

**Informe sobre la viabilidad de canalizar  
Mediante cable aislado enterrado  
la línea de 400 kV Santa Llogaia–Bescanó**

por

**Jordi Monteys Viñals**  
Doctor Ingeniero Industrial  
Consultor Electrotécnico

y

**José M<sup>a</sup> Giménez Tresaco**  
Doctor Ingeniero Industrial  
Consultor Electrotécnico

**06/05/2009**

## **1. Objeto del informe:**

En el enlace a 400 kV Sta Llogaia-Bescanó, de longitud aproximada 41,5 km, se plantea como alternativa a una línea aérea la posibilidad de ejecutar uno o varios tramos con cable enterrado.

El estudio completo de esta alternativa requiere análisis detallados de la planificación, del proyecto y de la explotación además de la valoración de los costes de inversión y de funcionamiento asociados al mantenimiento, temas no incluidos en el alcance de este informe. Por ejemplo, algunos de los aspectos técnicos que debe desarrollar el proyecto ejecutivo son los siguientes:

- El diseño de las protecciones si coexisten tramos mixtos de línea aérea y cable subterráneo y el tratamiento de la técnica del reenganche automático para resolver defectos transitorios, útil en las líneas aéreas y desaconsejada en los cables aislados enterrados.
- Los sistemas automáticos de localización de averías con el empleo de tramos mixtos cable-línea aérea
- El emplazamiento más adecuado para las reactancias de compensación de la reactiva.
- El esquema de maniobra en las subestaciones, líneas y reactancias.
- Los sistemas de telecontrol y telegestión
- El diseño de los sistemas de ventilación en las galerías y en las cámaras de empalme.
- La protección contra sobretensiones de maniobra y atmosféricas.
- El estado de mediciones con los costes de inversión y la estimación de los costes de mantenimiento.

Por consiguiente, el alcance de este informe se refiere exclusivamente a los dos puntos especificados en el documento-oferta 09/122 de TEP siguientes:

### 1. Sección tipo:

Estudio y definición de la sección tipo subterránea equivalente a la solución REE tanto en zanja como en galería especificando el número de cables, distancias entre fases, distancias entre ternas, profundidades, distancias entre rasas, diámetro de los cables, etc... Las secciones tipo equivalentes se plantearán minimizando el ancho de servidumbre necesaria y concretando el porqué de la constatada distancia entre rasas.

### 2. Compensación de la reactiva:

Realización de una propuesta de compensación de la energía reactiva en el escenario propuesto por CILMA (tipos de elementos de compensación, cantidad i ocupación del suelo y localización) considerando una propuesta de instalación subterránea en CA (Corriente Alterna) con la capacidad de transporte equivalente.

## **2. Introducción. Definición de la sección tipo**

La sección tipo de una línea se define para la potencia a transportar a una determinada tensión de servicio y su diseño es el resultado de:

1. La aplicación de los parámetros utilizados para el cálculo, en nuestro caso normas UNE.
2. La aplicación de criterios constructivos, de explotación y medioambientales.

En este informe se determinan las dimensiones del camino de cables que es capaz de transportar por medio de los conductores eléctricos la potencia definida por el operador del sistema en régimen permanente sin sobrepasar la temperatura máxima admisible por el aislamiento interno, en este caso de polietileno reticulado (XLPE).

Por lo que respecta a los parámetros de cálculo, el factor más importante es que con el calor generado por las pérdidas cuando circula la potencia de servicio (diferenciamos entre la potencia asignada del cable de la potencia de servicio) no se sobrepasen los límites térmicos del aislamiento del cable, lo que depende fundamentalmente del sistema de canalización que se adopte, bien sea en canalización enterrada o en galería, y de la conexión de las pantallas. En caso de ser enterrados los cables este límite térmico depende de la temperatura, humedad y conductividad térmica del terreno, conductividad térmica del relleno aportado, de las características del diseño del cable, y de la configuración de los conductores de las líneas (profundidad, disposición de los cables y separación entre fases) y en el caso de una galería, además de la configuración interna de los cables depende en gran manera de la temperatura del aire ambiente, lo que necesita en la mayor parte de los casos de sistemas de ventilación.

### **3. Factores que intervienen en la definición de la sección tipo**

Los factores que determinan las dimensiones de la canalización y su función se describen a continuación. Estas dimensiones se valoran más adelante teniendo en cuenta los cálculos que las justifican.

#### **3.1 Canalización**

Las dimensiones de la canalización, comprenden el camino de cables más los pasillos técnicos paralelos y los pasillos técnicos auxiliares que son necesarios para poder ejecutar la obra y mantener durante la explotación. El camino de cables se determina por cálculo mientras que los otros pasillos dependen de los criterios medioambientales sobre las formaciones vegetales afectadas, topografía de la zona, niveles freáticos, accesos, etc. No obstante, en este informe se señalarán algunos criterios que pueden servir de pauta para realizar el Estudio de Impacto Ambiental.

#### **3.2 Camino de cables**

Es el resultado del cálculo que proporciona las dimensiones necesarias para transportar la energía eléctrica, expresada normalmente en amperios (A), que satisface la potencia definida por el operador y que no depende de los criterios constructivos, de explotación y medioambientales que deseen aplicarse. Complementariamente también se verifica que el campo magnético satisfaga la normativa que le sea de aplicación.

### **3.3 Pasillos técnicos**

Las dimensiones necesarias para los pasillos técnicos, (a diferencia de los caminos de cables que son el resultado del cálculo a partir de parámetros eléctricos y térmicos), se definen por la aplicación de criterios basados en criterios constructivos, de mantenimiento, medioambientales, de costes, de explotación en caso de incidentes, de la experiencia, de las posibilidades de ocupación del territorio, etc., y por consiguiente admiten valoraciones diferentes según el proyectista. Pueden ser caminos paralelos a la canalización y/o caminos de acceso auxiliares hasta la canalización.

#### **3.4 Pasillos técnicos paralelos:**

Los pasillos técnicos paralelos tienen varias finalidades, según se trate de cables enterrados o en galería:

##### **3.4.1 Cables enterrados:**

- Mantener la separación física entre circuitos independientes, de forma que ante una actuación no prevista por un medio mecánico ajeno a la canalización puedan quedar afectados simultáneamente dos circuitos.
- Mantener la separación mínima que hay que dejar con posibles agentes externos, vegetales o no, que pudieran afectar algún circuito, como por ejemplo, raíces directrices de arbolado, fugas de agua de otras canalizaciones próximas, movimientos de tierra y excavaciones y afectaciones de otros servicios paralelos. En esta distancia se incluye la necesaria para efectuar la rasa sobre terreno, cuya sección estará en función de cómo se plantee la obra a realizar y de las características del propio terreno.
- Reservar viales para tránsito de vehículos durante la obra o el mantenimiento, paralelos a los pasillos técnicos y cuando no se utiliza el corredor situado sobre los cables.

##### **3.4.2 Cables en galería:**

Los pasillos técnicos paralelos tienen por finalidad, entre otros aspectos:

- Reservar la ocupación necesaria para efectuar la rasa en terreno, en función de tipo de ejecución de la obra a realizar y de las características del propio terreno.
- Reservar viales para tránsito de vehículos durante la obra o el mantenimiento, paralelos a los pasillos técnicos y cuando no se utiliza el corredor situado sobre la galería

### **2.5 Los pasillos técnicos auxiliares**

Los pasillos técnicos auxiliares tienen por finalidad reservar los viales para tránsito de vehículos durante la obra o el mantenimiento para acceder hasta las cámaras de empalme que se distribuyen siguiendo la traza de la canalización.

### 3. Cálculos térmicos

#### 3.1 Datos de partida

El principal dato de partida que utilizamos es la capacidad del transporte de energía que se ha definido para la alternativa en línea aérea pero utilizando cable aislado enterrado. La referencia tomada para este dato es que el enlace aéreo con doble circuito a 400 kV Sta. Llogaia-Bescanó se ha tramitado para que pueda funcionar con una potencia de 2.441 MVA por circuito (apartado 8.1 del documento de tramitación administrativa de REE, Exp.10.734/2008) siendo este por tanto el valor que tomamos para dimensionar el camino de cables.<sup>1</sup>

#### 3.2 Condiciones de la instalación

La canalización debe realizarse con 4 ternas de cables, formando dos circuitos de dos ternas cada uno, para la potencia de 2.441 MVA por circuito. La disposición de los cables depende del tipo de instalación.

##### 3.2.1 Instalación enterrada.

Se entierran los cables en dos circuitos de dos ternas cada uno. (en adelante tricables) separando los circuitos entre sí a una distancia mayor que la necesaria desde el punto de vista térmico debido a:

1. El trabajo o intervención física sobre un circuito obligará a descargar el circuito inmediatamente próximo. Los otros grupos del otro circuito pueden seguir en funcionamiento.
2. Una zona de separación lateral mayor permite disponer de espacios libres para los accesos a las cámaras de empalme.
3. Ocupación de Rellenos. Es importante que alrededor de los cables se disponga de un relleno de conductividad controlada y una granulometría adecuada para que los cables resulten bien asentados. El valor de la conductividad a conseguir se ha estimado en  $1\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$  que se consigue con arena de grano fino o con mortero pobre (Se exige rigor en el suministro y aplicación lo que se ha de tener en cuenta en el coste). De no aplicar esta capa controlada en las dimensiones necesarias o ser el terreno de resistividad muy elevada hay que recalcular las intensidades.

---

<sup>1</sup> Como referencia, una línea aérea cuádruplex cardinal, tiene una capacidad térmica máxima por circuito de unos 4.040 A, (2.800 MVA). Sin embargo, la capacidad térmica de una línea no es el parámetro que define la potencia que puede circular por ella en explotación normal, sino la caída de tensión admisible. Por ejemplo, el enlace con línea aérea a 400 kV Sta. Llogaia-Bescanó no admitiría en funcionamiento normal la potencia térmica de 2.441 MVA por excesiva caída de tensión en el tramo de 41,5 km. Influye el que las líneas aéreas tienen mayor reactancia que los cables y por consiguiente su caída de tensión es mayor para la misma potencia. Según esto, el dimensionado de los cables enterrados que se hace en este informe basado en la capacidad de transmisión de la potencia definida en el documento de tramitación administrativa arriba mencionado **es muy conservador**, por lo que se podrían reducir las separaciones entre fases o proponer otras configuraciones de menor ocupación del territorio si se ajustase su diseño a una potencia menor, si fuera coherente con la prevista en la planificación. A título de ejemplo y adelantando las conclusiones, al rebajar la potencia de 2.441 MVA a 1.940 MVA (1.400 A), sería posible utilizar la configuración de cables en trébol con una distancia de separación entre fases de 50 cm, lo que permitiría reducir el ancho del camino de cables en 4 m.

4. Campo magnético. No conviene separar las fases más de 1m entre sí para no superar los  $100\mu\text{T}$  de campo magnético sobre el suelo. Este valor es inferior a los límites establecidos por ICNIRP.

### **3.2.2 Instalación en galería**

La instalación en una galería dedicada específicamente a la línea eléctrica necesita colocar separador ignífugo horizontal entre los tricables de un mismo circuito para evitar en caso de incendio en un tricable superior la caída de plásticos encendidos sobre un cable inferior del otro grupo. Este separador no altera la refrigeración de los cables.

### **3.3 Detalles del cálculo.**

Las normas empleadas son IEC 60287 apartados 1-1, 1-2, y 2-1 (equivalente a UNE 21144)

#### **3.3.1 General**

1. El diseño del cable contempla una pantalla de aluminio de 3mm de espesor. Este diseño hace que las corrientes directamente inducidas en las pantallas y las pérdidas que causan sean considerables habiéndose incluido en el cálculo.
2. Se ha supuesto que las pantallas están cruzadas, -cross-bonding- con un desequilibrio de las longitudes de los tramos. Por este motivo hay una pequeña circulación de corriente que produce pérdidas incluidas en el cálculo.
3. Se considera que en los cables hay transposición de posición a lo largo del recorrido. De esta manera se unifican los valores de la inducción en las fases.
4. La disposición de las fases es simétrica (R, S, T - T, S, R). Se facilita así el trabajo de los cables en paralelo.

#### **3.3.2 Cables enterrados**

1. La resistividad térmica del terreno se toma de  $1\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ . En la instalación real este valor puede ser superior y habría que aproximarle mejor en el proyecto ejecutivo.
2. El cálculo está realizado para el conductor interior de un circuito (conductor T en el esquema de tendido de cables de dos circuitos R-S-T-T-S-R). En la instalación con el segundo circuito próximo este es el cable más caliente, pero para una separación grande entre los dos circuitos, el cable medio (conductor S del esquema) de un circuito puede ser el más caliente.
3. Las temperaturas del terreno se han tomado en los casos estudiados bajo las hipótesis de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Por margen de seguridad tomaremos en las recomendaciones la temperatura superior, ya que desconocemos a priori la resistividad del terreno a lo largo de la traza.

#### **3.3.3 Cables en galería**

1. La temperatura del ambiente de la galería se toma de  $40^\circ\text{C}$ . La refrigeración de la galería ha de estar bien diseñada para evitar zonas calientes o rincones mal ventilados.

### 3.3.4 Cables entubados bajo prisma de hormigón

1. Se toma un tubo de polietileno de pared de doble capa de 220/250 mm de diámetro.

#### 4. Diseño del cable. Generalidades

- Se estima un diseño aproximado. Para estos niveles de tensión no existe norma constructiva y el diseño puede variar según el fabricante.
- El conductor es de cobre segmentado de 2500 mm<sup>2</sup> y la pantalla es un tubo de aluminio de 3mm de espesor.
- Los cálculos se han de afinar cuando se haya determinado el diseño definitivo

Las medidas más importantes son:

Diseño del cable	espesores	diámetros
Conductor de 2500 mm <sup>2</sup>	0	63,5
s/c interior	2,5	68,5
Aislamiento XLPE	30	128,5
s/c exterior	4	136,5
Pantalla de aluminio extruido	3	142,5
Cubierta exterior	5	152,5

La capacidad térmica de un cable se incrementa con la separación entre fases. Por el contrario, aumenta la reactancia y los campos magnéticos.

Para el cálculo de los cables enterrados se ha adoptado una separación del pasillo técnico paralelo central de 4 m. entre los dos circuitos para mantener la separación física entre circuitos independientes. Este valor lo consideramos suficiente para cumplir con los requisitos de seguridad ante la posible agresión externa de maquinaria pesada, por ejemplo una excavadora que pudiera afectar simultáneamente a ambos circuitos y para que sea posible realizar trabajos de mantenimiento o reparaciones en uno de los circuitos sin afectar al otro. Si este valor se aumentara por otras consideraciones no contempladas en este informe no comportaría incremento alguno sobre la capacidad de transporte calculada.

Para el cálculo de las dimensiones del camino de cables con galerías, aunque el reglamento dice que en las galerías el pasillo central libre ha de ser mínimo de 0,80 m (p. ejemplo, en las galerías de Barcelona), nosotros recomendamos aumentar las dimensiones del pasillo hasta 1,20 m.

#### 4.1. Dimensiones del camino de cables.

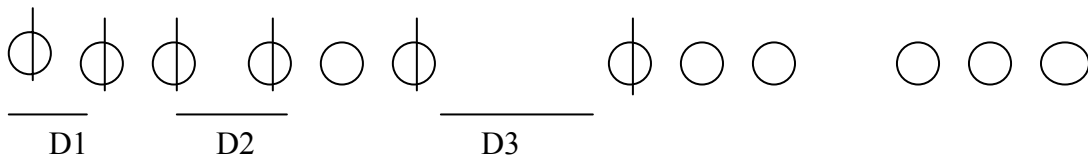
La capacidad de transporte de la línea formada por dos circuitos de 2 ternas cada uno (tricables) de las características antes definidas debe ser de 2.441 MVA por circuito de potencia aparente, es decir, 1.220,5 MVA por tricable, al que corresponde una intensidad de 1.761 A.

Se han efectuado los cálculos para los casos de:

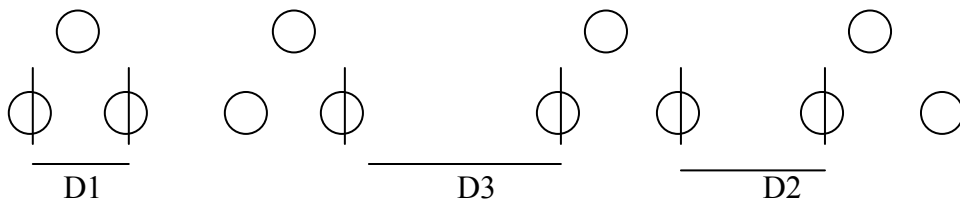
- a) cable enterrado directamente
- b) enterrado dentro tubulares y prismas de hormigón.

c) tendidos en el interior de galerías.

En el tendido del cable enterrado directamente la disposición de los cables es en plano:



y con el diseño en trébol la disposición es simétrica en cada tricable:



- D1 = separación entre fases
- D2 = separación entre tricables de un circuito
- D3 = separación entre circuitos

Todas las distancias en cables enterrados son entre ejes de los cables (así el pasillo central es de 4 m entre ejes de cables- 0,15m = 3,85 m libre) y la profundidad de 2 m.<sup>2</sup>

En los cables en galería las distancias mencionadas son espacio libre (entre cables o entre cables y pared).

En el caso de galería, se suponen las fases separadas o en contacto, y además se analizan en las posiciones de apoyo en vertical y en horizontal sobre las ménsulas de soporte.

Se ha efectuado un análisis de sensibilidad de la intensidad admisible, tomando como variables la distancia entre cables y la distancia entre tricables de un mismo circuito, tanto en el caso de cables enterrados directamente, bajo tubo o en galería.

Las variables consideradas han sido todas las combinaciones que se detallan a continuación:

#### 4.2 Cables enterrados:

##### En plano

Separación entre fases: D1: 15 cm, 40 cm, 50 cm 70 cm y 1 m

<sup>2</sup> Aunque en los documentos de REE publicados se menciona que la profundidad de enterramiento es de 1,2 m, nos parece poca profundidad para una línea de 400kV por lo que en el cálculo se ha adoptado 2 m, tomados desde nivel de terreno a eje del cable. De corregirse este valor la intensidad sería algo superior, ya que el cable refrigera por la superficie del terreno y tiene la evacuación más fácil para menor profundidad de soterramiento.

Separación entre tricables de un circuito: D2: 1 y 2 m.  
Separación entre circuitos: D3: 3 y 4 m.  
Temperatura del terreno: 20 °C y 25 °C

### En trébol

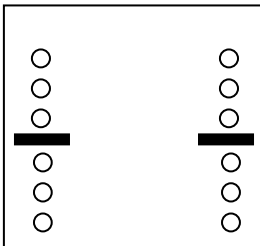
Se han tomado las siguientes configuraciones:

- Separación entre fases: 0,5 m; separación entre tricables de un circuito: 0,5 m; profundidad a centro del trébol: 2 m.
- Separación entre fases: 0,5 m ; separación entre tricables de un circuito: 1m; profundidad a centro del trébol: 2m.
- Separación entre fases: 0,6 m ; separación entre tricables de un circuito: 1m; profundidad a centro del trébol: 1,2m.

### 4.3 Cables en galería:

Separados horizontalmente 10 cm,  
Dispuestos en trébol,  
Horizontales en contacto,  
Verticales en contacto  
Verticales separados 15 cm.  
Temperatura ambiente de la galería: 40 °C

Una de las configuraciones posibles sería la representada en el croquis:



## 5. Resultados de los cálculos

### Datos de partida:

Capacidad de transporte: 1.761 A (1.220,5 MVA) por tricable

Separación D2 entre tricables de un mismo circuito de 1 m.  
Separación D3 entre circuitos de 4 m

### Cables enterrados en plano con temperatura del terreno de 20 °C

Distancia mínima entre fases D1: **40** cm.

Intensidad admisible con el cable enterrado directamente: 1.788 A.

Intensidad admisible con el cable enterrado en plano bajo tubular: 1.772 A

### Cables enterrados con temperatura del terreno de 25 °C

Distancia mínima entre fases D1: **50** cm.

Intensidad admisible con el cable enterrado directamente: 1.771 A.

Intensidad admisible con el cable enterrado en plano bajo tubular: 1.754 A

### **Recomendación:**

Nuestra recomendación por el lado de la seguridad sería la de tomar **50 cm** de separación entre fases.

No es necesario desde el punto de vista térmico incrementar la separación entre tricables ni entre circuitos por encima de 1m y 4 m respectivamente

### **Cables enterrados en trébol bajo tubular con temperatura del terreno de 25 °C**

Esta configuración es ampliamente utilizada en entornos urbanos porque reduce considerablemente la traza, siempre que los cables no sobrepasen la intensidad térmica que se asigne para esta configuración. En nuestro caso esta opción sería posible hasta una intensidad de 1.400 A correspondiente a la potencia de 970 MVA por tricable, pero se descarta por no alcanzar las hipótesis de partida como se ha explicado en el apartado 3.1.

Tiene la ventaja adicional de que disminuye los campos electromagnéticos sobre los cables, pero tiene menor capacidad de corriente que la disposición en plano ya que los dos conductores inferiores también calientan al superior. Para aumentar la capacidad de transporte sería necesario incrementar la separación entre fases y en consecuencia profundizar más para mantener la profundidad del conductor superior.

### **Cables en galería**

La capacidad térmica de las líneas se basa fundamentalmente en la ventilación de la galería cuando los cables generan más pérdidas al estar bajo carga. Los cálculos se han realizado para una temperatura del aire de 40 °C. El sistema de ventilación debe ser capaz de evacuar unas pérdidas de potencia aproximadamente de 135 W/m lineal de tricable instalado cuando funcionan a la máxima potencia. La potencia de los equipos de ventilación se ajusta automáticamente a la temperatura del aire ambiente.

El diseño de las ménsulas para adaptarse al tendido de los cables en posición vertical o en horizontal influye menos sobre la capacidad térmica de los cables que la separación entre fases, ya que la refrigeración se efectúa por el aire en movimiento que envuelve a los cables.

La capacidad de transporte con las fases depende de su configuración. Según estén en contacto o separadas, en posición vertical u horizontal, en todos los casos se satisface el objetivo de potencia nominal ya que la intensidad admisible está comprendida entre 2.177 A y 2.552 A.

## **6. Dimensiones de la canalización**

### **6.1 Cables enterrados:**

Las dimensiones mínimas del camino de cables enterrados en plano serían de:

$$A + D1 + D1 + D2 + D1 + D1 + D4 + D1 + D1 + D2 + D1 + D1 + B$$

Donde A y B son las distancias que hay que dejar como margen de seguridad con los lindes del camino de cables para mantener la separación mínima a dejar con posibles agentes externos.

$$D1 = 0,5\text{m}$$

$$D2 = 1\text{m}$$

$$D4 = 4\text{ m}$$

Si se adoptan los procedimientos adecuados durante la obra civil, por ejemplo, impermeabilizando con métodos adecuados la zanja para prevenir el crecimiento de las raíces de árboles próximos, A y B puede ser similar a D2. En este caso las dimensiones mínimas del camino de cables serían de 12 m.

Para los pasillos técnicos paralelos y los pasillos técnicos auxiliares las dimensiones mínimas están condicionadas por el proyecto de obra civil y el entorno del terreno.<sup>3</sup>

La opción más simple pero que ocupa más superficie es independizar los pasillos técnicos paralelos de los caminos de cables. Esta opción es obligada si los cables se entierran directamente ya que no es posible ejercer cargas sobre la superficie del terreno que cubre los cables y por tanto esta superficie no se puede utilizar como caminos de rodadura de vehículos.

Los pasillos técnicos auxiliares tienen que facilitar el acceso a las cámaras de empalme para permitir el mantenimiento. En función de las dimensiones de la bobina de cable transportable por camión, esta distancia puede variar entre 500 y 600 m, aunque tenemos referencias de instalaciones en las que con transportes especiales para bobinas de mayor anchura (el diámetro de la bobina queda limitado por el gálibo de puentes y viaductos, y la anchura por la de los caminos), esta longitud podría alcanzar unos 800 m.

## 6.2 Cables en galería

La dimensión de la galería, dentro de los límites normales, es poco dependiente de la configuración de los cables en su interior.

Las dimensiones interiores del pasillo, transitable y libre de cables, se determinan por las condiciones de accesibilidad y seguridad del personal de explotación, y siendo el

---

<sup>3</sup> Con los cables enterrados y entubados en prismas de hormigón de altura mínima 60 cm con los tubos de 25 cm en su interior, dispuestos sobre una base de preparación de hormigón de 150 kp/cm<sup>2</sup> más compactación del relleno de tierras superior, se podría construir la canalización, abriendo simultáneamente por tramos la zanja, colocando los prismas, recubriendo, compactando y dejando la superficie apta para rodadura de vehículos. Finalmente se pasan los cables por los tubos.

Se podría, como opción alternativa al pasillo sobre los cables, utilizar los 4 m libres de la zona D3 de separación entre circuitos, una vez compactado el terreno y dejando la superficie apta para rodadura de vehículos.

ancho mínimo de 0,80 m, recomendamos aumentar hasta 1,20 m mínimo para facilitar el movimiento de equipos, de 2,10 a 2,20 m de ancho y 2,20 m de alto.<sup>4</sup>

La zona superior de la galería puede adecuarse como pasillo técnico para el movimiento de vehículos pesados.

Evidentemente se requiere un proyecto detallado de obra para analizar y diseñar la canalización, que debe tener en cuenta la traza, carreteras próximas, cauces de agua, paso por viaductos, etc., que queda fuera del alcance de este informe.

## **7. Cámaras de empalme**

La finalidad de estas cámaras es poder realizar las uniones entre los tramos de las bobinas y a la vez instalar los dispositivos de “cross-bonding”<sup>5</sup>, puesta a tierra, y cuadros de servicios auxiliares para los equipos de vigilancia y control que determine el proyecto.

Se requiere un espacio amplio para poder construir “in situ” los empalmes. Las dimensiones por tricable estimamos que deberían ser de 12 m de largo por 3 de ancho para ubicar tres empalmes y sus elementos auxiliares, aunque pueden ser modificadas para facilitar la transición de los cables enterrados hacia las cámara, por ejemplo, de tendido en plano, a la disposición vertical de las cámaras y que debe ser objeto de análisis minucioso en el proyecto ejecutivo de obra civil.

Como se ha indicado la cámara de empalme requiere un pasillo técnico auxiliar de acceso y debe estar diseñada de forma que pueda evacuarse el calor generado en su interior.

## **8. Introducción: Compensación de reactiva**

Con diferencia de las líneas aéreas, los conductores quedan envueltos por una pantalla que les sirve de protección, controla el campo eléctrico en el aislante interior y permite la circulación de corrientes inducidas que limitan los campos electromagnéticos externos.

El efecto principal de las pantallas es que por la proximidad de las mismas al conductor y la alta constante dieléctrica del aislante, la capacidad eléctrica es mucho mayor que la de las líneas aéreas.<sup>6</sup>

La corriente que fluye entre el conductor central y la pantalla se suma (vectorialmente) a la corriente que transporta la línea para el servicio, en consecuencia se reduce la potencia útil de la línea. Para recuperar la potencia útil es necesario en líneas que

---

<sup>4</sup> Si los cables se disponen en posición vertical, se separan de la pared 10 cm y del pasillo transitado de 20 a 30 cm. Como el diámetro de los cables es aproximadamente de 15 cm, ocupan una zona de 45 a 55 cm a cada lado de la galería. El ancho interior resultante de la galería es de 210 a 220 cm.<sup>4</sup>

<sup>5</sup> Las pantallas se transponen para reducir las pérdidas en las mismas por efectos de la inducción que se reflejan en la línea, operación que se realiza en las cámaras de empalme.

<sup>6</sup> La capacidad electrostática es un parámetro para medir el paso de corrientes alternas a través del aislamiento. Una consecuencia importante de la capacidad es elevar la tensión de las líneas con poca carga, no siempre deseable en horas de baja carga.

sobrepasen cierta longitud, -de más de una decena de kilómetros a 400 kV-, instalar reactancias de compensación que anulen los efectos de la capacidad electrostática inyectando sobre los cables una corriente de signo contrario.

## 9. Estimación de la potencia reactiva de compensación

La capacidad electrostática depende de la configuración geométrica del cable y de las características del aislamiento.

El cable que se propone tendría las siguientes características:

Sección del conductor, Cu,	2.500 mm <sup>2</sup>
Diámetro del conductor	63 mm
Diámetro medio de la pantalla	130 mm
Constante dieléctrica del aislante (XLPE)	2,4

La potencia de las reactancias que se deben instalar para compensar totalmente el efecto de la capacidad del cable es de 12,56 Mvar/ km y tricable, es decir, 2.084 Mvar para una línea de 41,5 km de 2 circuitos.

Lógicamente la potencia reactiva necesaria debe distribuirse a lo largo de la línea si los tramos son, como en este caso, de gran longitud, pero el estudio detallado para optimizar el diseño de la red no forma parte de este informe.<sup>7</sup> La compensación reactiva funciona en los dos sentidos de circulación de la potencia en la línea.

Es conveniente que la potencia instalada de compensación sea ajustable para poder tener en cuenta las distintas configuraciones de la red y las variaciones de carga.

La reposición del servicio sobre los cables en vacío absorbería  $25,2 \cdot 41,5 = 1043$  A y aumentaría la tensión al final de la línea, lo que debe tenerse en cuenta en la planificación y en el proyecto para tomar las medidas necesarias que no generen problemas en la explotación, especialmente cuando la línea funciona en vacío, circunstancia en la que podría producirse incrementos de tensión no deseables para el sistema.

La superficie requerida para las “estaciones de compensación dedicadas” incluye la destinada a las reactancias (similares a transformadores en baño de aceite) más las de las posiciones de maniobra y protección (por ejemplo, con tecnología GIS). Debe tenerse en cuenta si las posiciones y las conexiones a las reactancias se realizan con tecnología convencional, aislamiento externo al aire o bien totalmente encapsuladas en GIS. En este último caso es posible instalar los equipos de maniobra en un edificio, en superficie o subterráneo. Las reactancias, por su gran tamaño y las necesidades de refrigeración se deben instalar al aire sobre el terreno.

El edificio de maniobra, apto para 4 posiciones de entrada de cable, 4 posiciones de salida y dos posiciones para reactancias, doble embarrado, y servicio auxiliares, puede

---

<sup>7</sup> Una propuesta de reparto podría consistir en distribuir el 50 % cerca de los extremos terminales de los cables, o bien repartir 25% + 50% + 25 % entre los extremos y el centro de la línea, etc., dependiendo entre otras consideraciones, de la disponibilidad de superficie para instalar en las “estaciones de compensación” dedicadas o compartidas con las subestaciones de la red.

necesitar unas dimensiones de 30 x 10 m, mientras que las reactancias instaladas en la superficie pueden necesitar unos 200 a 300 m<sup>2</sup> cada una, es decir, para las 2 reactancias de 400 m<sup>2</sup> a 600 m<sup>2</sup> en cada estación de compensación. En conjunto, podemos estimar unas necesidades totales de superficie de 2.000 m<sup>2</sup> para la “estaciones de compensación” y de unos 6.000 a 12.000 m<sup>2</sup> para el conjunto de subestación de red +”estaciones de compensación”.

06/05/2009

#### **ANEXO: Cálculo estimativo de la compensación de reactiva**

Las características del cable son:

Sección del conductor, Cu,	2.500 mm <sup>2</sup>
Radio geométrico medio del conductor	26 mm
Diámetro medio de la pantalla	130 mm
Constante dieléctrica del aislante (XLPE)	2,4

A partir de estos parámetros el cálculo de la capacidad da:  $C = 0,25 \mu\text{F}/\text{km}$ .

La reactancia capacitiva a 50 Hz vale:

$$X_c = 1/j\omega C = -j 12.738 \Omega/\text{km}$$

Realizando un cálculo simplificado, la potencia inductiva de las reactancias debe ser aproximadamente igual a la potencia capacitiva del cable (sin tener en cuenta los parámetros distribuidos y con la compensación concentrada en un punto final de la línea) suficiente para el nivel de aproximación de este informe.

Tenemos que la corriente capacitiva por km de cable a 400 kV es de:

$$400\text{kV}/\sqrt{3}/(-j 12.738 \Omega/\text{km}) = 18,13 \text{ A/km y fase}$$

La potencia de las reactancias de compensación necesaria, a 400 kV, sería de:

$\sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV} \cdot 18,13 \text{ A/km y fase} = 12,56 \text{ MVAr/ km y tricable}$ , o  $25,12 \text{ MVAr/ km y circuito de dos tricables}$ .

En el supuesto de compensar la reactiva de un tramo de 41,5 km formado por dos circuitos de dos tricables cada uno, la potencia total a compensar sería de:

$$12,56 \text{ MVAr/ km y tricable} \times 41,5 \text{ km} \times 4 \text{ tricables} = 2.084 \text{ MVAr}.$$

**Informe sobre la viabilidad de canalizar  
mediante cable aislado enterrado  
la línea de 400 kV Santa Llogaia–Bescanó y el  
ramal de Riudarenes  
2º parte**

por

**José M<sup>a</sup> Giménez Tresaco**  
Doctor Ingeniero Industrial  
Consultor Electrotécnico

y

**Jordi Monteys i Viñals**  
Doctor Ingeniero Industrial  
Consultor Electrotécnico

**20/05/2009**

## RESUMEN EJECUTIVO

### **Objeto del informe:**

Analizar comparativamente la alternativa de canalizar con cables enterrados los enlaces a 400 kV entre Bescanó-Santa Llogaia y el ramal de Riudarenes frente a la alternativa con línea aérea. Analizar la viabilidad de la alternativa de cable enterrado y de la utilización de nuevas aplicaciones tecnológicas.

Los valores de los resultados numéricos de los cálculos que se citan se refieren a los casos seleccionados de entre las diferentes opciones de carga y compensación consideradas en este informe.

### **Conclusiones:**

La tecnología del cable enterrado con aislamiento sintético (seco) a 400 kV (en adelante cables) dispone de los recursos tecnológicos necesarios para la fabricación, instalación y explotación de los enlaces objeto de este informe.

En el nivel de 400 kV es evidente que la experiencia en la explotación de las líneas aéreas de 400 kV (en adelante líneas) es mucho mayor que la de los cables a 400 kV de más moderna utilización, pero en el nivel de 220 kV la experiencia con cables ha sido suficientemente amplia y ha dado buenos resultados como para no esperar que en el escalado tecnológico de los cables desde el nivel de 220 kV hasta el siguiente nivel a 400 kV se produzcan incidencias que impidan su desarrollo.

Para la potencia límite a transportar de 2441 MVA por circuito (2x 2441 MVA = 4882 MVA), se puede utilizar alternativamente, o dos circuitos de línea aérea cuádruplex cardinal (483,4 mm<sup>2</sup> de Al y 62,7 mm<sup>2</sup> de acero), o 2 circuitos en canalización enterrada formados por 2 tricables cada uno de 2500 mm<sup>2</sup> de sección. La sección tipo de los cables se ha definido en la primera parte del informe.

Los cables pueden canalizarse bien en disposición plana bajo tubular, bien directamente enterrados o en el interior de galerías, siempre que se adopten las medidas necesarias para no superar los límites térmicos del aislamiento seco.

Con cable es necesaria la utilización de reactancias de compensación que se pueden instalar en ambos extremos de los cables, prescindiendo de

ubicaciones intermedias, aunque con otras opciones también podrían instalarse en tramos intermedios. La potencia total a compensar es de 2100 Mvar para 41,5 km.

Considerando las diferentes hipótesis de cálculo se concluye:

Sin carga, las pérdidas de la línea son irrelevantes, <20 kW, mientras que con cables las pérdidas totales por circuito son de 1676 kW.

Con la máxima carga, las pérdidas de la línea son más importantes que las de los cables, 33700 kW por circuito en la línea frente a 10368 kW por circuito para el cable. Con reactancias de compensación las pérdidas en la galería serían 10680 kW por circuito, (514 kW/km), lo que requiere ventilación forzada si la carga térmica supera el 82 % aproximadamente del conjunto de los cables.

El tramo de cables no puede quedar sin carga y conectado sobre una línea aérea de gran longitud porque la tensión puede exceder de 500 kV en el extremo final del cable. Esto crearía una gran limitación para reponer el servicio tras un incidente general en la red. Un caso a analizar más a fondo sería la reposición del servicio desde la línea de interconexión con Francia.

La construcción de la canalización con cables necesita instalar aproximadamente 840 empalmes entre 70 cámaras distribuidas a lo largo de 41,5 km. El ancho de la traza necesaria para el camino de cables es aproximadamente de 12 m en tendido en plano y de 2,5 m en galería.

El ancho del tendido de los conductores de la línea aérea es de 17 m, a los que hay que sumar las distancias de seguridad que determina el RD 223 \_ITC-LAT, unos 8 metros por cada lado, según los casos.

La fiabilidad de los cables y sus accesorios se debe asegurar mediante un estricto control de calidad en diseño, fabricación, instalación, puesta en marcha y ensayos finales. Durante la explotación es necesario un sistema de vigilancia y control para las temperaturas, así como protecciones de sobrecarga y cortocircuito de alto nivel en los interruptores para asegurar la máxima vida útil (hoy no es posible establecer el valor).

Las averías que eventualmente pudieran ocurrir en la canalización de cables, probablemente lo serán en los empalmes, lo que facilitará la localización y la reparación. No obstante se necesitaría un tiempo de varios días para sustituir el empalme averiado durante los cuales estarían

indisponibles las dos ternas del circuito averiado. Si la falta se produjese entre cámaras de empalme, la indisponibilidad podría alcanzar semanas. En las líneas se utiliza la reconexión automática para las faltas transitorias que suponen más del 70 % de las averías mientras que las faltas permanentes se resuelven en períodos de horas o días. Los cables por su naturaleza no están sometidos a faltas transitorias.

La canalización en galería implica instalar un potente sistema de renovación de aire capaz de evacuar el calor generado por las pérdidas en los cables. A la máxima carga térmica de todos los cables las pérdidas alcanzarían 530 kW, es decir, 12,77 kW/km, una parte de las cuales se disiparían al terreno través de las paredes. La ventilación debería ponerse en marcha cuando la temperatura del interior de la galería superase los 27 °C para asegurar que en ningún caso el aire en contacto con los cables sobrepase los 40 °C, evitando la formación de capas laminares más calientes en la superficie de los cables. Estas consignas proceden de la experiencia en galerías semejantes.

Las galerías deben disponer de cortafuegos cada 1000 m y medios de lucha contra incendios, salidas de personal cada 400 m, iluminación, detección de gases, drenaje de agua, avisos de emergencia y evacuación y vigilancia 24h.

En las galerías deben disponerse sistemas de vigilancia y control no sensibles a las consecuencias de las fuertes tensiones inducidas por la proximidad a los cables de 400 kV en particular en caso de cortocircuitos. Una de las medidas es utilizar cables de fibra óptica para las señales y transformadores de aislamiento para la fuerza y control. Los cables de fibra óptica son ampliamente utilizados en las líneas aéreas para las señales.

Los cálculos del campo electromagnético realizados muestran los valores están por debajo del valor máximo aceptado por la ICNIRP<sup>1</sup> 100 µT a 1 m del suelo para público en general, tanto en el caso de la línea aérea como en el caso de cables enterrados en una zanja de 2 m de profundidad.

La tecnología GIS (*Gas Insulated Switchgear*) permite construir subestaciones con los aparatos de protección y maniobra en el subsuelo, normalmente el sótano inferior para entrada y salida de cables y el sótano superior para disponer la aparamenta. En Cataluña existen varias referencias de instalaciones similares a 220 kV. Las reactancias de compensación no pueden enterrarse por lo que deben disponerse en

---

<sup>1</sup> Internacional Commission on Non-ionizing Radiation Protection

superficie, tanto por sus grandes dimensiones como para poder ventilar las pérdidas (aproximadamente 2100 kW en total en cada extremo de cable).

La tecnología GIL (*Gas Insulated Line*) aunque es muy prometedora en un futuro para transporte a grandes distancias, muy alta tensión y grandes corrientes, consideramos que todavía no está suficientemente madura para implementarse como elementos fiables en la red de 400 kV, por respuesta frente a las sobretensiones tipo rayo, mantenimiento, estabilidad del terreno, mantenimiento y coste.

En resumen, las principales características comparativas entre la solución aérea y la de cables enterrados aplicadas ya al caso concreto del tramo de la MAT Sta Llogaia – Bescanó son:

	<b>Línea</b>	<b>Cable</b>
Capacidad sobrecarga	Si, transitoriamente	No
Necesidad estaciones de compensación reactiva capacitiva	No,	Si, importante. 2100 Mvar en total
Canalización	Corredor aéreo de aproximadamente 33 m. Necesidad de pistas de acceso	Utilización de trazados de otras infraestructuras civiles o necesidad de vías de acceso adicionales
	Montaje de las torres cada 300 -500 m accesibles	Instalación de cámaras cada 500-600 m accesibles (hasta 800 m en casos especiales)
		Refrigeración forzada en galerías
		Necesidad de estaciones de compensación en cada extremo del cable y de instalaciones de conversión aéreo-subterráneo
Pérdidas totales por circuito 400 kV, sin carga	< 20 kW	1676 kW
Pérdida totales por circuito, a la máxima carga	33700 kW	10368 kW
Carga térmica admisible con ventilación natural, y temperatura exterior 25 °C	100 % del diseño	82 % del diseño
Explotación	Sensible a los agentes atmosféricos	Inmune a agentes atmosféricos
	Reenganche automático con faltas transitorias	Disparo permanente por faltas
		Se exige fiabilidad y control de los empalmes
	Vigilancia y mantenimiento de conductores, empalmes y aisladores	Vigilancia y mantenimiento periódico de las cámaras de empalme
Reposición del servicio en situación excepcional		Riesgo por elevación excesiva de la tensión
Protecciones eléctricas	Estándar	Especiales
Coste inversión estimado <sup>2</sup>	1 a 2 M€/km	4 a 10 M€/km
Coste de mantenimiento <sup>3</sup> estimado	M = 2 % de la inversión	5 x M
Ampliaciones	Si, con cambio o refuerzo conductores	No posible sin ampliar canalización

<sup>2</sup> Referencias del informe Monti

<sup>3</sup> Referencias del informe Monti

## INFORME

### 1. Objeto del informe:

Esta segunda parte es continuación del “Informe sobre la viabilidad de canalizar mediante cable aislado enterrado la línea de 400 kV Santa Llogaia–Bescanó” de fecha 6/5/2009, desarrollando los puntos especificados en el documento-oferta 09/117 de TEP, y que complementan los de la oferta 09/122. El alcance de las conclusiones se extiende también al ramal de Riudarenes.

El alcance del mismo comprende el desarrollo de los siguientes puntos:

- Análisis comparativo de la capacidad de transporte de los cables subterráneos con relación a la solución aérea.
- Ventajas e inconvenientes de la utilización de los cables enterrados con relación a la línea aérea. Instalaciones.
- Estado del arte y viabilidad de hacer algunos tramos con GIL (*Gas Insulated Line*).
- Distancias de seguridad con otras instalaciones o infraestructuras.
- Necesidad de la subestación intermedia a Sant Julià de Ramis.
- Posibilidad de realizar instalación de maniobra enterrada con GIS

En el enlace a 400 kV Santa Llogaia-Bescanó, de longitud aproximada 41,5 km, se plantea como alternativa a una línea aérea la posibilidad de ejecutar uno o varios tramos con cable.

Los resultados de los cálculos y las conclusiones también son extrapolables para el ramal de entrada y salida a Riudarenes de 19,5 km, aplicando un coeficiente reductor de  $19,5/41,5 = 0.47$  sobre las pérdidas, tamaño de las reactancias de compensación y caídas de tensión, ya que por formar parte del enlace doble circuito entre Sentmenat-Vich y Bescanó, la solicitud administrativa de REE la define igual que en el tramo Sta. Llogaia-Bescanó para una potencia de 2.441 MVA por circuito.

## **2. Análisis comparativo de la capacidad de transporte de cables frente a la solución aérea. Ventajas e inconvenientes**

Actualmente ya se dispone de los recursos tecnológicos para la fabricación y explotación de cables y sus accesorios de alta tensión de más de 400 kV con aislamiento sólido (orgánico), que sustituyen a los antiguos de aislamiento con papel impregnado en aceite fluido muy experimentados hasta tensiones de 220 kV. Las experiencias en 400 kV, en algunos tramos de cable instalados en diferentes países confirman los buenos resultados, aunque habrá que esperar varios años más para valorar a largo plazo el comportamiento de los materiales con relación al envejecimiento por oxidación debida a la temperatura y también por el campo eléctrico sobre el aislante, normalmente XLPE.

No obstante, la nueva tecnología de cables permite resolver situaciones en las cuales sería impensable pasar con líneas aéreas por zonas urbanas, industriales o zonas particularmente sensibles, bien para enlazar nudos de la red o bien para realizar conversiones aéreo-subterráneo en las líneas, por lo que es un recurso a tener en cuenta en estos casos especiales.

La situación es distinta para la tecnología de la línea aérea ya que está suficientemente probada en explotación con miles de km y décadas de experiencia con tensiones de más de 500 kV..

Una vez solucionados los problemas técnicos derivados de la capacidad eléctrica y de la capacidad térmica de los cables mediante la aplicación de las medidas correctoras que se describen más adelante, se han de tener en cuenta algunos problemas de explotación que diferencian los cables de las líneas.

En los puntos de transición de línea a cable se producen importantes aumentos de las tensiones transitorias de maniobra o rayo, llegándose fácilmente a duplicar la tensión de servicio por lo que deben instalarse elementos de protección contra estas sobretensiones peligrosas (descargadores de sobretensión). Los parámetros del diseño de los equipos que se facilitan al constructor y se definen mediante un estudio de coordinación de aislamiento pueden evitar estos problemas.

Las averías en las líneas son causadas por fallos internos en el aislamiento de las cadenas de soporte, por contacto entre conductores a causa del viento, por rotura de los conductores a causa del peso del hielo depositado, por caída de las torres por causas diversas, etc. Sin embargo, la mayoría de los disparos de las protecciones se producen por un cebado del arco en algún punto de la línea afectando únicamente a una de las fases, no son

faltas permanentes y no provocan una perturbación importante al sistema porque se eliminan en unas décimas de segundo por actuación de las protecciones y desconexión del interruptor de cabecera seguida de reconexión automática. En pocos casos las faltas son permanentes. La tecnología disponible permite indicar la localización de la falta para facilitar la actuación de los equipos de mantenimiento en el caso de faltas permanentes, cuya reparación puede hacerse en la mayor parte de los casos en un proceso de horas, por sustitución de aisladores o de un tramo de conductor.

En los cables, se ha de distinguir si están en contacto directo con el terreno, tendidos dentro de tubulares o en galería. En todos los casos el punto más débil es el empalme entre tramos de una misma línea, situado dentro de una cámara. La cantidad de empalmes está condicionada por la longitud de las bobinas del cable, entre 500 y 600 m.<sup>4</sup> Sólo en casos especiales se alcanzan los 800 m. En las cámaras de empalmes se realizan los empalmes y se hace el cruzamiento de pantallas (técnica del “cross bonding”).

Si la fabricación, tendido y la instalación de los cables se realiza con un buen control de la calidad, la probabilidad de tener un fallo en el propio cable es pequeña (los cables salen de fábrica probados), por lo que en principio están sometidos a menos incidentes por causas externas que las líneas aéreas, (falta disponer de datos estadísticos a largo plazo que lo confirmen). Los accesorios (empalmes y terminales), tienen más probabilidad de sufrir averías ya que se confeccionan en obra.

En el caso de producirse una avería la repercusión sobre la red es mucho mayor que en las líneas aéreas ya que no es posible actuar con la reconexión automático de los interruptores ya que por su propia naturaleza las averías en los cables son permanentes y una reconexión en tal caso pondría en riesgo la estabilidad del sistema y agravaría la avería.

La reparación de la avería en un cable enterrado requiere un tiempo de días o semanas dependiendo del lugar donde se haya originado y de la disponibilidad de recambios y montadores. Si la avería se ha iniciado en un empalme, el acceso a las cámaras facilita su sustitución. Si la avería se produce en un tramo comprendido entre las cámaras de empalme, la localización y sustitución del tramo averiado necesita de un proceso más largo de localización y más costoso de reparación.

---

<sup>4</sup> Con longitud de tiradas de bobina de 600 m El número de empalmes que estimamos sería necesario realizar es 12 por cámara, con unas 70 cámaras, en total 840 empalmes en un trayecto de 41,5 km.

Para realizar el análisis comparativo entre líneas aéreas y cables enterrados, en primer lugar se describen cualitativamente algunos aspectos técnicos de ambos sistemas de transmisión de energía, y mediante los cálculos realizados se hace una valoración cuantitativa de los parámetros eléctricos que definen el proyecto de una línea.

## **2.1 Capacidad de transporte de las líneas aéreas y cables enterrados**

Los tramos de cable forman parte de la red, antes o después conectan con líneas aéreas por lo que todas las partes de un mismo circuito han de tener la misma capacidad de transporte. La capacidad térmica de transporte de los cables a igualdad de sección es menor que la de las líneas, por cuya razón la equivalencia es a base de incrementar o bien la sección, o el número de circuitos o ambas cosas. En el caso de grandes intensidades se utiliza en los cables el cobre por su mayor conductividad. En las líneas se utiliza como conductor el aluminio por ser de menor peso y más barato que el cobre y su resistencia mecánica a la tracción se asegura mediante un alma de acero en el interior del cable que queda rodeado por los hilos de aluminio.

El proyectista debe prever las dimensiones de la traza necesaria, con línea o con cable, para satisfacer las necesidades en escenarios futuros de varias décadas. No obstante, cuando se necesita aumentar la capacidad de transporte de una línea, adaptando las torres existentes o instalando nuevas torres, también se puede cambiar el conductor para aumentar la sección o se pueden disponer varios conductores en paralelo, formando en el último caso disposiciones denominadas dúplex, triples o cuádruplex<sup>5</sup>. Para aumentar la capacidad de transporte de los cables, se deben disponer más cables en paralelo sobre la canalización, por lo que a veces se dejan instaladas tubulares vacías para ampliaciones futuras. Los cables de 400 kV necesitan tubulares de 30 cm de diámetro. La instalación en galería también permite contemplar futuras ampliaciones si se ha previsto el espacio necesario desde el inicio.

La especificación de REE para este tramo de red es que sea capaz de transportar por cada circuito la potencia de 2.441 MVA, que denominamos potencia asignada. Esto se puede alcanzar con los siguientes diseños supuestos:

---

<sup>5</sup> (Una ventaja de la disposición de conductores múltiples sobre la de conductor único de mayor sección es que las pérdidas por el efecto corona son menores).

### **2.1.1 Cable enterrado:**

En el “Informe sobre la viabilidad de canalizar mediante cable aislado enterrado la línea 400 kV Santa Llogaia-Bescanó”, se ha efectuado el prediseño térmico de los circuitos con cable, con una capacidad para transportar hasta 2.441 MVA por circuito, dando por resultado una canalización de dos circuitos de dos tricables cada uno de 2.500 mm<sup>2</sup> de cobre de sección, tanto enterrados o en el interior de una galería.

Debido a la relativamente menor reactancia de los cables que las líneas y su relativa longitud en el conjunto de la red, la capacidad térmica es el principal parámetro de diseño.

Los cables no admiten sobrecargas sobre el límite térmico. (La inercia térmica en calentamiento adiabático determina el tiempo límite de resistencia al cortocircuito, del orden de segundos, y del orden de minutos con ligeras sobrecargas).

### **2.1.2 Línea aérea:**

La capacidad térmica máxima de una línea aérea “cuádruplex” cardinal, es de unos 4.040 A, (2.800 MVA). (Ver anexo de cálculos). Sin embargo, como se ha explicado en el primer informe, este dato no es el principal parámetro que define la potencia que puede circular por ella, sino la caída de tensión admisible en funcionamiento normal de explotación.<sup>6</sup>

El factor de potencia es un factor determinante para el control de la tensión admisible en los circuitos de la red de 400 kV, donde aplicando los criterios de explotación se establece para cada línea la carga máxima que en régimen de explotación resulta admisible, valor que de forma transitoria

---

<sup>6</sup> La caída de tensión en una línea es más sensible al factor de potencia de la carga que en un cable ya que la reactancia de la línea es más elevada que la del cable aislado al tener más distanciadas las fases. La resistencia del cable es menor a igualdad de capacidad de transporte por ser mayor la sección del conductor y además ser de cobre.

Con una caída de tensión del 1,95, %, (7,8 kV) equivalente a la del cable de igual longitud, la capacidad de transporte en la línea cuádruplex cardinal se reduce de 2.800 MVA a 2100, MVA, con factor de potencia 0,98. En condiciones normales, la carga de servicio admisible en las líneas se ajusta de forma que las tensiones en cada nudo de la red estén comprendidas dentro de los límites admisibles, estableciendo el adecuado reparto de cargas.

Para asegurar el funcionamiento de la red en condiciones especiales de explotación se deben satisfacer algunos requisitos técnicos para no sobrepasar sus límites. Una de las situaciones a tener en cuenta es cuando las líneas aéreas quedan conectadas sobre cables en antena en un extremo con nula o baja carga. La capacidad de los cables absorbe una potencia reactiva de signo contrario a la de las líneas que los alimentan, lo que en función de las características y longitud de las líneas y de los cables puede causar por efecto “Ferranti” una elevación de tensión inadmisibles.

podría superarse a expensas de un aumento en la caída de tensión ya que esta carga máxima es inferior en la mayor parte de los casos a la capacidad térmica.<sup>7</sup>

### **3. Ventajas e inconvenientes de la explotación de líneas con los cables enterrados con relación a las líneas aéreas. Instalaciones asociadas**

Como hemos visto en el “Informe sobre la viabilidad de canalizar mediante cable aislado enterrado la línea 400 kV Santa Llogaia-Bescanó”, la capacidad del cable enterrado se compensa mediante el empleo de reactancias (ver cálculos estimativos de dicho informe) cuando genera la suficiente potencia capacitiva como para que el efecto de la elevación de tensión supere los límites admisibles, lo que depende de la longitud del cable.

Uno de los peores casos se puede originar tras un apagón general seguido de la reposición de servicio desde una línea aérea de mayor longitud energizando un cable conectado en el extremo de la línea.

En los circuitos entre Santa Llogaia y Bescanó, la situación descrita anteriormente admitiría dos escenarios posibles:

- a) reposición del servicio desde la red peninsular de 400 kV
- b) reposición del servicio desde la interconexión en D.C<sup>8</sup> con Francia.

En el primer escenario debe asegurarse que, o bien el cable tiene la compensación de reactiva en servicio o que en ningún caso se dará la circunstancia de quedar alimentado en vacío y en antena sobre líneas, -esta última situación es difícil de asegurar-, mientras que el segundo escenario dependerá de la tecnología de conversión AC/DC<sup>9</sup>, por lo que debería analizarse con la ayuda de simuladores de red la repercusión de la capacidad del cable en relación a los sistemas de control de dicha tecnología.

---

<sup>7</sup> Para las sobrecargas temporales, la línea aérea admite un cierto aumento temporal sobre la temperatura del conductor que tendría en régimen normal, dependiendo de las condiciones ambientales atmosféricas ya que el conductor carece, a diferencia de los cables, del recubrimiento aislante que limita la máxima temperatura de servicio a 90 °.

<sup>8</sup> Corriente continua

<sup>9</sup> Corriente alterna a corriente continua

### 3.2 Control de temperatura. Vida útil de los cables

La vida útil de las líneas y de los cables depende, entre otras cosas, del régimen de temperatura a la que se ven sometidos, que a su vez depende en cada momento de la carga y de la temperatura del medio aislante, en las líneas del aire y en los cables de los componentes orgánicos como el XLPE. Las protecciones de cabecera de las líneas y de los cables protegen a estos contra las elevaciones de temperatura transitoria durante el paso de las corrientes de cortocircuito o las corrientes de sobrecarga de media o larga duración, evitando que no se sobrepasen los parámetros de diseño.

En las líneas pueden tenerse en cuenta señales de control cuyos parámetros se ajusten a las condiciones de disipación térmica de la atmósfera, temperatura, viento, lluvia, etc., controlables por el operador del sistema.

En los cables el parámetro a controlar sería la temperatura del terreno, lo que en la práctica no es viable, mientras que en los cables en galería el parámetro más importante es la temperatura del aire ambiente del interior. En la galería el calor se disipa por el flujo de aire circulante y por la conducción a través de las paredes debido a la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y el terreno.

El calor es generado en las líneas en los conductores, mientras que en los cables se añade al calor generado en el conductor central el de las pérdidas en la pantalla y el de las pérdidas del aislamiento.

En el dimensionado térmico de los cables enterrados directamente o bajo tubular hemos visto que se obtienen los valores límite de intensidad suponiendo una temperatura del terreno de 20°C y 25°C y unas resistividad térmica del terreno de 1°K.m/w, mientras que en la galería se ha supuesto una temperatura del aire constante de 40 °C.

Para que la temperatura ambiente de la galería no supere los 40 °C es necesario prever una circulación forzada del aire desde un punto de entrada exterior hasta otro punto de salida exterior, mediante ventiladores de eje axial de la potencia requerida para mover el caudal de aire necesario controlados por termostatos de temperatura ambiente. Cuando la temperatura de la galería supere el valor de consigna (p.e. 27°C) será necesario aplicar ventilación forzada a la galería.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Ver anexo cálculos térmicos.

### **3.3 Línea de alimentación auxiliar en las galerías**

Las galerías de cables deben disponer de sistemas de ventilación, control de temperatura, vigilancia de incendio y sistemas de alumbrado que requieren la presencia de circuitos auxiliares de fuerza, alumbrado y señal a lo largo de la galería, líneas de suministro en MT y centros de transformación MT/BT.

Todos los cableados auxiliares, con excepción de los de señal de fibra óptica, se ven expuestos a sobretensiones inducidas por la corriente de servicio y de cortocircuito de los cables de 400 kV lo que obliga a tomar medidas específicas para contrarrestarlas, por ejemplo, con opto-aisladores en los módulos electrónicos y transformadores de separación galvánica en las fuentes de alimentación y circuitos de fuerza y alumbrado.

En las líneas se incorpora a los conductores de guarda cables de fibra óptica para la comunicación de señales de control y protección. Al ser de fibra óptica no se ven afectados por la inducción de los conductores de 400 kV.

### **3.4 Subestaciones**

De los cálculos eléctricos se obtiene que las dos opciones consideradas para compensar la potencia capacitiva de los cables enterrados, a) en los extremos o b) en los extremos más en un punto intermedio a la línea, son eléctricamente comparables, por consiguiente, la subestación intermedia de compensación no sería indispensable por este motivo. No se entra a valorar en este informe la necesidad de esta subestación si se incorporasen otros criterios estructurales o de planificación de la red de transporte o distribución.

### **3.5 Subestaciones con tecnología GIS**

La tecnología GIS (*Gas Insulated Swichtgear*) ha permitido reducir drásticamente las distancias de aislamiento utilizadas en la tecnología convencional (*aislamiento al aire*) entre partes en tensión, lo que conlleva la reducción del espacio necesario hasta el punto que ha permitido facilitar la instalación de los conjuntos de maniobra y protección en el interior de edificios de reducidas dimensiones.

Es frecuente en instalaciones urbanas de 220 kV instalar los aparatos GIS en sótanos (por ejemplo línea 9 del Metro, SE Zona Franca, SE ZAL del Port de Barcelona, etc.) de los edificios destinados a usos industriales. El primer sótano se reserva para la entrada y salida de cables y el conexionado

desde la parte inferior hasta los aparatos GIS situados en el sótano superior. La obra civil debe prever la inundación y las filtraciones de agua. No se ven dificultades para que la misma solución tecnológica y constructiva se pueda aplicar al nivel de tensión 400 kV.

### **3.6 Subestaciones con tecnología GIL**

La tecnología GIL (*Gas Insulated Line*), combinada con la AIS (Air Insulated Substations) produce la HIS (Highly Integrated Switchgear), que junto con la GIS (*Gas Insulated Switchgear*) ofrecen grandes posibilidades para el futuro de la transmisión de energía con altas prestaciones de tensión y de corriente, (más de 500 kV y más de 4000 A) una vez que se hayan solucionado los problemas que aparecen en las instalaciones de pequeña longitud actualmente en servicio y los costes de fabricación se beneficien de la economía de escala.

Tiene la ventaja de que la capacidad electrostática de los conductos de cable es mucho menor que la de los cables con aislamiento seco, por la mayor separación entre el conductor central y las pantallas y por la menor constante del dieléctrico interno (gas), lo que en teoría permite alcanzar distancias de hasta 100 km sin necesidad de compensación de reactiva.

La primera instalación a 400 kV data de principios de los años 1970 en como aplicación en un túnel vertical de Black Forest (Alemania) que quedó fuera de servicio porque fue averiada por un rayo. La primera generación utilizaba como medio aislante el SF<sub>6</sub>, pero en la segunda generación se ha incorporado también el N<sub>2</sub> al SF<sub>6</sub>.

Empresas tecnológicas importantes como Siemens han desarrollado e instalado equipos en diversos países, bien en montaje en túneles (400 m, Ginebra) como sobre la superficie del terreno (6000 m, China). Complementariamente se han desarrollado técnicas de localización de averías ALC (Arc Location Converters) de precisión inferior a 10 m.

Esta tecnología puede competir con las líneas aéreas (o con los cables) únicamente en los casos que deban atravesarse áreas muy pobladas o entornos muy sensibles medioambientales, ya que su coste resulta muy superior. No se tienen experiencias de explotación en líneas de gran longitud que permitan valorar el comportamiento frente a sobretensiones transitorias, fugas de gas, movimientos del terreno, etc.

### **3.7 Reactancias de compensación**

Según el informe preliminar, la potencia reactiva de compensación para el tramo de 41,5 km es de 2100 MVA aproximadamente. El cálculo más exacto efectuado en este informe proporciona el valor de 2136 Mvar.

Las reactancias se conectan sobre cada circuito de dos tricables para evitar la necesidad de duplicar las posiciones de 400 kV.

En la opción 50% -50 % se necesitan las siguientes:

- Extremo 1: 2 reactancias de 534 Mvar, 1 por circuito
- Extremo 2: 2 reactancias de 534 Mvar, 1 por circuito

En la opción 25%-50%-25 % se necesitan las siguientes:

- Extremo 1: 2 reactancias de 267 Mvar, 1 por circuito
- Punto intermedio: 2 reactancias de 534 Mvar, 1 por circuito
- Extremo 2: 2 reactancias de 267 Mvar, 1 por circuito

En la primera opción se instalan 4 máquinas y 4 posiciones de 400 kV y en la segunda opción se instalan 6 máquinas y 6 posiciones de 400 kV. En todos los casos se han de añadir las posiciones correspondientes a las llegadas de las líneas de 400 kV, como mínimo, 2 en cada extremo de la canalización, más una eventual posición de acoplamiento de barras 400 kV en cada extremo. Aparte estarían las eventuales posiciones de transformadores de red.

Cada máquina ocupa en el parque de la S.E una superficie de dimensiones parecidas a las que tendrían los transformadores de igual potencia y nivel tensión de una S.E. a 400 kV, dependiendo de la configuración constructiva que oferte cada fabricante.

Las pérdidas de potencia de las reactancias obligan, entre otras razones técnicas, a su instalación en intemperie, ya que necesitan de aerorefrigerantes de grandes dimensiones para evacuar el calor. Suponiendo unas pérdidas del 0,2 %, una máquina de 534 Mvar generaría en calor 1068 kW que se debe disipar a la atmósfera.

### **3.8 Campo electromagnético**

El campo electromagnético no debe pasar de 100  $\mu$ T para exposición al público en general, según las recomendaciones más ampliamente

utilizadas, tabla 7 de la ICNIRP (Internacional Commission on Non-ionizing Radiation Protection).

Los cálculos realizados muestran que tanto en el caso de la línea de las características descritas en el anexo como en el caso de cables enterrados en una zanja a 2 m de profundidad y separación entre fases de 0.5 m no se alcanzan 100  $\mu$ T a 1 m del suelo. En el interior de la galería, no accesible al público en general, pueden existir ciertas zonas en que se supere este valor, pero no se alcanza nunca el de 500  $\mu$ T que la norma de referencia fija para exposición personal ocupacional.

#### **4. Servidumbres de los corredores de líneas aéreas**

La línea aérea necesita de un corredor capaz de extender los conductores aéreos entre las torres y colocar sus torres de soporte.<sup>11</sup>

El reglamento RD 223\_ITC-LAT de 15 de marzo determina las distancias mínimas tanto internas como externas en el apartado 5 de la ITC-LAT 07. La altura mínima se regula en los puntos donde la flecha sea máxima y la distancia a otras líneas aéreas eléctricas o de telecomunicación. La casuística es muy detallada en los casos que contempla la norma, indicándose en cada apartado correspondiente las fórmulas y sus parámetros, por lo que al estar extensamente desarrollada no se incluye en este informe.

La distancia máxima entre conductores horizontales para la torre supuestamente instalada es de 16,5 m y las distancias de seguridad aproximadamente de 8 m a cada lado. Como ejemplo de esta detallada y exhaustiva descripción para los corredores que se hace en el citado RD se citan algunos párrafos de la misma:

Se especifican algunos valores en condicional como *“siempre que sea posible”*, o de forma más concreta, por ejemplo, en el paralelismo entre líneas eléctricas aéreas y líneas de telecomunicación dice que *“se evitará la construcción de líneas paralelas a distancias inferiores a 1,5 veces de altura del apoyo más próximo...”*

---

<sup>11</sup> Las dimensiones utilizadas para el cálculo en este informe para las torres de las líneas de 400 kV, soportando 4 conductores por fase y línea tipo cardinal, (483,4 mm<sup>2</sup> de Al y 62,7 mm<sup>2</sup> de acero), tienen unas crucetas superior e inferior de 14 m y la cruceta central de 16,5 m, consiguiendo con esta torre unas alturas de los conductores inferiores, centrales y superiores sobre el nivel del suelo de 10 m, 8 m, y 26 m respectivamente. (Ver datos en el Anexo cálculos).

En efecto el ICT-LAT-06 en le apartado 5.1 dice lo que aquí se indica, citando el RD 1955/200 art. 162, 3, que a su vez dice:

*3. En todo caso, y para las líneas eléctricas aéreas, queda limitada la plantación de árboles y prohibida la construcción de edificios e instalaciones industriales en la franja definida por la proyección sobre el terreno de los conductores extremos en las condiciones más desfavorables, incrementada con las distancias reglamentarias a ambos lados de dicha proyección.*

*Para las líneas subterráneas se prohíbe la plantación y construcciones mencionadas en el párrafo anterior, en la franja definida por la zanja donde van alojados los conductores incrementada en las distancias mínimas de seguridad reglamentarias.*

Creemos que el redactor del reglamento ha interpretado la distancia mínima de seguridad reglamentaria (que no esta definida en ningún sitio) extrapolando de la línea aérea, pero no cita la fuente.

En el paralelismo con carreteras del Estado, dice “*se hará detrás de la línea límite de edificación y a una distancia de la arista exterior de la calzada superior a una vez y media su altura*”. Para carreteras que no pertenezcan al Estado “*la instalación de apoyos deberá cumplir con la normativa vigente en cada comunidad autónoma aplicable al efecto.*”

Las distancias con los ferrocarriles sin electrificar, electrificados, tranvías y trolebuses, se determina también en base a la casuística del interés general, etc., así como a teleféricos, cables transportadores, ríos, canales, también tiene capítulos dedicados.

## **5. Servidumbres de los corredores de cables enterrados**

En el “Informe sobre la viabilidad de canalizar mediante cable aislado enterrado la línea 400 kV Santa Llogaia-Bescanó”, ya se ha descrito la servidumbre mínima requerida para el camino de cables con cable aislado enterrado o con galería.

Para las líneas subterráneas se especifican el apartado 5.1 de la ITC\_LAT 07 las distancias mínimas a mantener en los cruzamientos, proximidades y paralelismos, dice, “*sin perjuicio de otras disposiciones que otros órganos competentes de la Administración, como consecuencia de disposiciones legales, cuando sus instalaciones fueran afectadas por tendidos de cables subterráneos de AT<sup>12</sup>*”.

---

<sup>12</sup> Alta Tensión

*“Para las líneas subterráneas se prohíbe la plantación de árboles y construcción de edificios e instalaciones industriales en la franja definida por la zanja donde van alojados los conductores, **incrementada a cada lado en una distancia mínima de seguridad igual a la mitad de la anchura de la canalización**. Estos requisitos no serán de aplicación a cables dispuestos en galerías. En dichos casos la disposición de los cables se hará a criterio de la empresa que los explote, sin embargo, para establecer las intensidades admisibles en dichos cables, deberán aplicarse, cuando corresponda, los factores de corrección definidos en el capítulo 6 de la presente instrucción.”*

Según lo indicado por la ITC-LAT-07, las dimensiones del camino de cables enterrados directamente o bajo tubular, cuya separación mínima valoramos en el primer informe en 12 m, debería aumentarse a 24 m para evitar la plantación de árboles y/o construcción de edificios. Creemos que este valor sería razonable cuando se tratase de canalizaciones de cables para distribución, normalmente de dimensiones mucho más pequeñas, de 0,8 m a 2 m, pero en canalizaciones singulares deberían establecerse otros valores bajo criterio del proyectista y sancionado por la autoridad competente, de la misma forma que para los pasillos técnicos paralelos y los pasillos técnicos auxiliares. Es un tema que creemos debería valorarse por la administración competente.

## **6. Resumen de los cálculos**

Se ha efectuado el estudio comparativo del comportamiento eléctrico de un tramo de 41,5 km de distancia, realizado en línea aérea y con cable, como el que enlazaría Bescanó con Santa Llogaia. Para el ramal Riudarenes de 19,5 km los resultados de los cálculos son extrapolables aplicando un coeficiente reductor de  $19,5/41,5 = 0.47$  sobre las pérdidas, tamaño de las reactancias de compensación y caídas de tensión, ya que por formar parte del mismo circuito Vic-Bescanó REE ha prescrito la misma potencia de 2441 MVA.

En la línea aérea se ha supuesto una línea cardinal cuádruplex montada sobre torres cuyas dimensiones figuran también el anexo, valor necesario en el cálculo puesto que la separación entre los conductores determina la reactancia de la línea. La carga total sobre el circuito de esta línea se reparte entre los dos tricables del circuito de cables.

Las pérdidas tienen en cuenta también en cada hipótesis las de las reactancias de compensación instaladas. La compensación de la línea aérea se supone con condensadores conectados en el extremo final.

En el Anexo se resumen los resultados de los cálculos efectuados en las hipótesis siguientes:

- 1ª Hipótesis: Sin carga y sin reactancias de compensación.
- 2ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$  y sin reactancias de compensación.
- 3ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$ , con reactancias de compensación en los extremos del cable.
- 4ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$  y con reactancias de compensación en un punto intermedio y en ambos extremos.
- 5ª Hipótesis: Sin carga y con reactancias de compensación.

También se ha incluido en el Anexo el caso supuesto descrito en el apartado 2.1.2 cuando se originan circunstancias de explotación especiales.

- 6ª Hipótesis: Sin carga, sin reactancias de compensación, el cable de 400 kV alimentado en antena desde una línea aérea de 400 kV de 100 km de longitud.

Finalmente, se ha calculado el valor de la carga admisible por la línea de 400 kV de la misma longitud que el cable pero equivalente en caída de tensión a la del cable.

- 7ª Hipótesis: Con carga admisible por la línea aérea y con condensadores de compensación en el final de la línea.

## **6.1 Conclusiones de los resultados de los cálculos eléctricos:**

Sin carga, las pérdidas de potencia en el cable sin compensación son importantes debido a la intensidad que la capacidad propia del cable absorbe, en el origen de cada tricable de 772 A ( $2 \times 772 \text{ A}$  por circuito) y que genera las pérdidas. En la línea sin carga las pérdidas por esta causa son irrelevantes.

Con carga límite térmica en el cable de 2441 MVA y  $\cos \varphi = 0,98$ , sin compensación de reactiva inductiva en la línea aérea ni compensación de reactiva capacitiva en el cable, las pérdidas de potencia en la línea son

superiores a las de del cable, siendo de 33700 kW en la línea y de  $2 \times 5164 = 10328$  kW en el cable (2 tricables).

Con carga límite térmica en el cable de 2441 MVA y  $\cos \varphi = 0,98$ , sin compensación de reactiva inductiva en la línea aérea o compensación de reactiva capacitiva en el cable, las pérdidas de potencia en la línea también son superiores a las del cable, siendo de 28560 kW en la línea y de  $2 \times 5340 = 10680$  kW en el cable (2 tricables).

Sin carga, la tensión al final de la línea es aproximadamente igual a la del origen, incrementándose en 394 V, mientras que en el cable la tensión aumenta en 6000 V. Si el cable está compensado, la tensión al final es prácticamente es igual a la del origen.

Cuando el cable se alimenta sin carga desde una línea de gran longitud, situación posible después de un incidente general del sistema 400 kV, **las tensiones tanto al final de la línea aérea como del cable aumentan hasta alcanzar valores inadmisibles para la seguridad del material**, por lo que esta situación debe evitarse mediante la instalación de reactancias de compensación en el cable de potencia inductiva equivalente a la potencia capacitiva del cable.

La potencia total de las reactancias de compensación para los cables es de 2100 MVA, pudiéndose distribuir 50 % de la potencia en cada extremo de Bescanó y de Santa Llogaia, o 25 % en cada extremo y 50 % en un punto intermedio a definir. Ambos métodos difieren poco en el resultado final, pero el primero se incrementa más la carga del cable en el extremo final (114 %) frente al segundo (107,8 %).

El efecto de la conexión de las reactancias sobre la carga máxima admisible por el cable, es aumentar la intensidad, por lo que un estudio de red más profundo debería optimizar la reducción de la capacidad efectiva del cable en relación a la potencia de las reactancias compensadoras.

Para que la carga de la línea genere una caída de tensión igual a la que se obtendría con el cable de igual longitud, del 1,93 % en 41,5 km, la carga de la línea debería reducirse a 2100 MVA, o sea, el 76,5 % de su capacidad térmica. **Este es uno de los factores que explican porqué algunas líneas aéreas admiten “sobrecargas” temporales, ya que trabajan por debajo de su capacidad térmica cuando el límite viene dado por las caídas de tensión, mientras esta situación no se da en los cables porque siempre se ajustan más a su límite térmico.**

## 6.2 Conclusiones de los cálculos térmicos:

Para que los cables enterrados admitan una carga total de 2441 MVA por circuito deben disponerse 4 tricables de 2500 mm<sup>2</sup> de sección, manteniendo separadas las fases 0,5 m y a una profundidad de zanja de 2 m.

Si los cables se disponen en galería también se necesitan 4 tricables de 2500 mm<sup>2</sup> de sección, separadas las fases 0,1 m y dispuestas en una galería de sección transversal 2,5 x 2,2 m. La temperatura del aire interior no debe sobrepasar 40 °C. Con la máxima carga térmica en los 4 tricables se generan unas pérdidas de 530 kW/km que deben evacuarse a través de las paredes de la galería y por la ventilación forzada, proporción que orientativamente sería del 40 % por las paredes y 60 % por el aire para unas determinadas condiciones de temperatura exterior e interior. Únicamente cuando la carga térmica fuera inferior podría prescindirse o reducir la ventilación forzada. Cuando la temperatura del interior de la galería superase los 27°C debería ponerse en marcha para asegurar que en ningún caso el aire en contacto con los cables sobrepase los 40°C, evitando la formación de capas laminares más calientes en la superficie de los cables. Estas consignas proceden de los la experiencia en galerías semejantes.

## ANEXO: CÁLCULOS

Estudio comparativo del comportamiento de las líneas y cables para el tramo Bescanó-Sta. Llogaia de 41,5 km

La equivalencia se establece entre dos tricables enterrados con 1 circuito de línea aérea sobre torres de doble circuito, ambos transportando la misma potencia.

Parámetros eléctricos comparativos

	Línea	Cable
Carga máxima	1x2.440 MVA	2x1220 MVA
Número de conductores	3x4x cardinal	3x1x2500 mm <sup>2</sup> /tricable
Intensidad térmica de referencia	4.040 A	2x1.600 A

Los cálculos realizados se basan en los siguientes datos:

Dimensiones del cable de 400 kV

	espesores (mm)	Diámetros (mm)
Diseño del cable		
Conductor de 2500 mm <sup>2</sup>	0	63,5
s/c interior	2,5	68,5
Aislamiento XLPE	30	128,5
s/c exterior	4	136,5
Pantalla de aluminio extruido	3	142,5
Cubierta exterior	5	152,5

Parámetros eléctricos del cable 400 kV

	Unidades	Valor
Resistencia conductor	Ω/km	0.0119
Reactancia	mH/km	0.643
Conductancia aislamiento	μS/km	0.079
Capacidad	μF/km	0.251
Intensidad de referencia	A	1600

Dimensiones de la línea aérea 400 kV

	Alto (m)	Ancho (m)
Diseño de las torres		
Cruceta superior	26	14
Cruceta central	18	16,5
Cruceta inferior	10	14
Número de conductores: 4		

Parámetros eléctricos del cable 400 kV

	Unidades	Valor
Conductor: cardinal		
Sección de aluminio	mm <sup>2</sup>	483,4
Sección de acero	mm <sup>2</sup>	62,7
Resistencia conductor	Ω/km	0.0695

Reactancia	$\Omega/\text{km}$	0.26
Intensidad, 25°C, +50 °C, 0,6 m/s	A	1010
Capacidad	$\mu\text{F}/\text{km}$	0.00
Radio geométrico medio	mm	12,28
Radio exterior	mm	16,38

Los resultados de los cálculos son:

1ª Hipótesis: Sin carga y sin reactancias de compensación

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV	400	400
Tensión al final, kV	400,4	405,7
Pérdidas, kW	1	2x838

2ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV	400	400
Tensión al final, kV	358,2	398,2
Pérdidas, kW	< 20	2x5.164

3ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$

Con reactancias de compensación equivalente al 50 % de la capacidad del cable en cada uno de los extremos del cable y del 100 % de la reactancia de la línea en el extremo final

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV	400	400
Tensión al final, kV	389,9	392,25
Pérdidas, kW	28.560	2x5.340

4ª Hipótesis: Con carga:  $P = 2 \times 1.220 \text{ MW}$ ,  $Q = 2 \times 242 \text{ MVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,98$

Con reactancias de compensación equivalente al 25 % de la capacidad del cable en cada uno de los extremos del cable, del 50 % en el tramo central y del 100 % de la reactancia de la línea en el extremo final

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV	400	400
Tensión al final, kV	389,9	392,27
Pérdidas, kW	28.560	2x5.230

5ª Hipótesis: Sin carga y con reactancias de compensación

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV		400
Tensión al final, kV		399.98
Pérdidas, kW		2x608

6ª Hipótesis: Sin carga, sin reactancias de compensación, el cable de 400 kV alimentado en antena desde una línea aérea de 400 kV de 100 km de longitud

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV	400	400
Tensión al final, kV	473	506
Pérdidas, kW	25.602	11.221

7ª Hipótesis: Con carga reducida en la línea aérea y con condensadores de compensación en el final de la línea

	Línea	Cable
Tensión en origen, kV		400
Tensión al final, kV		392,17
Pérdidas, kW		20.910

## VENTILACIÓN DE LA GALERÍA

La situación a prever más desfavorable en galería es suponer que los cuatro tricables de 2.500 mm<sup>2</sup> están a plena potencia, (situación límite). Las pérdidas por metro lineal de tricable son aproximadamente de 130 W/m, o sea, 130 kW/km de galería, lo que para 4 tricables da un total de 520 kW/km.

La potencia de los ventiladores se determina a partir del caudal de aire y de la pérdida de carga a lo largo del circuito de ventilación, con los ventiladores dispuestos a intervalos de 200 m a 600 m, cuyo proyecto definitivo no forma parte del alcance de este informe, no obstante damos en lo que sigue un valor orientativo para situar la necesidad de potencia..

Suponiendo una superficie de pared interior de galería a lo largo de 1 km , de 1000 x 2 x (2,5 + 2,2) = 9.400 m<sup>2</sup>, si la temperatura interior es de 40 ° C y la temperatura de la pared exterior de la galería es de 25 °C, la potencia evacuada por conducción es aproximadamente de 2,5 w/m<sup>2</sup> x 9.400 m<sup>2</sup> x

$(40-25) = 352 \text{ kW/km}$ ,<sup>13</sup> lo que supone un 82 % del calor generado entre los dos circuitos a plena carga.

Con estos resultados podemos suponer en una aproximación que hasta que la carga total térmica del conjunto de los cables no alcance el 82% no sería necesaria la ventilación forzada. La potencia a disipar a través de la ventilación forzada del aire con los 2 circuitos a plena carga sería de  $520 - 352 = 172 \text{ kW/km}$ , equivalentes con un salto térmico de  $40 - 25 = 15 \text{ °C}$  a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  de aire de ventilación, o  $30600 \text{ m}^3/\text{h}$  y la velocidad del aire en el interior de la galería de  $2 \text{ m/s}$ .

Por cada 10 mm de c.d.a de pérdida de carga en la galería y un rendimiento de los ventiladores del 50 %, la potencia de ventilación necesaria sería de 2,31 kW.

Evidentemente, el valor de la potencia de ventilación está directamente en función del salto térmico entre el aire del interior de la galería y el aire exterior, y la pérdida de carga en la galería, pudiendo ser mayor o menor que el indicado.

20/05/2009

---

<sup>13</sup> Tomando un coeficiente de conducción para paredes de hormigón de  $2,5 \text{ w/m}^2 \text{ y } \text{°C}$