

Cliente prof. Mario Monti – Coordinador Europeo para la interconexión eléctrica entre Francia y España

Asunto Análisis de la necesidad de una nueva interconexión entre Francia y España – Documento nº 2

Pedido

Notas versión original en francés

Prohibida la reproducción parcial , excepto con autorización escrita de CESI

Nº de páginas 45

Nº de páginas anexos: 57

Fecha de emisión: 19 de marzo de 2008

Rédigé: CESI-IMP – Bruno Cova ; CESI Ricerca – Michele de Nigris

Vérifié: IMP – Dario Provenzano

Approuvé: SIST – Antonio Ardito

Tabla de materias

1	LÍNEAS ELÉCTRICAS DE MUY ALTA TENSIÓN EN TENSIÓN ALTERNA: SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE SOTERRAMIENTO PARCIALES O TOTALES.....	3
2	COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN CABLE DE POTENCIA DE MUY ALTA TENSIÓN.....	4
2.1	Los componentes y su misión [1], [2]	4
2.2	Elementos de dimensionamiento	6
2.3	Necesidad de compensar la potencia reactiva	11
3	INSTALACIÓN DE UN CABLE DE MUY ALTA TENSIÓN.....	12
3.1	Tipología e impacto de las instalaciones [4], [3].....	12
4	OPERACIÓN DE LOS CABLES DE MUY ALTA TENSIÓN.....	22
5	IMPACTO PERMANENTE DE LOS CABLES DE MUY ALTA TENSIÓN.....	23
6	COSTE DE UN CABLE DE MUY ALTA TENSIÓN	26
6.1	Costes de inversión.....	26
6.2	Costes de gestión y desmantelamiento	28
7	LÍNEAS MIXTAS AERO-SUBTERRÁNEAS.....	30
7.1	Proyecto ELTRA en Jutlandia – Dinamarca	30
8	OTRAS ALTERNATIVAS: CONEXIONES EN CORRIENTE CONTINUA.....	33
8.1	<i>Coste de inversión</i>	<i>38</i>
8.2	<i>Costes de explotación y de mantenimiento.....</i>	<i>38</i>
8.3	<i>Coste de las pérdidas</i>	<i>39</i>
9	COMPARACIÓN.....	40
10	BIBLIOGRAFÍA	45

ANEXO (FASCÍCULO ANEXO): SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

1 LÍNEAS ELÉCTRICAS DE MUY ALTA TENSIÓN EN TENSIÓN ALTERNA: SOLUCIONES TECNOLÓGICAS DE SOTERRAMIENTO PARCIALES O TOTALES

Los cables eléctricos de potencia de muy alta tensión se desarrollaron en los años 50 para efectuar enlaces submarinos que no se podrían construir con tecnología aérea. La difusión de esta tecnología para las redes terrestres subterráneas estaba limitada por la necesidad de utilizar el aceite mineral como aislante y por sus costes de instalación y gestión prohibitivos. Estas dificultades se han reducido estos últimos años gracias al desarrollo del aislamiento sintético seco y gracias a una reducción importante de los costes de instalación. En numerosos países, la construcción de nuevas líneas de media y alta tensión se hace actualmente casi sistemáticamente en cable subterráneo en los alrededores de los núcleos urbanos y en los alrededores de las zonas especialmente sensibles desde el punto de vista medioambiental. En la **Figura 1** se pone de relieve la tasa de soterramiento de líneas eléctricas de alta potencia, recogida por un grupo de especialistas del CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas), en 2007 [3]: se puede constatar un decrecimiento de la tasa de soterramiento a medida que sube el nivel de tensión, hasta valores de algunas décimas por ciento para los cables del nivel de tensión que nos interesa (400 kV).

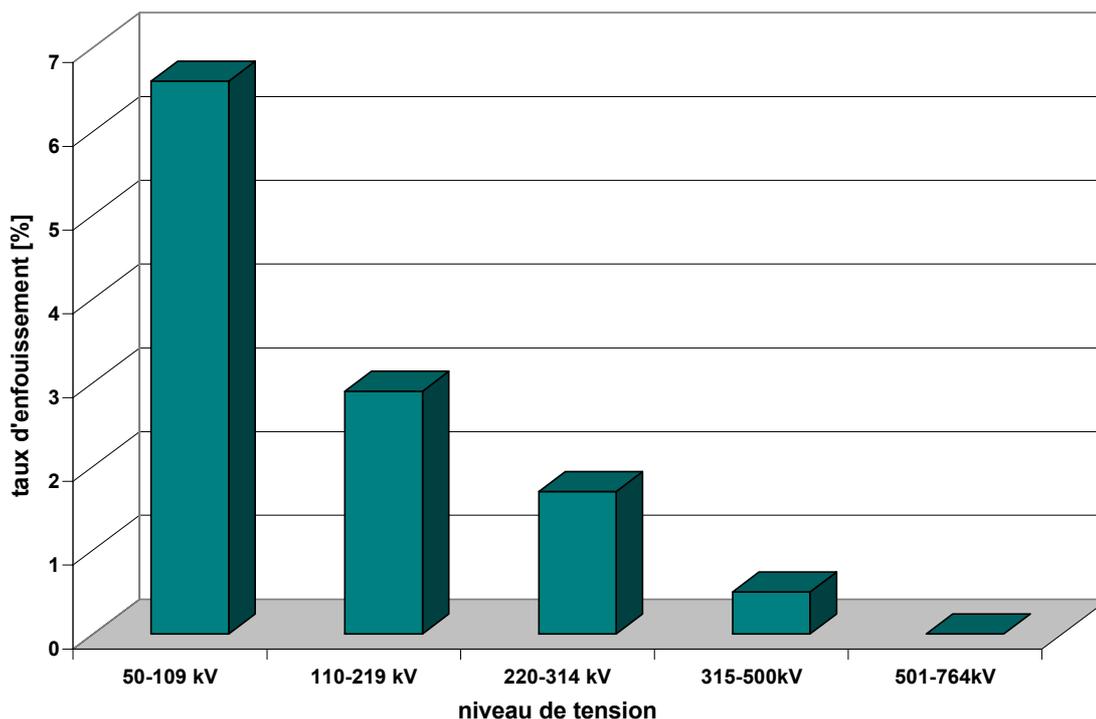


Figura 1 : Tasa de soterramiento de las líneas en función del nivel de tensión, para los principales países industrializados

(fuente CIGRE 2007)

Es necesario observar que la disponibilidad de cables con aislamiento sintético con un nivel de fiabilidad probado por ensayos normalizados de calidad y envejecimiento es muy reciente (principios de la presente década) y que el número de fabricantes de cable que tenían acceso a las técnicas de producción e instalación se ha multiplicado en los cinco últimos años. Por lo tanto, el diferencial de costes entre la

tecnología subterránea y aérea se redujo progresivamente permaneciendo todavía mucho más económico la aérea; las técnicas de instalación evolucionan y se simplifican a medida que se multiplican las instalaciones. Hasta ahora, los gestores de las redes recurren a la tecnología subterránea para los niveles de tensión más elevados únicamente en ocasiones aisladas, en caso de atravesar grandes núcleos urbanos (Berlín, Madrid, Tokio, Singapur..) y casi siempre para distancias de algunos kilómetros. Se proporcionan más detalles en un anexo adjunto sobre la tasa de enterramiento y un resumen de las principales construcciones de enlaces recientes en cable subterráneo de muy alta tensión.

2 COMPOSICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UN CABLE DE POTENCIA DE MUY ALTA TENSIÓN

2.1 Los componentes y su misión [1], [2]

La estructura básica de un cable con aislamiento sintético para su uso a muy alta tensión se muestra en la **Figura 2**; se compone de los siguientes elementos:

- **Un alma de cobre** (conductor): permite el tránsito de la corriente; la capacidad de transporte del cable depende del material y de las dimensiones (sección) del alma; para grandes potencias se utilizan almas con una sección entre 1600 y 2500 mm² que garantizan el paso de la corriente limitando al mismo tiempo las pérdidas por efecto Joule y el calentamiento resultante. Para secciones importantes (superiores a 1200 mm²) los conductores se construyen por segmentos con el fin de reducir la resistencia eléctrica equivalente (disminución del efecto “pelicular”). Naturalmente, el aumento del número de segmentos presenta una gran complejidad para la fabricación del conductor y por lo tanto un aumento del coste del cable.
- **Una pantalla semiconductor interna:** permite hacer uniforme el campo eléctrico en la parte interna de la envolvente aislante y asume la función de interfaz entre el aislante y los electrodos.
- **Una envolvente aislante:** permite aislar al conductor del medio externo; el material básico del aislamiento es el polietileno reticulado, una materia plástica compleja de reciente formulación para operaciones a muy alta tensión; el comportamiento del aislante es mucho mejor que el del aire, lo que permite tener en los cables configuraciones mucho más compactas que las de las líneas aéreas. Un fallo del aislante genera una corriente de gran intensidad hacia el exterior y puede tener consecuencias mecánicas importantes (disrupción del cable). La configuración geométrica del cable (constituida por electrodos formados por el conductor en tensión y las pantallas puestas a tierra separadas por el aislamiento del cable) presenta un valor importante de efecto capacitivo por unidad de longitud; esta capacidad se carga y descarga a medida que la tensión local aumente o disminuya por efecto de su característica alterna (la tensión se invierte a un ritmo de 50 veces por segundo); veremos más tarde que el efecto capacitivo influye sobre la opción de recurrir a los cables para las longitudes importantes.
- **Una pantalla semiconductor externa:** hace uniforme el campo eléctrico en la superficie externa de la envolvente aislante.
- **Una pantalla metálica:** contribuye al confinamiento del campo eléctrico, garantiza la circulación de las corrientes de cortocircuito, recoge el componente capacitivo de la corriente, desempeña el papel de referencia para el potencial de tierra e impide la penetración de agua hacia la envolvente aislante; la pantalla constituye también la protección mecánica del cable contra la acción externa.
- **Una cubierta aislante exterior:** protege el cable del ambiente exterior y de ataques externos y aísla la pantalla metálica garantizando la protección de terceros ante el contacto directo.

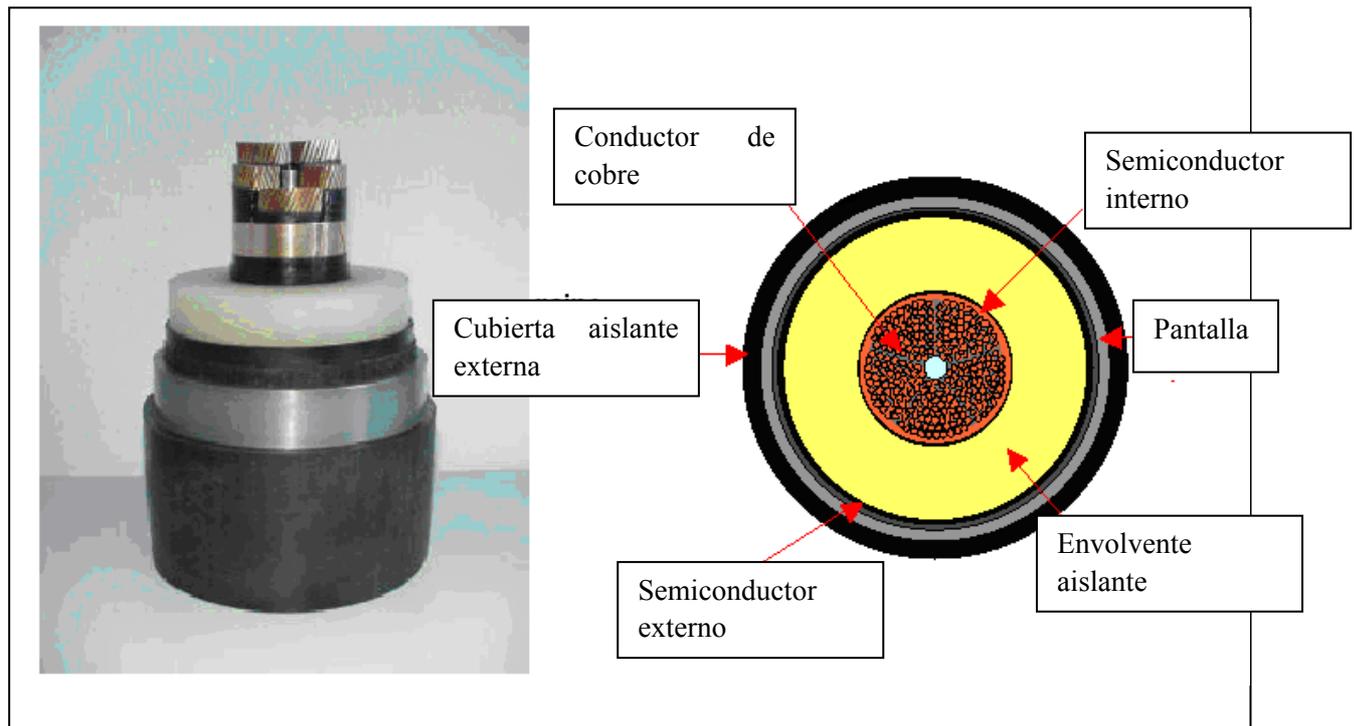


Figura 2 : elementos constitutivos de un cable de 400 kV con aislamiento sólido

Una línea subterránea está constituida por la parte subterránea propiamente dicha y por dos tipos de accesorios esenciales: los terminales y las uniones (véase **Figura 3** y **Figura 4**).

- **Los terminales** sirven para conectar el cable a la red eléctrica. Según el elemento que debe conectarse, hay varias posibilidades: en el caso de conexión de cables con aparatos instalados al aire libre (por ejemplo una línea aérea) se emplean terminales para exterior (en las cuales el aislamiento externo está constituido por aire); cuando la conexión de los cables debe realizarse con elementos como transformadores o subestaciones blindadas, se utilizan terminales concebidos específicamente para funcionar con un aislamiento externo en aceite o gas (típicamente SF₆).
- **Las uniones:** La limitación de la longitud de los cables de muy alta tensión no está vinculada a los medios de producción en fábrica, que están en condiciones de producir un cable de una única parte de longitud prácticamente infinita, sino que está vinculada a las dimensiones y los pesos admisibles para su transporte por carretera o vía férrea. De hecho, la longitud máxima de un tramo de cable de muy alta tensión suministrada en carrete es de entre 500 y 1000 m. Cuando la longitud de la línea que debe soterrarse sobrepasa la máximas transportables, es necesario realizar uniones entre los tramos, para poder obtener la longitud deseada. Las uniones deben realizarse sobre el lugar de instalación por equipos altamente especializados. Con el fin de limitar al mínimo las operaciones in situ, se utilizan cada vez más uniones de las llamadas "premoldeadas" que permiten aumentar las operaciones hechas y controladas en fábrica. Una unión mide alrededor de 2 metros de longitud. La elaboración de la unión debe efectuarse muy rigurosamente so pena de crear un punto de fragilidad potencial en el enlace subterráneo. Los cables submarinos se enrollan sobre un enorme carrete instalado sobre el puente del buque de instalación a las amarras de la boca de producción. Dado que el gálibo y el peso para el transporte en el mar son menos restrictivos que para el transporte terrestre, los cables submarinos requieren de un menor número de uniones y presentan desde este punto de vista una fiabilidad más elevada que los cables subterráneos.



Figura 3 : Terminal de cable 400 kV



Figura 4 : Unión de cables de muy alta tensión

Un enlace eléctrico en una red de corriente alterna tiene tres fases, el conjunto de ellas se denomina “circuito”. En el caso de una línea subterránea, los cables de tres fases se llaman “tricable”. Un circuito puede estar constituido por uno o dos tricables. Cuando un circuito no puede transportar él solo la potencia que debe circular o cuando su indisponibilidad implica sobrecargas inadmisibles sobre el resto de la red, es necesario añadir un circuito suplementario paralelo. Se habla entonces de enlaces de doble circuito. La **Figura 5** muestra ejemplos de configuraciones de circuitos de líneas subterráneas: la configuración de la instalación ilustrada es en trébol; es también posible instalar los cables en una capa horizontal.

<p>Cable</p>	<p>Circuito trifásico o tricable</p>	<p>Doble circuito en doble tricable</p>

Figura 5 : Configuraciones típicas de circuitos subterráneos

2.2 Elementos de dimensionamiento

Los principales parámetros de un proyecto de enlace subterráneo son el dimensionamiento térmico, el del aislante y la elección del sistema de puesta a tierra de los blindajes metálicos. Dado que el tercero es una cuestión tecnológica compleja, sólo trataremos los dos primeros aspectos:

- **Dimensionamiento térmico:** la capacidad para evacuar el calor es determinante para una conexión subterránea. El calentamiento es causado por la resistencia que el conductor opone al paso de la corriente (efecto Joule), así como por las pérdidas dieléctricas en el aislante y las pérdidas inducidas en la cubierta. Los cables con aislamiento sintético son aptos para funcionar hasta una temperatura del conductor de 90°C en régimen permanente. No se puede sobrepasar esta temperatura so pena de degradación o envejecimiento acelerado del aislante. Con relación a las líneas aéreas (cuyos conductores desnudos están expuestos al aire libre, que los enfría por convección) el calor generado en los cables debe propagarse a través de toda la estructura (aislamiento, pantalla, cubierta) para disiparse en el suelo y a continuación hacia la atmósfera. Un cable enterrado se enfría pues más difícilmente: es pues importante limitar las pérdidas al mínimo utilizando conductores de gran sección, eligiendo cobres muy puros, que tengan una resistencia eléctrica baja y prestando una atención especial a las pérdidas del aislamiento y de la cubierta. Respecto al conductor de una línea aérea que tenga una capacidad de tránsito comparable, el cable tendrá alrededor del doble de diámetro de conductor, 4 veces su sección y 10 veces su peso (véase **Figura 6**). Por el contrario, el aumento de la sección del cable permite una disminución de resistencia eléctrica y por tanto de las pérdidas por efecto Joules de cerca de $\frac{1}{4}$ para un material conductor dado. Esta característica, positiva bajo el punto de vista medioambiental, puede tener consecuencias eléctricas importantes: en efecto, en un sistema eléctrico mallado, la corriente transita preferentemente por el camino menos resistente; una resistencia eléctrica menor puede llevar a un cable subterráneo a soportar un tránsito de una mayor intensidad de corriente con respecto a la carga que llevaría una línea aérea en paralelo.
- **Dimensionamiento del aislante:** se hace sobre la base de las características dieléctricas del material elegido y de las condiciones que deberá soportar en servicio. El dimensionamiento del grosor aislante se efectúa sobre la base de una previsión de las condiciones de corta y de larga duración, de las sobretensiones debidas un rayo y de los maniobras de explotación. La experiencia adquirida durante estos últimos años se traduce, para los cables de 400 kV, en grosores aislantes aproximadamente de 25 a 30 mm., según la sección del conductor y los criterios de proyecto del fabricante.

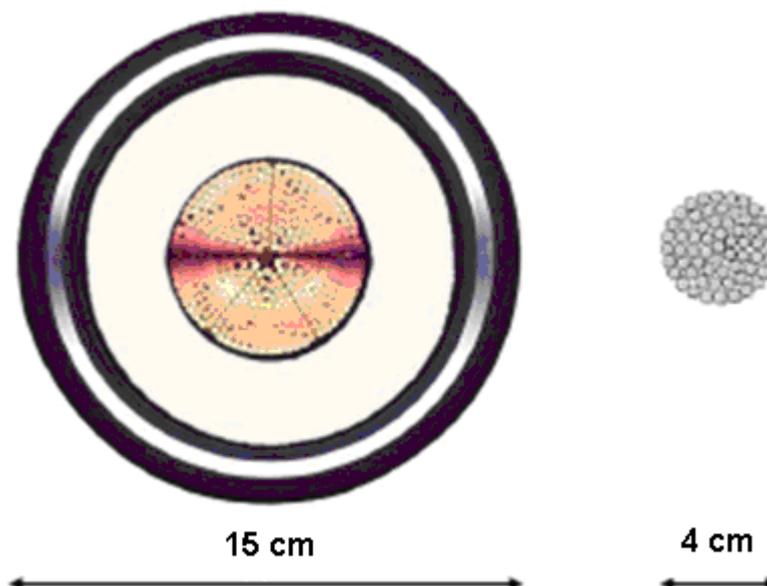


Figura 6 : Comparación entre las dimensiones de un cable de 400 kV y las de un conductor de línea aérea de la misma capacidad (destacar el hecho de que el conductor del cable soterrado representado es de cobre, mientras que el conductor aéreo es de aleación de aluminio con alma de acero)

La tabla siguiente muestra las capacidades de diferentes configuraciones de circuito y de instalación de cables subterráneos; también se indican valores indicativos de la capacidad de transporte de un circuito de línea aérea.

Tecnología	Instalación	Configuración	Nºcables /fase	Capacidad (MVA/circuito)
Aérea	-	-	3	2.200
Subterránea (XLPE)	Enterrada	Instalación en trébol	1	1.100
			2	2.170
		Instalación en capa horizontal	1	1.160
			2	2.250
	En túnel o en galería	Instalación vertical 1 túnel	1	1.700
		Instalación vertical 2 tuneles	2	3.400

De estos datos se deduce que, para una conexión de gran potencia equivalente a la de una línea aérea de **dobles circuito de 400.000 voltios**, es generalmente necesario recurrir a dos circuitos enterrados, dado que se constituye cada circuito de dos tricables (para llegar a un total de 12 cables).

La **Figura 7** muestra las dimensiones relativas de una línea aérea de doble circuito y de una línea enterrada de capacidad comparable.

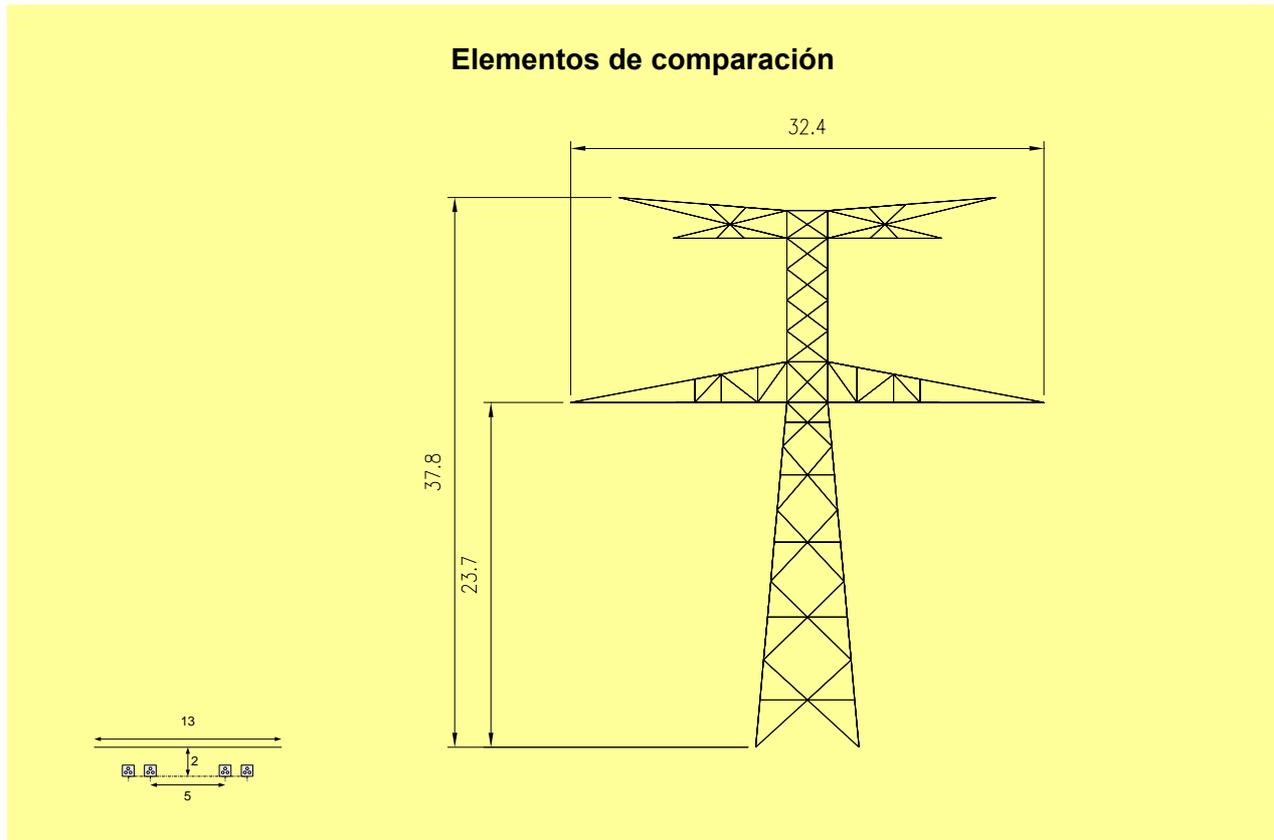


Figura 7 :Comparación geométrica entre una línea de muy alta tensión de doble circuito y su equivalente en cable subterráneo

Los enlaces eléctricos se dimensionan para una necesidad de capacidad de tránsito dada. La necesidad se calcula en función de la evolución previsible del consumo y de la producción. Esta previsión debe hacerse a largo plazo, ya que se considera una vida útil de la obra entre 30 y 50 años. Para adaptar la capacidad de tránsito de una línea subterránea a las exigencias del sistema, existen varias soluciones, que pueden combinarse entre sí:

- Elegir la sección del alma conductora en cobre (existen actualmente secciones de hasta 2500 mm²) o utilizar varios cables por fase;
- Instalar varios circuitos en paralelo (en la mayoría de los casos dos circuitos). Este último punto presenta una ventaja importante en caso de avería en uno de los dos circuitos puesto que el circuito no dañado permanece en servicio. Se permite así, con una capacidad de tránsito eventualmente deteriorada, mantener la conexión eléctrica;
- Utilizar una tierra (terraplenes) térmicamente controlada, constituida por una mezcla de agregados de resistividad térmica baja. Una granulometría adaptada y un apisonamiento cuidadoso permiten una mejor evacuación del calor producido por los cables;
- Utilizar, en caso de instalación en túnel, un sistema de ventilación forzada.

El dimensionamiento inicial de los enlaces subterráneos requiere una atención especial, ya que es muy difícil o de un coste prohibitivo aumentar la capacidad de transporte de una conexión existente. Cambiar el cable por uno de sección mayor equivaldría prácticamente a reconstruir la obra de nuevo, teniendo que volver a hacer los trabajos de excavación. Aumentar el nivel de la tensión de explotación es muy delicado, sobre todo en el ámbito de la muy alta tensión, ya que se calculan las dimensiones del aislante

del cable para una tensión dada (salvo si el cable se sobredimensionó en la construcción). En algunos casos, puede ser posible instalar dispositivos de enfriamiento, como los terraplenes térmicos, en zonas limitadas donde la evacuación del calor es problemática. El incremento de capacidad, cuando es posible, es escaso (alrededor del 10 %). Para las líneas aéreas las posibilidades de aumento a posteriori de la capacidad de transporte son mayores. Una situación muy diferente se produce en las posibles sobrecargas transitorias: las masas de cobre, de aislante, los terraplenes que constituyen una conexión subterránea son tan inmensos que los cambios de régimen eléctrico (aumento o disminución de la corriente) suponen una variación muy lenta de las temperaturas: el sistema tiene una gran "inercia térmica". Esta característica permite un régimen de sobrecarga hasta de un 200% de la capacidad nominal durante una decena de horas sin que se dañen significativamente los componentes del circuito. Sin embargo, es inevitable que el funcionamiento de los cables a una temperatura más elevada que la del régimen nominal acelere el proceso de envejecimiento del aislante y una disminución de su vida útil: por tanto, este modo de funcionamiento no puede prolongarse en el tiempo sin comprometer la fiabilidad de la conexión a largo plazo. Esta capacidad de sobrecarga constituye un activo primordial con relación a las líneas aéreas, que sólo pueden soportar sobrecargas muy limitadas y de muy corta duración debido a la elongación rápida de los conductores con la temperatura, y el riesgo resultante de contacto con la vegetación o con los edificios (es lo que pasó en el apagón europeo del 28 de septiembre de 2003, cuando una línea aérea suiza sobrecargada hizo contacto con árboles vecinos multiplicando la sobrecarga y causando el desencadenamiento en cascada de otras líneas en un "efecto dominó" que dejó sin luz a casi 60 millones de ciudadanos en el sur de Europa).

Elementos de comparación	
<i>Líneas soterradas</i>	<i>Líneas aéreas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento a posteriori de la capacidad de transporte en régimen permanente muy difícil (máximo 10%): necesidad de calcular las dimensiones de la capacidad de la conexión teniendo en cuenta las exigencias a muy largo plazo • Posibilidad de sobrecarga transitoria muy grande (200%) por un período de tiempo de algunas decenas de horas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de aumento de la capacidad de transporte (hasta un 30-50%) mediante sustitución de los conductores; se puede duplicar la capacidad en algunos casos mediante el aumento del nivel de tensión, la instalación de un doble circuito (si los apoyos se dimensionaron a tal efecto), el alzamiento y refuerzo de los apoyos; • Capacidad de sobrecarga transitoria muy limitada (10%) debido a la baja capacidad térmica y la elongación de los conductores que puede hacer contacto con las estructuras o vegetación vecinas

2.3 Necesidad de compensar la potencia reactiva

Hemos visto que los parámetros eléctricos de las líneas aéreas y cables con aislamiento sintético son muy diferentes:

- Dado que la sección de conductor del cable subterráneo es generalmente mucho mayor que la de la línea aérea, la resistencia que el conductor del cable opone al paso de la corriente (y en consecuencia las pérdidas de energía asociadas) es mucho menor.
- La naturaleza misma del cable enterrado y su configuración de construcción hace que el efecto capacitivo propio de los cables sea de 15 a 20 veces más elevado que el de las líneas aéreas;

Esta diferencia de parámetros eléctricos tiene una influencia primordial sobre las longitudes de conexión admisibles para las líneas aéreas y los cables: en efecto, al nivel de muy alta tensión, las líneas aéreas pueden tener longitudes de varios centenares de kilómetros (100 a 300) sin que surjan problemas ni de nivel ni de perfil de tensión. Por el contrario, en el caso de los cables con aislamiento sintético, los parámetros eléctricos limitan la longitud a algunas decenas de kilómetros. El proceso de carga y descarga continuo de la capacidad de los cables requiere la circulación de corriente (llamada "reactiva") que no contribuye a abastecer la carga activa y que limita la capacidad de tránsito de la corriente "activa" en el cable. Más allá de una longitud de cable de algunas decenas de km (límites que dependen de las características de los cables, de la red y de la configuración de instalación) es necesario prever sistemas de compensación; a tal efecto se utilizan "estaciones de compensación" que, instaladas en subestaciones que jalonan el trazado del cable o conectadas a los terminales de los cables proporcionan localmente la potencia reactiva requerida reduciendo las limitaciones de capacidad de transporte de los cables.



Estación de compensación 400 kV 160 MVA

La potencia reactiva necesaria para el funcionamiento de los cables debe generarse en la red por medio de ajustes de los generadores de las centrales eléctricas o utilizando estaciones de compensación. La posibilidad de compensación por medio de las centrales depende de las características de la red local (en particular, la potencia de cortocircuito local) y los procedimientos de operación del operador de la red. Las longitudes máximas admisibles sin compensación dependen pues de las características del proyecto concreto y de la operación de la red: algunos operadores del

sistema compensan localmente toda la potencia reactiva para evitar la circulación de corrientes "no útiles" en las líneas eléctricas. Desde el punto de vista físico la reactiva que debe compensarse es tanto más elevada cuanto mayor es la distancia entre las fases: la instalación en capa horizontal o en túnel es por tanto favorable en este contexto. En la práctica, para una línea de muy alta tensión de cable sintético, la necesidad de compensación de la reactiva comienza a partir de los 30-35 km de longitud de conexión. Para un sistema a 400 kV la potencia de dimensionamiento de las estaciones de compensación de reactiva, cuando resultan necesarias, se calculan para entre 15 y 30 MVAR/km, según las características y el método de instalación de los cables. Es necesario pues prever, para una conexión subterránea a 400 kV de cerca de 50 km, una compensación de reactiva de entre 700 y 1500 MVAR, ajustables para tener en cuenta las distintas configuraciones de la red que garanticen el nivel de flexibilidad requerido. La compensación de la reactiva es especialmente importante cuando las cargas alimentadas son reducidas (en los períodos valle). Es conveniente recordar que en realidad no existe ninguna línea de muy alta tensión subterránea que tenga una tal longitud que sea necesario un sistema de compensación a lo largo de su trazado. Las líneas subterráneas más largas en servicio se compensan únicamente en los terminales.

3 INSTALACIÓN DE UN CABLE DE MUY ALTA TENSIÓN

3.1 Tipología e impacto de las instalaciones [4], [3]

Básicamente, hay dos tipos de instalación:

- **Cables directamente enterrados o instalados en cubiertas enterradas:** el método consiste en cavar una zanja y en colocar cubiertas dentro de las cuales se tenderán los cables. Una instalación directamente en tierra, sin cubierta de protección, puede considerarse en zonas que no tengan ninguna actividad, agrícola o industrial, en la superficie. En efecto, el riesgo de contacto accidental con los cables es entonces muy escaso, y su protección mecánica por tanto inútil. La instalación en zanja abierta es muy interesante porque, a parte de las operaciones de excavación y relleno de la zanja con el material adaptado, no requiere de otras operaciones costosas. La ventaja principal de la técnica en cubierta es acortar la duración de apertura de la excavación puesto que la zanja puede volverse a cerrar antes de que los cables estén tendidos dentro de las cubiertas. Otra ventaja es permitir desviar fácilmente el curso previsto, en caso de obstáculo. En todos los casos, la profundidad de soterramiento así como las protecciones se diseñarán para garantizar la seguridad de las personas y sus bienes. Los cables se depositan

sobre una base dura cuyo objetivo es protegerlos contra el subsuelo (puntas rocosas, etc). El material utilizado para el relleno de la zanja es una arena especial de baja resistencia térmica o un cemento fino; raramente se reutiliza el terreno extraído para rellenar la trinchera. Sobre el terreno se coloca a menudo una losa de protección en cemento. Estas protecciones garantizan que los efectos mecánicos y térmicos que aparecen en un fallo del cable no afectan ni a las personas ni a sus bienes en la superficie del suelo. La profundidad de la zanja es generalmente superior a un metro (1,50 metros a 2 metros): soterrar más profundamente no aportaría ninguna garantía suplementaria en términos de seguridad y sin embargo reduciría la capacidad de transporte de la línea ya que la evacuación del calor sería más difícil.

- En la zanja o en el interior de las cubiertas, los cables se colocan en forma de trébol o en capa horizontal. Estos tipos de instalación permiten aumentar la capacidad de transporte. La anchura de la zanja varía según el nivel de tensión y la disposición de los cables. En particular para cada trocable las anchuras son:
 - Instalación en trébol: aproximadamente 80 cm;
 - Instalación en capa: > 1,0 m.

En el caso de instalación de un doble tricable, son necesarias dos zanjas de aproximadamente 3 metros de ancho, separadas entre 3 a 4 metros para limitar el recalentamiento mutuo, lo que representa en total una zona afectada de cerca de 10 metros de ancho. La configuración de instalación típica para una conexión de doble circuito con doble tricable se muestra esquemáticamente en la **Figura 8** y la **Figura 9** para las configuraciones en trébol y en capa respectivamente.

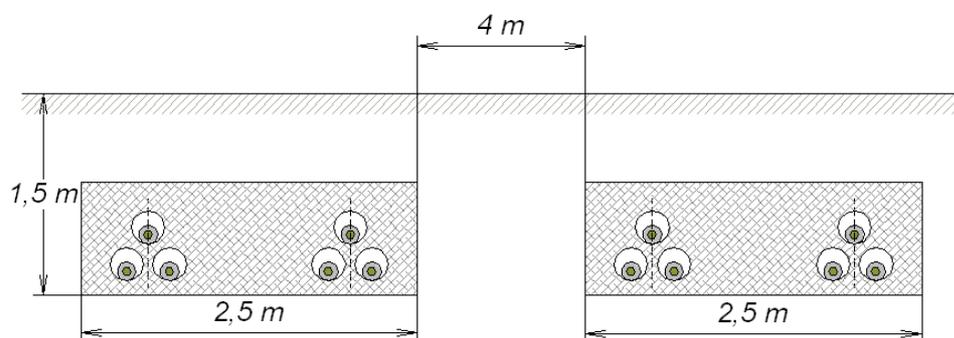


Figura 8 : Esquema de instalación de un doble circuito con doble tricable en trébol

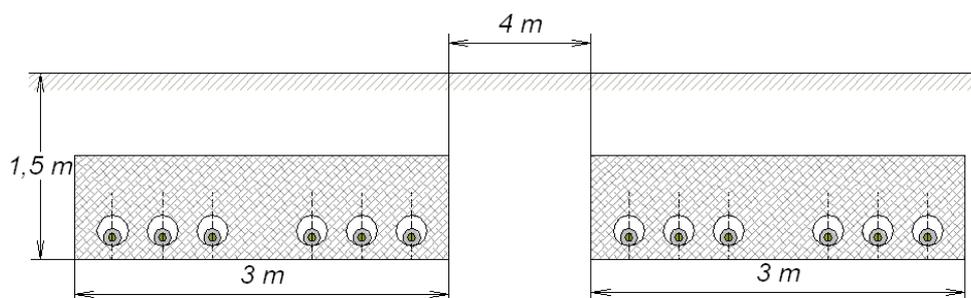


Figura 9 Esquema de instalación de un doble circuito con doble tricable en capa horizontal

El tipo de instalación que genera a priori un menor impacto es el que utiliza el trazado de otras obras lineales (carreteras, autopistas, vías férreas etc.). La instalación de cables soterrados es entonces mucho menos difícil y mucho menos costosa que en construcciones en terreno cultivado. Se muestra un ejemplo de esta sinergia en la **Figura 10**, que muestra la línea enterrada de doble circuito (un tricable por circuito de 8 km en el Norte de Italia, en la periferia de Milán. Esta línea se conecta a una línea aérea de terna simple. Se constata que la construcción de la línea en el borde de la carretera implica un menor impacto, sobre todo si se considera que fue necesario actuar sobre una nueva zona, creando un impacto sobre un terreno virgen y creando nuevas servidumbres, ya que se utilizó la zona ya afectada por la carretera.



Figura 10 : Instalación de un doble circuito a lo largo de una carretera nacional en Italia: reducción de las perturbaciones y uso de sinergias entre las construcciones (2007)

La longitud de la zanja depende de la dimensión de los cables, de los carretes utilizados para su transporte y de las limitaciones impuestas por los problemas de circulación en las zonas urbanas. Raramente, se excava la trinchera y se deja abierta sobre una longitud superior a dos tramos de cable (es decir, alrededor de 1 a 2 km): los tramos de trinchera se cubren sistemáticamente a medida que los cables van tendiendo (en el caso de instalación directamente sobre tierra) o que van confeccionando las cubiertas, en el caso de este tipo de instalación. A lo largo del trazado de una determinada longitud, trabajan en paralelo numerosas obras, para poder respetar los plazos de construcción. En el caso reciente del cable instalado en Milán (véase **Figura 10**), un doble tricable directamente en tierra en zanja abierta a lo largo de una carretera, se llevó a cabo la instalación de 8 km en unos 150 días (4 meses y medio), utilizando 5 equipos de instalación.

Las fotos de figuras **Figura 11** a **Figura 21** muestran ejemplos de obras de instalación de cables de muy alta tensión, en diferentes fases del proyecto y diferentes condiciones.



Figura 11 : Zanja para instalación de cables en el centro de la ciudad – probablemente configuración de tricable simple de alta tensión

(fuente CIGRE 2007)



Figura 12 : Zanja para la instalación de cables a lo largo de una carretera nacional – probablemente configuración de tricable doble en trébol

(fuente CIGRE 2007)



Figura 13 : Zanja para instalación de cables en la periferia de una ciudad – tricable simple en capa

(fuente CESI RICERCA 2007)



Figura 14 : Zanja en terreno raso – tricable simple

(fuente CIGRE 2001)



Figura 15 : Anchura de la zona de obra para instalación de un tricable doble (fuente CESI RICERCA 2007)



Figura 16 : Acondicionamiento de la base de las cubiertas

(fuente RTE 2007)



Figura 17 : Instalación de un tramo de cubierta de tricable simple en trébol

(fuente RTE 2007)



Figura 18 : Instalación de los cables directamente sobre tierra – tricable simple en capa

(fuente CIGRE 2007)



Figura 19 : Transporte de los cables a la obra

(fuente CESI RICERCA 2007)



Figura 20 : Tendido de cables en las cubiertas – tricable simple

(fuente CIGRE 2007)



Figura 21 : Vista de conjunto de la zona de la obra

(fuente CIGRE 2007)

El impacto de la obra está vinculado a los siguientes aspectos:

- La superficie de terreno ocupada por la construcción de la línea subterránea es equivalente a una franja de anchura variable desde 2 m (para la instalación de tricable de muy alta tensión directamente sobre el terreno en trébol) a cerca de 20 m (para la instalación de un juego de 4 tricables en capa) que discurre a lo largo de todo el trazado. Estas dimensiones de anchura incluyen la vía de servicio, la excavación de la zanja en el que se colocarán los cables y el almacenamiento del terreno excavado y la tierra de conductibilidad térmica controlada a utilizar para cubrir los cables. Cada obra supone abrir una trinchera de una longitud equivalente a dos tramos de cable (es decir, alrededor de entre 1 y 1.5 km) que permanece abierta el tiempo de colocar de los cables o las cubiertas y de la confección de las cámaras de unión. La instalación de los cables es muy rápida (se coloca un tramo de tricable de 500 a 800 metros en menos de una jornada). Se vuelve a cubrir inmediatamente la zanja una vez han terminado los equipos de expertos que realizan las uniones. El tiempo de montaje es aproximadamente de 5 semanas por 2 juegos de uniones y se sincroniza normalmente con el desarrollo general de la obra principal. Es necesario, además prever una superficie para depositar definitivamente el excedente de terreno excavado, que tiene un volumen aproximadamente de 30.000 metros cúbicos por kilómetro de línea. Evidentemente, toda vegetación presente en superficie será destruida.
- La naturaleza del suelo deberá ser adecuada para permitir el paso de los camiones con remolques porta-carretes. Hay ligada toda una serie de impactos en el medio ambiente a la presencia de un gran número de camiones, como la contaminación atmosférica y al aumento del ruido, solamente en las horas laborables.
- Una parte importante del impacto de la obra a la zona vecina, en particular con las zonas agrícolas de valor (viñedos, huertas), está vinculada a la presencia de polvo debida a los movimientos de tierra en la excavación. Tal impacto puede reducirse con la adopción de ciertas medidas durante la fase de obra (ejemplo: lavado frecuente de las carreteras, etc.).

- De una manera quizá marginal, será necesario prestar atención a la posibilidad de descubrimientos arqueológicos durante las fases de excavación, lo que implicaría ralentizar los trabajos de instalación de los cables, o incluso una modificación del trazado.

Entre los trabajos de instalación es necesario mencionar la realización de cámaras para las uniones de los tramos que, para el nivel de 400 kV, tienen dimensiones importantes (más de 10 m de longitud y 2 m de anchura y profundidad). En el momento de la disponibilidad de los equipos de expertos para la realización de las uniones, las cámaras, que se habían recubierto precedentemente, se acondicionan. Las uniones deben realizarse al refugio de las perturbaciones locales: se instalan por lo tanto refugios temporales sobre el lugar de cada serie de uniones, como el que se muestra en la **Figura 22**. Las cámaras están constituidas por paredes en secos enterradas que sirven de soporte y protección a las uniones, como lo muestra la **Figura 23**.



Figura 22 : Refugio temporal para la realización de las uniones



Figura 23 : Cámara de uniones

La duración de la obra es variable según los requerimientos y las dificultades de la instalación:

- A pesar de que puede resultar difícil estimar la duración de obra cuando los cables deben colocarse dentro de una ciudad, se puede considerar que en medio no urbano la velocidad de construcción de una longitud de cerca de 1,5 km (longitud equivalente a dos tramos de cable) puede ser por término medio entre 50 y 100 metros al día. En obras de gran envergadura y longitud importante hay muchas zonas de obra al mismo tiempo: por ejemplo, en la construcción de la línea del Norte de Italia, había activas hasta 5 obras en paralelo.

Elementos de comparación	
<i>Líneas subterráneas</i>	<i>Líneas aéreas</i>
<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de producción de los fabricantes internacionales para líneas de doble circuito de tricable doble de larga distancia requiere la participación de distintos agentes: cada línea de producción puede en efecto producir alrededor de 200 km de cable monofásico al año; • Cada obra tiene una longitud equivalente a dos tramos de cable (alrededor de 1,5 km) • El ancho de cada obra es variable entre 3 y 15-20 metros (incluida la vía de servicio o la carretera a lo largo de la cual se desarrolla la obra) • La velocidad media de la obra es de 50 a 100 metros al día en el medio rural, cuando no se encuentran obstáculos considerables. La zona de obra dura por término medio de 25 a 35 días por km de línea • Volumen de tierra removida alrededor de 30.000 m³/km; • Impacto de obra vinculado al polvo, a la circulación de camiones y maquinaria de excavación. 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de producción de los fabricantes internacionales para la realización de una línea de doble circuito de gran envergadura no plantea ningún problema • Obra discontinua a lo largo del trazado: compuesto de muchas obras individuales en cada apoyo (a 500 metros de distancia uno del otro) sobre una longitud total de entre 3 y 5 km • Superficie ocupada en la obra de cada apoyo: de 200 a 500 m²; área accesoria adicional para la tierra del terraplén y depósito de los materiales: 400 m²; superficie ocupada total de obra equivalente: 500-800 m²/km • Velocidad media de desarrollo de la obra: de 30 a 80 m/día: tiempo para los cimientos de los apoyos: 45 a 50 días por apoyo; construcción y erección: de 3 a 10 días por apoyo; instalación de los aislantes: 1 día por apoyo; instalación y tendido de los conductores: 8 días por cada 5 km • Volumen de tierra excavada: 200 m³/km; volumen de cemento inyectado 40 m³/km • Posible necesidad de pistas de acceso • Nivel de ruido de la maquinaria de excavación: 95 dB; martillos neumáticos: 120 dB

- **Instalación en galería:** Se puede instalar los cables en una galería prefabricada instalada en una zanja abierta a lo largo del trazado. Un ejemplo de este tipo de instalación es el enterramiento de un doble circuito en los alrededores del aeropuerto de Madrid. Las dimensiones de una galería son típicamente del orden de 2x2.5 metros en cuyo interior se instalan los cables en soportes fijados a lo largo de las paredes laterales. Esta configuración permite reducir, en algunos casos, el número de circuitos necesarios con relación a la instalación directamente enterrada, para una capacidad de transporte determinada. Otra ventaja de este tipo de instalación es la posibilidad de acceder a los cables en cualquier momento a lo largo de todo el trazado para efectuar las operaciones de mantenimiento y vigilancia. La instalación de dos circuitos en la misma galería plantea el problema de la organización de los trabajos de reparación, cuando se produce una avería en uno de los circuitos: con el fin de garantizar la seguridad del personal y evitar la

inducción de los circuitos contiguos, es necesario poner fuera de servicio todos los cables cercanos, a no ser que se adopten medidas de precaución especiales (instalación de paredes de separación, utilización de galerías separadas etc. Es necesario decir que la fiabilidad de los cables con aislamiento sintético disponibles actualmente hace menos interesante la ventaja de la accesibilidad por túnel. Las **Figura 24** y **Figura 25** muestran los trabajos de nivelación e instalación de la galería prefabricada en la construcción de la línea de Barajas en España y los cables en servicio en la galería.



Figura 24 : colocación de la galería en la zanja – conexión de Barajas en España



Figura 25 : vista interior de la galería de la conexión de Barajas en servicio

- **Instalación en túnel:** se utiliza un túnel cuando no es posible excavar una zanja, cuando se deben instalar numerosos circuitos simultáneamente a lo largo del mismo trazado o cuando es difícil garantizar el transporte de la potencia exigida con la técnica subterránea o la técnica en cubierta. Es el caso por ejemplo de la zona urbanizada o en áreas con gran desnivel. El túnel debe tener dimensiones suficientes para garantizar el paso de la maquinaria de instalación y mantenimiento: eso supone un túnel de 3,5 metros de diámetro. Una vez construido el túnel, la instalación de los cables se realiza a lo largo de los muros. Se instala a menudo un sistema de refrigeración para mejorar la evacuación del calor. La **Figura 26** y la **Figura 27** muestran ejemplos de este tipo de instalación.

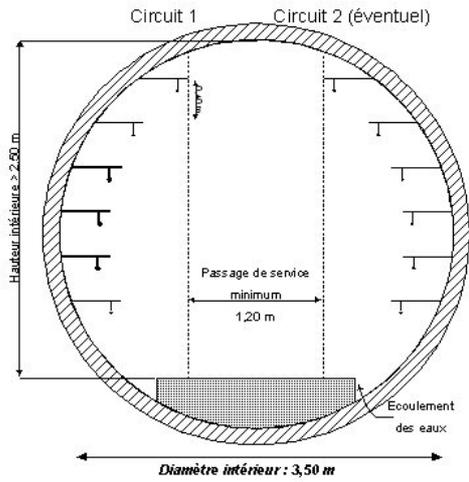


Figura 26 : Sección de una línea eléctrica de 400 kV en galería



Figura 27 : instalación en túnel Berlín - Bewag

- Utilización de construcciones existentes (túneles, viaductos etc.)



Figura 28 : Instalación de cables integrados en la estructura de un viaducto

A pesar de que existe la posibilidad de utilizar los viaductos (ferroviarios o de carreteras) (**Figura 28**) para la sujeción de cables de potencia y para atravesar obstáculos, es generalmente imposible utilizar los túneles existentes, excepto cuando se diseñan en origen para acoger cables de potencia o si están provistos de una galería de servicio. En efecto, si la concepción inicial del túnel no prevé la ampliación de equipamientos, no habrá espacio suficiente para poner en práctica los mecanismos constructivos requeridos que garanticen la explotación en toda seguridad de la conexión eléctrica, tanto para las personas como para las

instalaciones existentes. Además, en caso de reparación de una avería en el cable eléctrico, la circulación deberá interrumpirse durante varios días. Por último, una gran corriente eléctrica en los cables puede perturbar los sistemas de señalización y de seguridad. No obstante, esta última dificultad puede evitarse con unos trabajos adaptados a las circunstancias.

4 OPERACIÓN DE LOS CABLES DE MUY ALTA TENSION

El mantenimiento de una conexión subterránea, al menos con cables con aislamiento sintético, es casi nulo. Basta con garantizar periódicamente que no se presenta una vegetación incompatible sobre el trazado de la línea y con comprobar la integridad de la conexión subterránea.

Los fallos de las líneas subterráneas principalmente se deben a daños causados durante los trabajos de nivelación y por averías de los accesorios (uniones). Las averías en el cable propiamente dicho son más raras: los cables en efecto no se someten a la mayoría de los fenómenos meteorológicos que pueden afectar a las líneas aéreas (rayo, viento, nieve, contacto accidental con la vegetación etc.)

Mientras que para las líneas aéreas, la operación de reenganche automático permite con frecuencia volver a poner inmediatamente la línea en tensión (con ocasión de fallos "fugitivos" como, por ejemplo, cuando la interrupción es causada por un rayo, por un contacto accidental con una parte de la línea en tensión o también por una contaminación elevada de los aislantes), no es generalmente posible con las líneas subterráneas para las cuales las averías son de tipo permanente.

Las puestas fuera de servicio para los cables son generalmente inferiores en número a las interrupciones registradas para las líneas aéreas para una longitud de red equivalente: son no obstante más largas porque son necesarios normalmente algunos días para la localización del lugar de la avería y a veces las operaciones de reparación o sustitución total de los elementos afectados por la avería duran algunas semanas. La elección del número y la dimensión de los cables que deben instalarse en el proyecto de una nueva línea, así como su método de instalación (en circuitos independientes) pueden limitar estos inconvenientes.

5 IMPACTO PERMANENTE DE LOS CABLES DE MUY ALTA TENSIÓN

- **Área de terreno afectada permanentemente:**

Al final de los trabajos de construcción, el terreno ocupado se reduce a un ancho de entre 3 y 10 metros (para un juego de dos trocables dobles), que puede dividirse en dos pasillos de cerca de 3 metros cada uno a los bordes de una vía de circulación o de una vía de servicio. La consecuencia principal reside en la imposibilidad de mantener vegetación con raíces profundas sobre un ancho de al menos 2 metros a cada lado del cable. La presencia de raíces cerca de los cables puede dañarlos y causar que se seque el suelo, dificultando la disipación de las pérdidas. Se tolera una vegetación rasa o de cultivos con escaso arraigo. Hay, además, con un intervalo de 500-1000 metros, cámaras de unión enterradas de dimensiones 20x2x2 metros para el acceso a los cables. Para distancias de más de 20 o 30 kilómetros es necesario, finalmente, prever estaciones de compensación de reactiva. La influencia in situ de una estación de compensación de reactiva modelo se muestra en la **Figura 29** (en el caso de la figura se considera una estación calculada para dimensiones de 250 MVAR). Es necesario tener en cuenta que, para garantizar la flexibilidad de la operación la red, la compensación de la potencia capacitiva de los cables se distribuye normalmente en los dos terminales de la conexión. Cuando es necesaria la compensación, se utilizan normalmente dos estaciones de compensación.

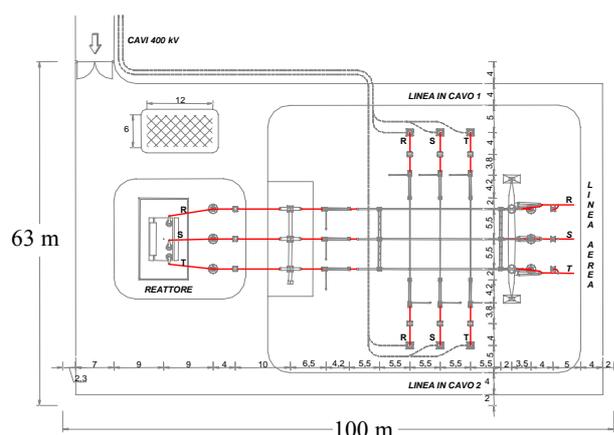


Figura 29 : dimensiones de una estación de compensación de reactiva para un cable de 400 kV

- **Impacto sobre la vegetación:**

El impacto en la flora y la vegetación de este tipo de línea eléctrica es muy significativo. Hemos visto que durante la fase de obra es necesario disponer de una superficie de terreno "limpia" (tala y pérdida temporal de cultivos agrícolas) equivalente a la longitud del trazado por una anchura correspondiente a la superficie de obra, y, durante la fase de funcionamiento, una limitación de las especies vegetales cultivables. La energía térmica producida por la línea en funcionamiento podrá inducir un efecto de secado del terreno alrededor o una fuerte erosión en caso de inundaciones.

- **Impacto sobre las aguas superficiales o subterráneas:**

Tratándose de una tecnología subterránea, no es necesario descuidar el impacto sobre las aguas superficiales y subterráneas, sobre todo en zonas de alta explotación de las capas acuíferas con fines agrícolas. Atravesar el curso de aguas de cierta importancia puede constituir, además un elemento de atención, no sólo desde un punto de vista técnico, sino también frente a las distintas utilizaciones posibles de dichas aguas y a la presencia de fauna acuática.

- **Impacto visual:**

El impacto visual se debe principalmente a las necesidades de tala: es pues un impacto muy reducido pero no nulo.

- **Influencia en los terrenos:**

No se podrá construir en el ancho del trazado. Debe mantenerse un acceso permanente al conjunto del trazado con el fin de poder intervenir cuanto antes en caso de avería.

- **Ruido:**

La conexión subterránea no genera ningún ruido a lo largo del trazado, exceptuando posibles zumbidos en los terminales (que se confunden con los de los otros componentes eléctricos de las subestaciones de los extremos) o el de los subestaciones de transición en el caso de conexiones aero-subterráneas o las posibles estaciones de compensación;

Elementos de comparación	
Líneas subterráneas	Líneas aéreas
<ul style="list-style-type: none"> • Influencia permanente en el terreno: ancho de 3 a 10 metros en el que no se puede construir y con posibilidades de cultivo limitadas; • El terreno puede resecarse a lo largo del trazado de la línea • El impacto en las aguas superficiales puede ser significativo • El impacto visual es prácticamente nulo, si se exceptúan las subestaciones de los extremos y las posibles estaciones de compensación • Es necesario tener en cuenta la influencia permanente vinculada a las estaciones de compensación, en caso de que fueran necesarias (2500 a 5000 m² según la potencia reactiva) 	<ul style="list-style-type: none"> • El principal impacto de una línea aérea es la perturbación visual causada por la presencia de los apoyos y los conductores. • Una línea aérea puede ser fuente de una determinada contaminación sonora, esencialmente en casos de mucho viento (ruido alrededor de los cables y de la estructura de los apoyos) o de tiempo húmedo (efecto "corona" que se traduce en un zumbido perceptible bajo la línea). • Una línea aérea supone pocas construcciones en cuanto a la imposibilidad de construir, poco impacto sobre la biodiversidad (exceptuando la avifauna) y permite la plantación de especies de árboles de talla pequeña.

- **Campos electromagnéticos :**

El efecto de pantalla ejercido por las cubiertas conductoras de los cables permite anular el campo eléctrico. El perfil del campo magnético a 1 metro de altura sobre el suelo para una conexión en doble circuito con dos tricables por circuito se muestra en la **Figura 30**, considerando condiciones nominales de funcionamiento, es decir, una corriente de 2000 A sobre cada circuito. El campo magnético puede alcanzar alrededor de 10 μ T encima de un circuito pero disminuye muy rápidamente en cuanto al alejarse (se divide por 5 a 5 metros y por 15 a 10 metros). El valor del campo magnético es uniforme a lo largo del trazado de la línea y aumenta al acercarse al suelo.

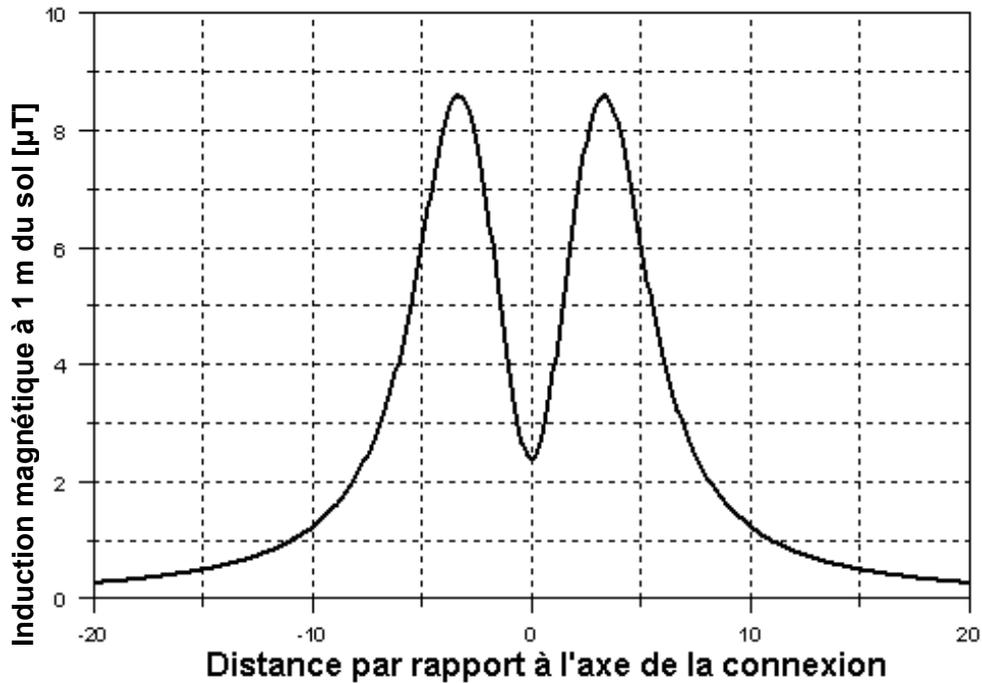


Figura 30 : Perfil de inducción magnética a 1 m del suelo para un doble circuito con tricable doble

Si se desea reducir el campo magnético emitido (por ejemplo en proximidad de viviendas etc.) la técnica de instalación puede incluir la utilización de pantallas (naturalmente aumentando los costes de instalación). Se indica un ejemplo de utilización de pantalla magnética en la **Figura 31**



Figura 31: pantalla magnética – la configuración mostrada es de un tricable

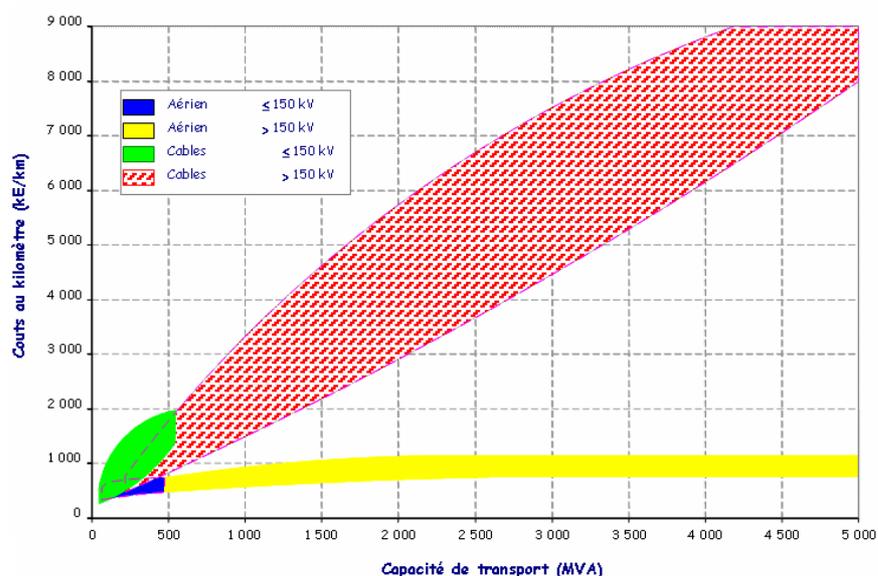
Elementos de comparación	
Líneas subterráneas	Líneas aéreas
<ul style="list-style-type: none"> • Campo eléctrico nulo fuera de la cubierta • Campo magnético de cerca de 10 μT sobre el cable (el valor depende fuertemente de la configuración de instalación); perfil uniforme a lo largo del trazado; el campo magnético aumenta al acercarse al suelo • Radio (para un tricable simple en trébol) de 3 μT: 16 m • Radio (para un tricable simple en trébol) de 0.2 μT: 60 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Campo eléctrico de aproximadamente 5 kV/m a 1 m del suelo que disminuye a 0,5 kV/m a 50 m del eje de la línea • Campo magnético de 10-15 μT (valor que depende de la configuración de los conductores y de la altura de los apoyos); campos variable a lo largo del trazado, con disminución considerable al acercarse a los apoyos (dónde los conductores están más distantes del suelo); los campos magnéticos disminuyen en el suelo; • Radio (para una línea aérea de un circuito) de 3 μT: 70 m • Radio (para una línea aérea de un circuito) de 0.2 μT: 300 m

6 COSTE DE UN CABLE DE MUY ALTA TENSIÓN

6.1 Costes de inversión

Para una potencia que de transporte importante que requiera dos circuitos, el coste de base incluyendo los equipos (cables y uniones), la ingeniería civil (zanja, recubrimiento) y la mano de obra está en una banda de 4 a 8 M€/km en zona rural para un tricable doble, según la naturaleza del suelo (rocoso o no), las condiciones de acceso, las inclemencias del tiempo, etc. La **Figura 32** muestra los costes de inversión medios para la instalación de cables y líneas aéreas en terreno llano en función de la capacidad de transporte requerida.

Figura 32 – Coste por kilómetro en función de la capacidad de transporte (fuente: Jicalble 2007)



Este coste excluye los equipos de fábrica (galerías o túnel) o los pasos de obstáculos por paso subterráneo (perforaciones dirigidas) así como los dispositivos de compensación de capacidad necesarios por las grandes longitudes (de 20 a 30 km). El paso de obstáculos como cursos de agua, vías de tránsito rodado o vías férreas exigen la utilización de técnicas y materiales específicos (excavación o perforación dirigida). En estas situaciones más críticas los costes de inversión incluso pueden sobrepasar ampliamente los 10 M€/km. El coste de inversión de una conexión subterránea de 400.000 voltios de alta potencia no puede calcularse a priori, al ser la variabilidad tan grande. Sólo un estudio sobre un caso real es pertinente.

Desde el punto de vista de la compensación de la reactiva se indican las cifras orientativas siguientes:

- Coste de inversión del material eléctrico de compensación: 6 k/MVAR (se considera como orden de magnitud una potencia de compensación del 75% para un doble circuito de 20 MVAR/km)
- Coste de inversión de la estación de compensación (obras de ingeniería civil, materiales eléctricos, sistema de telemando etc.): 750 k€
- Coste de inversión de los 6 terminales de cable (si la subestación no es una antena) con su soporte: 300 k€

El coste total de una subestación de transición aero-subterránea de muy alta tensión para una línea de doble circuito que se conecta a una línea en cable en túnel (2 circuitos) se calcula en aproximadamente 450 k€. Es necesario considerar que para un sifón son necesarios 2 subestaciones de transición.

Un ejemplo comparativo de los costes de inversión para una línea enterrada en terreno llano a lo largo de una infraestructura tecnológica existente (por ejemplo a lo largo de una carretera, o a lo largo del pasillo de una vía férrea etc.) sin retos técnicos especiales (paso de aglomeraciones urbanas, paso de montañas etc.) se muestra en la **Figura 33**. Se muestran los costes de inversión en función de la longitud de línea sobre una gama de 10 a 100 km, y para un porcentaje de enterramiento variable del 0% (línea aérea) al 100% (línea enteramente subterránea). Se tienen en cuenta, a partir de las longitudes pertinentes los costes de las estaciones de compensación, de las subestaciones de los extremos y las subestaciones de transición, en caso necesario. Se puede constatar que todos estos últimos elementos no tienen prácticamente influencia sobre el perfil de los costes, que está esencialmente vinculado a la instalación de la obra principal.

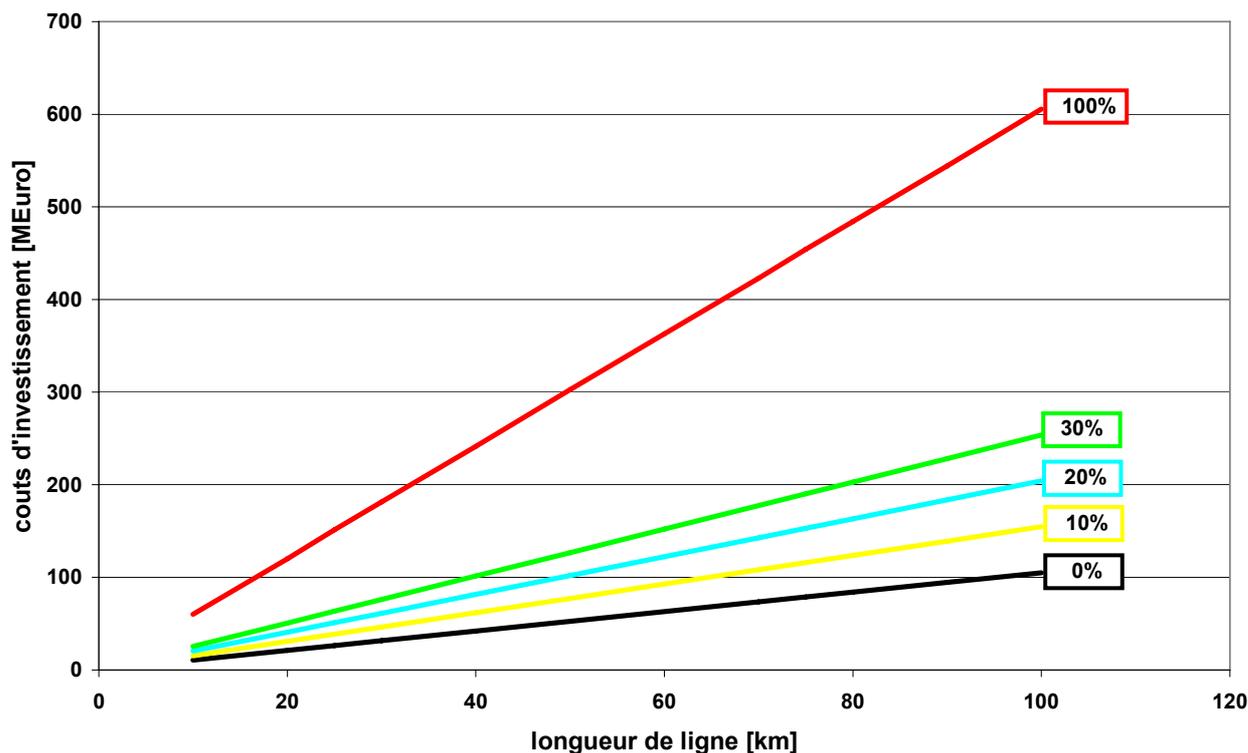


Figura 33 : Costes de inversión en función de la longitud de la línea para diferentes tasas de soterramiento

6.2 Costes de gestión y desmantelamiento

Los costes de gestión, que incluyen la vigilancia, el mantenimiento, el seguimiento de las líneas y de sus alrededores considerando una vida útil de 30 años pueden estimarse en menos de 1000 €/km, lo que es casi despreciable; dado que además las pérdidas por efecto Jules son menores, gracias a las gruesas secciones de los conductores, el coste se reduce a 120 k€/km (teniendo en cuenta los siguientes parámetros: coste de energía: 0.035 €/kWh, tasa de actualización 6.5%, vida útil estimada: 30 años, corriente en temporada invernal: 1000 A, corriente en temporada estival: 850 A).

Por lo que se refiere a la compensación de la reactiva, los datos de la literatura internacional son los siguientes:

Coste de gestión de una estación de compensación (sobre una vida útil estimada de 30 años): despreciable

Coste de las pérdidas de una estación de compensación (considerando el coste de la energía: 0.035 €/kWh, el tipo de actualización 6.5% y una vida útil estimada de 30 años): 9 k€/MVar

Coste de desmantelamiento de una estación de compensación: 0.2 k€/MVar

Se muestra una representación simplificada del coste del ciclo de vida en función de la longitud de la línea y para distintos tipos de soterramiento en la **Figura 34**. Con relación a la figura anterior se observa la influencia de las pérdidas de las estaciones de compensación, que deforma ligeramente la curva de los costes de las opciones subterráneas y se constata una ligera aproximación relativa de las curvas extremas causada por la influencia de las pérdidas de la opción aérea, que son más importantes que las de los cables enterrados. Es necesario constatar, sin embargo, que en todos los casos los costes de inversión son los que tienen una influencia primordial.

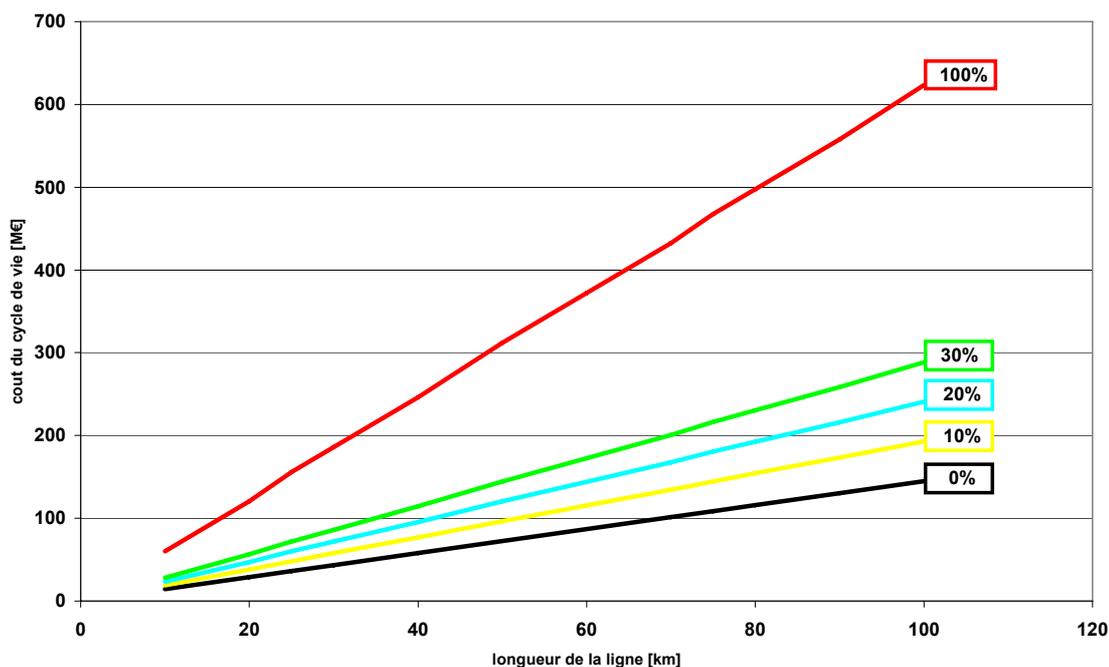


Figura 34 : Costes del ciclo de vida en función de la longitud de la línea para diferentes tipos de soterramiento

Elementos de comparación	
Líneas subterráneas	Líneas aéreas
<ul style="list-style-type: none"> • Costes de inversión en zona rural sin grandes obstáculos: entre 4 y 8 M€/km para un tricable doble; • Es casi imposible estimar a priori los costes de construcción en caso que haya obstáculos considerables: es necesario realizar un estudio detallado para las circunstancias específicas. En estas situaciones, los costes de inversión pueden superar sobradamente 10 M€/km • Costes de compensación de reactiva (necesario si la longitud de la conexión sobrepasa 25 o 30 km): 150 k€/km • Coste de un par de subestaciones de transición aero-subterránea: 900 k€ • Costes de operación y de mantenimiento (O&M): despreciables en relación al coste de inversión • Coste de las pérdidas: 2% del coste de inversión • Coste de desmantelamiento al final de la vida útil: 0.08% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> • Costes de inversión en zona rural: 0.6 à 1 M€/km • Costes de los tramos de montaña : 1.5 à 2 M€/km • Costes de operación y mantenimiento (O&M) : 2.5-3% del coste de inversión • Coste de las pérdidas : 40% del coste de inversión • Coste de desmantelamiento al final de la vida útil: 0.05% del coste de inversión

7 LÍNEAS MIXTAS AERO-SUBTERRÁNEAS

Las soluciones aero-subterráneas se denominan “sifones”: están constituidas básicamente por dos tramos de línea aérea conectadas por un cable (ver **Figura 35**).



Figura 35 :esquema de un sifón

Esta solución tecnológica se utiliza para atravesar valles o ríos cuya anchura supera el alcance máximo de una línea aérea, o para ocultar un tramo de línea en zonas protegidas o densamente pobladas. La transición entre la línea aérea y la línea subterránea se hace sobre un apoyo o por una subestación denominada "subestación de transición". Casi todas las conexiones subterráneas de muy alta tensión son del tipo mixto aero-subterráneo; es en efecto muy raro que una conexión de gran longitud esté enterrada completamente.

En Dinamarca ha entrado en servicio recientemente una instalación que utiliza la tecnología mixta.

7.1 Proyecto ELTRA en Jutlandia – Dinamarca

El proyecto sirve para cerrar el anillo 400kV de Jutlandia en Dinamarca. Consiste en una conexión de muy alta tensión entre las ciudades de Aalborg y Arhus. Los Ministerios daneses de Energía y de Medio Ambiente tomaron la decisión de realizar la nueva línea para crear una espina dorsal sólida y estable, que pudiera acoger en el sistema eléctrico una gran potencia proporcionada por unidades de producción dispersas constituidas de pequeños grupos de ciclo combinado y de aerogeneradores. En efecto, las variaciones importantes de producción deben ser compensadas con una capacidad de reacción de la red que debe ser capaz de transportar grandes cantidades de energía distancias importantes para contrarrestar esta variabilidad de la producción.

La conexión, de una longitud total de 140 km, es principalmente aérea, con tres tramos enterrados, para alcanzar una longitud total subterránea de 14 km. La construcción de la línea fue la ocasión para ocultar una serie de tramos de línea de 150 kV en las superficies urbanas. El coste total anunciado fue de 140 M€. El tipo de cable (dimensionamiento) utilizado, así como las condiciones de instalación, que son muy particulares permitieron reducir de manera muy significativa la previsión del coste de enterramiento, que, en el caso específico se calculaba en 4.5 según los datos comunicados.

Una particularidad de esta construcción son las dimensiones del cable subterráneo: éste se efectuó teniendo en cuenta el principio de equivalencia entre la capacidad de transporte a corto plazo de la línea aérea y el cable enterrado: las dimensiones de la línea aérea se calculaban para una capacidad de 2000 MVA (2800 A) y su carga máxima (vinculada a la elongación de los conductores con la temperatura y por lo tanto su aproximación a la tierra) estaba limitada a apenas algunos minutos. Las dos líneas subterráneas conectadas en paralelo tienen una capacidad total de 1000 MVA (1400 A). Los cables subterráneos pueden funcionar sobrecargados durante 30 horas a 2000 MVA. Cada cable puede explotarse a 800 MVA durante alrededor de 100 horas, para permitir la realización de operaciones de mantenimiento sobre una terna de la línea aérea, limitando las carencias causadas al funcionamiento de la red. Se instaló un sistema de seguimiento de la temperatura del conductor de los cables para monitorizar la capacidad de transporte. Estas consideraciones condujeron a adoptar la solución de cable subterráneo con conductor de 1200 mm², aislado en XLPE de un grosor de 28 mm., blindado por una pantalla compuesta de 117 hilos de 1.8 mm. de diámetro.

Esta instalación es la primera instalación de cables de muy alta tensión directamente enterrados en zonas agrícolas y parques naturales. La línea se puso en servicio en agosto de 2004.

La estructura de los cables utilizados en los tramos subterráneos y submarinos implica una sección de conductor muy reducida con relación a la capacidad de transporte tenida en cuenta y una dimensión del aislamiento en el límite inferior de la tecnología, con el fin de limitar los costes de construcción. Las modalidades de instalación de los cables se muestran en la **Figura 36**: los cables se entierran directamente sobre una capa de arena sin túnel ni cubierta: esta solución permite reducir los costes de instalación pero limita las posibilidades de explotación de las líneas (capacidad de carga, fiabilidad, accidentes potenciales) y del terreno (nivel de campos electromagnéticos).

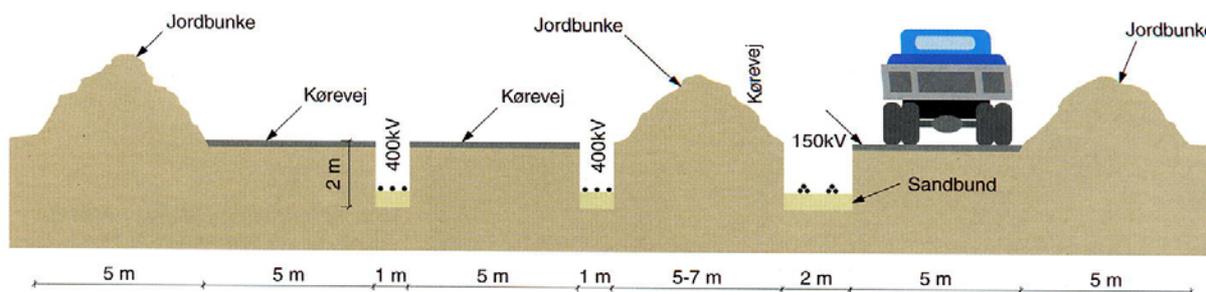


Figura 36: Tipo de instalación de los tramos subterráneos de la línea danesa

Los cables con aislamiento sintético, como ya hemos visto, se conectan a la red por medio de terminales. Los terminales se colocan normalmente dentro de una subestación, excepto en el caso de los sifones donde pueden colocarse directamente sobre un apoyo de la línea aérea, cuando las dificultades de nivel de tensión, de protección de las personas, de impacto visual, de protección contra los actos de vandalismo lo permiten. Esta solución se muestra en la **Figura 37**. En el caso de líneas de muy alta tensión, el peso de los equipamientos y los espacios de separación que son necesarios para garantizar el comportamiento dieléctrico imponen la utilización de subestaciones de transición, que son superficies cerradas próximas al apoyo aéreo, en las cuales se colocan, como en una subestación eléctrica, todos los equipamientos necesarios para la transición. Esta solución se muestra en la **Figura 38**



Figura 37: terminales de cable colgados a un apoyo de línea aérea de alta tensión a 130kV



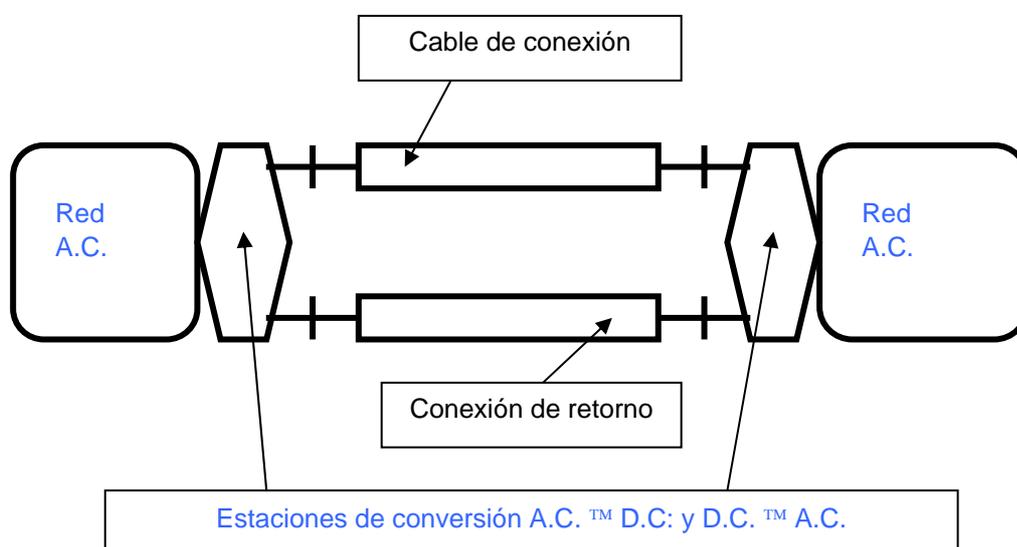
Figura 38: subestación de transición aero-subterránea en una red de muy alta tensión

Es necesario prever un dispositivo de protección específico del cable contra los defectos de aislamiento. Este sistema de protección no debe interferir con el sistema propio de la parte aérea y debe poseer una alimentación eléctrica específica.

8 OTRAS ALTERNATIVAS: CONEXIONES EN CORRIENTE CONTINUA

En el estado actual de la tecnología, si se considera una línea de gran envergadura en términos de capacidad de transporte y distancias que deben recorrerse, la única solución alternativa a las líneas aéreas y subterráneas en corriente alterna que puede tenerse en cuenta es la tecnología de muy alta tensión a corriente continua. Es, en efecto, muy poco probable que las líneas con aislamiento gaseoso (cuyas aplicaciones están limitadas en todo el mundo a algunos centenares de metros) o que las tecnologías con superconductividad (que actualmente forman parte aún del ámbito del laboratorio o demostración in situ) puedan tener una expansión y un desarrollo tales para desempeñar un papel significativo a corto o medio plazo. En cualquier caso, con el fin de completar la información técnica, adjuntamos en anexo los detalles de la reciente evolución de estas dos tecnologías, sobre la base de los informes redactados en 2003 y 2006, con motivo de los debates públicos Francia- España y - Maine Cotentin.

El esquema de principio de funcionamiento de una conexión en corriente continua es el siguiente:



AC : corriente alterna

DE : corriente continua

Las dos redes de corriente alterna se conectan a través de una conexión en corriente continua, constituida por una estación de conversión de salida en la cual se convierte la corriente de alterna a continua, un cable de enlace en el que pasa la corriente que alimenta la segunda red y una estación de conversión de llegada en la cual se convierte la corriente de continua a alterna. Una conexión de retorno es necesaria para garantizar el cierre del circuito y en consecuencia el flujo de la corriente; esta conexión puede cerrarse por el agua del mar (en el caso de una interconexión marina) a través de electrodos situados en cada extremidad de la conexión. La descripción detallada de los componentes de una conexión en corriente continua y su misión se adjunta a este informe.

A continuación se resumen las características, comparándolas a las de las otras tecnologías tenidas en cuenta, es decir, la línea aérea en corriente continua y la línea (parcialmente) enterrada en corriente alterna

Los sistemas de muy alta tensión en continua pueden tener dos tipos de configuración, según el tipo de convertidor utilizado:

- **LCC** (Line Commutated Converters): convertidores de conmutación de línea, cuyos elementos básicos son tiristores: se desarrollaron a partir de los años 50 (en la época los tiristores eran de vapor de mercurio, mientras que actualmente son componentes de electrónica de potencia basados en el silicio) y se basan en una tecnología muy consolidada y estable. Se han adaptado para el transporte de grandes cantidades de energía a los más elevados niveles de tensión (el nivel +- 600 kV está completamente estabilizado, mientras que se desarrollan actualmente para el mercado chino los componentes de línea y subestación para el nivel de 800 kV); este sistema requiere importantes redes aguas arriba y aguas abajo, y permite el flujo de potencia en los dos sentidos. Son necesarios filtros y bancos de condensadores para la producción de la reactiva necesaria para su funcionamiento;
- **VSC** (Voltage Source Converter): convertidor de fuente de tensión, cuyos elementos básicos son los IGBT (Transistor Bipolar Rejilla Aislada) y cuyo desarrollo es más reciente y basado en las repercusiones de la electrónica de potencia moderna. Esta tecnología, desarrollada al final de los años 90 están difundiendo en todo el mundo gracias a sus costes competitivos y a su mayor simplicidad. La tecnología no requiere grandes redes aguas arriba y aguas abajo (no hay necesidad de compensar la reactiva por medios exteriores) y es muy interesante para transportar hasta tierra la energía producida por los eólicos en pleamar. Las aplicaciones actualmente en uso son para potencias de 800 MW como máximo (para dar la equivalencia de una línea 400 kV en doble terna sería necesario diseñar 2 sistemas en paralelo). Dado que esta opción tecnológica es muy reciente para los niveles de potencia que se refieren a este estudio, la citamos sin profundizar en los detalles.

Esta opción, como vimos con anterioridad, requiere dos estaciones de conversión AC/DC (una aguas arriba y la otra aguas abajo) para poder conectarse en la red a alta muy tensión. Estas estaciones, muy costosas y que exigen mucho espacio, limitan de hecho la aplicación de esta tecnología. Las estaciones están equipadas de los siguientes elementos principales:

- Filtros c.a.;
- Transformadores de conversión;
- Convertidores: Rectificadores (estación de salida) o inversores (estación de llegada);
- Filtros c.c.

Desde el punto de vista de la tecnología de transporte de electricidad, la opción en corriente continua implica dos aspectos:

- Línea aérea en corriente continua
- Línea enterrada en corriente continua

Línea aérea:

Las líneas aéreas en corriente continua tienen los mismos elementos constitutivos básicos que las de corriente alterna: los apoyos en apoyos tipo "celosía", las cadenas de aislantes, los conductores (hay 2 en vez de 3 o 6) y los accesorios mecánicos; sin embargo, las características técnicas de cada componente son específicas para la aplicación en corriente continua debido a las distintas capacidades dieléctricas en diferentes condiciones. Es necesario observar en primer lugar que la capacidad de transporte de una línea en corriente continua es claramente más elevada que la de una línea en corriente alterna del mismo galibo. Se muestra un ejemplo visual en la **Figura 39** en la que se comparan dos líneas de muy alta tensión que tienen una capacidad de transporte similar: una línea a 800 kV en corriente alterna que tiene

una capacidad de transporte de 2000 MVA y que ocupa un pasillo de 75 m y una línea a 500 kV en corriente continua, con capacidad de 3000 MW y que ocupa un pasillo de 50m de anchura.



Figura 39: comparación de envergadura entre una línea aérea en corriente alterna y una línea aérea en corriente continua de la misma capacidad

El mismo concepto se muestra en la **Figure 40**, que se refiere a la línea HVDC que conecta la central hidroeléctrica de Tres Gargantas en China a la ciudad de Shangai (línea en construcción): las dos líneas 500 kV en corriente continua se comparan, en término de empleo de terreno, a las 5 líneas que serían necesarias para obtener la misma capacidad de transporte (2 x 3000 MW).

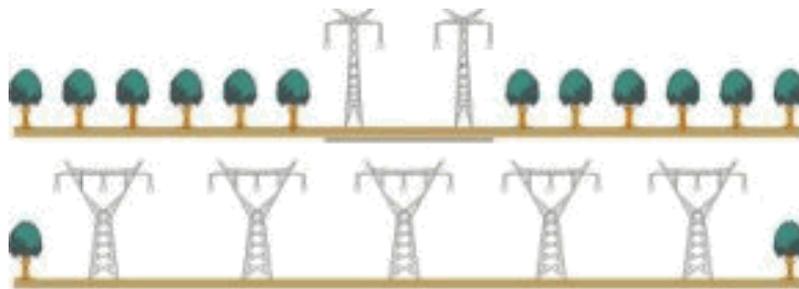


Figure 40 : comparación de la anchura de pasillo requerida para las dos líneas HVDC 500 kV Tres Gargantas - Shangai y para las líneas HVAC con la misma capacidad de transporte

Contrariamente a las líneas convencionales, las líneas HVDC no presentan campo magnético de baja frecuencia sino únicamente un campo fijo, muy inferior al campo magnético terrestre: el impacto medioambiental se reduce consecuentemente.

Por lo que se refiere a los cables (soterrados o submarinos),
las tecnologías de construcción son las siguientes:

- **Cables con aislamiento de aceite fluido** (Self-Contained fluid filled cables - SCFF): su sistema de aislamiento está formado por papel que se impregna de un fluido sintético de baja viscosidad (aceite) que se mantiene constantemente a presión en un conducto practicado en el centro del conductor: esto supone una limitación del nivel de profundidad máxima de la instalación; esta solución, utilizada desde hace muchos años, es adecuada para grandes flujos de energía bajo condición de no superar una temperatura en el conductor de 85°C, debido a la presencia del aceite; la presencia de un fluido en circulación supone la adopción de circuitos hidráulicos y estaciones de bombeo en las extremidades. Una posible fuga de aceite constituye un peligro potencial para el medio ambiente;
- **Cables con aislamiento sólido:** son cables cuyo sistema de aislamiento está constituido por papel de alta densidad impregnado de una mezcla densa. En contraste con los cables con aislamiento de aceite fluido, la mezcla de impregnación no circula en el conductor dentro del cuerpo del cable, sino que sigue prácticamente sin moverse de su posición de origen. Actualmente, se pueden realizar conexiones de varios centenares de kilómetros utilizando esta tecnología; los límites técnicos son 600kV de tensión y 55°C de temperatura. Este tipo de cable se empleó recientemente para la construcción de la interconexión submarina en corriente continua entre Italia y Grecia (enlace a 400kV, 500MVA, longitud 160km).
- **Cables con aislamiento mixto papel-polipropileno** (PPL): son cables cuyo sistema de aislamiento está constituido por papel de alta densidad impregnado de una mezcla viscosa, pero cuyas capas de papel están separadas por películas de polipropileno; esta solución de reciente desarrollo combina las ventajas de las dos tecnologías anteriores; con relación a la solución de aislamiento sólido permite una ganancia entre 25 y 50% de potencia transportada, o una reducción del 30% de las dimensiones para una misma capacidad; esta ventaja permite una reducción del diámetro del 10%, del peso en aire del 20% y del peso en agua del 25%. La utilización de este tipo de cable permite por tanto tener tramos considerablemente más largos y transportar en la plataforma de instalación un 25% más de cable de con relación a la tecnología de aislamiento sólido.

Los métodos de instalación de los cables HVDC pueden compararse a los de los cables en corriente alterna, con una ventaja muy importante constituida por el hecho de que la conexión implica entre 2 y 4 cables (+ 1 cable para el retorno de la corriente) en vez de 12 cables. Las zanjas son más estrechas y el impacto en el medio ambiente es por lo tanto menor. La **Figura 41** muestra la instalación de un cable en tensión continua a +- 300 kV en Australia, a lo largo de una carretera. Destaca la gran simplicidad de instalación.

Figura 41: obra de instalación de un cable HVDC en Australia



En los tramos de instalación más compleja se pueden usar las técnicas modernas de instalación: la **Figura 42** muestra también la instalación australiana.



Figura 42: utilización de técnicas modernas de instalación automatizada en las zonas rurales de Australia

Dado que las dificultades de transporte por carretera son las mismas que para los cables convencionales, las etapas de instalación implican la realización de terminales y uniones. Esto se hace como de costumbre, preparando refugios provisionales (véase **Figura 43**) a lo largo del trazado. Es importante observar que el número de uniones es en mucho menor debido a la presencia de una cantidad de cables mucho menos elevada.



Figura 43: estructura provisional para la realización de las uniones

El impacto de una línea HVDC, en términos de influencia sobre el terreno, duración de la obra, impacto de la obra, velocidad media de avance, influencia permanente, interferencias, son comparables a los de una línea en corriente alterna de tecnología similar (aérea o soterrada). Dos diferencias principales subsisten:

- La ausencia de campos magnéticos de baja frecuencia

- La presencia de las estaciones de conversión en los extremos, que ocupan cada una una superficie de cerca de 30m²/MW, sin contar las acometidas y los juegos de barras de 400 kV. Para un estación de 4000 MW en bipolar es necesario por tanto contar una superficie de cerca de 120 000 m²

8.1 Coste de inversión

- Estaciones de conversión:

Los costes de inversión para las estaciones de conversión están compuestos por los costes de adquisición de los equipos y los costes de infraestructuras. Por lo que se refiere a los equipos, los costes son función del tamaño, del nivel de tensión, del nivel de seguridad de funcionamiento requerido, de las condiciones medioambientales y el tipo de telemando; el coste de las infraestructuras depende de las condiciones de instalación, es decir, de la necesidad de adquirir un nuevo terreno, de modificar la red existente etc. Es muy difícil detallar los costes para la construcción de un enlace en corriente continua ya que los dos principales fabricantes europeos proporcionan presupuestos "llave en mano" sin desglosar los puntos. Como orden de magnitud se pueden evaluar los costes de la inversión para dos subestaciones de conversión bipolares a 500kV de un tamaño comparable a la de la hipótesis (datos basados en una estación de 2000MW) en alrededor de 200 k€/MW;

- Cables HVDC:

Igual que para las estaciones de conversión, los datos sobre los costes de adquisición y de instalación de cables HVDC son difícilmente extrapolables a partir de los presupuestos cerrados de los fabricantes; en situaciones de instalación normales para cada uno de los cables en cuestión, se pueden tener en cuenta las cifras que se indican en el siguiente cuadro:

Tipo de cable	Coste [k€/km]
400 MW 400 kV	320
500 MW 400 kV	350
600 MW 500kV	380

8.2 Costes de explotación y de mantenimiento

- El mantenimiento de las estaciones supone un coste de explotación que puede calcularse en aproximadamente 0.5% del coste de inversión cada año
- En general, el coste de mantenimiento de los cables es prácticamente nulo, en la medida en que se refiere solamente a la limpieza de los terminales que puede formar parte del mantenimiento periódico que debe efectuarse en las estaciones de conversión. No obstante, puede ser útil un seguimiento periódico de los cables a lo largo del trazado, por ejemplo todos los 4 o 5 años (en cualquier caso durante los 10 o 15 primeros años de servicio). Una primera estimación de los costes podría ser: entre 0.2 y 0.25 M€/año/100 km de cable

8.3 *Coste de las pérdidas*

- El coste de las pérdidas para las estaciones HVDC puede estimarse en 0.035 M€/MW con las hipótesis financieras utilizadas para los otros casos, es decir, un coste de la energía: 0.035€/kvh, un tipo de actualización del 6.5% y una estimación de vida útil de 30 años
- Con las mismas hipótesis, los costes de las pérdidas para los cables pueden calcularse en 600€/km de cable.

9 COMPARACIÓN

	Línea aérea	Cables subterráneos en corriente alterna con compensación de reactiva	Línea aérea con sifón 25% sin compensación de reactiva	Línea HVDC soterrada
Flexibilidad de corrección del dimensionamiento en función de los cambios de las condiciones de la red	<ul style="list-style-type: none"> Posibilidad de aumento de la capacidad mediante refuerzo de la línea y sustitución de los conductores, hasta el 30% 	<ul style="list-style-type: none"> Muy limitada y costosa: los cables deben dimensionarse para la capacidad prevista a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> La limitación está vinculada a la presencia de los cables. Requiere dimensionamiento para la capacidad prevista a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> La limitación está vinculada tanto a la presencia de los cables como a la de las estaciones de conversión. A diferencia del comportamiento de las líneas y cables en corriente alterna, el flujo de potencia de una línea HVDC se controla en cada momento por el operador
Posibilidad de sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> Sobrecarga limitada a aproximadamente el 10% durante una decena de minutos 	<ul style="list-style-type: none"> Sobrecarga hasta el 200% durante algunas decenas de horas con un envejecimiento acelerado del cable 	<ul style="list-style-type: none"> Sobrecarga limitada por la presencia de tramos aéreos 	<ul style="list-style-type: none"> No se admite ninguna sobrecarga por el flujo controlado por el operador; Dado que la construcción es modular, se puede añadir una nueva estación de conversión: se trata a todos los efectos de una nueva construcción
Necesidad de compensación de la reactiva	<ul style="list-style-type: none"> Ninguna para las longitudes de interés para este estudio 	<ul style="list-style-type: none"> Necesidad de compensar la reactiva a partir de longitudes de 25 a 30 km; Potencia de compensación de cerca de 25 MVar/km para un tricable doble 	<ul style="list-style-type: none"> Ninguna para el caso que nos interesa (longitud total de los sifones inferior a la longitud máxima sin compensación) 	<ul style="list-style-type: none"> No hay necesidad de compensar la reactiva

	Línea aérea	Cables subterráneos en corriente alterna con compensación de reactiva	Línea aérea con sifón 25% sin compensación de reactiva	Línea HVDC soterrada
Influencia de la obra	<ul style="list-style-type: none"> • Obra discontinua a lo largo del trazado en cada apoyo, cada 300 o 500 m. Excepto durante la instalación de los conductores; • La obra en cada apoyo ocupa aproximadamente 800m² • Necesidad de pistas de acceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Obra de alrededor de 1,5 km de longitud con ancho variable de 3-4 metros a cada lado de una vía de 15 metros, ya incluida la vía de servicio; • No hay pista de acceso si la obra se realiza a lo largo de una vía; • Obra civil y tecnológica importante para la construcción y la puesta en servicio de las estaciones de los terminales y de las estaciones de compensación de la reactiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Obra con características intermedias entre la línea aérea y el cable soterrado; • Obra civil y tecnológica importante para la construcción y la puesta en servicio de las estaciones de transición aero-subterráneas 	<ul style="list-style-type: none"> • Obra con características lineares parecidas a las de los cables soterrados, pero una anchura considerablemente menor, ya que hay que instalar entre 3 y 5 cables, en lugar de los 12 del doble circuito de un doble tricable; • Obra civil y tecnológica importante para la construcción y la puesta en servicio de las estaciones de conversión, con una superficie de alrededor de 150000 m²
Velocidad de progreso de la obra	<ul style="list-style-type: none"> • La obra avanza de media entre 50 y 100 m por día en medio rural 	<ul style="list-style-type: none"> • La obra avanza de media entre 30 y 80 m por día: el tiempo de construcción de los apoyos es aproximadamente de 60 días (todo incluido); 	<ul style="list-style-type: none"> • Obra con características intermedias entre la línea aérea y el cable soterrado; • Dado que la longitud del cable es mas limitada que la del tramo de línea aérea, la velocidad total está más vinculada a la del tramo aéreo 	

	Línea aérea	Cables subterráneos en corriente alterna con compensación de reactiva	Línea aérea con sifón 25% sin compensación de reactiva	Línea HVDC soterrada
Impacto de la obra	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria de movimiento de tierras y su transporte • Polvo y contaminación debidos al tránsito de camiones • Ruido de movimientos de tierras y de inyección del cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria de movimiento de tierras y su transporte • Polvo y contaminación debidos al tránsito de camiones • Ruido de movimientos de tierras 	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria de movimiento de tierras y su transporte • Polvo y contaminación debidos al tránsito de camiones • Ruido de movimientos de tierras 	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinaria de movimiento de tierras y su transporte • Polvo y contaminación debidos al tránsito de camiones • Ruido de movimientos de tierras
Impacto permanente y limitación de la utilización del terreno a lo largo de la línea	<ul style="list-style-type: none"> • 250 m² por apoyo ; • 1 apoyo cada 300-400 m • Se permiten cultivos de pequeña altura bajo la línea 	<ul style="list-style-type: none"> • Cada 1000 m cámaras de unión; • Limitación de cultivos en un ancho de 5 o 6 metros a cada lado del tricable doble; • Influencia menor en caso de instalación a lo largo de una vía; 	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto permanente con características intermedias entre la línea aérea y el cable soterrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Como los cables
Impacto visual	<ul style="list-style-type: none"> • Muy importante: el ancho de los pilones para las líneas de doble circuito a 400 kV es del orden de 50 o 60 metros; • Si los cables no se colorean artificialmente (tonos verdes, marrones, negros o azules) reflejan la luz y pueden destacarse mucho en contraste con el fondo; 	<ul style="list-style-type: none"> • Prácticamente nulo a lo largo del trazado (exceptuando las limitaciones del cultivo); • Impacto de las subestaciones de los extremos y de compensación de reactiva similares a las de las subestaciones de transformación de muy alta tensión; 	<ul style="list-style-type: none"> • Características intermedias entre la línea aérea y el cable soterrado • Impacto de las estaciones de transición aero-subterráneas similares a las de las subestaciones de transformación de muy alta tensión; 	<ul style="list-style-type: none"> • Prácticamente nulo a lo largo del trazado (exceptuando las limitaciones del cultivo); • El impacto visual de las estaciones de conversión es muy similar al de una subestación de transformación, al que se añade una serie de edificaciones de entre 20 y 25 metros de altura;

	Línea aérea	Cables subterráneos en corriente alterna con compensación de reactiva	Línea aérea con sifón 25% sin compensación de reactiva	Línea HVDC soterrada
Impacto permanente de las estaciones de compensación o de transición	<ul style="list-style-type: none"> Subestaciones de cada extremo: aproximadamente 500 m² por circuito 	<ul style="list-style-type: none"> Al comienzo y al final de la línea: subestación de transición: 1200 m² para un tricable doble; Cada 25 km estación de compensación: 2000 a 5000 m²; 	<ul style="list-style-type: none"> En cada conexión aero-subterránea, una subestación de transición: 1200 m² para un tricable doble; 	<ul style="list-style-type: none"> Estaciones de conversión
Campo eléctrico y magnético	<ul style="list-style-type: none"> Radio de 10μT : 35 m Radio de 0.5μT : 180 m Radio de 0.2 μT : 300 m 	<ul style="list-style-type: none"> Radio de 10μT : 8 m Radio de 0.5μT : 16 m Radio de 0.2 μT : 60 m 	<ul style="list-style-type: none"> Situación intermedia entre la línea aérea y el cable soterrado 	<ul style="list-style-type: none"> Radio de 10μT : 0 m Radio de 0.5μT : 0 m Radio de 0.2 μT : 0 m
Coste de inversión	<ul style="list-style-type: none"> De 0.6 a 1 M€/km en llano De 1,5 a 2 M€/km en montaña 	<ul style="list-style-type: none"> De 4 a 8 M€/km para un tricable doble en zona rural Más de 10 M€/km en caso de obstáculos Coste de compensación de la reactiva: aprox. 150 k€/km 	<ul style="list-style-type: none"> Situación intermedia entre la línea aérea y el cable soterrado Coste de un par de subestaciones de transición aero-subterráneas: 900 k€ 	<ul style="list-style-type: none"> Coste de las estaciones de conversión (dos estaciones): 200-230 k€/MW Coste de la línea de cable soterrado: aprox. 1 M€/km
Coste del terreno	<p>Este aspecto debe considerarse con atención ya que puede tener una influencia primordial sobre la conveniencia económica de las soluciones tecnológicas consideradas: en efecto, si se considera el coste del terreno edificable, el coste de las obras de urbanización, los costes de construcción de un inmueble, el beneficio de la inversión inmobiliaria y teniendo en cuenta las zonas afectadas por los campos electromagnéticos (ver por ejemplo [5] en el que se calcula que para un terreno con un coste de aproximadamente 34/m²), los costes del ciclo de vida de una línea aérea de doble circuito de longitud inferior a 10 km son equivalentes a los de un cable soterrado de la misma capacidad.</p>			
Coste de operación	<ul style="list-style-type: none"> 2 a 3% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> 1,5 à 2% del coste de inversión; 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 2% del coste de inversión; 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 2,5% del coste de inversión

	Línea aérea	Cables subterráneos en corriente alterna con compensación de reactiva	Línea aérea con sifón 25% sin compensación de reactiva	Línea HVDC soterrada
Coste de las pérdidas	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 100 k€/km*año Sobre la vida útil estimada: 40% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 50 k€/km*año Sobre la vida útil estimada: 2% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> Situación intermedia entre la línea aérea y el cable soterrado 	<ul style="list-style-type: none"> Aproximadamente 130 k€/km*año
Coste de desmantelamiento	<ul style="list-style-type: none"> 0,05% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> 0,08% del coste de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> Situación intermedia entre la línea aérea y el cable soterrado 	<ul style="list-style-type: none"> 0,04% del coste de inversión
Experiencia previa	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología dominada 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología dominada para distancias cortas 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología reciente pero dominada 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología dominada
Fiabilidad esperada	<ul style="list-style-type: none"> Grande: la frecuencia de disparos es elevada pero de corta duración y con posibilidad de reenganche automático 	<ul style="list-style-type: none"> Más bien grande: la frecuencia de disparos por causas internas es muy limitada pero la duración de la reparación es muy grande; El reenganche automático no es posible 	<ul style="list-style-type: none"> Situación intermedia entre la línea aérea y el cable soterrado; Dificultad de proteger debido a las características eléctricas muy diferentes entre el tramo aéreo y el tramo de cable 	<ul style="list-style-type: none"> Grande La frecuencia de disparos por causas internas es muy limitada pero la duración de la reparación es muy grande

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B.Cova, M. De Nigris, G. Pirovano, P.Stigliano, “Etude de faisabilité technico-économique d’alternatives à la réalisation d’une ligne à très haute tension entre la France et l’Espagne”, CESI, rapport A2/038822, Milán, diciembre 2002
- [2] B.Cova, M. De Nigris, “Etude de faisabilité technico-économique d’alternatives à la réalisation d’une ligne à très haute tension entre la France et l’Espagne: complément d’étude de réseau sur l’influence de la localisation de la ligne”, CESI, informe A3/006235, Milán, marzo 2003
- [3] CIGRE WG B1.07 Brochure 338: “Statistics of AC underground cables in power networks” – Diciembre 2007
- [4] CIGRE WG 21.17 Brochure 192: “Construction, laying and installation techniques for extruded and self contained fluid filled cable systems” – Octubre 2001
- [5] R. Benato, M. del Brenna, C. Di Mario, A. Lorenzoni, E. Zaccone: “A new procedure to compare the social costs of EHV-HV overhead lines and underground power XLPE cables” – CIGRE 2006, paper B1-301