

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE
TRANSPORTE
DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS
DE ALTA TENSIÓN**

INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTORA: TERESA PARTIDA MANZANERA

TUTOR: ÁNGEL RAMOS GÓMEZ

Agradecimientos.

En primer lugar al tutor de este proyecto, Ángel Ramos, por darme la oportunidad de realizarlo y de hacer la beca en Socoin. También a la tutora de la beca, Melita, y a toda la gente de Socoin, por todo lo que me han enseñado y por la ayuda y el tiempo que me han prestado. Y a los chicos de Mantenimiento, en especial a Diego, por toda la información que me han facilitado y por llevarme de excursión por las galerías de Madrid.

A mis padres por todo su apoyo y porque siempre me han dado todo lo que se necesita y más. Y a todos mis familiares que se han preocupado por mí y se han alegrado con mis aprobados.

A mi Prim, por acogerme y educarme en los aspectos importantes de la vida, aunque sólo sea para que la mantenga cuando acabe la carrera y me haga rica. Y a todos los primos que me han ido adoptando por el camino.

A mis amigos de la carrera, que han hecho que estos años sean más fáciles y divertidos. Y al resto de mis amigos por estar siempre ahí, en especial a Mija, y al Pater por estar siempre “hay”.

En definitiva a toda la gente que ha hecho posible que haya llegado hasta aquí.

Muchas gracias.

ÍNDICE.

1. Introducción.	1
2. Objetivos.	2
3. Aspectos introductorios.	3
3.1 Sistemas de cables aislados de potencia.	3
3.1.1 Partes de un cable aislado.	4
3.1.2 Tipos de tendido de los cables aislados de potencia.	11
3.1.3 Trazado.	16
3.1.4 Accesorios: empalmes y terminales.	22
3.1.5 Paso aéreo subterráneo.	23
3.1.6 Sistemas de puesta a tierra.	25
4. Capacidad de transporte de un sistema de cables aislados de potencia.	34
4.1 Descripción del fenómeno térmico.	34
4.2 Aspectos y parámetros que intervienen en la capacidad de transporte.	35
4.2.1 Resistencia de un conductor.	35
4.2.2 Pérdidas de potencia en los conductores.	36
4.2.3 Inductancia y reactancia inductiva.	36
4.2.4 Capacidad y pérdidas dieléctricas en los aislamientos.	37
4.2.5 Tensión inducida en la pantalla.	38
4.2.6 Pérdidas por efecto Joule en la pantalla.	38
4.2.7 Resistencias térmicas.	39
4.2.8 Intensidad máxima admisible.	40
4.2.9 Caída de tensión.	41
4.2.10 Pérdidas de potencia en la línea.	42
5. Análisis de la explotación de sistemas de cables aislados de potencia.	44
5.1 Metodología utilizada para el cálculo de la capacidad de transporte nominal.	44
5.1.1 Modelado matemático de la transmisión de calor por conducción en medios continuos.	45
5.1.2 Modelado térmico de la instalación.	52
5.1.3 Determinación de la capacidad de transporte nominal de un cable aislado de potencia.	54
5.2 Estudio de diferentes factores que influyen en la capacidad de transporte nominal.	71
5.2.1 Influencia de otras líneas eléctricas de alta tensión.	71
5.2.2 Influencia de una canalización de media tensión.	87
5.2.3 Caracterización de la influencia de otras líneas de alta tensión y media tensión en la capacidad de transporte de una línea de alta tensión.	99

5.3 Caso real: estudio de diferentes la capacidad de transporte de las líneas eléctricas subterráneas de la red de 220kV de Madrid.	105
5.3.1 Determinación de la capacidad de transporte nominal sin tener en cuenta la influencia de otras líneas ajenas a la instalación.	107
5.3.2 Estudio de la influencia térmica de otras líneas en la capacidad de transporte nominal.	128
6. Conclusiones.	156
7. Desarrollos futuros.	160
8. Bibliografía.	161



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

1. Introducción.

La expansión de las grandes ciudades en los últimos años ha tenido como consecuencia el aumento del número de instalaciones eléctricas subterráneas de alta y media tensión. Este aumento se debe principalmente a que las instalaciones eléctricas aéreas son inviables en un entorno urbano, especialmente como consecuencia del fuerte rechazo social que tienen. Las líneas subterráneas presentan, entre otras ventajas, un menor impacto social y ambiental. El impacto visual y la superficie destinada al uso eléctrico se reducen, el nivel de ruidos disminuye en los alrededores de la instalación y la fiabilidad y calidad del suministro eléctrico aumentan, pudiéndose así atender las crecientes necesidades de suministro eléctrico.

En la actualidad, este crecimiento en la cantidad de instalaciones subterráneas hace necesario optimizar su diseño y explotación con la finalidad de maximizar su capacidad de transporte. Para ello es importante contar con herramientas eficientes capaces de calcular la capacidad de transporte de las líneas eléctricas de forma precisa.

La capacidad de transporte de una línea subterránea está limitada por la máxima temperatura que puede alcanzar el aislamiento sin que sus propiedades dieléctricas disminuyan. Limitar el valor de la temperatura del aislamiento equivale a limitar el valor de la temperatura en la superficie del conductor de cada fase de la línea. Esta temperatura depende fundamentalmente de las pérdidas de la propia fase, pero también de las pérdidas de las otras fases y de las otras líneas.

La problemática de la metodología que se emplea habitualmente en el cálculo de la capacidad de transporte (basada en la Norma UNE 21144), es la dificultad de modelar la influencia que tienen las pérdidas de una determinada fase en la temperatura de las otras fases y las otras líneas que forman la instalación eléctrica. Además dicha metodología no tiene en cuenta la influencia térmica que pueden tener otras instalaciones subterráneas próximas a la que se está estudiando.

La herramienta informática que se utilizará durante el presente proyecto utiliza una metodología que obtiene un valor más exacto de la capacidad de transporte de las líneas eléctricas subterráneas, ya que dispone de un modelo más preciso de interacción térmica entre las diferentes fases de cada línea de la instalación y tiene la gran ventaja de que permite calcular la capacidad de transporte teniendo en cuenta la influencia de otras líneas ajenas a la instalación.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

2. Objetivos.

En el presente proyecto se pretende llevar a cabo un estudio completo de la capacidad real de transporte de las instalaciones subterráneas de alta tensión. Los principales objetivos del proyecto son:

- Conocer previamente los tipos de cables aislados de potencia que existen, así como los tipos de tendido de los mismos, con el fin de conocer los elementos que los componen y la función de cada elemento.
- Estudiar el fenómeno térmico que se produce cuando una línea eléctrica subterránea trabaja en régimen permanente, y los parámetros que intervienen en éste.
- Explicar la metodología empleada para calcular la capacidad de transporte de una línea eléctrica subterránea de alta tensión y los parámetros que influyen en la misma.
- Caracterizar, con la ayuda de una herramienta informática para el cálculo de la capacidad de transporte, los principales aspectos que tienen influencia en la capacidad de transporte nominal de una línea eléctrica subterránea de alta tensión.
- Aplicar la metodología empleada en la identificación y optimización de la capacidad de transporte de la red de 220kV de Madrid de Unión Fenosa Distribución.
- Comparar los resultados obtenidos al simular casos reales con los obtenidos al aplicar otras metodologías y con los utilizados por Unión Fenosa Distribución en la actualidad.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

3. Aspectos introductorios.

3.1 Sistemas de cables aislados de potencia.

La función de los cables aislados de potencia es transportar energía eléctrica con la mayor eficiencia posible. La energía eléctrica transportada por un cable de potencia es el resultado de la suma geométrica de las energías cinéticas de cada uno de los electrones que se desplazan en el seno del metal conductor. Cuando un cable está desconectado, la suma geométrica de esta energía cinética es nula debido a que el movimiento de los electrones es anárquico, sin orden y al azar. Cuando el cable se conecta a una fuente de tensión eléctrica, el movimiento de los electrones se ordena, se orienta y se acelera como consecuencia de la presencia del campo eléctrico, de esta forma se obtiene una corriente eléctrica.

El campo eléctrico aporta más energía cinética a los electrones y orienta su movimiento colectivo. Por tanto, la corriente que se obtiene será más importante cuanto mayor sea la ordenación y la aceleración de los electrones como consecuencia de la aplicación del campo eléctrico.

La menor o mayor facilidad que los electrones tienen para desplazarse en el seno de un material, cuando son acelerados por un campo eléctrico, permite clasificar los materiales en dos grandes grupos:

- Materiales conductores: se caracterizan porque, con un pequeño aporte de energía, los electrones más alejados del núcleo salen de sus órbitas. La agitación térmica presente a temperaturas ordinarias puede ser suficiente aporte de energía, por lo que a dichas temperaturas los materiales conductores tienen en su seno gran cantidad de electrones desligados de sus átomos, que pueden acelerarse fácilmente en presencia de un pequeño campo eléctrico. Normalmente son materiales metálicos, y con muy bajas intensidades de campo eléctrico permiten obtener en su seno corrientes de electrones significativas.
- Materiales aislantes: estos materiales a temperaturas normales no presentan electrones libres que permitan el paso de corriente eléctrica. Para que alguno de sus electrones exteriores se desprenda, se necesita tanta energía que, antes de darse esta situación, su estructura regular molecular se destruye. Para conseguir una corriente eléctrica apreciable, necesitan unas intensidades de campo eléctrico tan elevadas, que antes de conseguirla se destruye el material.

A nivel microscópico, en la marcha de la corriente eléctrica en el seno de un cable, cada electrón presenta un movimiento individualizado. Es decir, se desplaza por su cuenta chocando y rozando con otros electrones, cediendo parte de su energía cinética que se disipa en forma de calor. Macroscópicamente, el conjunto de todos estos procesos elementales se manifiesta como una resistencia que el material presenta ante el paso de corriente eléctrica, lo que conlleva a un calentamiento del conductor. Este calentamiento es lo que se conoce como “efecto Joule”.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

3.1.1. Partes de un cable aislado.

Los elementos principales de un cable eléctrico aislado, que están representados en la figura 1, son: los conductores, los aislamientos y las protecciones. El aislamiento y el conductor completan el cable desde el punto de vista eléctrico. A estos elementos se le añade la protección con la finalidad de proteger al cable de agresiones e influencias externas.

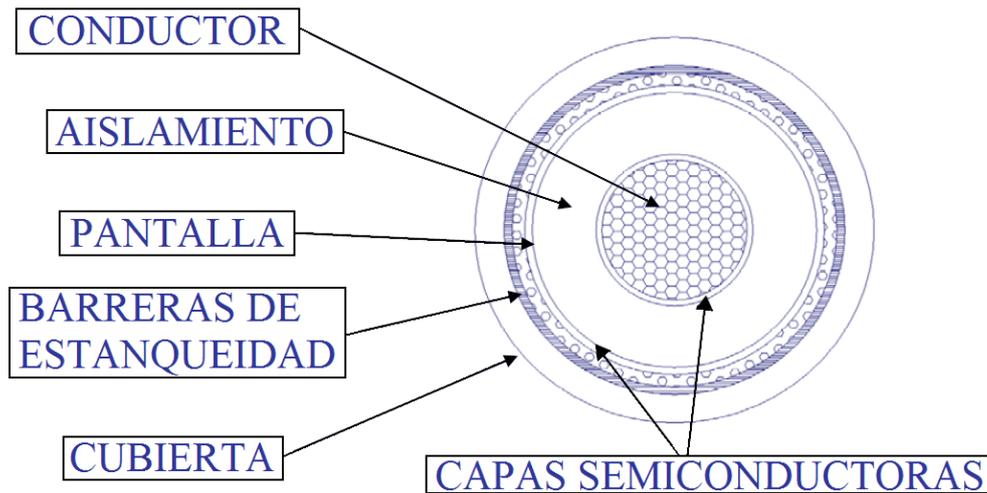


Figura 1. Partes de un cable aislado de potencia.

En función de la naturaleza de la protección que realizan, se distinguen cuatro tipos de elementos de protección:

- Protección contra daños de origen mecánico: cubiertas y armaduras.
- Protección contra daños de origen eléctrico: pantallas y capas semiconductoras.

Los cables eléctricos aislados utilizados en las líneas subterráneas de alta tensión son unipolares, de campo radial, y están formados por un solo conductor de cobre o aluminio rodeado del aislamiento, cubierta, envolturas protectoras y armadura.

Estos cables deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- Deben estar aislados con materiales adecuados a las condiciones de instalación y explotación.
- Tienen que estar debidamente apantallados y protegidos contra la corrosión que pueda provocar el terreno donde se instalen o la producida por corrientes erráticas.
- Deben tener resistencia mecánica suficiente para soportar las acciones de instalación y tendido y las habituales después de la instalación (exceptuando las agresiones mecánicas procedentes de maquinaria de obra pública como excavadoras, perforadoras o picos).



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Los materiales y su montaje deben cumplir con los requisitos de las normas UNE y demás normas aplicables. En caso de no existir norma UNE, se utilizan las normas UNE-EN, que son la versión oficial en español de las normas europeas, y en su defecto se utilizan las publicaciones de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

Conductores:



Figura 2. Conductores de un cable aislado de potencia.

La energía eléctrica se transporta por los cables a través de los conductores. Como ya se ha comentado anteriormente, la energía eléctrica que se transporta por un cable es el resultado de la suma de las energías cinéticas de cada uno de los electrones que se trasladan por los conductores. Por tanto, la función de un conductor en un cable aislado es desplazar estos electrones a través del cable, perdiendo la menor cantidad de energía posible por el camino, es decir, permitiendo el paso de corriente eléctrica en su seno.

Los materiales que se utilizan para fabricar los conductores de los cables eléctricos aislados son generalmente metálicos. Los más utilizados son:

- El cobre (que se presenta en las variantes de cobre recocido desnudo, cobre recocido estañado y cobre duro).
- El aluminio, cuyo uso es cada vez mayor en los cables de energía.

Los cables utilizados en instalaciones subterráneas están formados por conductores circulares de cuerda redonda compacta de aluminio para secciones circulares inferiores a 800mm^2 , y de cobre o aluminio para secciones superiores. Para secciones superiores a 1000mm^2 y cuando una línea requiere un aumento en su capacidad de transporte, se puede emplear cuerda segmentada (Miliken).

La fabricación de los conductores de los cables aislados de potencia se lleva a cabo utilizando materias primas de gran pureza de acuerdo con las normas internacionales y las normas UNE. De esta forma se garantizan los valores de conductividad eléctrica exigidos, ya que la presencia de pequeñas proporciones de impurezas residuales, aumenta en gran medida la resistencia eléctrica del material conductor, y como consecuencia aumentan las pérdidas por efecto Joule y el calentamiento del cable, poniendo en peligro la vida útil de este.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Aislamientos:

Como ya se ha indicado anteriormente, los materiales aislantes están formados por electrones fuertemente ligados a sus núcleos, a los que no se les permite un fácil desplazamiento debido a que les es muy difícil saltar a la banda de conducción. Por ello, cuando se aplica una diferencia de potencial entre dos puntos de un material aislante, no hay paso de corriente eléctrica.

Los aislamientos se deben fabricar con materiales en los que los electrones estén fuertemente ligados a sus núcleos, es decir, materiales con una elevada resistencia eléctrica.

Además de las características eléctricas, los aislamientos deben cumplir otras características en función de las influencias externas a las que se va a ver sometido el cable durante su vida útil:

- Absorción de agua y resistencia a la humedad.
- Grado de polimerización, vulcanización o reticulación.
- Resistencia al ozono, a la acción solar, a la radiación ultravioleta, a la radiación gamma.
- Resistencia a los hidrocarburos, a los agentes corrosivos, a los ambientes salinos, alcalinos, etc.

También es importante tener en cuenta otras características de los aislamientos tales como:

- Termoplasticidad.
- Cristalinidad.
- Resistencia al agrietamiento o gelificación
- Resistencia al frío/calor.
- Resistencia al fuego
- Temperaturas máximas de servicio.
- Temperaturas de cortocircuito.
- Resistencia a la tracción.
- Carga de rotura.
- Alargamiento a la rotura.
- Resistencia al alargamiento permanente.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al envejecimiento, etc.

En función del tipo de aislamiento, los cables aislados se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. Cables con aislamiento de papel impregnado.
2. Cables de aislamiento seco.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Cables con aislamiento de papel impregnado:

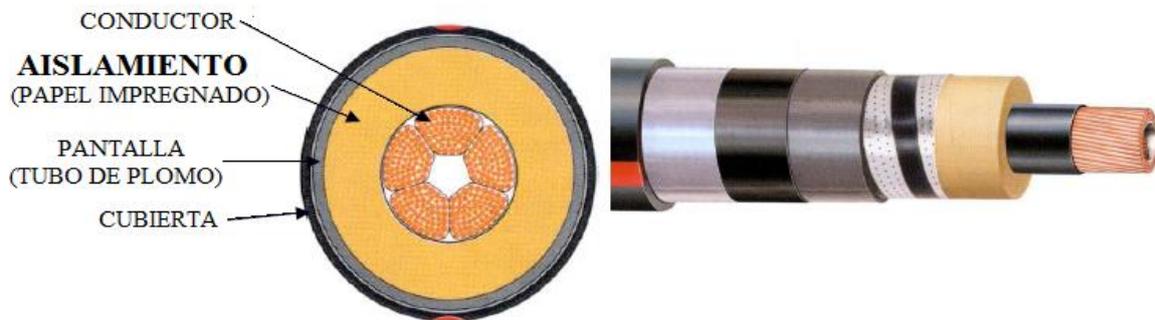


Figura 3. Cable aislado de potencia con aislamiento de papel impregnado.

El aislamiento está formado por una mezcla de resinas y aceites minerales, que utiliza como soporte físico un encintado de papel celulósico desmineralizado. Esta mezcla se caracteriza por estar prácticamente solidificada a temperatura ambiente, y a temperaturas superiores aumenta su fluidez. Por ello el conjunto debe estar rodeado por un tubo de plomo que impida la pérdida de la mezcla.

Este tipo de aislamiento tiene la ventaja de presentar una vida útil muy superior a la de los cables secos. Su inconveniente es que en el pasado, a temperatura de servicio, la fluidez de la mezcla se hacía muy elevada y ésta se escapaba del tubo de plomo a través de minúsculas fisuras producidas por cristalizaciones del plomo que se formaban por vibraciones o fallos en la soldadura de los empalmes de los cables cuando éstos estaban colocados en posición vertical y presentaban una importante presión hidrostática dentro del tubo. El desarrollo de mezclas de impregnación no migrantes, que presentan una elevada viscosidad a temperaturas muy elevadas (mayores de las que puede alcanzar el cable), ha solucionado este problema.

Aunque a partir de los años 70-80 la fabricación de cables con aislamiento de papel impregnado se fue sustituyendo por la de cables con aislamiento seco, en la actualidad existen kilómetros de cables aislados con papel impregnado en servicio, debido a la gran vida útil de este tipo de cables antes mencionada.

- Cables con aislamiento seco:

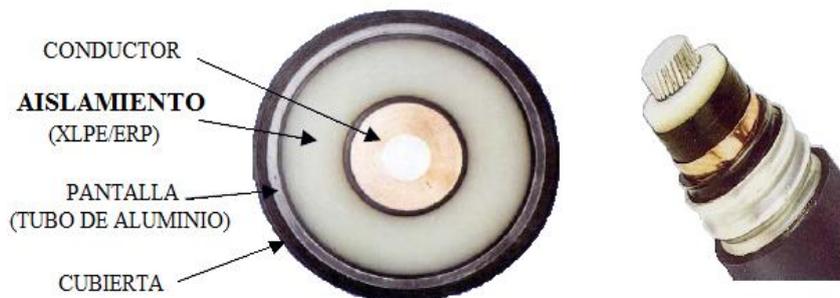


Figura 4. Cable aislado de potencia con aislamiento seco.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSION

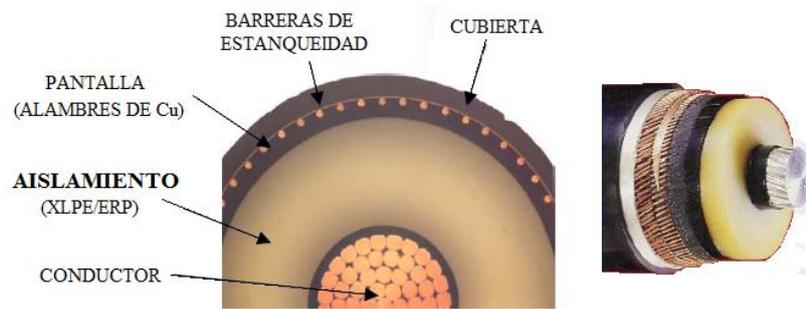


Figura 5. Cable aislado de potencia con aislamiento seco (II).

Los aislamientos secos están constituidos por aislantes sintéticos extruidos tales como el PVC, el EPR o el XLPE. Presentan unas características que los diferencian de los aislamientos de papel impregnado tales como:

- No presentan vertimiento de material ni en posición vertical.
- No precisan el tubo de plomo como protección mecánica para evitar pérdida de material fluido o la entrada de humedad.
- Tienen buena resistencia a la humedad.
- Soportan bastante bien las vibraciones.
- Algunos tipos especiales presentan buen comportamiento frente al fuego.

Polietileno reticulado (XLPE): el XLPE se ha desarrollado como consecuencia de la necesidad de obtener un aislamiento con las mismas propiedades del polietileno termoplástico (PE), pero que superase sus limitaciones. Las limitaciones que presenta el PE es que tiene un bajo punto de fusión, presenta riesgos de propagación de la llama, y una muy elevada cristalinidad que le confiere una alta rigidez y fragilidad a altas temperaturas.

Gomas de etileno-propileno (EPR): se han desarrollado con el fin de mejorar los inconvenientes del XLPE, ya que presenta elevada rigidez mecánica. El XLPE difícilmente acepta la introducción de componentes que permitan modificar sus propiedades, sin embargo el EPR permiten la incorporación de cargas y plastificantes que facultan la creación de mezclas adaptadas a exigencias particulares.

Los aislamientos de los cables eléctricos aislados de alta tensión se fabrican sobre el conductor, por triple extrusión simultánea, mediante cabezal triple y reticulación en seco, de:

- Pantalla sobre el conductor de compuesto semiconductor.
- Aislamiento a base de polietileno reticulado (XLPE).
- Pantalla sobre el aislamiento de compuesto semiconductor.

El XLPE no es un termoplástico, por lo que al aumentar la temperatura no se vuelve fluido, manteniendo su forma aunque con propiedades de material elástico. Como consecuencia aumenta la temperatura admisible del conductor, que pasa de 75°C en el PE a 90°C en el XLPE, lo que permite la circulación de mayores intensidades de corriente en régimen permanente. En el caso de cortocircuitos, se pueden alcanzar hasta 250°C durante cortos periodos de tiempo [1].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Al ser el XLPE un aislamiento seco, es especialmente sensible a la penetración de la humedad, que termina por dañarlo cuando el cable está enterrado en terrenos húmedos debido al crecimiento de arborescencias que penetran progresivamente a través del aislamiento. Por ello los cables de XLPE se pueden fabricar con una o dos barreras longitudinales que evitan la propagación del agua por el interior del cable mediante una obturación tanto sobre el conductor como sobre la pantalla.

Capas semiconductoras:

Las capas semiconductoras de los cables eléctricos aislados se pueden considerar como un caso especial de pantallas. Son unas capas delgadas de polímero, que suelen ser de la misma composición básica que el material aislante, que se mezcla con productos conductores, como el negro de humo, para reducir su resistencia de aislamiento. Las capas semiconductoras interna y externa se disponen para homogeneizar el campo eléctrico en la superficie del conductor y en la de pantalla metálica respectivamente, con la misión de evitar que las zonas huecas de las superficies interior y exterior del aislamiento soporten campos eléctricos intensos, en los que se podrían producir descargas parciales ante la presencia de aire o vapor de agua que degradarían el aislamiento.

- La capa semiconductora interna alisa el campo eléctrico más próximo al conductor, lo hace perfectamente cilíndrico y así evita las irregularidades superficiales que introduce el cableado de la cuerda al rellenar los huecos presentes entre los alambres. Como consecuencia, se reduce el gradiente eléctrico, y se disminuye el riesgo de formación de puntos de ionización en la parte del aislamiento en la que el campo es más intenso. La capa semiconductora interna está a la misma tensión que el conductor con el que está en contacto.
- La capa semiconductora externa cumple una función similar a la de la capa semiconductora interna en la parte exterior del aislamiento. Se mantiene en contacto con éste, evitando vacíos de tensión entre los elementos de la pantalla y el aislamiento. Esta capa, al estar en contacto con la pantalla, se mantiene a la tensión de tierra.

Pantallas:



Figura 6. Pantallas de cables aislados de potencia.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Las pantallas de los cables eléctricos aislados son elementos metálicos con función de protección eléctrica, en el caso de cables de media y alta tensión se emplean para dar forma regular y cilíndrica al campo eléctrico que rodea el conductor.

La pantalla metálica de un cable eléctrico aislado está constituida por una corona de alambres de cobre arrollados helicoidalmente, con contraespira de cobre que garantiza la sujeción de la pantalla frente a los esfuerzos electrodinámicos. Sobre la pantalla se instala un sistema contra la penetración del agua, que está constituido por una cinta semiconductora hinchable que garantiza la estanqueidad longitudinal del cable, y por una lámina de aluminio copolímero adherida a la cubierta exterior como barrera transversal.

En cables utilizados para el nivel de tensión de 220 kV, como alternativa a esta pantalla a veces se emplea tubo de aluminio ondulado y sin soldadura, colocado por extrusión sobre una cinta semiconductora hinchable que garantiza la estanqueidad longitudinal del cable.

Cubiertas y armaduras:



CUBIERTA DE POLIOLEFINA DE SEGURIDAD



CUBIERTA DE POLIETILENO GRAFITADO



CUBIERTA DE PVC

Figura 7. Cubiertas de cables aislados de potencia.

Las cubiertas de los cables eléctricos aislados son elementos de protección mecánica contra la corrosión, generalmente no metálicos, que aíslan la pantalla metálica (de cobre o aluminio) del terreno. Su función es proteger al cable contra agentes dañinos exteriores de tipo químicos, biológico, atmosférico, abrasivo, etc.

También se utilizan para mejorar características internas del cable que le permitan satisfacer mejor sus prestaciones:

- Como materiales de relleno para dar forma cilíndrica a cables multiconductores.
- Como elementos portantes que soportan esfuerzos tractors.
- De barreras antillama en cables resistentes al fuego.
- Como asientos de armadura para evitar que ésta dañe los conductores, etc.

A veces se utilizan cubiertas metálicas como material de protección. Por ejemplo el plomo se utiliza de cubierta protectora ante agresivos del tipo de hidrocarburos y otros, por su gran inercia química. También se utiliza el plomo para la confección de cubiertas estancas. En ocasiones se emplean cubiertas de aluminio para proteger aislamientos de XLPE, de cables enterrados de media y alta tensión, contra la acción biológica del agua contaminada, que podría deteriorarlo por la formación de arborescencias químicas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

En los cables aislados de potencia se utiliza una cubierta exterior de poliolefina para los niveles de tensión de 45 y 66 KV, y de polietileno de alta densidad para 132 y 220 KV, de color negro en todos los niveles de tensión [6].

El acero se utiliza en forma de flejes o hilos como protección mecánica de los cables.

3.1.2. Tipos de tendido de los cables aislados de potencia.

Los cables aislados subterráneos de alta tensión se pueden canalizar de tres formas:

- Directamente enterrados en zanja.
- Entubados en zanja.
- Al aire alojados en galería.

Cables aislados subterráneos directamente enterrados en zanja.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el factor que limita la capacidad de transporte de energía de un cable es la facilidad con que éste disipa el calor generado por las pérdidas. Este calor se disipa del cable al medio que lo rodea, por lo tanto, este tipo de canalización facilita la disipación de calor al estar los cables en contacto directo con el terreno, ya que la humedad del suelo se mantiene en las inmediaciones de la instalación.

Por un lado, es más fácil encontrar humedad cuanto mayor sea la profundidad de la zanja, sin embargo si aumenta la profundidad, se dificulta la disipación de calor hacia la atmósfera. Por esta razón, la profundidad del tendido eléctrico se hace buscando el equilibrio entre las dos situaciones. Para cables de alta tensión la profundidad desde la superficie hasta la parte superior del tendido, no debe ser menor de 0,6m en acera o tierra, ni de 0,8m en calzada [2].

En las instalaciones subterráneas de alta tensión, los cables eléctricos aislados se tienden en contacto, agrupados en disposición de tresbolillo. Cuando las condiciones específicas de un proyecto lo aconsejen, se puede utilizar la disposición en capa de los cables de manera excepcional [6].

Para el tendido de los cables de telecomunicaciones, se instalan tubos de plástico de doble pared (corrugada externa y lisa interna) de 110mm de diámetro exterior. Como norma general se instalan dos tubos, salvo en el caso de ciudades de más de 50.000 habitantes, en el que se instalan cuatro tubos [6].

El ancho de la zanja debe ser el suficiente para que se pueda permitir el trabajo de un hombre cuando sea necesario. Los laterales de la zanja han de ser compactos y no deben desprender piedras o tierra. Siempre se deben respetar unos espesores mínimos de 10cm de tierra o arena rodeando a la terna de cables [6].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Para evitar daños en los cables durante la compactación, éstos se tienden en un lecho de tierra cribada procedente de la misma excavación. Si la tierra no cumple las condiciones exigidas por las normas, reglamentos y ordenanzas municipales correspondientes, se utiliza arena de río lavada. La capa de arena debe ser de un espesor mínimo de 5cm [2], y debe estar exenta de cuerpos extraños. Con el fin de estabilizar térmicamente la arena que rodea a los cables, ésta se mezcla con cemento (una parte de cemento por cada catorce de arena) [6].

Sobre la tierra o arena, para proteger el cable frente a futuras excavaciones realizadas por terceros y disminuir el riesgo de averías, los cables deben tener una protección mecánica que en las condiciones de instalación soporte un impacto puntual de 20J y que cubra la proyección en planta de los cables. También se debe disponer una cinta de señalización que advierta de la existencia del cable eléctrico de AT. [2]

En la práctica se colocan placas de PVC rígido ensambladas, con la doble misión de protección mecánica y de señalización, ya que tiene un color amarillo muy llamativo que le permite realizar una función señalizadora y además tiene gran resistencia al impacto, y resulta más económica que otros materiales utilizados (por ejemplo ladrillos). Las placas son de 1000mm de longitud y 250mm de ancho, se colocan a 10cm de la capa de tierra o arena sobre la vertical de cada terna de cables [6]. Debido a estas características esta solución también tiene las ventajas de presentar un transporte y almacenamiento más económicos y ligeros.

Después de colocar el dispositivo protector, la zanja se rellena con tierra procedente de la misma excavación, siempre que cumpla con las condiciones exigidas por las normas, reglamentos y ordenanzas municipales correspondientes, en caso contrario las zanjas se rellenan con tierra de aportación.

Para la señalización de los cables enterrados, se coloca una cinta señalizadora por terna a una distancia mínima de 100mm del suelo y de 300mm de la parte superior del cable [6].

En el caso de canalizaciones con dos ternas en la misma zanja, se deberá mantener una separación mínima entre ejes de las ternas. Esta separación es de 60cm para niveles de tensión de 45 y 66kV, y de 70cm para tensiones de 132 y 220kV [6].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

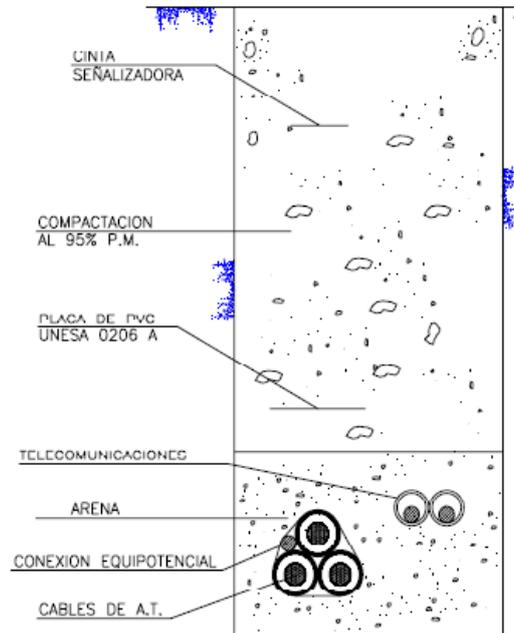


Figura 8. Tendido de una terna de cables aislados directamente enterrada.

Este tipo de canalización es el que se usa prioritariamente, ya que presenta una gran facilidad de tendido a cielo abierto y además el calor se evacúa mejor que en las canalizaciones entubadas. Sin embargo, como los cables directamente enterrados son más vulnerables que bajo tubo, esta canalización no se utiliza en los siguientes casos:

- Cruces o tendidos a lo largo de vías públicas, privadas o paso de carruajes. En este caso se utilizará la canalización de tubos hormigonados en todo el recorrido.
- Cruzamientos, paralelismos y casos especiales, cuando los reglamentos oficiales, ordenanzas vigentes o acuerdos con otras empresas lo exijan. En este caso se empleará la canalización de cables entubados en zanja.
- Sectores urbanos, donde existan dificultades para la apertura de zanjas de la longitud necesaria para permitir el tendido del cable a cielo abierto. En este caso también se utilizará la canalización de cables entubados en zanja.
- También se realizará la canalización de cables entubados en zanja cuando sea necesario dejar prevista la canalización para realizar el tendido del cable en el futuro.

Cables aislados subterráneos entubados en zanja.

Los cables enterrados bajo tubo presentan la ventaja de tener mayor protección mecánica que los cables directamente enterrados. Su principal desventaja es que en este tipo de canalización se produce una menor evacuación del calor.

En este tipo de canalización se instala un cable por tubo. Los tubos son independientes entre sí y presentan las siguientes características [6]:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Tubo de plástico de doble pared, con pared interna lisa para facilitar la instalación o sustitución del cable o circuito averiado, y pared externa corrugada.
- Diámetro exterior de 160, 200 ó 250 mm. El diámetro interior no debe ser inferior a vez y media del diámetro exterior del cable.
- Tramos de 6 m de longitud, con uniones entre tubos mediante manguitos con junta de estanqueidad.

En este caso, la profundidad desde la superficie hasta la parte superior de los tubos, no debe ser menor de 0,6m en acera o tierra, ni de 0,8m en calzada [2].

La disposición de los tubos es siempre al tresbolillo, con el empleo de separadores cada 3 m. Cuando las condiciones específicas de un proyecto lo aconsejen, se puede utilizar la disposición en capa de los tubos de manera excepcional [6].

Si es necesario, los tubos se instalan hormigonados en zanja para que presenten la suficiente resistencia mecánica. Antes de realizar el tendido, se debe eliminar la suciedad y tierra que pueda haber en el interior de los tubos mediante mandrinado, garantizando el paso de los cables. Durante el tendido se debe evitar que entre tierra u hormigón.

Los tubos deben ir hormigonados durante su recorrido en los cruces o tendidos a lo largo de vías públicas, privadas o paso de carruajes. En el resto de los casos se colocan en lecho de tierra cribada procedente de la propia excavación, si reúne las condiciones necesarias, o de aportación en caso contrario. En el recubrimiento de los tubos, se emplea arena u hormigón. Se deben respetar unos espesores mínimos de 10cm rodeando el tresbolillo formado por los tubos [6].

A continuación se rellena la zanja con tierra procedente de la misma excavación, si ésta reúne las condiciones exigidas por las normas, reglamentos y ordenanzas municipales correspondientes, en caso contrario se rellena con tierra de aportación. La tierra se compacta en tongadas de 30cm hasta lograr una compactación mínima del 95% del Proctor Modificado [6].

En este caso no es necesario colocar el dispositivo protector formado por las placas de PVC. Lo que si es necesarios es la señalización de los cables enterrados, para ello se coloca un cinta señalizadora por terna a una distancia mínima de 100mm del suelo y de 300mm de la parte superior del cable [6].

Cuando se tiendan dos ternas en la misma zanja, se deberá mantener una separación mínima entre ejes de las ternas. Esta separación es de 60cm para niveles de tensión de 45 y 66kV, y de 70cm para tensiones de 132 y 220kV [6].

Cables al aire alojados en galería.

Esta canalización es la más beneficiosa desde el punto de vista eléctrico, ya que en ella se da la máxima evacuación de calor, lo que equivale a una mayor capacidad de transporte de energía por parte de los cables aislados. Además, se caracteriza por la



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

facilidad de tendido de los cables y por causar molestias mínimas a la hora de realizar las obras.

Sin embargo, la canalización en galería se evita en la medida de lo posible porque supone un elevado coste de construcción. Sólo se utiliza en el caso en el que el número de líneas sea tal que justifique la realización de galerías, en casos especiales en los que no se pueda realizar otro tipo de canalizaciones, o en los casos en los que ya existan galerías de servicios. Otra desventaja de esta canalización es que los cables son muy vulnerables.

En este caso los cables se tienden en disposición de tresbolillo y fijados sobre soporte metálico mediante abrazaderas [6]. Los cables se sujetan a la pared de la galería mediante abrazaderas para evitar los movimientos que producen los ciclos térmicos del servicio o los esfuerzos electrodinámicos que producen las corrientes de cortocircuito. Las abrazaderas se deben colocar a una distancia tal que garantice que los cables no se desplacen.

Las galerías deben ser de hormigón armado o de otros materiales de rigidez, estanqueidad y duración equivalentes. Deben soportar la carga de tierras y pavimentos y las cargas de tráfico que tengan situados por encima. Las paredes deben permitir una sujeción segura de las estructuras soportes de los cables y permitir la fijación de los medios de tendido del cable. Además las galerías deben estar bien aireadas para obtener una baja temperatura media y deben tener un buen sistema de drenaje.

Como norma general, se colocan por separado los cables con tensiones distintas: en un lado de la galería los cables de media y alta tensión y en el otro los de baja tensión, los de control y los de señalización.

Cuando se tienden varias ternas, éstas preferentemente se deben colocar en un mismo plano. Se debe mantener una distancia mínima entre ternas situadas en el mismo plano horizontal de 1,5 veces el diámetro exterior del cable. La separación mínima entre ternas situadas en el mismo plano vertical será de 4 veces el diámetro exterior del cable. La separación entre ternas y pared conviene que sea de 0,5 veces el diámetro exterior del cable. [6]

Es conveniente dejar los cables al descubierto dentro de la galería, ya que si se rellena de tierra, el calor evaporaría la humedad y ésta no podría recuperarse a través de la pared de la galería. La tierra seca tiene una dificultad para conducir el calor cinco veces mayor que la tierra húmeda.

Para evitar sobretensiones en las protecciones metálicas de los cables, todos los elementos metálicos de sujeción de los cables se conectan a tierra. En el caso de que existan cables de distinta tensión se deben independizar los circuitos de tierra.

Nunca se instalan cables eléctricos en galerías donde existan conducciones de gases o líquidos inflamables.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

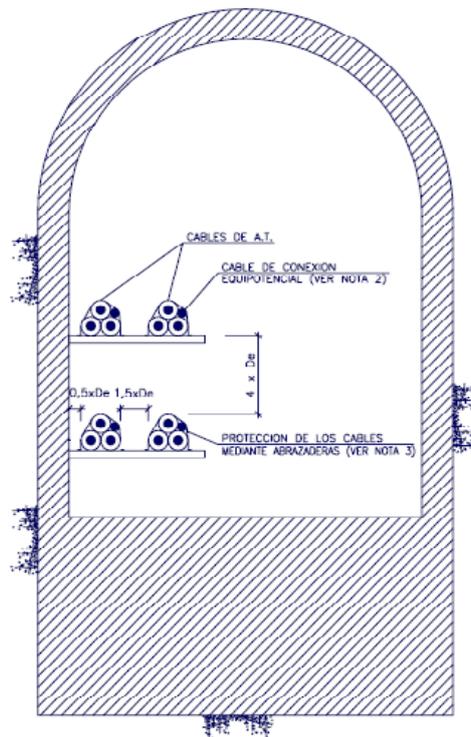


Figura 9. Tendido de cables aislados en galería.

3.1.3. Trazado.

El trazado de las líneas subterráneas de alta tensión se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones acerca de la canalización:

- Su longitud debe ser lo más corta posible.
- Se ubicará siempre que sea posible en terrenos de dominio público y evitando los ángulos pronunciados.
- A la hora de definir el trazado, se respetará en todo momento el valor mínimo del radio interior de curvatura del cable una vez instalado.
- Por norma general, los cruces de calzadas se hacen perpendiculares a sus ejes y el trazado en posición horizontal y en línea recta, siempre que sea posible.
- Se deben respetar, siempre que sea posible, las distancias a las fachadas especificadas por los reglamentos y ordenanzas municipales correspondientes.

Los cables subterráneos de alta tensión directamente enterrados deben cumplir una serie de requisitos que se indicarán a continuación, además de las condiciones que pueden imponer otros Organismos Competentes de la administración, como consecuencia de disposiciones legales, cuando sus instalaciones se vean afectadas por tendido de cables subterráneos de alta tensión.

Para líneas subterráneas se prohíbe la implantación de árboles y la construcción de edificios en instalaciones industriales en la franja definida por la zanja donde van alojados los conductores incrementada a cada lado una distancia mínima de seguridad igual a la mitad de la anchura de la canalización, según lo establecido en el artículo 162 del RD 1955/2000.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Todos estos requisitos no se aplican a cables alojados en galería, en este tipo de canalizaciones la disposición de los cables se hace a criterio de la empresa que los explota.

Cuando es necesario cruzar zonas en las que no es posible o supone graves inconvenientes y dificultades la apertura de zanjas (como es el caso de grandes carreteras, ferrocarriles, etc.) se pueden utilizar máquinas perforadoras “topo” de tipo impacto, hincadora de tuberías o taladradora de barrena. En estos casos se prescinde del diseño de zanja prescrito anteriormente ya que se utiliza el proceso de perforación que se considere más conveniente. Para la adopción de este sistema se precisan zonas amplias a ambos lados del obstáculo a atravesar, para ubicar la maquinaria.

Entre las disposiciones reglamentarias que hay que tener en cuenta están las referentes a las distancias de los conductores a otras instalaciones ajenas a la propia red.

En los proyectos de líneas eléctricas es necesario presentar separatas a los organismos afectados, en las que hay que incluir los cruces y paralelismos de la línea con dicho organismo.

Paralelismos.

Los cables de AT deben cumplir una serie de condiciones y distancias de proximidad para los casos que se indican a continuación [2]. Siempre se debe evitar que los cables queden en el mismo plano vertical que las demás conducciones.

Otros cables de energía eléctrica.

Los cables de alta tensión pueden instalarse paralelamente a otros de baja o alta tensión, siempre que se mantenga entre sus proyecciones verticales una distancia mínima de 0,25m si los otros cables son de baja tensión, o una distancia mínima de 0,60m si el paralelismo es entre cables de alta tensión directamente enterrados pertenecientes a distintos circuitos eléctricos.

Cuando estas distancias no se pueden respetar, la conducción más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC instalada entre ambas líneas, o bien se coloca una de las dos bajo tubo.

Si las cables que se canalizan son del mismo nivel de tensión y pertenecen al mismo propietario, se pueden instalar a una distancia menor, manteniéndolos separados con alguna de las protecciones indicadas anteriormente.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Cables de telecomunicación.

La distancia mínima entre los cables de energía eléctrica y los de telecomunicación, si ambos van directamente enterrados, debe ser de 0,20m como mínimo.

Igual que en el caso anterior, si no se puede mantener esta distancia mínima, la canalización más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC instalada entre ambas conducciones, o bien se coloca una de las dos bajo tubo.

Canalizaciones de agua.

La distancia mínima entre los cables de energía eléctrica y los de telecomunicación es de 0,50m, y la de los empalmes de los cables de energía eléctrica y las juntas de las canalizaciones de agua será de 1m. Además se debe procurar que la canalización de agua quede por debajo del nivel del cable eléctrico.

Además se debe procurar mantener una distancia mínima de 0,20m en proyección horizontal, y que la canalización de agua quede por debajo del nivel del cable eléctrico. Se debe asegurar que las arterias importantes de agua queden a distancias superiores a 1m respecto a los cables eléctricos de alta tensión.

También en este caso, si no se puede mantener esta distancia mínima, la canalización más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC instalada entre ambas conducciones, o bien se colocan los cables bajo tubo.

Canalizaciones de gas.

La distancia mínima entre los cables de energía eléctrica y las canalizaciones de gas debe ser de 0,50m. Además, la distancia mínima entre los empalmes de energía eléctrica y las juntas de las canalizaciones de gas debe ser de 1m.

Si no se puede mantener esta distancia mínima, ésta puede reducirse mediante la colocación de una protección suplementaria colocada entre servicios, constituida por materiales preferentemente cerámicos (baldosas, rasillas, ladrillo, etc.) o mediante tubos de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre los cables y la conducción de gas, o se colocan los cables bajo tubo.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Se debe asegurar la ventilación de los conductos, galerías y registros de los cables para evitar la posibilidad de acumulación de gases en su interior.

Hay que evitar en la medida de lo posible la colocación de los cables eléctricos sobre la proyección vertical del conducto de gas, en caso de que sea necesario, el cable debe quedar por debajo de la conducción de gas.

Alcantarillado.

La distancia mínima entre los cables de energía eléctrica y el alcantarillado debe ser de 0,50m.

Si no se puede mantener esta distancia mínima, la canalización más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o bien se colocan los cables bajo tubo.

Depósitos de carburante.

La distancia mínima entre los cables de energía eléctrica y los depósitos de carburante debe ser de 1,20cm.

Si no se puede mantener esta distancia mínima, la canalización más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o bien se colocan los cables bajo tubo.

Cruzamientos.

Vías públicas.

En los cruzamientos con calles y carreteras los cables deben ir bajo tubo y hormigonados. La profundidad mínima hasta la parte superior del tubo más próximo a la superficie debe ser 0,6m. El cruce debe ser perpendicular al eje del vial siempre que sea posible.

En todo caso deben tenerse en cuenta las especificaciones de las normas y ordenanzas vigentes que correspondan.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Ferrocarriles.

Los cables deben ir bajo tubo y hormigonados. Dichas canalizaciones entubadas deberán rebasar en 1,5m las vías férreas por cada extremo. El cruce debe ser perpendicular al eje del vial siempre que sea posible. La parte superior del tubo más próximo a la superficie quedará a una profundidad mínima de 1,1m respecto de la cara inferior de la traviesa.

Siempre se debe procurar efectuar el cruzamiento por los lugares con menor anchura de la zona del ferrocarril. En todo caso, deben tenerse en cuenta las especificaciones de la correspondiente autorización de RENFE.

Otros cables de energía eléctrica.

La distancia mínima entre un cable de energía eléctrica de alta tensión y un cable de baja tensión, ambos directamente enterrados, debe ser de 0,25m. En cruzamientos con otras líneas de alta tensión, la distancia mínima que se debe respetar es de 0,25m. La distancia del punto de cruce a los empalmes debe ser mayor a 1m.

Siempre que sea posible debe hacerse que el cable de alta tensión discorra por debajo de los de baja tensión. Cuando estas distancias no se pueden respetar, el cable instalado más recientemente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se instala una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o se bien se coloca una de ellas bajo tubo.

Cables de telecomunicación.

La separación mínima entre los cables de energía eléctrica y los de telecomunicación debe ser de 0,25m. El cruzamiento no debe realizarse correspondiendo con un empalme del cable de telecomunicación, en todo caso la distancia del punto de cruce a los empalmes, tanto del cable de energía como del cable de telecomunicación debe ser mayor a 1m.

Cuando no puedan respetarse estas distancias, el cable más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas líneas, o bien se coloca una de ellas bajo tubo.

En cruzamientos con cables telefónicos, en caso de existir convenios con las distintas compañías telefónicas, se deberá tener en cuenta lo especificado en los correspondientes acuerdos.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Canalizaciones de agua.

La separación mínima entre los cables de energía eléctrica y las canalizaciones de agua, vapor, etc. debe ser de 0,25m. Se debe evitar el cruce por la vertical de las juntas de las canalizaciones de agua, o de los empalmes de la canalización eléctrica, situando unas y otros a una distancia superior a 1m del cruce.

Cuando no puedan respetarse estas distancias, la conducción más reciente se debe disponer separada mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o se colocan los cables bajo tubo.

Canalizaciones de gas.

La distancia mínima del cruce de una línea eléctrica de alta tensión con una canalización de gas debe ser de 25cm. Nunca se debe realizar el cruce del cable eléctrico sobre la proyección vertical de las juntas de la canalización de gas.

Si no se puede mantener esta distancia mínima, ésta puede reducirse mediante la colocación de una protección suplementaria colocada entre servicios, constituida por materiales preferentemente cerámicos (baldosas, rasillas, ladrillo, etc.) esta protección suplementaria debe garantizar una cobertura mínima longitudinal de 0,45m a ambos lados del cruce y 0,30m de anchura centrada con la instalación que se pretende proteger. En el caso de líneas subterráneas entubadas se considera como protección suplementaria el propio tubo, los tubos deben estar constituidos por materiales con adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre los cables y la conducción de gas, o se colocan los cables bajo tubo.

Canalizaciones de alcantarillado.

En los cruzamientos de cables eléctricos con conducciones de alcantarillado, se debe evitar el ataque de la bóveda de la conducción, manteniendo una distancia mínima de 50cm. Se admitirá incidir en la pared siempre que esta no quede debilitada.

Se procurará pasar los cables por encima de las conducciones de alcantarillado. Si no es posible, se pasará por debajo, y los cables se dispondrán separados mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o se colocan los cables bajo tubo.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Depósitos de carburante.

Los cables se dispondrán separados mediante tubos, conductos o divisorias constituidos por materiales de adecuada resistencia mecánica, con una resistencia de compresión de 450N y que soporten un impacto de energía de 20J si el diámetro exterior del tubo no es superior a 90mm, 28J si mide entre 90 y 140mm y de 40J si es superior a 140mm. En la práctica se emplean una protección mediante placas de PVC entre ambas conducciones, o se colocan los cables bajo tubo.

Se deben evitar los cruzamientos de cables eléctricos sobre depósitos de carburantes. Los cables deben bordear el depósito protegidos adecuadamente, quedando a una distancia mínima de 1,20m del mismo. Los extremos de los tubos deben rebasar el depósito como mínimo 2m por cada extremo.

3.1.4. Accesorios: empalmes y terminales.

Los accesorios se utilizan para dar continuidad al cable, deben ser adecuados a la naturaleza, composición y sección de los cables, nunca deberán aumentar la resistencia eléctrica de éstos. Además deben ser adecuados a las características ambientales: interior, exterior, contaminación, etc.

En las instalaciones subterráneas los accesorios de los cables subterráneos se efectúan de acuerdo con las instrucciones del fabricante, empleando los materiales adecuados para garantizar la perfecta continuidad del conductor y su aislamiento. Cabe destacar que en estas instalaciones los accesorios son elementos muy críticos desde el punto de vista del aislamiento porque suponen una discontinuidad de campo eléctrico, esto se debe a que interrumpen el aislamiento principal del cable, que se recompone mediante el montaje en obra de los diferentes componentes del accesorio. Por tanto, en los puntos de unión de los distintos tramos de tendido se utilizan empalmes adecuados a las características de los conductores a unir. El montaje debe ser realizado por personal especializado.

Las líneas se tienden en tramos de la mayor longitud posible, con el fin de que el número de empalmes sea mínimo. A la hora de definir la longitud del tendido hay que tener en cuenta las dimensiones de las bobinas en que suministra el cable, ya que tramos de mayor longitud implican bobinas más grandes, lo que incrementa las dificultades de transporte, el precio y el plazo de suministro. Por tanto, para cada proyecto hay que analizar la posibilidad de realizar un mayor número de empalmes frente a la repercusión de emplear bobinas de mayor tamaño.

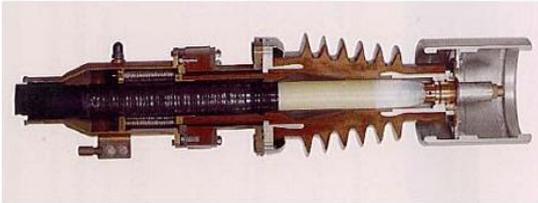
Con el fin de que no sean elementos que limiten la capacidad de transporte de la instalación, los empalmes y terminales deben cumplir una serie de condiciones que garanticen que éstos no disminuyan las características eléctricas y mecánicas del cable:

- La conductividad del empalme o terminal deberá ser igual o superior a la de un solo conductor de la misma longitud.
- El aislamiento debe ser tan efectivo como el aislamiento propio del cable.

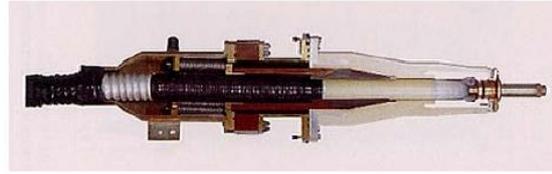


ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- El empalme o terminal debe estar protegido para evitar el deterioro mecánico y la entrada de humedad.
- El empalme o terminal debe resistir los esfuerzos electrodinámicos en caso de cortocircuito, así como el efecto térmico de la corriente, tanto en régimen normal como en el caso de sobrecargas o cortocircuitos.
- Los empalmes y terminales serán premoldeados y ensayados en fábrica según especificaciones.



TERMINAL DE 220KV ACOMETIDA TRANSFORMADOR



TERMINAL DE 220KV ACOMETIDA CELDA BLINDADA



TERMINAL DE 220KV EXTERIOR



EMPALME PREMOLDEADO DE 220KV

Figura 10. Empalmes y terminales de cables aislados de potencia.

3.1.5. Paso aéreo subterráneo.

Las conversiones aéreo subterráneas se utilizan en las siguientes situaciones:

- Cuando se intercala un tramo subterráneo en el cruce de una línea aérea con una carretera.
- Cuando de una línea aérea se deriva un tramo corto de línea subterránea para alimentar un centro de transformación o a una subestación.

Cuando se tiene un cable subterráneo intercalado en una línea aérea, o un cable subterráneo de unión entre una línea aérea y una instalación transformadora se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si el cable subterráneo está destinado a alimentar un centro de transformación se instala un seccionador ubicado en el propio poste de la conversión aéreo subterránea, en uno próximo o en el centro de transformación siempre que el seccionador sea una unidad funcional y de transporte separada del transformador.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

En cualquier caso el seccionador debe quedar a menos de 50m de la conexión aéreo subterránea. El seccionador se instala para separar en centro de transformación del resto de la línea, para así mejorar la calidad del servicio.

- Cuando el cable está intercalado en una línea aérea no es necesario instalar un seccionador.
- La instalación aéreo subterránea se realiza en el apoyo fin de línea sobre un bastidor, donde a una altura mínima de 7m sobre el suelo se instala un juego pararrayos autoválvulas y los terminales del cable, de forma que la conexión entre ambos sea lo más corta posible, tanto por el terminal de línea como por el terminal de puesta a tierra. Los terminales, pararrayos autoválvulas y la bobina de bloqueo de onda portadora sólo se instalaran en pasos de aéreo a subterráneo donde aplique.
- El cable subterráneo en el tramo aéreo de subida hasta la línea aérea va protegido con un tubo o canal cerrado de material sintético, de cemento y derivados, o metálicos con la suficiente resistencia metálica. El interior de los tubos o canales es liso para facilitar la instalación o sustitución del cable o circuito averiado. El tubo o canal se obtura por la parte superior para evitar la entrada de agua, y se empotra en la cimentación del apoyo, sobresaliendo 2,5m por encima del nivel del terreno. El diámetro del tubo tiene que ser como mínimo 1,5 veces el diámetro del cable o el de la terna de cables si son unipolares, y en el caso de canal cerrado su anchura mínima será 1,8 veces el diámetro del cable. Si se instala un solo cable unipolar por tubo o canal, éstos deben ser de plástico o metálicos de material no ferromagnético, para evitar el calentamiento producido por las corrientes inducidas.
- En el tendido de los cables a lo largo del apoyo, éstos van grapados al apoyo, con una separación entre los puntos de fijación tal que se garantice la ausencia de desplazamientos de los cables por efectos electromagnéticos. Los cables deben estar protegidos hasta una altura mínima desde el suelo de 3m, introduciendo cada cable en un tubo de PVC de resistencia mecánica adecuada o realizando una protección de chapa que cubra perfectamente todos los cables, como se ha mencionado anteriormente.
- Únicamente se utilizan los dispositivos de maniobra en las subestaciones, no en los pasos de aéreo a subterráneo.
- Cuando deben instalarse protecciones contra sobretensiones mediante pararrayos autoválvulas o descargadores, se procura que la conexión sea lo más corta posible y sin curvas pronunciadas, garantizando el nivel de aislamiento del elemento a proteger.
- Cuando los cables estén instalados con sistema de puesta a tierra tipo “Single-Point”, el extremo puesto a tierra a través de descargadores será el de entrada a la subestación, siempre que sea posible.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

3.1.6. Sistemas de puesta a tierra.

Como ya se ha indicado anteriormente, los cables eléctricos aislados disponen de una pantalla metálica de cobre o aluminio sobre la que se inducen tensiones. Dependiendo del sistema de conexión de puesta a tierra de las pantallas se pueden dar dos fenómenos distintos:

- 1- Pueden aparecer corrientes inducidas que disminuyen la intensidad máxima admisible en el cable
- 2- Pueden aparecer tensiones inducidas que pueden alcanzar valores peligrosos.

La elección del tipo de conexión se realiza para cada proyecto específico, para cada caso habrá que tomar medidas correctoras ante los efectos que las tensiones inducidas provocan en la instalación.

Por lo tanto, en redes subterráneas de alta tensión la conexión de las pantallas a tierra tiene los siguientes objetivos:

- Eliminar o reducir corrientes de circulación por las pantallas debidas a un acoplamiento inductivo con la corriente que pasa por los cables, evitando así pérdidas de potencia activa.
- Reducir las tensiones inducidas entre las pantallas de los cables y tierra, tanto en régimen permanente como en cortocircuito. Las sobretensiones inducidas durante cortocircuitos pueden provocar averías en los cables, principalmente en sus empalmes y en las cajas de conexiones que se utilizan para la transposición de pantallas, así como la perforación del aislamiento de la cubierta.

Las pantallas metálicas de los cables se conectan a tierra al menos en una de sus cajas terminales extremas. Cuando no se conectan ambos extremos a tierra, el proyectista debe justificar que en el extremo no conectado las tensiones provocadas por el efecto de las faltas a tierra o por inducción de tensión entre la tierra y pantalla, no producen una tensión de contacto aplicada superior a la admisible, salvo que en ese extremo la pantalla esté protegida por envolvente metálica puesta a tierra o que sea inaccesible. También debe justificar que el aislamiento de la cubierta es suficiente para soportar las tensiones que pueden aparecer en servicio o en caso de defecto.

Se puede evitar el cálculo y comprobación de las tensiones de contacto ubicando los terminales de los cables junto con las extremidades de las pantallas en el interior de envolvente metálicas puestas a tierra, o instalándolas a una distancia del pasillo tal que resulten inaccesibles para las personas.

Los tipos de conexión a tierra de las pantallas metálicas de los cables aislados son:

- Sistema de puesta a tierra *Solid Bonding* ó puesta a tierra en ambos extremos.
- Sistema de puesta a tierra *Single Bonding* ó puesta a tierra en un solo punto.
- Sistema de puesta a tierra *Cross Bonding* ó transposición de pantallas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSION

Y los elementos que se conectan a tierra en las líneas subterráneas de Alta Tensión son:

- Los bastidores de los elementos de protección.
- Apoyos y pararrayos autoválvulas, en los pasos aéreo-subterráneos.
- Pantallas metálicas de los cables, empalmes y terminales.

Sistema de puesta a tierra *Solid Bonding* ó puesta a tierra en ambos extremos (“Both Ends”).

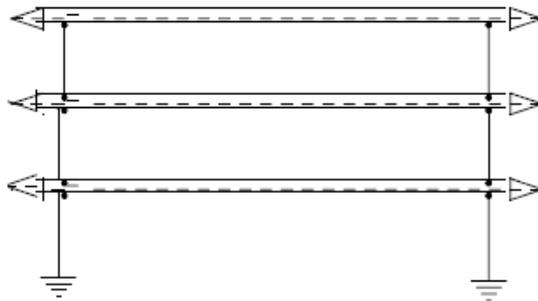


Figura 11. Esquema de conexión de las pantallas tipo Both-Ends.

Se aplica a líneas de media tensión y en general a líneas de poca longitud en las que el tendido normalmente se hace en un solo tramo, siempre que la potencia de pérdidas pueda ser asumible. Es decir, donde la disminución de la intensidad máxima admisible en el conductor debido a la corriente de pantalla se asume en el proyecto de la línea. Cuando la corriente que circula por el cable es superior a 500 A las pérdidas son elevadas y se suele recurrir a disposiciones de conexión entre pantallas especiales.

En este tipo de conexión las pantallas de los cables son continuas y se conectan a tierra en ambos extremos de la línea.

Las ventajas que presenta es que es un sistema de conexión sencillo y de poco coste, en el que no aparecen tensiones inducidas en las pantallas que puedan llegar a ser peligrosas, además las pantallas actúan como apantallamiento reduciendo tensiones inducidas en cables paralelos. En régimen permanente, las tensiones de las pantallas entre sí y respecto a tierra son pequeñas, y la tensión de contacto en los extremos de las pantallas es nula. Como la disposición de los cables es a tresbolillo, en régimen permanente se cancela la tensión inducida a lo largo de la pantalla de los conductores.

El inconveniente de este tipo de conexión es que aparecen corrientes inducidas en las pantallas que provocan un aumento de la temperatura del cable, y por lo tanto una reducción de la intensidad admisible en el conductor. Por eso se utiliza para media tensión y distancias de pocos kilómetros.

En cuanto a la instalación de este sistema de puesta a tierra, conviene tener en cuenta que cuanto más juntos se coloquen los cables más se reduce la tensión inducida en pantalla y por tanto la corriente de circulación. Además, para no superar las tensiones soportadas por la cubierta, conviene conectar las pantallas entre sí y a tierra al menos cada dos o tres kilómetros (dependiendo de la intensidad de defecto a tierra), ya que en



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

caso de defecto en un punto intermedio del cable, la corriente de cortocircuito que circula por la pantalla se reparte entre uno y otro lado de la misma hacia las tierras de cada extremo. El reparto de la corriente dependerá de la resistencia de puesta a tierra de cada extremo y de la proximidad del fallo a uno y otro extremo.

Sistema de puesta a tierra *Single-Bonding* ó puesta a tierra en un solo punto.

Este tipo de conexión se utiliza para líneas de pequeña longitud, con uno o dos tramos como máximo, en las que es necesario aprovechar al máximo la intensidad admisible en el conductor sin las limitaciones que provocan las corrientes de pantalla. Se aplica para cables de tensión asignada igual o superior a 66kV, y con una longitud no superior a 500-600m.

Dentro de este sistema se pueden distinguir dos tipos de conexiones:

- Conexión Single Point, que se utiliza en tramos cortos y en empalmes.
 - Conexión Mid Point, que se utiliza para tramos más largos en los que la línea no puede ser tendida en un solo tramo y es necesaria la realización de un único empalme intermedio.
- En un solo tramo (Single Point): se conecta rígidamente a tierra la pantalla en un solo extremo de la línea, conectando el otro extremo a tierra a través de descargadores.

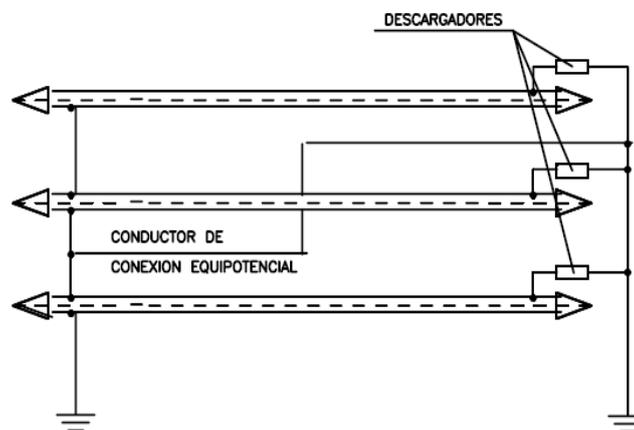


Figura 12. Esquema de conexión de las pantallas tipo Single-Point.

- Con dos tramos (Mid Point): cuando la longitud de la línea requiere que ésta sea tendida en dos tramos con un empalme intermedio, las pantallas se conectan rígidamente a tierra en el empalme, y los dos extremos se conectan a tierra a través de descargadores.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

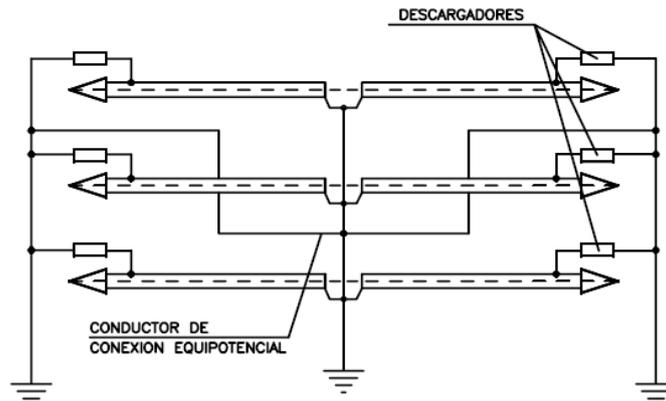


Figura 13. Esquema de conexión de las pantallas tipo Mid-Point.

Para un mismo valor de tensión inducida en régimen permanente en el extremo de la pantalla no conectada a tierra, la disposición en Mid Point permite cubrir el doble de longitud que el Single Point al conectar las pantallas a tierra en la mitad de la longitud del cable dejando los dos extremos abiertos.

La ventaja de la conexión a tierra de las pantallas en un único extremo es que se elimina la corriente de circulación inducida en la pantalla (las pérdidas por corrientes de Foucault siempre existen, pero se pueden considerar despreciables), con lo que se eliminan pérdidas y se aprovecha la capacidad de transporte del conductor. Pero hay que tener en cuenta que en el extremo que no está puesto a tierra aparecen tensiones inducidas que no deben superar los 150V en condiciones nominales de servicio y con la máxima corriente admisible del cable. Lo que supone una limitación de la máxima longitud por tramo que debe tener el cable en cada proyecto.

El inconveniente de este sistema de puesta a tierra es que aparece una tensión inducida en régimen permanente en el extremo de las pantallas no conectadas a tierra, de una magnitud tal que obliga a tener en cuenta las tensiones de contacto en las pantallas y en caso necesario evitar su accesibilidad para garantizar la seguridad de las personas. En régimen transitorio se producen unas tensiones muy elevadas en los extremos de las pantallas no conectadas a tierra que obligan a proteger la cubierta de los cables con limitadores de tensión de pantalla.

Otro aspecto a tener en cuenta es que cuando el punto de puesta a tierra es accesible, como es el caso de terminales en transiciones de aéreo-subterráneo o terminales en subestaciones, se debe proteger éste con una carcasa de plástico o mediante encintado.

Además en dicho punto se deben instalar descargadores de tensión entre la pantalla y tierra, para que sobretensiones inducidas en las pantallas ante fenómenos transitorios, como por ejemplo sobretensiones atmosféricas o de maniobra, no impliquen averías en la cubierta del cable. Los descargadores se particularizarán para cada proyecto, de manera que garanticen una protección eficaz, es decir, que se garantice que no actúan en cortocircuito.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

En este tipo de conexión es necesario el tendido a lo largo del trazado del cable de un conductor equipotencial conectado a tierra en ambos extremos, como unión equipotencial entre los diferentes electrodos de puesta a tierra, para reducir las tensiones inducidas en las pantallas en caso de cortocircuitos. Este conductor equipotencial se debe transponer para evitar corrientes de circulación y pérdidas de potencia, ya que está sujeto a inducción por parte de los cables de potencia, salvo que se transpongan los conductores de fase. De forma alternativa se puede conseguir el mismo efecto si el conductor equipotencial se coloca en el centro de la disposición de conductores al tresbolillo. En canalizaciones entubadas, se instala un tubo de plástico de doble pared (corrugada la externa y lisa la interna) para el tendido de dicho cable de tierra. La sección del conductor equipotencial debe ser capaz de soportar la corriente de defecto a tierra prevista de la instalación. Para lograr que la tensión inducida en la pantalla en caso de defecto monofásico sea lo menor posible, es necesario que la distancia entre conductor de fase por el que circula la corriente de defecto y el conductor equipotencial sea lo menor posible.

Sistema de puesta a tierra *Crossbonding* ó transposición de pantallas.

Se utiliza para cables de tensión asignada igual o superior a 36/66 kV y para grandes longitudes de cable, en las que son necesarios dos o más empalmes intermedios, y donde se quiera eliminar las corrientes de pantalla

Consiste en interrumpir las pantallas y transponerlas ordenadamente, aprovechando los puntos de empalme de los cables, para neutralizar la tensión inducida en el total de tres tramos consecutivos que tengan longitudes sensiblemente iguales. Además se ponen a tierra ambos extremos de la línea, con lo que resulta una corriente de pantalla despreciable.

Es decir, cada *Crossbonding* está formado por tres tramos de cable que deben ser de la misma longitud, con una longitud máxima para cada tramo de 500-600 m. El final de cada tramo donde se realiza la transposición de pantallas se hace coincidir con los empalmes.

Por tanto, hay que estudiar la longitud total de la línea y el número de empalmes necesarios, para que el número de tramos en los que queda dividida la línea sea tres o múltiplo de tres.

En instalaciones de grandes longitudes en las que es difícil conseguir que el número de tramos sea múltiplo de tres, se combina el *Crossbonding* con uno o dos tramos finales en *Single Point*.

La ventaja de este sistema es que para una disposición de conductores en triángulo, la tensión inducida en régimen permanente en tres tramos consecutivos de pantallas es nula, ya que es la suma de tres tensiones iguales desfasadas 120° , al ser las inducciones mutuas entre conductores y pantallas iguales en las tres fases. Como consecuencia no hay corrientes de circulación por las pantallas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

La ventaja de este tipo de conexión frente al Single Point es que no necesita un conductor paralelo de retorno por tierra, ya que las pantallas forman un paso continuo desde un extremo a otro de la línea y están puestas a tierra en ambos extremos, de forma que ante una avería, la corriente de falta puede circular por ellas. Además, debido a la transposición de pantallas, la tensión inducida en cables paralelos durante una falta es menor es menor que en el caso de emplear cable paralelo de retorno por tierra.

En este caso, la tensión inducida en las pantallas es máxima en los empalmes intermedios de transposición, y no debe superar los 150V en condiciones nominales de servicio y con la máxima corriente admisible por el conductor, considerando el tramo más largo. Las tensiones inducidas tanto en régimen permanente como en cortocircuito se calculan para cada proyecto. En los puntos donde se realiza la transposición de pantallas se deben instalar unas cajas de conexión provistas de limitadores de tensión de pantalla.

Hay dos tipos de conexión Crossbonding:

- Crossbonding seccionado:

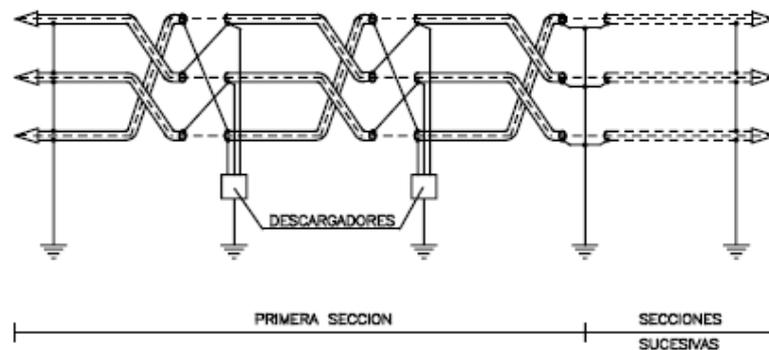


Figura 14. Esquema de conexión de las pantallas tipo Crossbonding seccionado.

Que consiste en dividir la sección total de la línea en secciones independientes (constituidas por tres tramos elementales), conectadas en serie, de forma que en la unión de entre dos secciones, y en los extremos de la línea, las pantallas se conectan rígidamente a tierra, y en los empalmes intermedios de cada sección se realiza la permutación de fases y pantallas,

- Crossbonding continuo:

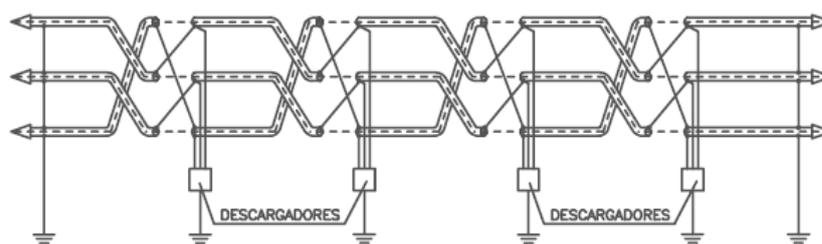


Figura 15. Esquema de conexión de las pantallas tipo Crossbonding continuo.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Consiste en permutar tanto las pantallas como las fases en cada empalme intermedio a lo largo de la longitud total de la línea, y conectar las pantallas rígidamente a tierra en los extremos de ésta.

La elección de un tipo u otro de Crossbonding se hace para cada proyecto, en función de la importancia de los siguientes aspectos:

- En el Crossbonding seccionado es necesario dividir la longitud total de la línea en un número de tramos múltiplo de tres, y además las longitudes de los tres tramos que forman cada sección deben ser sensiblemente iguales. En el crossbonding continuo, el efecto relativo de los tramos elementales no uniformes se reduce al aumentar el número de tramos, además es posible que el número de tramos no sea múltiplo de tres siempre que las longitudes de los tramos sean sensiblemente iguales para cada fase.
- En el Crossbonding seccionado, la conexión rígida a tierra en los extremos de cada sección permite que, ante una avería, la corriente de falta se distribuya entre las tres pantallas de los cables, excepto en la sección donde se ha provocado la falta. En el caso de Crossbonding continuo, esta intensidad circulará siempre por la misma pantalla.
- En el Crossbonding continuo, es posible controlar en todo momento la corriente de pantalla, cualquiera q sea el número de tramos, midiéndola en uno de sus extremos. Esto permite un control del aislamiento de la cubierta y de los descargadores de tensión de manera sencilla, ya que basta con levantar dos conexiones de puesta a tierra (en ambos extremos) y probar desde uno de ellos. En el Crossbonding seccionado, solo es posible controlar cada sección independientemente.
- En el Crossbonding seccionado, el número de descargadores a emplear es inferior al empleado en el Crossbonding continuo.

Elementos que constituyen la puesta a tierra.

Los elementos que constituyen la puesta a tierra son:

- Los elementos de conexión de puesta a tierra.
- La línea de tierra.
- Elementos de conexión de puesta a tierra.
 - Conexión rígida: la conexión directa de las pantallas a tierra, se realiza mediante un puente desmontable, instalado en el interior de una caja metálica estanca pintada interior y exteriormente con resina de poliéster, apta para instalación intemperie.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

La conexión se hace mediante conductor de Cu con aislamiento 0,6/1kV, y con una sección tal que permita la conducción de la corriente total de falta especificada para la pantalla en cada nivel de tensión.

Las secciones normalizadas según el nivel de tensión son:

- 150mm² para 45 y 66 kV.
- 185mm² para 132 y 220 kV.

- Punto abierto en conexión de pantallas a tierra en un solo extremo (Single Point): en este caso se emplean cajas de puesta a tierra, unipolares o tripolares, para la conexión a tierra de las pantallas a través de descargadores.

Estas cajas son metálicas y disponen de los orificios necesarios para recibir los cables de conexión de pantallas y las barras de contacto.

Los descargadores son de óxido de zinc. La sobretensión temporal soportada sin descargar a frecuencia industrial será calculada según la guía de aplicación ANSI/IEEE Std.575-1988, con los datos de intensidad máxima de cortocircuito fase-tierra de la red y con el doble del tiempo de despeje de falta considerados en cada proyecto específico.

El cable de conexión pantallas-descargadores será concéntrico con aislamiento 0,6/1 kV, y con sección de Cu de:

- 2x150mm² para 45 y 66 kV.
- 2x185mm² para 132 y 220 kV.

El conductor exterior está directamente puesto a tierra en ambos extremos, y el interior será el que conecte la pantalla del cable con el descargador.

Para garantizar la eficaz protección del cable, la máxima longitud de esta conexión debe ser de 10 a 20 m.

- Cruzamiento de pantallas: Se emplea una caja tripolar de cruce de pantallas (idéntica a la tripolar de puesta a tierra del apartado anterior), apta para instalación directamente enterrada. Para la puesta a tierra directa de los empalmes intermedios en el crossbonding seccionado, se utilizará esta misma caja pero sin instalar descargadores.

El cable de conexión pantallas-caja, está compuesto por dos conductores concéntricos, cada uno de los cuales conecta uno de los dos extremos de la pantalla interrumpida a sendas barras de contacto para su cruce.

El aislamiento será de 0,6/1 kV y la sección será al menos igual a la sección de pantalla del cable y, por tanto, capaz de soportar la intensidad de cortocircuito durante un tiempo de 0,5 s. Las secciones normalizadas son:

- 2x150mm² para 45 y 66 kV.
- 2x185mm² para 132 y 220 kV.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Conexión equipotencial de puestas a tierra: se hace mediante conductor de Cu, con aislamiento 0,6/1 kV a efectos de protección contra la corrosión.

La sección del cable se calcula para que permita la conducción de la intensidad de cortocircuito, durante un tiempo de 0,5 s. Las secciones normalizadas son:

- 150mm² para 45 y 66 kV.
- 185mm² para 132 y 220 kV.

Línea de tierra.

La línea de tierra es el conductor que une el electrodo de puesta a tierra con el punto de la instalación que ha de conectarse a tierra, es decir, las cajas de puesta a tierra de empalmes y terminales.

Está constituida por conductores de cobre desnudo según RU 3401. En función de la corriente de defecto y de la duración del mismo se determinan las secciones mínimas del conductor a emplear por la línea de tierra, a efectos de no alcanzar su temperatura máxima.

Las secciones normalizadas según el nivel de tensión serán:

- 150mm² para 45 y 66 kV.
- 185mm² para 132 y 220 kV.

Electrodo de puesta a tierra.

Los electrodos de puesta a tierra están constituidos, bien por picas de acero-cobre (según RU 3401), bien por conductores de cobre desnudo enterrados horizontalmente (según RU 3401), o bien por combinación de ambos.

En las terminaciones en subestaciones, se empleará el electrodo de puesta a tierra propio de la subestación.

En los entroques aéreo-subterráneos, el electrodo de puesta a tierra se realizará en anillo cerrado.

En los empalmes se instalarán 2 picas de 2m de longitud unidas por 4m de cable de cobre de 95mm² de sección. En el punto medio de dicho cable se conectará, mediante soldadura aluminio térmica, la línea de tierra.



4. Capacidad de transporte de un sistema de cables aislados de potencia.

4.1. Descripción del fenómeno térmico.

El cálculo de la intensidad máxima admisible que puede circular por un cable en régimen permanente, consiste en resolver un problema de transferencia de calor, de forma que las pérdidas de potencia activa generadas en el cable se disipen al entorno sin que el aislamiento del cable alcance una temperatura excesiva que pueda deteriorar sus características eléctricas, mecánicas o químicas.

El calentamiento del cable y de su envolvente se produce por las diferentes pérdidas que tienen lugar en el cable, estas pérdidas son:

- Pérdidas por efecto Joule en el conductor.
- Pérdidas dieléctricas en el aislante.
- Pérdidas por efecto Joule debidas a las corrientes inducidas en las pantallas.

Como es sabido, el calor generado se puede transmitir por tres vías: conducción, convección y radiación. Si un cable está instalado al aire, el calor pasa del conductor al medio ambiente atravesando las protecciones del propio cable (aislamientos y cubiertas) por conducción. Cuando el cable está en carga, la cubierta presenta una temperatura superior a la del aire que le rodea, y por lo tanto, dicha cubierta lo calienta provocando una circulación de la masa de aire por convección, que refrigera dicha cubierta al evacuar calor. Al mismo tiempo, se produce una radiación de energía al espacio que rodea al cable proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de la cubierta según la ley de Stefan-Boltzmann. Como la diferencia de las temperaturas absolutas de la cubierta y del aire no es muy grande, el calor radiado por la cubierta está compensado en gran parte por la radiación que el cable recibe de la atmósfera, por lo que se puede despreciar esta vía como medio de refrigeración del cable.

Si el cable está enterrado, el calor generado por las pérdidas, después de atravesar las protecciones del cable, llega al terreno donde se diluye por conducción en la gran masa de tierra que rodea al cable. Sólo en el caso en el que el cable estuviera muy próximo a la superficie se apreciaría un aumento de la temperatura en la superficie del terreno.

La metodología que se emplea habitualmente para calcular la capacidad de transporte de líneas subterráneas se basa en un modelo discreto de la instalación que está fundamentado en la analogía eléctrica de las ecuaciones de Fourier. Dicha analogía consiste en considerar cada una de las diferentes capas que separan el conductor del exterior de la instalación como una resistencia térmica. El flujo de calor asociado a la evacuación de las pérdidas de potencia activa del conductor atraviesa este tren de resistencias, y conforme lo atraviesa va provocando una serie de gradientes de temperatura cuya suma determina la diferencia de temperatura existente entre el conductor y el ambiente que rodea a la instalación eléctrica.

Esta metodología se encuentra recogida en las Normas UNE 21144 [3], equivalentes a las normas internacionales CEI 287



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

4.2. Aspectos y parámetros que intervienen en la capacidad de transporte.

Como ya se ha explicado, el cálculo de la capacidad de transporte de un sistema de cables aislados de potencia está sujeto principalmente a la máxima temperatura que los cables pueden alcanzar en servicio. Dicha temperatura depende fundamentalmente del calor disipado en los conductores por efecto Joule. Sin embargo, existen otras fuentes de calor que influyen en la temperatura de los conductores y de las pantallas, que deben ser considerados en el cálculo de la capacidad de transporte de las instalaciones subterráneas.

4.2.1. Resistencia de un conductor.

Cuando un cable se pone en servicio y transporta energía, se calienta. Este calentamiento es debido a las pérdidas de potencia activa por efecto Joule que se producen cuando una corriente atraviesa un conductor. Está demostrado que el calentamiento del cable es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente que circula a través del cable. Además, crece con una magnitud característica del material conductor denominada resistencia eléctrica. Esta resistencia eléctrica del conductor depende de la frecuencia de la corriente y de la temperatura del conductor.

Cuando una corriente alterna pasa a través del conductor de un cable, se induce a su alrededor un campo magnético que genera una fuerza contraelectromotriz en su seno o en los conductores situados en sus proximidades, que se opone al sentido original de la corriente. Esto hace que la intensidad real que recorre el cable sea menor que la que le recorrería si se alimentara con una tensión en corriente continua del mismo valor que la tensión eficaz en corriente alterna aplicada. Esto provoca un aumento de su resistencia óhmica y, por tanto, de las pérdidas por efecto Joule que se generan en dichos cables.

Este fenómeno ocasiona una diferencia en la distribución de la intensidad eléctrica en el seno del conductor, reduciendo la densidad de corriente en las partes del mismo más próximas a su interior, por lo que los valores más elevados se encuentran en la superficie del conductor (efecto piel o pelicular), o reduciendo la intensidad de la corriente que lo recorre a causa de los campos magnéticos provocados por otros conductores situados en sus proximidades (efecto proximidad). El efecto piel es mucho más pronunciado en los conductores de gran sección y a frecuencias elevadas.

La fórmula de la resistencia del conductor en corriente alterna y a la temperatura máxima de servicio es:

$$R = R_{cc} \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (1)$$

siendo:

- R resistencia óhmica en c.a. a la temperatura máxima de servicio de 90° C en Ω/km .
- R_{cc} resistencia óhmica en c.c. a la temperatura máxima de servicio de 90° C en Ω/km .
- y_s factor de efecto pelicular.
- y_p factor de proximidad.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

La resistencia R_{cc} en corriente continua a la temperatura máxima de servicio ($\theta=90^{\circ}\text{C}$), es:

$$R_{cc} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20)) \quad (2)$$

siendo:

- R_0 la resistencia del conductor en c.c. a 20°C en Ω/km .
- α coeficiente de temperatura del cobre a 20°C en K^{-1} .

En el caso de cables en tubo de acero o con pantalla o cubierta metálicas, se originan unas corrientes parásitas o de magnetización que ocasionan unas pérdidas adicionales que se calculan añadiendo una resistencia adicional que se verá más adelante.

4.2.2. Pérdidas de potencia en los conductores.

Cuando una corriente I_c atraviesa un conductor, se generan unas pérdidas de potencia activa por efecto Joule cuyo valor por unidad de longitud es:

$$W_c = I_c^2 \cdot R_c \quad (3)$$

siendo:

- R_c resistencia del conductor en corriente alterna y a la temperatura máxima de servicio.

4.2.3. Inductancia y reactancia inductiva.

Cuando por un conductor circula una corriente eléctrica de magnitud variable en el tiempo, se crea en su entorno un campo magnético también variable, que rodea a los restantes conductores del circuito por los que también circulan otras corrientes de naturaleza análoga.

A la relación de proporcionalidad existente entre la variación del flujo magnético y la variación de la corriente eléctrica en el tiempo, se la conoce con el nombre de inductancia. Este flujo magnético variable genera una diferencia de potencial en el propio conductor.

La inductancia de un cable viene dada por la suma de la inductancia propia o interna, ya que parte del flujo generado corta al propio conductor, y la externa o mutua. La inductancia propia de un conductor es constante y solo depende de su formación, esto es, si se trata de un alambre único macizo o si está formado por varios alambres cableados.

La reactancia inductiva depende de la frecuencia del sistema y del valor de la inductancia total, suma de las inductancias propia y mutua del cable.

La reactancia por km de línea viene dada por la fórmula:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (\Omega/\text{km}) \quad (4)$$

siendo:

- f frecuencia de la red en Hz.
L coeficiente de autoinducción entre fases, cuyo valor es:

$$L = 0,5 + 2 \ln \left(\left(\frac{2D_m}{d} \right) 10^4 \right) \quad (\text{H}/\text{km}) \quad (5)$$

siendo:

- D_m separación media geométrica entre fases en mm.
D diámetro del conductor en mm.

4.2.4. Capacidad y pérdidas dieléctricas en los aislamientos.

La capacidad entre dos conductores viene determinada por la relación existente entre la cantidad de electricidad acumulada en ellos y la diferencia de potencial aplicada. Esta capacidad varía de acuerdo con la geometría del cable y los materiales empleados en su construcción. La capacidad para los conductores de sección circular y se calcula con la expresión dada en el apartado 2.2 de las Normas UNE 21144-1-1 [3]:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_a}{d} \right)} \quad (\text{F}/\text{km}) \quad (6)$$

siendo:

- ε permitividad relativa del aislante, cuyo valor es 2,5.
 D_a diámetro exterior del aislamiento en mm.
d diámetro del conductor en mm.

Si entre las armaduras de un condensador se aplica una tensión alterna, se produce un desplazamiento alternativo de las cargas que constituyen el dieléctrico, lo que da origen a una corriente de carga del condensador. Cuando se aplica una tensión sinusoidal sobre un cable sin carga, se produce una corriente capacitiva de desplazamiento que pasa a través del aislamiento. Como los aislantes no son perfectos, el cable, como condensador, presenta una cierta conductancia que deja pasar una pequeña corriente de conducción al ser sometido a una cierta tensión. Esta corriente ocasiona una pérdida de energía activa en el seno del aislante.

Las pérdidas dieléctricas en cada fase y por unidad de longitud en los aislamientos también se calculan con la expresión dada en el apartado 2.2 de las Normas UNE 21144-1-1 [3]:

$$W_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_0^2 \text{tg } \delta \quad (\text{W}/\text{km}) \quad (7)$$

siendo:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- f frecuencia de la red en Hz.
C capacidad del cable en $\mu\text{F}/\text{km}$.
 U_0 tensión de fase en kV.

4.2.5. Tensión inducida en la pantalla.

Las corrientes eléctricas que circulan por los conductores, inducen tensiones en los elementos metálicos que se encuentran en su entorno, generando en estos unas corrientes eléctricas de mayor o menor importancia según la posición relativa y la composición de las diversas cubiertas que conforman el sistema eléctrico, según como vayan instaladas (cortocircuitadas entre sí y a tierra, o no) y según el tipo de material del que estén constituidas (magnético o amagnético).

Normalmente la instalación de las cubiertas metálicas de los cables se realiza cortocircuitándolas a tierra en ambos extremos de la línea como mínimo. Al poner a tierra los extremos de la cubierta metálica del cable, se cierra una espira que rodea una parte del campo magnético generado por la corriente principal del cable, lo que produce un efecto transformador que induce la tensión en la pantalla.

Según el apartado 2.3.1 de la Norma UNE 21144-1-1 [3], la inducción mutua entre el conductor y la pantalla se calcula como:

$$M=0,46 \log \frac{2 D_m}{D_p} \text{ (nH / km)} \quad (8)$$

donde:

- D_m distancia entre ejes de conductores en mm.
 D_p diámetro medio de la pantalla en mm.

Si las pantallas se conectaran a tierra en un solo extremo, aparecerían unas tensiones en el extremo libre en pantallas y tierra y entre pantallas de distinta fase, que podrían llegar a ser peligrosas. El valor de esta tensión inducida en la pantalla en condiciones de funcionamiento normal por efecto de la corriente que circula por el conductor de las otras fases, se calcula según la expresión:

$$E = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M \cdot I \cdot 10^{-3} \text{ (V/km)} \quad (9)$$

donde:

- M inducción mutua entre conductor y pantalla en mH/km.
I intensidad por el conductor en A.
f frecuencia de la red en Hz.

4.2.6. Pérdidas por efecto Joule en la pantalla.

Las pérdidas de potencia en las pantallas se deben por un lado a las pérdidas óhmicas debidas al paso de las corrientes inducidas por las pantallas, y por el otro lado a las pérdidas causadas por la existencia de corrientes de Foucault. Estas pérdidas se calculan como un incremento aparente (λ) de la resistencia del conductor, es decir:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

$$W_{\text{pantalla}} = \lambda \cdot R \cdot I^2 \cdot 10^{-3} \text{ (kW/km)} \quad (10)$$

El factor λ recoge la influencia de las corrientes de circulación por la pantalla debido a la aparición de las tensiones inducidas (λ'), y la influencia de las corrientes de Foucault en la propia pantalla (λ'').

$$\lambda = \lambda' + \lambda'' \quad (11)$$

Cuando la pantalla se pone a tierra en ambos extremos, la influencia de las corrientes de Foucault (λ'') es despreciable frente a la influencia de las corrientes que circulan por la pantalla (λ').

Cuando la pantalla se pone a tierra en un único extremo o se realiza la conexión *Crossbonding*, no hay circulación de corrientes por la pantalla y todas las pérdidas que se producen en ella son debidas a la existencia de corrientes de Foucault (λ'').

Los valores de los parámetros que relacionan las pérdidas en la pantalla debidas a corrientes de circulación (λ'), y las pérdidas debidas a corrientes de Foucault (λ''), se calculan con las expresiones que aparecen en el apartado 2.3 de la Norma UNE 21144-1-1 [3].

4.2.7. Resistencias térmicas.

Las pérdidas de energía de los cables, es decir, las fuentes de generación de calor, están en los conductores, las protecciones metálicas (pantallas y armaduras) y en el dieléctrico. El camino que debe seguir el calor para llegar a disiparse hacia el medio ambiente varía según cuál sea el lugar en el que se ha generado: el calor procedente del conductor debe atravesar los aislamientos y las cubiertas, mientras que el generado en las pantallas y armaduras solo debe atravesar las cubiertas.

La determinación de la intensidad máxima admisible en servicio permanente, o lo que es lo mismo, aquella a la que se alcanza el equilibrio térmico, depende únicamente del valor de la resistencia térmica total de los elementos que tiene que atravesar el calor generado en el cable para llegar al medio ambiente. Esta resistencia térmica total está formada por un conjunto de resistencias térmicas parciales.

Los diferentes elementos del cable y el medio exterior, oponen una resistencia a la propagación del calor producido por las fuentes de calor consideradas en anteriores apartados, en el interior del cable. Esta resistencia depende de la resistividad térmica de los distintos materiales y de los espesores de los mismos.

Para calcular estos valores de la resistencia térmica se sigue el guión marcado en la Norma UNE 21144-2-1 [3].

Los valores de resistencia térmica entre el conductor y la pantalla (T_1) y la de la cubierta exterior (T_3) son propios de cada cable y dependen únicamente de las



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

dimensiones del cable y de la resistividad térmica del aislante o de la cubierta. El valor de la resistencia térmica del medio exterior (T_4) depende de la instalación realizada (al aire, directamente enterrada o enterrada bajo tubo) y de las características del terreno.

Casos particulares.

Hay elementos del sistema que no se pueden modelar de forma continua y se adaptan a partir de la Norma UNE.

- Encofrado.

Cuando las líneas van encofradas en un bloque de material distinto al del terreno donde están soterradas (normalmente hormigón), debido a que el encofrado es rectangular, su modelado y el cálculo de la resistencia térmica se hacen muy complicados. En estos casos se aplica una corrección propuesta en la sección 2.2.7.3 de la Norma UNE 21144-2-1 [3]. Esta corrección consiste en calcular la resistencia térmica suponiendo el terreno homogéneo, y después se corrige su valor para tener en cuenta la diferencia entre la resistividad térmica del hormigón y la del terreno.

- Galería.

Los cables alojados en galería son un caso especial, ya que hay que aplicarles modelos de transmisión de calor por convección y radiación. En este caso se aplica la expresión que aparece en la sección 2.2.1.1. de la Norma UNE 21144-2-1 [3], para calcular la resistencia térmica existente entre la superficie de los cables y el ambiente.

- Cables en conductos o tubos.

En cables colocados en conductos, la transferencia de calor se realiza por convección. Esto hace necesario la utilización de fórmulas especiales para calcular la resistencia térmica que representa el vacío existente entre los cables y el tubo. Las fórmulas necesarias para este caso se obtienen de la sección 2.2.7 de la Norma UNE 21144-2-1 [3]. Una vez obtenida la resistencia térmica, se puede obtener un valor de la resistividad térmica equivalente del medio del que está relleno el tubo. Con lo que dicho medio pasa a tratarse como un material sólido y por tanto se trata como un medio conductivo más.

4.2.8. Intensidad máxima admisible.

La intensidad máxima admisible por un cable, es aquella que provoca el calentamiento del conductor hasta la temperatura máxima de servicio en régimen permanente. En el caso de los cables de alta tensión, tanto los cables con aislamiento seco de XLPE como los cables aislados con papel impregnado, pueden soportar una temperatura en servicio del conductor de hasta 90°C sin que el aislamiento pierda sus propiedades [6].

Como ya se ha mencionado, el conductor y su envolvente aislante se calientan debido al calor producido por:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Pérdidas por efecto Joule en el conductor.
- Pérdidas dieléctricas del aislante.
- Pérdidas por efecto Joule debidas a la corriente por la pantalla.

El calor producido en el conductor es evacuado a través de las distintas capas aislantes hasta la cubierta y transmitido al medio exterior por las siguientes vías:

- Por convección y radiación en los cables al aire.
- Por conducción en los cables directamente enterrados.

El cálculo de la intensidad admisible se realiza aplicando el punto 1.4.1 de la Norma UNE 21144-1-1 [3], utilizando los valores de resistencia del conductor, pérdidas dieléctricas, y resistencia térmica calculados en los apartados anteriores.

Las condiciones normales de instalación se pueden obtener de los valores dados en la Norma UNE 21144-3-1 [3].

4.2.9. Caída de tensión.

Cuando la corriente eléctrica circula por un conductor y éste disipa energía en forma de calor, la energía que recibe del generador debe ser mayor que la que entrega al receptor en una cuantía igual a la de las pérdidas en el cable. Además, la potencia disponible en el extremo receptor del cable es proporcional a la intensidad que lo recorre y a la diferencia de potencial disponible en dicho extremo.

Por continuidad, la cantidad de electrones que entran el cable por unidad de tiempo es la misma que la que sale, la menor potencia disponible en el extremo receptor del cable se debe a que la diferencia de potencial a la entrada del cable es mayor que a la salida. Esta disminución de la diferencia de potencial se conoce con el nombre de caída de tensión.

Para la determinación de la caída de tensión es necesario evaluar las pérdidas que se producen en cada uno de los elementos del cable (conductor, aislamiento y protecciones metálicas). La expresión completa que proporciona el módulo de la caída de tensión en una línea de transporte de energía eléctrica, considerando tanto los parámetros propios de la línea en estudio así como el régimen de conexión de las pantallas de los cables, es la siguiente:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot \sqrt{(R(1+\lambda))^2 + X_L^2} \quad (12)$$

donde:

- ΔU caída de tensión en V.
- I intensidad por la línea en estudio en A.
- R resistencia del conductor en Ω/km .
- λ coeficiente de pérdidas en la pantalla.
- X_L reactancia inductiva de la línea en estudio en Ω/km .
- L longitud en km.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

La intensidad que circula por la línea está relacionada con la potencia transportada según la siguiente expresión:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \quad (13)$$

donde:

- P potencia activa entregada por la línea en kW.
- U tensión compuesta en el extremo de la línea en kV.
- $\cos\varphi$ factor de potencia de la potencia entregada.

La caída de tensión en la línea en tanto por ciento de la tensión en el extremo de la línea se puede expresar como:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{(R \cdot (1 + \lambda))^2 + X_L^2}}{10 \cdot U^2 \cdot \cos\varphi} \cdot P \cdot L \quad (14)$$

Sustituyendo los valores conocidos de U, R a 90 °C, λ y X_L , se obtienen los valores de caída de tensión para la potencia de transporte en función del factor de potencia $\cos\varphi$.

4.2.10. Pérdidas de potencia en la línea.

La pérdida de potencia activa que se dará en una línea al circular por ella una determinada intensidad es según la expresión:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot L \cdot R \cdot (1 + \lambda) \quad (15)$$

donde:

- ΔP pérdida de potencia activa en W.
- I intensidad por la línea en A.
- R resistencia del conductor en Ω/km .
- λ coeficiente de pérdidas en la pantalla.
- L longitud de la línea en km.

La intensidad que circula por la línea está relacionada con la potencia transportada según la siguiente expresión:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \quad (16)$$

donde:

- P potencia activa entregada por la línea en kW.
- U tensión compuesta en el extremo de la línea en kV.
- $\cos\varphi$ factor de potencia.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

La pérdida de potencia activa en la línea en tanto por ciento de la potencia entregada en el extremo de la línea se puede expresar como:

$$\Delta P\% = \frac{R \cdot (1 + \lambda)}{10 \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot P \cdot L \quad (17)$$

Sustituyendo los valores conocidos de U , R a 90°C y λ se obtienen los valores de pérdida de potencia activa en tanto por ciento para la potencia de transporte y en función de su factor de potencia $\cos \varphi$.

Pérdidas de potencia en las canalizaciones de los topes.

En algunas instalaciones soterradas bajo tope, los cables se alojan en canales contruidos con material conductor. En estos casos, las corrientes que circulan por los conductores también inducen corrientes en el tubo del tope que provocan pérdidas de potencia que deben ser tenidas en cuenta en el cálculo de la capacidad de transporte. La expresión de las pérdidas en el tubo del tope es:

$$W_T = \lambda_2 \cdot \sum_i W_{Ci} \quad (18)$$

donde:

W_{Ci} son las pérdidas de potencia del conductor i perteneciente al conjunto de cables canalizados dentro del tope.

λ_2 es el parámetro que relaciona las pérdidas en el tubo del tope con las pérdidas en los conductores, y se calcula según el apartado 2.4.3 de la norma UNE 21144-1-1 [3].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5. Análisis de la explotación de sistemas de cables aislados de potencia.

5.1. Metodología utilizada para el cálculo de la capacidad de transporte nominal.

En el apartado 4 del presente proyecto se ha explicado la metodología que se utiliza normalmente para calcular la capacidad de transporte nominal de las líneas eléctricas subterráneas de alta tensión.

Esta metodología, que está recogida en las Normas UNE 21144 [3], utiliza un modelo discreto de la instalación, basado en la analogía eléctrica de las ecuaciones de Fourier. La analogía considera cada una de las capas que separan al conductor del exterior como una resistencia térmica, y calcula la intensidad máxima admisible del conductor, en función de las resistencias térmicas que tiene que atravesar el calor generado en el cable para llegar al medio ambiente.

Como consecuencia, la precisión de la metodología utilizada en las Normas UNE depende fundamentalmente del cálculo de las resistencias térmicas. A su vez, el cálculo de las resistencias térmicas depende del medio o material del que se compone cada capa. En el caso de medios en los que la transmisión de calor se realiza mediante convección (como es el caso de galerías o tubos sin relleno), el cálculo de las resistencias térmicas correspondientes se realiza mediante fórmulas empíricas. Sin embargo, cuando la transmisión de calor se realiza por conducción, las fórmulas empleadas se basan en el cálculo de factores de forma. La utilización de los factores de forma implica una serie de simplificaciones, tales como considerar isotermas y sin generación interna de calor las diferentes capas en las que se modelan las resistencias.

Por lo tanto, el empleo del modelo de conducción basado en resistencias térmicas implica una pérdida de precisión en los resultados, lo que conlleva un cálculo inexacto de la capacidad de transporte de las instalaciones. Además, el empleo de resistencias térmicas dificulta el modelado de la influencia que tienen las pérdidas de una determinada fase en la temperatura de otras fases y de otras líneas.

Con el fin de llevar a cabo un estudio más exacto de la capacidad de transporte de las líneas subterráneas, en este proyecto se ha utilizado la ayuda de un programa informático que calcula la capacidad de transporte empleando una metodología que presenta ventajas con respecto a la metodología utilizada en las Normas UNE.

La metodología utilizada por el programa, se basa en modelos continuos de conducción que consideran la distribución real de temperaturas en toda la instalación [4]. Para los modelos de no-conducción se calcula la correspondiente conductividad térmica equivalente, a partir de la resistencia térmica especificada por la norma, para después aplicar los modelos de conducción equivalentes. La distribución total de temperaturas se obtiene como superposición de las distribuciones parciales debidas a cada una de las fases de cada una de las líneas que forman la instalación subterránea, obteniendo así un modelo más preciso de interacción térmica entre las diferentes fases de las diferentes líneas que componen la instalación.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Aunque las pérdidas de potencia en los conductores son la principal fuente de calor de las instalaciones eléctricas, también son relevantes las pérdidas de potencia que aparecen en las pantallas de los cables. Estas pérdidas de potencia en las pantallas se deben a las corrientes inducidas en las pantallas como consecuencia del acoplamiento electromagnético entre conductores y pantallas, y dependen en gran medida del tipo de puesta a tierra que se utilice en la instalación. Las Normas UNE evalúan las pérdidas en una pantalla mediante un coeficiente que multiplica a las pérdidas en el conductor correspondiente, sin tener en cuenta la influencia de las corrientes que circulan por el resto de los conductores. El programa informático emplea modelos eléctricos reales que evalúan la relación existente entre las corrientes de los diferentes conductores y las que se inducen en las diferentes pantallas por acoplamiento electromagnético. Además estos modelos tienen en cuenta los diferentes tipos de puesta a tierra empleados en la instalación eléctrica.

5.1.1. Modelado matemático de la transmisión de calor por conducción en medios continuos.

A continuación se explican los modelos matemáticos de transmisión de calor por conducción en medios continuos utilizados por el programa.

Distribuciones de temperatura por conducción en medios continuos.

La conducción estacionaria se basa en dos ecuaciones fundamentales:

1- Ecuación de balance de energías:

$$\nabla \cdot q = q_v \quad (19)$$

2- Ley de Fourier:

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (20)$$

donde:

q es el flujo vectorial de calor por unidad de área

q_v es la densidad volumétrica de generación interna de calor

T es la temperatura

k es la conductividad térmica del medio

La combinación de ambas ecuaciones tiene como resultado la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 T = -\frac{q_v}{k} \quad (21)$$

La ecuación de Poisson define la distribución estacionaria de temperaturas en un medio, considerando generación interna de calor, donde la transmisión del flujo calorífico se produce por conducción. Ésta constituye una ecuación diferencial de segundo orden en derivadas parciales.

En el caso concreto de los modelos de distribución de temperaturas considerados en este proyecto, la ecuación (21) se puede resolver de forma analítica empleando un



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

sistema de coordenadas cilíndricas, considerando que no existe flujo de calor en una determinada dirección principal de dicho sistema de coordenadas.

Así, si se considera el elemento diferencial de volumen de la figura 16, en coordenadas cilíndricas, y el balance de energías que se presenta cuando solo existe flujo de calor radial:

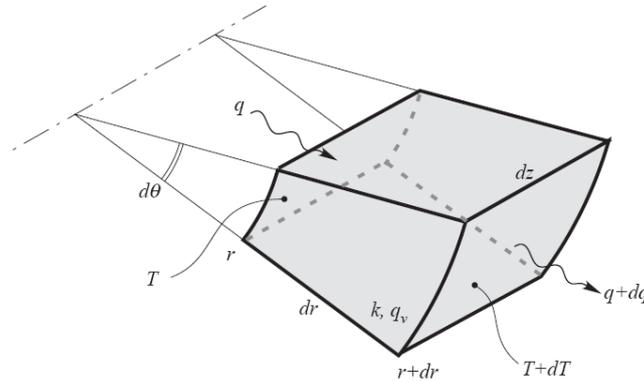


Figura 16. Elemento diferencial en coordenadas cilíndricas.

Haciendo el balance correspondiente de energías en el elemento diferencial, se obtiene la siguiente ecuación:

$$(q + dq) \cdot (r + dr) \cdot dT = q \cdot r \cdot dT + q_v \cdot r \cdot dr \quad (22)$$

Desarrollando la ecuación, simplificando y despreciando infinitésimos de orden superior, se alcanza la siguiente ecuación de equilibrio:

$$q \cdot dr + r \cdot dq = q_v \cdot r \cdot dr \quad (23)$$

La resolución de esta ecuación diferencial abarca dos casos cualitativamente diferentes: distribución de temperaturas debida a generación interna de calor en la corona, y distribución de temperaturas debida a aporte externo de calor desde el interior de la corona. Ambos casos implican diferentes condiciones de contorno. Además, se puede considerar un tercer modelo de distribución, correspondiente a una fuente de calor circular enterrada en un medio semi-infinito. Como se verá más adelante, este tercer modelo se puede obtener a partir de los anteriores. A continuación se desarrollan estos tres tipos de distribuciones.

- Distribución de temperaturas en una corona de radios $r_a < r_b$ debida a generación interna de calor q_v .

La condición de contorno que compete a la ecuación diferencial consiste en asumir como nulo el flujo de calor q en el interior de la corona, puesto que también lo es el aporte externo de calor desde el interior de la corona Q . Esto es:

$$q(r_a) = 0 \quad (24)$$



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Resolviendo la ecuación diferencial con esta condición de contorno, se obtiene la siguiente distribución radial de flujo de calor a lo largo de la corona:

$$q(r) = \frac{q_v}{2} \cdot \frac{r^2 - r_a^2}{r} \quad ; \quad r_a < r < r_b \quad (25)$$

Con la distribución de flujo de calor obtenida, suponiendo una temperatura T_b en el perímetro exterior de la corona y aplicando la ley de Fourier para la conducción, se obtiene la distribución radial de temperaturas a lo largo de la corona:

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dr} \rightarrow -\int_r^{r_b} dT = k \cdot \int_r^{r_b} q(r) \cdot dr \quad (26)$$

Y resolviendo la ecuación queda:

$$T(r) = T_b + \frac{q_v}{2k} \cdot \left[\frac{r_b^2 - r^2}{2} - r_a^2 \cdot \ln\left(\frac{r_b}{r}\right) \right] \quad ; \quad r_a < r < r_b \quad (27)$$

Como caso particular de este, se obtiene las distribuciones radiales de flujo de calor y de temperatura a lo largo de un disco, debidas a generación interna q_v de calor. Para ello, tan sólo es necesario hacer 0 el radio interno r_a de la corona. Esto es:

$$q(r) = \frac{q_v}{2} \cdot r \quad ; \quad 0 < r < r_b \quad (28)$$

$$T(r) = T_b + \frac{q_v}{4k} \cdot (r_b^2 - r^2) \quad ; \quad 0 < r < r_b \quad (29)$$

- Distribución de temperaturas en una corona de radios $r_a < r_b$ debida a aporte externo de calor Q desde el interior de la corona.

En primer lugar, es importante indicar que, asumida nula la generación interna q_v de calor en la corona, la ecuación de balance de energías se simplifica:

$$q \cdot dr + r \cdot dq = 0 \quad (30)$$

En este caso, la condición de contorno que compete a la ecuación diferencial consiste en este caso en fijar un flujo de calor q en el interior de la corona que es función del aporte externo de calor Q que se realiza desde el interior de la corona. Esto es:

$$q(r_a) = \frac{Q}{2\pi \cdot r_a} \quad (31)$$

Resolviendo la ecuación diferencial con la condición de contorno, se obtiene la siguiente distribución radial de flujo de calor a lo largo de la corona:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

$$q(r) = \frac{Q}{2\pi \cdot r} \quad ; \quad r_a < r < r_b \quad (32)$$

Con la distribución de flujos de calor obtenida en (32), suponiendo una temperatura T_b en el perímetro exterior de la corona y aplicando la ley de Fourier para la conducción, se obtiene la distribución radial de temperaturas a lo largo de la corona:

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dr} \rightarrow -\int_r^{r_b} dT = k \cdot \int_r^{r_b} q(r) \cdot dr \quad (33)$$

Y resolviendo la ecuación, se obtiene:

$$T(r) = T_b + \frac{Q}{2\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{r_b}{r}\right) \quad ; \quad r_a < r < r_b \quad (34)$$

- Distribución de temperaturas en medio semi-infinito debida a fuente de calor circular inmersa en dicho medio.

Suponiendo un medio semi-infinito en el que se haya una fuente de calor circular de radio r_0 y que se encuentra fijado en su frontera a una temperatura ambiente T_∞ :

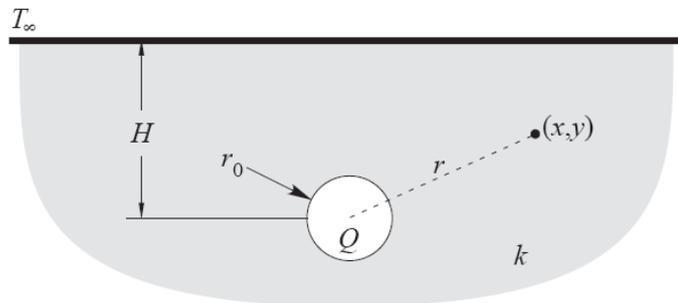


Figura 17. Fuente de calor soterrada en un medio semi-infinito.

Si a esta configuración se le resta la temperatura ambiente T_∞ , se puede descomponer en dos configuraciones anti-simétricas:

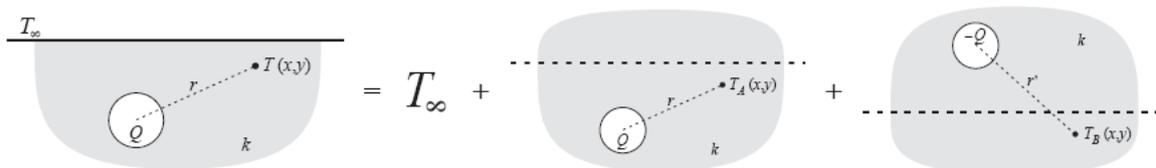


Figura 18. Descomposición por imágenes de la fuente de calor soterrada en un medio semi-infinito.

La primera configuración de esta descomposición es similar a la original, excepto en el hecho de que el terreno se extiende hasta el infinito en todas direcciones. La segunda configuración, anti-simétrica de la primera, representa también un terreno que se extiende hasta el infinito en todas direcciones. Además, esta segunda configuración



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

presenta una fuente de calor en una posición simétrica a la de la fuente original con respecto de la línea de suelo. Esta fuente simétrica se caracteriza por tener un valor de generación de calor igual a la original, pero cambiada de signo, esto es, $-Q$.

Así, la temperatura de un punto (x,y) del terreno puede descomponerse en tres sumandos:

$$T(x, y) = T_{\infty} + T_A(x, y) + T_B(x, y) \quad (35)$$

Las funciones T_A y T_B se obtienen aplicando la distribución de temperaturas en corona de radios $r_a < r_b$ debida a aporte externo de calor desde el interior de la corona, desarrollada en el anterior apartado. Para ello, tan sólo es necesario realizar las siguientes sustituciones:

$$r_a = r_0 ; \quad r_b = r_{\infty} ; \quad T_b = 0 \quad (36)$$

donde

r_{∞} representa un radio ficticio que tiende a infinito.

Aplicando estos cambios, se obtiene:

$$T(x, y) = T_{\infty} + \frac{Q}{2\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{r_{\infty}}{r}\right) + \frac{-Q}{2\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{r'_{\infty}}{r'}\right) \quad (37)$$

Manipulando esta expresión, asumiendo que los radios ficticios r_{∞} y r'_{∞} se anulan mutuamente en el infinito, y sustituyendo r y r' por sus expresiones en coordenadas cartesianas, se obtiene:

$$T(x, y) = T_{\infty} + \frac{Q}{2\pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + (y - 2H)^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (38)$$

Temperatura en un determinado punto de la instalación.

A partir de los modelos matemáticos desarrollados, teniendo en cuenta todas las fuentes de calor que existen en una instalación eléctrica (que se han visto en el apartado 4.2 del presente proyecto), se puede obtener la temperatura de un determinado punto de la instalación mediante superposición del efecto de cada una de las fuentes de calor en dicha temperatura.

La temperatura en cualquier punto de la instalación es la superposición, en dicho punto, del efecto térmico de:

- Las pérdidas en los conductores de cada fase de cada línea.
- Las pérdidas en las pantallas cada fase de cada línea.
- Las pérdidas en los aislamientos cada fase de cada línea.
- Las pérdidas de las canalizaciones de los topos si las hay.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- La temperatura ambiente del medio que rodea a la instalación.

$$T = \sum_{\text{líneas}} \sum_{\text{fases}} f_C(I_C) + \sum_{\text{líneas}} \sum_{\text{fases}} f_P(I_P) \sum_{\text{líneas}} \sum_{\text{fases}} f_a + \sum_{\text{topos}} f_t(W_T) + T_{\text{ambiente}} \quad (39)$$

Las pérdidas en un determinado conductor dependen de la corriente que circula por dicho conductor, mientras que las pérdidas en una pantalla dependen de la corriente que circula por la misma. De la misma forma, las pérdidas que se producen en una canalización en tope dependen de la corriente de dicha canalización. Como las corrientes que circulan por las pantallas y las que circulan por los topos dependen de las corrientes que circulan por los conductores, la anterior ecuación se puede simplificar, quedando de la siguiente forma:

$$T = g(I_C) \quad (40)$$

Donde I_C representa un vector que contiene todas las corrientes que circulan por cada uno de los conductores que forman la instalación.

El problema para calcular la capacidad de transporte de una determinada instalación es por tanto un problema con un número de incógnitas igual al número de líneas de la instalación multiplicado por el número de fases de cada línea, es decir, como variables del problema se tienen las corrientes que circulan por cada uno de los conductores de la instalación. Para poder resolver este problema se necesita un número de ecuaciones igual al de variables existentes. Estas ecuaciones se pueden fijando la temperatura del conductor. De esta forma se obtiene un sistema de ecuaciones de la siguiente forma:

$$g(I_C) - T_0 = 0 \quad (41)$$

Así se obtiene un sistema de ecuaciones no lineales en el que se ha fijado la temperatura en determinados puntos de la instalación con un conjunto de valores T_0 , y el vector de variables está formado por las corrientes que atraviesan los conductores de las líneas que forman la instalación.

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene el vector I_C de corrientes por los conductores que ajustan la temperatura de los conductores a sus valores límite. Por lo tanto, I_C es la capacidad de transporte de la instalación, en Amperios.

El método que utiliza el programa informático para resolver el sistema de ecuaciones (41) es mediante el algoritmo iterativo de Newton-Rhapson [4]. Los pasos básicos de una iteración del algoritmo son los siguientes:

- 1) Dado el vector I_C^n en la iteración n, se evalúa el error cometido en el sistema de ecuaciones:

$$g(I_C^n) - T_0 = \varepsilon^n \quad (42)$$



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- 2) Si el error ε^n es menor que un determinado umbral, se detiene el algoritmo. En caso contrario, se pasa al tercer paso.
- 3) Se evalúa el jacobiano G_{IC} del sistema de ecuaciones con respecto del vector de corrientes I_C :

$$G_{IC} = \left[\frac{\partial g_i}{\partial I_{Cj}} \right] \quad (43)$$

- 4) Se obtiene el vector ΔI_C de corrección de las corrientes en los conductores:

$$\Delta I_C = -G_{IC}^{-1} \cdot \varepsilon^n \quad (44)$$

- 5) Se actualiza el vector de corrientes:

$$I_C^{n+1} = I_C^n + \Delta I_C \quad (45)$$

- 6) Volver al primer paso.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5.1.2. Modelado térmico de la instalación.

Los modelos matemáticos que se han desarrollado en el anterior apartado, son los que se aplican sobre los modelos eléctricos de la instalación para calcular su capacidad de transporte.

Los modelos eléctricos de la instalación son los que se han descrito en el apartado 4.2 del presente proyecto, a excepción del modelo de pérdidas de potencia en las pantallas, que se ha sustituido por un modelo más real que se explica a continuación.

Mientras que en el modelo del apartado 4.2 las pérdidas en una pantallas se calculaban multiplicando por un coeficiente las pérdidas del conductor correspondiente, el nuevo modelo de pérdidas de potencia en las pantallas tiene en cuenta la influencia que tienen, sobre una determinada pantalla, las corrientes que circulan por cada uno de los conductores que componen la instalación eléctrica. Además este nuevo modelo tiene en cuenta el tipo de puesta a tierra utilizado en la instalación, ya que es un parámetro que influye en gran medida en las pérdidas de potencia de las pantallas.

Pérdidas de potencia en las pantallas.

Las pérdidas de potencia en las pantallas se deben por un lado a las pérdidas óhmicas debidas al paso de las corrientes inducidas por las pantallas, y por el otro lado a las pérdidas causadas por la existencia de corrientes de Foucault.

- Pérdidas de potencia en las pantallas debidas a la circulación de las corrientes inducidas.

Al paso de una corriente I_p a través del conductor de una pantalla, se generan unas pérdidas de potencia activa por efecto Joule, cuyo valor por unidad de longitud es:

$$W_p = I_p^2 \cdot R \quad (46)$$

donde:

- R es la resistencia del conductor en corriente alterna y a la temperatura máxima de servicio

Hay que tener en cuenta que las corrientes inducidas que circulan por las pantallas de los cables, dependen de características de la instalación eléctrica tales como el tipo de puesta a tierra, y de las corrientes de Foucault. Las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault se evalúan en la sección 2.3.6.1 de la norma UNE 21144-1-1 [3]. La influencia que tienen los distintos tipos de puesta a tierra en las corrientes inducidas en las pantallas se estudia utilizando el modelo eléctrico de la instalación.

- Pérdidas de potencia en las pantallas debidas a las corrientes de Foucault.

Las pérdidas de potencia en las pantallas debidas a las corrientes de Foucault, se obtienen con la siguiente expresión:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

$$W_p = \lambda'' \cdot W_c \quad (47)$$

donde:

λ'' es el parámetro definido en la sección 2.3.6.1 de la norma UNE 21144-1-1 [3], que relaciona las pérdidas en las pantallas con las pérdidas de los conductores

W_c son las pérdidas de potencia del conductor perteneciente al mismo cable de la pantalla.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5.1.3. Determinación de la capacidad de transporte nominal de un cable aislado de potencia.

El programa informático utilizado en este proyecto, obtiene los parámetros eléctricos que definen una línea eléctrica a partir de las características del cable a instalar, el tipo de instalación a realizar y de las condiciones en las que se lleva a cabo dicha instalación.

En este apartado se va a realizar un estudio completo de la capacidad de transporte de una línea eléctrica subterránea de alta tensión (LAT).

Parámetros de la línea.

Inicialmente, es necesario definir una serie de datos de partida que definen la línea eléctrica. En la figura 19 se puede observar la sección de una Canalización Tipo de Unión Fenosa para una terna de alta tensión bajo tubo hormigonada.

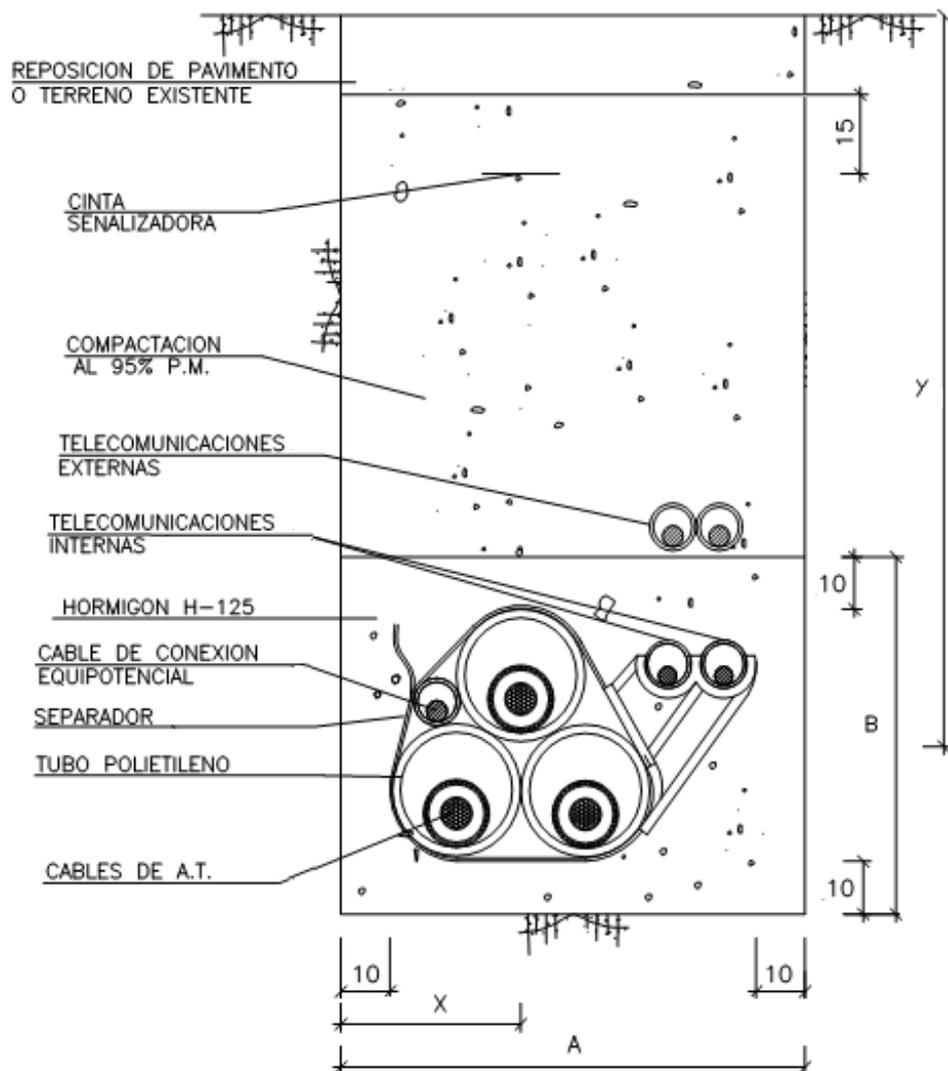


Figura 19: Sección de Canalización Tipo para una terna bajo tubo hormigonada.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

En este caso, los datos que se han supuesto para la línea son los siguientes:

- Sistema: Corriente alterna trifásica.
- Número de circuitos: 1.
- Separación entre fases de una misma línea: en el Proyecto Tipo de Unión Fenosa es cero [6].
- Ángulo de inclinación de la terna: tiene un valor de 0° según el Proyecto Tipo [6].
- Configuración de la línea: tresbolillo según el Proyecto Tipo [6].

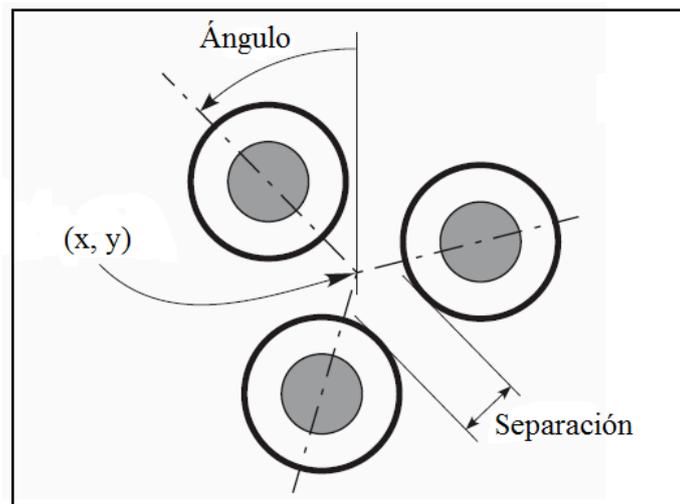


Figura 20: Configuración en tresbolillo.

- Tensión de la red: 220kV.
- Frecuencia de la red: 50Hz.
- Posición horizontal y posición vertical de la línea con respecto del nivel suelo (la referencia de la posición horizontal carece de importancia a la hora de realizar los cálculos necesarios para obtener la capacidad de transporte). Los valores definidos en el Proyecto Tipo [6], para zanjas de 220kV, son:

x (mm)	350
y (mm)	-1150

A partir de la tensión de red y de la utilización de la línea eléctrica, se selecciona el material y la sección del conductor. Una vez definidos los datos genéricos de la línea, hay que empezar a definir los datos relativos a las capas que componen dicha línea eléctrica. La información necesaria para el cálculo de la capacidad de transporte se obtiene de las hojas del fabricante y de las Normas UNE-21144 [3].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Datos del conductor.

Material	Cobre
Área (mm ²)	2000
Resistividad térmica (m·°K/W)	0.0025
Resistividad eléctrica (DC, 20°C) (Ω·m)	1.759·10 ⁻⁸
Diámetro de la cuerda (mm)	53.5
Temperatura límite (°C)	90
Efecto térmico (α)	3.93·10 ⁻³
k _s	0.62
k _p	0.37

Tabla 1: Datos de entrada de los conductores.

Donde:

- Los valores de la resistividad térmica y de la resistividad eléctrica del conductor en corriente continua y a 20°C (DC, 20°C) se han obtenido de la tabla 1 de las Normas UNE-21144-1-1 [3].
- La temperatura límite del conductor está determinada por la máxima temperatura que es capaz de soportar el aislamiento, en régimen permanente, sin que sus propiedades aislantes se vean alteradas [1].
- El diámetro de la cuerda está referido al diámetro medio del perímetro exterior del conductor, se calcula como la media aritmética de los diámetros máximo y mínimo dados por el fabricante [9].
- El valor de α se obtiene de la tabla 1 de la Norma UNE-21144-1-1 [3].
- Los valores de k_s y k_p dependen del tipo de conductor del cable y se obtienen de la tabla 2 de las Normas UNE-21144-1-1 [3].

Datos del aislamiento.

Material	XLPE
Diámetro (mm)	107
Resistividad térmica (m·K/W)	3.5
Permitividad dieléctrica relativa (ε)	2.5
Factor de calidad (tgδ)	0.0005

Tabla 2: Datos de entrada de los aislamientos.

- El diámetro está referido al diámetro de la capa semiconductor externa que aparece en las fichas técnicas de cables [9].
- Los valores de resistividad térmica, ε y tgδ se obtienen de la tabla 3 de las Normas UNE 21144-1-1 [3].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Datos de la pantalla.

Material de la pantalla	Cobre
Área (mm ²)	180
Diámetro exterior (mm)	116
Resistividad térmica (m·K/W)	0.0025
Resistividad eléctrica (DC, 20°C) (Ω·m)	1.759·10 ⁻⁸
Influencia térmica (α)	3.93·10 ⁻³

Tabla 3: Datos de entrada de las pantallas.

- El valor del área de la pantalla es el indicado por el fabricante en las fichas técnicas de los cables [9].
- El diámetro exterior de la pantalla está indicado en las fichas técnicas de cables como diámetro sobre la pantalla, se puede tomar como aproximación el diámetro medio de la pantalla [9].
- Los valores de la resistividad térmica, de la resistividad eléctrica del conductor en corriente continua a 20°C (DC, 20°C) y de α se obtienen de la tabla 1 de las Normas UNE-21144-1-1 [3].

Datos de la cubierta.

Material	Polietileno
Resistividad térmica (m·K/W)	3.5
Diámetro exterior (mm)	125

Tabla 4: Datos de entrada de las cubiertas.

- Valor de la resistividad térmica obtenido de de la tabla 3 de las Normas UNE 21144-1-1 [3].
- El diámetro exterior viene dado en las fichas de cables [9] y está referido al diámetro medio del perímetro exterior del cable.

Datos del tubo.

Los tubos utilizados en alta tensión son tubos unipolares (una fase por tubo) según Proyecto Tipo, y tienen las siguientes características:

Material	Polietileno
Diámetro interior (mm)	215
Diámetro exterior (mm)	250
Resistividad térmica (m·K/W)	3.5
Parámetro de convección U	1.87
Parámetro de convección V	0.312
Parámetro de convección Y	0.0037

Tabla 5: Datos de entrada de los tubos.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Los valores de diámetro interior y diámetro exterior del tubo son valores normalizados según Proyecto Tipo [6] y están referidos a los diámetros medios de los perímetros interior y exterior del tubo.
- Valor de la resistividad térmica obtenido de de la tabla 3 de las Normas UNE 21144-1-1 [3].
- Los valores de los parámetros de convección se obtienen de la tabla 4 de las Normas UNE 21144-2-1 [3].

Parámetros de la instalación.

Parámetros del terreno.

El tipo de instalación donde se encuentran alojadas las líneas pueden ser de dos tipos: galería o soterramiento. En ambos casos los parámetros relativos al terreno son comunes para todo tipo de instalación:

Temperatura del suelo (°C)	25
Temperatura del aire ambiente (°C)	40
Resistividad eléctrica del terreno ($\Omega \cdot m$)	100
Resistividad térmica del terreno ($m \cdot K/W$)	1

Tabla 6: Parámetros del terreno.

Estos valores de los parámetros del terreno son los relativos a las condiciones de funcionamiento en España, y se obtienen del anexo de las Normas UNE 21144-3-1 [3].

Parámetros del encofrado de hormigón.

Hay casos en los que las líneas no se encuentran directamente enterradas, sino que están encofradas en hormigón, en este caso hay que definir los datos relativos a dicho encofrado:

Altura del encofrado de hormigón (mm)	700
Anchura del encofrado de hormigón (mm)	900
Resistividad térmica del hormigón ($m \cdot K/W$)	0.9

Tabla 7: Parámetros del encofrado.

- Las medidas del bloque de hormigón se corresponden a las de las zanjas normalizadas por Unión Fenosa distribución en el Proyecto Tipo [6].
- La resistividad térmica del hormigón es un parámetro que depende del tipo de hormigón empleado, en este caso se emplea el valor correspondiente al del coeficiente de seguridad más conservador, que es el valor normalizado para Unión Fenosa distribución [6].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Parámetros para instalaciones en galería.

Temperatura del ambiente (°C)	40
Resistividad eléctrica del terreno ($\Omega \cdot m$)	100
Parámetro Z	0.94
Parámetro E	0.79
Parámetro g	0.2
Coefficiente de reducción para cables agrupados (h1/hg)	1

Tabla 8: Parámetros de la galería.

- Los parámetros Z, E y g dependen del tipo de configuración de la línea, de la distancia a la pared y del número de ternas instaladas en la galería, estos parámetros y el coeficiente de reducción para cables agrupados (h1/hg) se obtienen de la Norma UNE 21144-2-2 [3]. En este caso se han utilizado los parámetros correspondientes a tres cables en tresbolillo, en contacto, pegados a la pared porque es el caso más desfavorable.

Parámetros para instalaciones en topo.

Hay ocasiones en las que las líneas pueden estar canalizadas en conducciones denominadas “topo”. Dependiendo de las características del topo son necesarios distintos tipos de datos:

- Tipo de relleno del topo: el topo puede estar relleno de aire o de algún tipo de aislamiento.
 - En el caso de estar relleno de aire, es necesario definir los parámetros de convección U, V e Y que se obtienen de la tabla 4 de las Normas UNE 21144-2-1 [3].
 - En el caso de que el topo está relleno de aislamiento es necesario definir la resistividad térmica del aislante.
- Material del tubo del topo: el tubo puede estar hecho de acero o de otro material. Si está hecho de acero, es necesario determinar las posibles pérdidas que se pueden producir en el tubo del topo por corrientes de Foucault.

Las características de los topos de Unión Fenosa suelen ser las siguientes:

Tipo	Topo relleno con aislante
Material del tubo	Hormigón
Resistividad térmica del tubo ($m \cdot K/W$)	0.9
Material del aislante	Bentonita
Resistividad térmica del aislante ($m \cdot K/W$)	0.9

Tabla 9: Parámetros de topo.

- Datos obtenidos de Unión Fenosa distribución.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Modelos de puesta a tierra.

El modelado de la puesta a tierra se realiza a partir de las características de los tramos que componen la línea eléctrica. Suponiendo que tenemos la instalación que se muestra en la figura 21:

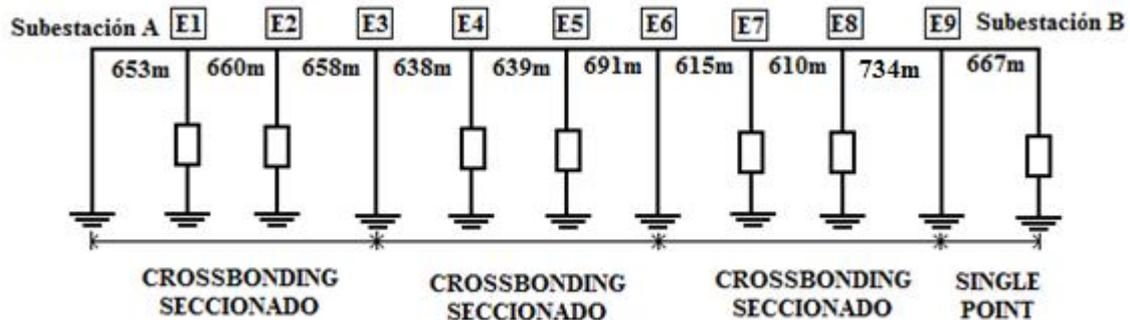


Figura 21: Esquema de puestas a tierra de la línea eléctrica subterránea.

Como puede observarse, la línea está compuesta por 10 tramos y 9 empalmes con las siguientes características:

Tramo	Longitud (m)	Tipo de puesta a tierra
Sub.A-E1	653	Crossbonding Seccionado
E1-E2	660	Crossbonding Seccionado
E2-E3	658	Crossbonding Seccionado
E3-E4	638	Crossbonding Seccionado
E4-E5	639	Crossbonding Seccionado
E5-E6	691	Crossbonding Seccionado
E6-E7	615	Crossbonding Seccionado
E7-E8	610	Crossbonding Seccionado
E8-E9	734	Crossbonding Seccionado
E9-Sub.B	667	Single Point

Tabla 10: Datos de la puesta a tierra de la línea.

Es decir, la línea está compuesta por cuatro tramos de puesta a tierra (o sectores): tres tramos de Crossbonding Seccionado (a su vez cada tramo de Crossbonding Seccionado está compuesto por tres tramos de la línea) y un tramo de puesta a tierra en Single Point.

- En el caso del Crossbonding Seccionado es necesario definir la longitud total del tramo y los puntos en los que hay transposición de pantallas, es decir:

Crossbonding Seccionado 1:

Longitud del tramo (m)	1971
Punto 1 de la transposición de pantallas (m)	653
Punto 2 de la transposición de pantallas (m)	1313

Tabla 11: Longitudes del primer sector de Crossbonding.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Crossbonding Seccionado 2:

Longitud del tramo (m)	1968
Punto 1 de la transposición de pantallas (m)	638
Punto 2 de la transposición de pantallas (m)	1277

Tabla 12: Longitudes del segundo sector de Crossbonding.

Crossbonding Seccionado 3:

Longitud del tramo (m)	1959
Punto 1 de la transposición de pantallas (m)	615
Punto 2 de la transposición de pantallas (m)	1225

Tabla 13: Longitudes del tercer sector de Crossbonding.

- En el caso del Single Point, además de la longitud del tramo hay que definir los parámetros del hilo de tierra característico de este tipo de puesta a tierra:

Datos del hilo de tierra:

Material	Cobre
Sección del conductor (mm ²)	300
Resistividad eléctrica (DC, 20°C) (Ω·m)	$1.759 \cdot 10^{-8}$

Tabla 14: Datos del hilo de tierra.

- Valor de la sección obtenido de las especificaciones de materiales de Unión Fenosa.
- Valor de la resistividad eléctrica del conductor en corriente continua y a 20°C (DC, 20°C) obtenido de la tabla 1 de las Normas UNE-21144-1-1 [3].



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Parámetros eléctricos de la línea.

Una vez definidos todos los datos de entrada, se pueden obtener los parámetros eléctricos necesarios para calcular la capacidad de transporte de la línea eléctrica.

- Resistencia de los conductores:

Resistencia eléctrica (DC, 20°C) (Ω/km), $R_0 = \rho_{20}/S_{\text{conductor}}$	0.008795
y_s	0.209295
y_p	0.012824
Resistencia eléctrica (DC, 90°C) (Ω/km), $R_{cc} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20))$	0.011214
Resistencia eléctrica (AC, 90°C) (Ω/km), $R = R_{cc} \cdot (1 + y_s + y_p)$	0.013705

Tabla 15: Resistencia de los conductores.

Tramo	Longitud (km)	$R_{DC,90^\circ C} (\Omega)$	$R_{AC,90^\circ C} (\Omega)$
Sub.A-E1	0.653	0.0073136	0.00895
E1-E2	0.660	0.0073920	0.00905
E2-E3	0.658	0.0073696	0.00902
E3-E4	0.638	0.0071456	0.00874
E4-E5	0.639	0.0071568	0.00876
E5-E6	0.691	0.0077392	0.00947
E6-E7	0.615	0.0068880	0.00843
E7-E8	0.610	0.0068320	0.00836
E8-E9	0.734	0.0082208	0.01006
E9-Sub.B	0.667	0.0074704	0.00914
Total	6.565	0.073528	0.08997

Tabla 16: Resistencia de los conductores en cada tramo de la instalación.

- Pérdidas de potencia en los conductores:

Pérdida de potencia en los conductores (W/km), $W_c = I_c^2 \cdot R$	96623.9
--	---------

Tabla 17: Pérdida de potencia en los conductores.

Tramo	Longitud (km)	$W_c (W)$
Sub.A-E1	0.653	63095.4067
E1-E2	0.660	63771.7740
E2-E3	0.658	63578.5262
E3-E4	0.638	61646.0482
E4-E5	0.639	61742.6721
E5-E6	0.691	66767.1149
E6-E7	0.615	59423.6985
E7-E8	0.610	58940.5790
E8-E9	0.734	70921.9426
E9-Sub.B	0.667	64448.1413
Total	6.565	634335.9035

Tabla 18: Pérdidas de potencia en los conductores en cada tramo de la instalación.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Reactancia:

Coef.autoinducción entre fases (H/km), L	0.000496985
Reactancia (Ω /km) , $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	0.156132533

Tabla 19: Reactancia.

Tramo	Longitud (km)	X_L (Ω)
Sub.A-E1	0.653	0.101954544
E1-E2	0.660	0.103047472
E2-E3	0.658	0.102735207
E3-E4	0.638	0.099612556
E4-E5	0.639	0.099768689
E5-E6	0.691	0.107887580
E6-E7	0.615	0.096021508
E7-E8	0.610	0.095240845
E8-E9	0.734	0.114601279
E9-Sub.B	0.667	0.104140400
Total	6.565	1.025010081

Tabla 20: Reactancia por tramo de la instalación.

- Capacidad y pérdidas dieléctricas en los aislamientos:

Capacidad (μ F/km), C	0.200652
Pérdidas dieléctricas en la línea (W/km), $W_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U_0^2 \cdot \text{tg} \delta$	1525.5

Tabla 21: Capacidad y pérdidas dieléctricas en los aislamientos.

Tramo	Longitud (km)	C(μ F)	W_d (W)
Sub.A-E1	0.653	0.131025756	996.152
E1-E2	0.660	0.132430320	1006.830
E2-E3	0.658	0.132029016	1003.779
E3-E4	0.638	0.128015976	973.269
E4-E5	0.639	0.128216628	974.795
E5-E6	0.691	0.138650532	1054.121
E6-E7	0.615	0.123400980	938.183
E7-E8	0.610	0.122397720	930.555
E8-E9	0.734	0.147278568	1119.717
E9-Sub.B	0.667	0.133834884	1017.509
Total	6.565	0.665562684	10014.908

Tabla 22: Capacidad y pérdidas dieléctricas por tramo en los aislamientos.

- Tensión inducida en las pantallas:

Inducción mutua entre conductor y pantalla (mH/km), M	0.292
Tensión inducida en las pantallas (V/km), $E = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M \cdot I \cdot 10^{-3}$	140.56

Tabla 23: Tensión inducida en las pantallas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Tramo	Longitud (km)	M (mH)	E (V)
Sub.A-E1	0.653	0.1906	91.786
E1-E2	0.660	0.1926	92.770
E2-E3	0.658	0.1009	92.488
E3-E4	0.638	0.1862	89.677
E4-E5	0.639	0.0980	89.818
E5-E6	0.691	0.2017	97.127
E6-E7	0.615	0.1795	86.444
E7-E8	0.610	0.1780	85.742
E8-E9	0.734	0.2142	103.171
E9-Sub.B	0.667	0.1947	93.753

Tabla 24: Tensión inducida por tramo en las pantallas.

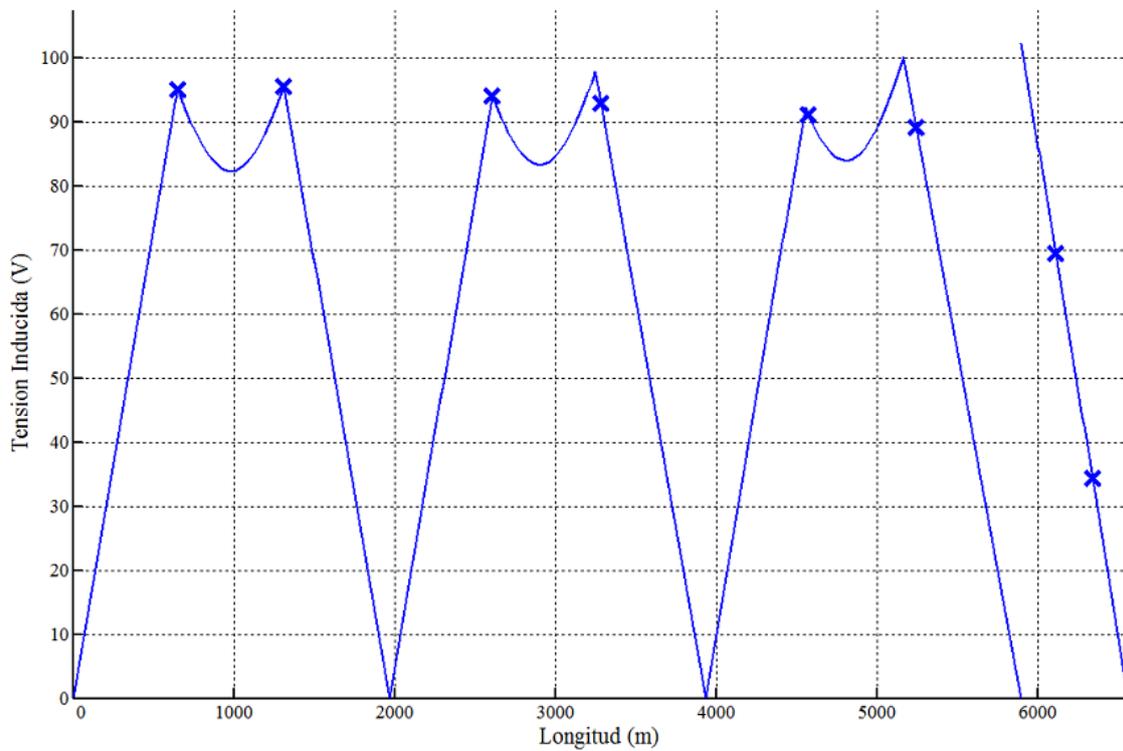


Figura 22: Tensiones inducidas en las pantallas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Pérdidas por efecto Joule en las pantallas:

Factor de acoplamiento en las pantallas λ	0.094986
Pérdidas de potencia en las pantallas (W/km), W_p	9178.5

Tabla 25: Pérdidas por efecto Joule en las pantallas.

Tramo	Longitud (km)	W_p (W)
Sub.A-E1	0.653	1997.466337
E1-E2	0.660	2018.878686
E2-E3	0.658	2012.760872
E3-E4	0.638	1951.58273
E4-E5	0.639	1954.641637
E5-E6	0.691	2113.704806
E6-E7	0.615	1881.227867
E7-E8	0.610	1865.933331
E8-E9	0.734	2245.237812
E9-Sub.B	0.667	2040.291036
Total	6.565	20081.72511

Tabla 26: Pérdidas por efecto Joule por tramo en las pantallas.

- Intensidad máxima admisible.

Corriente máxima admisible por el conductor (A), I	1532.9
Capacidad de transporte máxima (MVA)	584.1

Tabla 27: Intensidad máxima admisible.

- Caída de tensión.

P (kW), $P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos\phi$	584113.3502
ΔU (%/km)	0.2438

Tabla 28: Caída de tensión.

Tramo	Longitud (km)	ΔU (%)
Sub.A-E1	0.653	0.1592
E1-E2	0.660	0.1609
E2-E3	0.658	0.1355
E3-E4	0.638	0.1555
E4-E5	0.639	0.1316
E5-E6	0.691	0.1685
E6-E7	0.615	0.1499
E7-E8	0.610	0.1487
E8-E9	0.734	0.1789
E9-Sub.B	0.667	0.1626
Total	6.565	1.5514

Tabla 29: Caída de tensión en cada tramo.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Pérdidas de potencia en la línea.

Tramo	Longitud (km)	ΔP (%/km)	ΔP (%)
Sub.A-E1	0.653	0.0118	0.3815
E1-E2	0.660	0.0120	0.0079
E2-E3	0.658	0.0119	0.2837
E3-E4	0.638	0.0116	0.0115
E4-E5	0.639	0.0116	0.2462
E5-E6	0.691	0.0125	0.3129
E6-E7	0.615	0.0111	0.0187
E7-E8	0.610	0.0110	0.0442
E8-E9	0.734	0.0133	0.1303
E9-Sub.B	0.667	0.0121	0.2369
Total	6.565	0.1189	1.6738

Tabla 30: Pérdidas de potencia en cada tramo de la línea.

Puntos calientes de la instalación.

El programa informático proporciona la siguiente información acerca de los puntos calientes de la instalación:

Conductores.

Fase	R
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	90
Corriente máxima admisible (A)	1554.4
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo donde la temperatura es máxima(°)	-100

Tabla 31: Datos del punto caliente en el conductor de la fase R.

Fase	S
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	90
Corriente máxima admisible (A)	1523.6
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo de temperatura máxima (°)	160

Tabla 32: Datos del punto caliente en el conductor de la fase S.

Fase	T
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	90
Corriente máxima admisible (A)	1520.7
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo de temperatura máxima (°)	20

Tabla 33: Datos del punto caliente en el conductor de la fase T.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Pantallas.

Fase	R
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	78.6
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo de temperatura máxima (°)	-90

Tabla 34: Datos del punto caliente en la pantalla de la fase R.

Fase	S
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	78.8
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo de temperatura máxima (°)	157.50

Tabla 35: Datos del punto caliente en la pantalla de la fase S.

Fase	T
Tramo	E2-E3
Temperatura máxima (°C)	78.8
Radio relativo de temperatura máxima (%)	100
Ángulo de temperatura máxima (°)	22.50

Tabla 36: Datos del punto caliente en la pantalla de la fase T.

Corrientes máximas admisibles por las pantallas (A):

Sector	1	2	3	4
Tipo PAT	CBS	CBS	CBS	SP
Fase R	159.9	162.7	172.2	159.7
Fase S	156.9	157.2	164.0	156.5
Fase T	156.8	159.8	170.0	156.2

Tabla 37: Corrientes admisibles en las pantallas.

Corrientes por los hilos de tierra (A):

Sector	1	2	3	4
Tipo PAT	CBS	CBS	CBS	SP
	-	-	-	58.4

Tabla 38: Corrientes por los hilos de tierra.

En la figura 23 se muestra el perfil de temperaturas del punto crítico de la instalación eléctrica estudiada:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

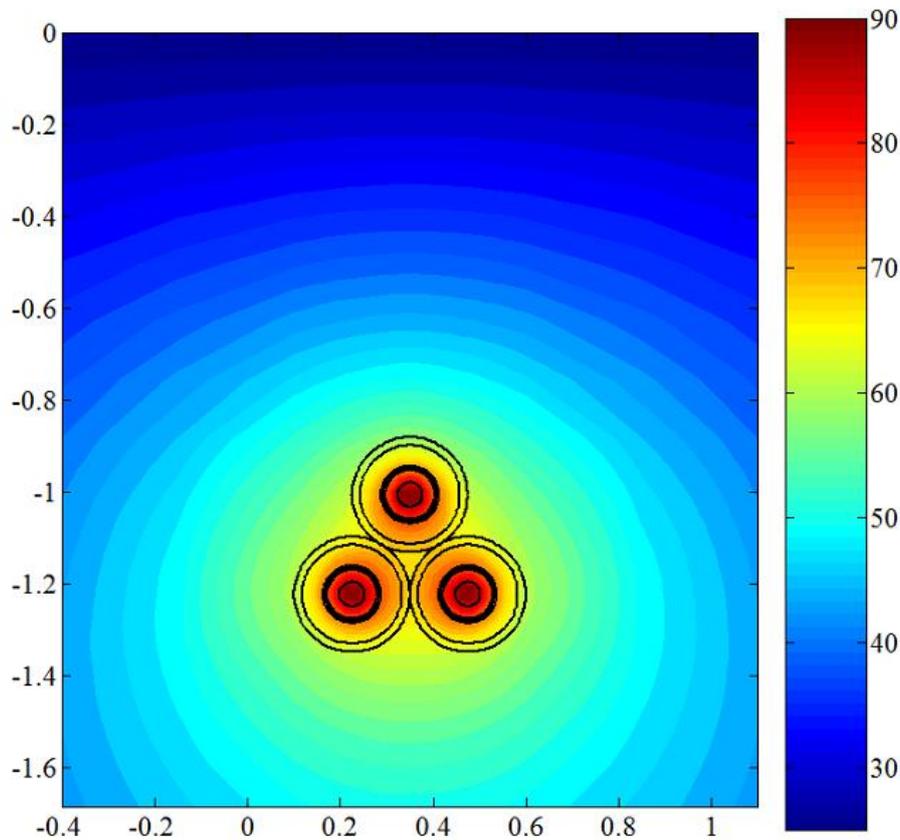


Figura 23: Perfil de temperaturas del punto crítico de la instalación.

Comparación de los resultados obtenidos.

En este apartado se han obtenido los parámetros eléctricos y la capacidad de transporte de una línea subterránea de alta tensión, utilizando la metodología basada en modelos continuos de conducción que se ha explicado en los apartados 5.1.1 y 5.1.2 del presente proyecto. A continuación se muestra una comparativa de estos resultados con los que se obtendrían al utilizar la metodología basada en las Normas UNE.

- Metodología UNE.

Los diferentes elementos del cable y el medio exterior oponen una resistencia a la propagación del calor producido en el interior del cable por las pérdidas dieléctricas, las pérdidas por efecto Joule en la pantalla y las pérdidas por efecto Joule en el conductor. Esta resistencia depende de la resistividad térmica de los distintos materiales y de los espesores de los mismos.

Para calcular estos valores de la resistencia térmica se sigue el guión marcado en la Norma UNE 21144-2-1:1997. Los valores de resistencia térmica entre el conductor y la pantalla (T_1) y la de la cubierta exterior (T_3) son propios de cada cable y dependen únicamente de las dimensiones del cable y de la resistividad térmica del aislante o de la cubierta. El valor de la resistencia térmica del medio exterior (T_4) depende de la instalación realizada (al aire, directamente enterrada o enterrada bajo tubo) y de las características del terreno. Las expresiones de las resistencias térmicas son:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

$$T_1 = \frac{1}{2\pi} \rho_t \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_c} \right) \quad (48)$$

donde:

- ρ_t es la resistividad térmica del aislamiento en K·m/W.
- d_c es el diámetro del conductor en mm.
- t_1 es el espesor entre el conductor y la envolvente del cable en mm.

$$T_2 = 0 \quad (49)$$

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \rho_t \cdot \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D_a} \right) \quad (50)$$

donde:

- ρ_t es la resistividad térmica de envolturas exteriores en K·m/W.
- D_a es el diámetro exterior de la armadura en mm.
- t_3 es el espesor del revestimiento exterior en mm.

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_t \cdot \left(\ln \left(2 \frac{2L}{D_e} \right) + 2 \ln \left(\frac{2L}{D_e} \right) \right) \quad (51)$$

donde:

- ρ_t es la resistividad térmica del suelo en K·m/W.
- L es la distancia de la superficie del suelo al eje del cable en mm.
- D_e es el diámetro exterior del cable en mm.

Para la línea considerada en este apartado, los valores de las resistencias térmicas son:

$$T_1 = 0.385612 \text{ (K.m/W)}$$

$$T_2 = 0 \text{ (K.m/W)}$$

$$T_3 = 0.3779 \text{ (K.m/W)}$$

$$T_4 = 1.523354 \text{ (K.m/W)}$$

El cálculo de la intensidad admisible se realiza aplicando el punto 1.4.1 de la Norma UNE 21144-1-1:1997, según la siguiente expresión:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - Wd \cdot (0.5T_1 + T_3 + T_4)}{RT_1 + R(1 + \lambda) \left(\frac{1}{D_3} + T_4 \right)} \right]^{0.5} \quad (52)$$

donde:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- $\Delta\theta$ es el calentamiento del conductor con respecto la temperatura ambiente.
- W_d son las pérdidas dieléctricas en W/m.
- R es la resistencia del conductor en Ω/m .
- λ es el factor que recoge la influencia de las corrientes de circulación por la pantalla debido a la aparición de las tensiones inducidas (λ'), y la influencia de las corrientes de Foucault en la propia pantalla (λ'').

Con todo esto, el valor obtenido es:

$$I=1554 \text{ A.}$$

- Comparación de resultados.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los resultados obtenidos con la metodología basada en la Norma UNE y los obtenidos con la metodología basada en modelos continuos de conducción:

	UNE	Modelo	Variación (%)
Pérdida de potencia en los conductores (W/km)	99289.3	96623.9	-2.68
Pérdidas dieléctricas en la línea (W/km)	1523.6	1525.5	0.12
Pérdidas de potencia en las pantallas (W/km)	10125.3	9178.5	-9.35
Corriente máxima admisible por el conductor (A)	1554	1532.9	-1.36
Capacidad de transporte máxima (MVA)	592.3	584.1	-1.38
Tensión inducida en las pantallas (V/km)	142.2	140.6	-1.13

Tabla 39: Comparativa entre resultados de la metodología UNE y la utilizada en el proyecto.

Como se ha demostrado en el apartado 5.1, la metodología basada en modelos continuos de conducción es más precisa que la metodología basada en las Normas UNE, lo que implica un cálculo más exacto de la capacidad de transporte de las líneas que se puede traducir en una explotación óptima de las mismas.

Por ello, como se observa de la tabla anterior en el ejemplo estudiado, la metodología basada en modelos continuos de conducción es más restrictiva que la metodología empleada tradicionalmente en el cálculo de la capacidad de transporte de líneas subterráneas de alta tensión, que está basada en la Norma UNE.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5.2. Estudio de diferentes factores que influyen en la capacidad de transporte nominal.

En el apartado 5.1.3 de este proyecto, se ha llevado a cabo el estudio de la capacidad de transporte de una línea eléctrica de alta tensión con la ayuda de un programa informático basado en una metodología que permite obtener un valor más exacto de la capacidad de transporte que el que se obtiene con la metodología que se utiliza habitualmente y que está basada en las Normas UNE. La principal ventaja que tiene dicho programa, es que tiene en cuenta la influencia térmica de cada una de las fases de cada línea de la instalación, en el resto de las fases.

Como ya se ha visto, el factor principal que limita la capacidad de transporte de un cable aislado es la temperatura. El gran problema que existe actualmente en el cálculo de la capacidad de transporte de una instalación de cables aislados de potencia, es que no se tiene en cuenta la influencia térmica que pueden tener otras líneas eléctricas ajenas a dicha instalación, en la capacidad de transporte nominal de una determinada línea. En el presente apartado, se va a analizar la influencia que tienen en la capacidad de transporte nominal de una línea eléctrica, otras líneas eléctricas ajenas a su instalación.

5.2.1: Influencia de otras líneas eléctricas de alta tensión en la capacidad de transporte nominal.

En este primer apartado se va a estudiar la influencia que tienen otras líneas de alta tensión (LAT), en la capacidad de transporte nominal de una línea subterránea de 220kV.

Las características de la LAT que se va a analizar en este apartado están definidas en las siguientes tablas:

Características generales:

Sistema	Corriente alterna trifásica
Tensión nominal (kV)	220
Frecuencia (Hz)	50
Longitud (m)	5898
Número de circuitos	1
Número de tramos	9
Número de empalmes	8
Sistema de puesta a tierra	Crossbonding Seccionado

Tabla 40: Datos generales de la instalación de AT.

En la figura 24 se muestra la longitud de cada tramo y el esquema de puesta a tierra de la LAT:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

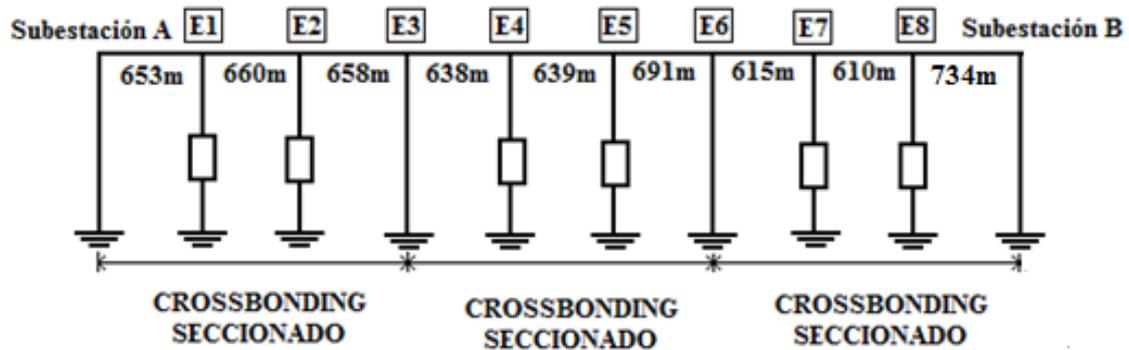


Figura 24: Esquema de puesta a tierra de la LAT.

Características del cable de alta tensión:

TIPO	Cobre 2000
Material del conductor	Cobre
Material de la pantalla	Cobre
Sección del conductor (mm ²)	2000
Diámetro del conductor (mm)	53,5
Material del aislamiento	XLPE
Diámetro del aislamiento(mm)	107
Sección de la pantalla(mm ²)	180
Diámetro medio de la pantalla(m)	116
Material de la cubierta	Polietileno
Diámetro exterior del cable (mm)	116
Tipo de tubo	Tubo monofásico
Diámetro interior del tubo (mm)	215
Diámetro exterior del tubo (mm)	250

Tabla 41: Datos de los cables de AT.

Las características de la instalación son:

Tipo	Enterrada bajo tubo (sin hormigonar)
Configuración de los conductores	Tresbolillo
Profundidad mínima, medida al eje de la terna (mm)	1150
Ancho mínimo de la canalización, por terna (mm)	700
Temperatura máxima del conductor (°C)	90
Temperatura del suelo (°C)	25
Temperatura del aire ambiente (°C)	40

Tabla 42: Datos de la canalización de AT.

La capacidad de transporte obtenida para esta LAT es: 568.7MVA.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

-Influencia de otra terna de AT:

Se considera la influencia de una canalización compuesta por una sola terna de 200kV, con las mismas características que la LAT que se han definido en las tablas 39, 40 y 41. Para todas las simulaciones que se van a llevar a cabo en este apartado, se considerará que todas las líneas eléctricas funcionan a plena carga.

El estudio de la capacidad de transporte se va a realizar en función de la distancia existente entre las dos canalizaciones de AT. Considerando que la anchura mínima para una canalización de 220kV es de 700mm, la mínima distancia que puede haber entre los ejes de dos ternas contiguas es también de 700mm [6]. Por tanto, para las sucesivas simulaciones de este apartado, se va a considerar que una distancia nula entre canalizaciones es la correspondiente a una distancia de 700mm entre el eje de la LAT objeto de estudio y el eje de la terna más próxima a dicha LAT.

Para este primer caso, la situación en función de la distancia existente entre las dos canalizaciones, es la que se muestra en la figura 25:

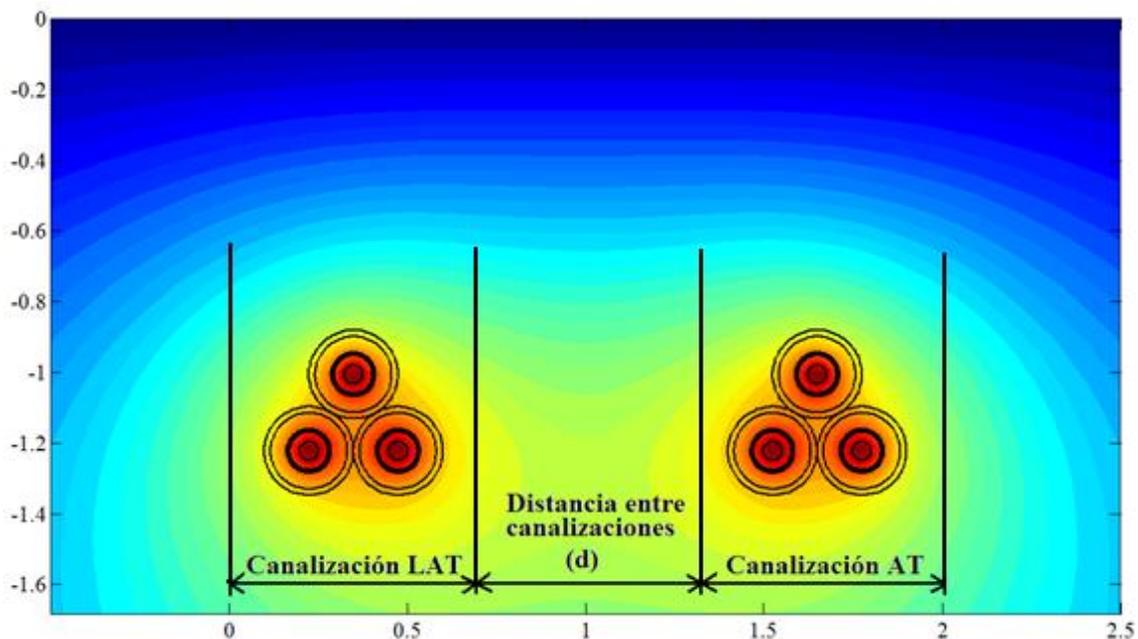


Figura 25: Perfil térmico de la LAT con influencia de otra canalización de AT.

Como se puede observar en la figura 25, una distancia nula entre canalizaciones no implica que las dos LAT estén pegadas, sino que se encuentran a la mínima distancia a la que pueden estar teniendo en cuenta el ancho mínimo de sus canalizaciones.

La evolución de la capacidad de transporte que se ha obtenido para ambas ternas, en función de la distancia existente entre sus canalizaciones, se puede observar en la gráfica de la figura 26:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

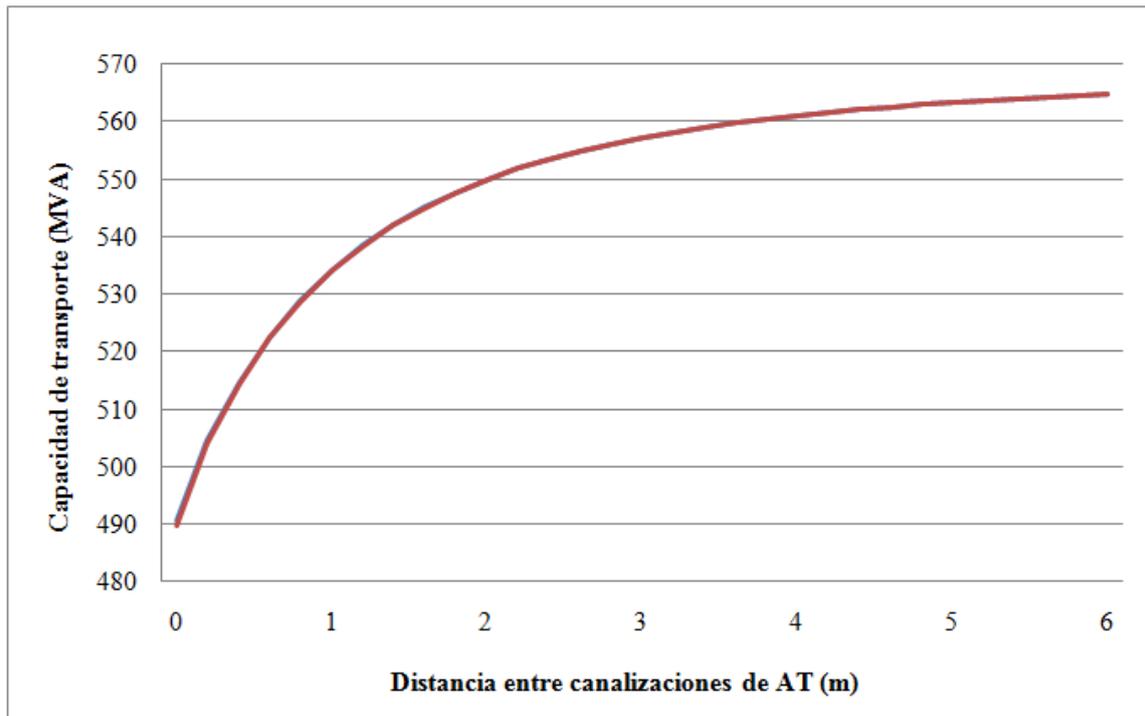


Figura 26: Variación de la capacidad de transporte con la distancia a la otra canalización.

En este primer caso se muestra la evolución de la capacidad de transporte de una LAT en función de la distancia existente a otra canalización de AT compuesta por una sola terna, con las mismas características que la LAT objeto de estudio. Como se puede observar en la figura 26, la capacidad de transporte es la misma para las dos líneas.

La capacidad de transporte nominal de la LAT objeto de estudio es de 568.7MVA, que es la capacidad de transporte que tiene la línea cuando no sufre la influencia térmica de otras líneas ajenas a su instalación. Los valores obtenidos al tener en cuenta la influencia térmica de otra terna de AT, son:

- 490,6MVA cuando la distancia entre canalizaciones es nula, es decir, la capacidad de transporte de la línea se reduce un 13.7% con respecto su capacidad de transporte nominal en el caso más desfavorable, como consecuencia de la influencia térmica de otra terna de AT.
- 534,1MVA cuando hay 1 metro de distancia entre canalizaciones, esto supone una reducción del 6.1% con respecto la capacidad de transporte nominal.
- 549,9MVA cuando hay una distancia de 2 metros entre canalizaciones, es decir, la capacidad de transporte se reduce un 3.3% con respecto la capacidad de transporte nominal.
- 557,2MVA cuando hay una distancia de 3 metros entre canalizaciones, lo que supone un reducción del 2% con respecto la capacidad de transporte nominal.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Con estos resultados se puede observar que la influencia de la otra canalización en la capacidad de transporte de la LAT es significativa sobretodo en el primer metro de distancia. Si se considera un margen del 5% sobre la capacidad de transporte nominal, en este caso se puede afirmar que la influencia térmica de la canalización compuesta por una terna es significativa hasta una distancia de 1.3 metros, punto en el que la capacidad de transporte de la LAT alcanza un valor de 540.3MVA, correspondiente a un 95% del valor de su capacidad de transporte nominal.

Por otra parte, si se considera que no hay influencia térmica de las otras canalizaciones cuando la capacidad de transporte de la LAT alcanza un valor del 99% de su capacidad de transporte nominal, esto es, cuando la capacidad de transporte es igual o superior a los 563.0MVA, en este caso se puede afirmar que a partir de una distancia de 4.9 metros la LAT no sufre la influencia térmica de la otra terna.

-Influencia de dos ternas de AT:

En este caso se va a estudiar la influencia térmica de una canalización de AT compuesta por dos ternas (ternas 1 y 2). Las características de estas dos ternas y de sus instalaciones son las mismas que las que se han definido en las tablas 39, 40 y 41 para la LAT objeto de estudio, considerando una separación fija entre los ejes de dichas ternas de valor 700mm.

En la figura 27 se puede observar la situación cuando hay una distancia d genérica entre la canalización correspondiente a la línea objeto de estudio (LAT) y la canalización compuesta por las ternas 1 y 2 (canalización AT):

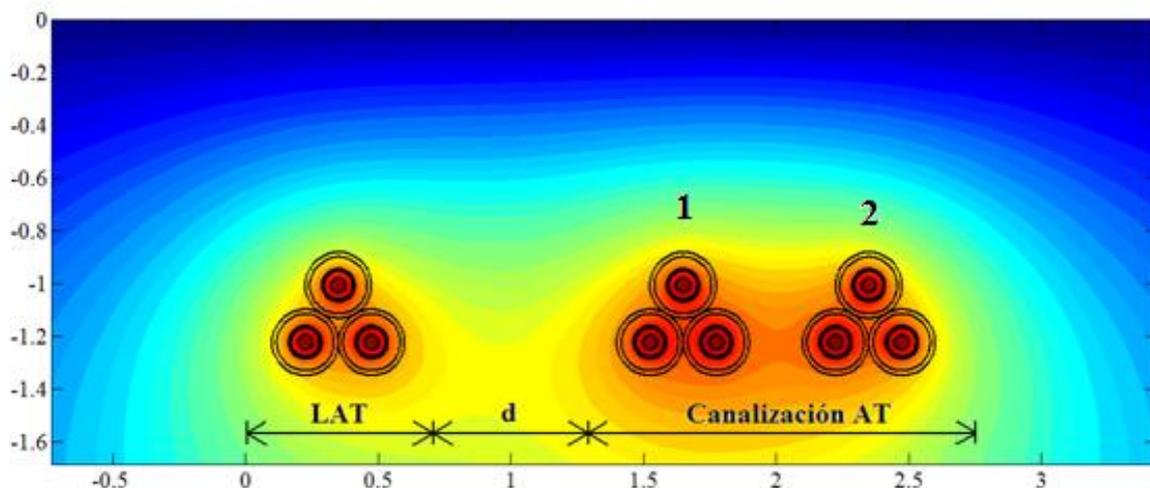


Figura 27: Perfil térmico de la LAT con influencia de otras dos ternas de AT.

La evolución de la capacidad de transporte obtenida para las tres ternas, en función de la distancia d existente entre las dos canalizaciones, es la que se muestra en la gráfica de la figura 28:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

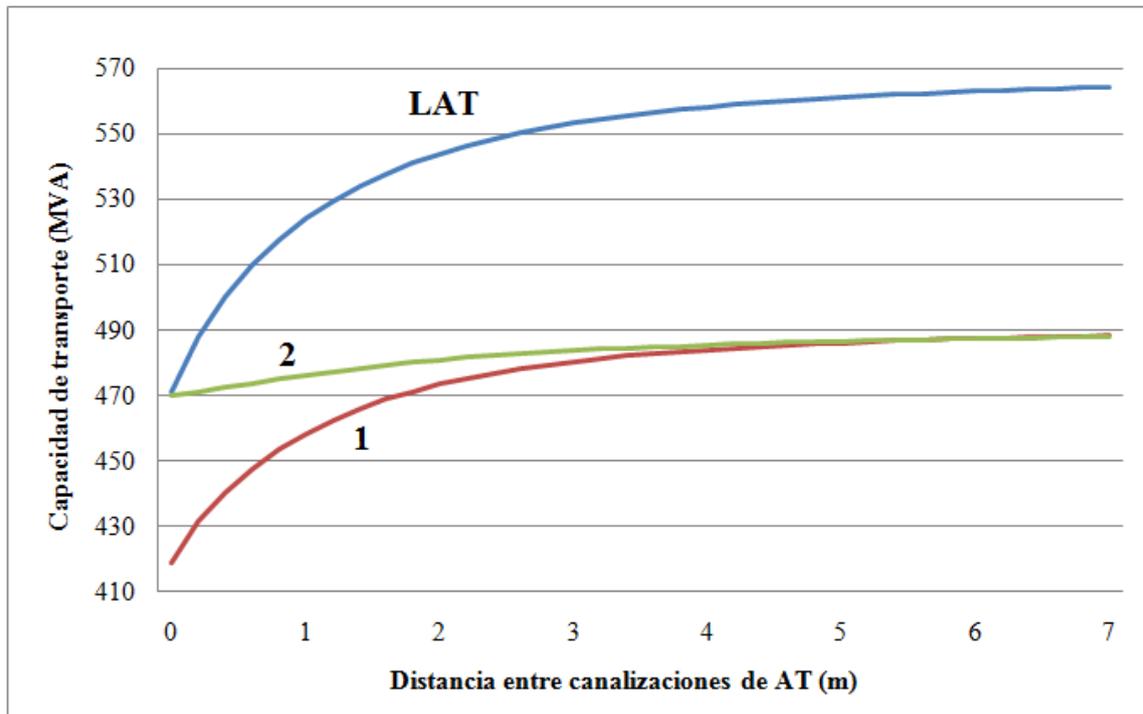


Figura 28: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones.

En la figura 29 se muestra el perfil térmico correspondiente a una distancia nula entre canalizaciones:

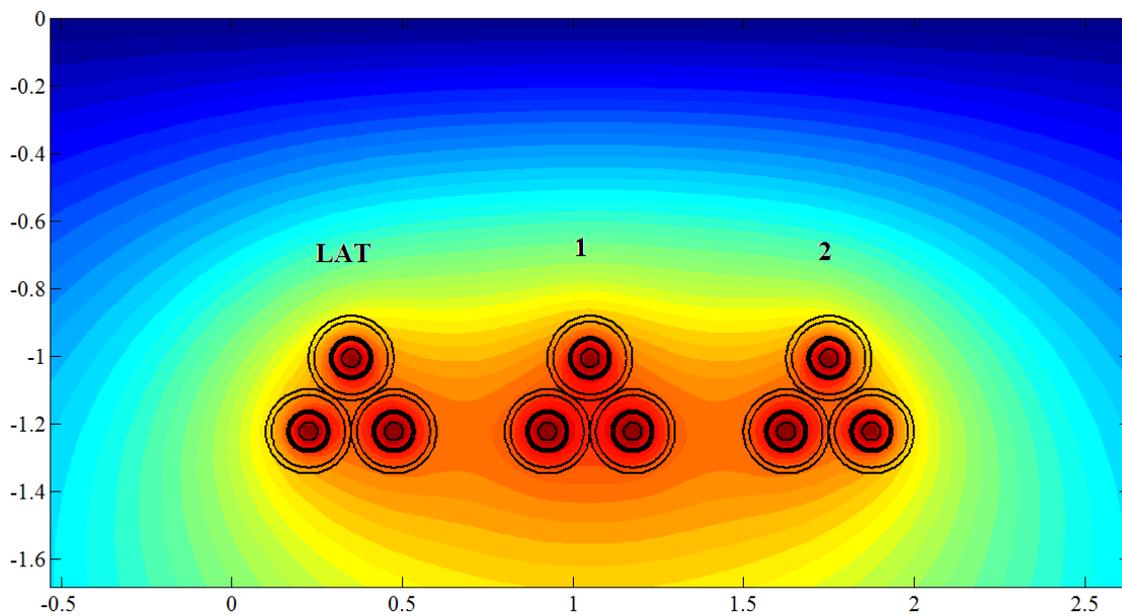


Figura 29: Perfil térmico con una distancia nula entre canalizaciones.

Como se puede observar, cuando la distancia entre canalizaciones es nula, la capacidad de transporte de las dos líneas que están en los extremos (LAT y línea 2) es la misma. La capacidad de transporte de la línea del centro (línea 1) es menor debido a que tiene la influencia térmica de las otras dos LAT.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Conforme aumenta la distancia entre la primera LAT y las otras dos ternas, la capacidad de transporte de la terna 1 se va igualando a la de la terna 2, esto se debe a que la influencia térmica entre la LAT y las líneas 1 y 2 va disminuyendo. Es decir, se puede afirmar que cuanto más se aproximen los valores de la capacidad de transporte de las líneas 1 y 2, menor es la influencia térmica que éstas tienen sobre la LAT.

La variación de la capacidad de transporte de la LAT en función de la distancia a la canalización formada por las líneas 1 y 2 es la siguiente:

- La capacidad de transporte se reduce de 568.7MVA hasta 471.0MVA cuando la distancia entre canalizaciones es nula, es decir, disminuye un 17.2% del valor de su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 1 metro la capacidad de transporte se reduce hasta los 524MVA, lo que equivale a una disminución del 7.9% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros la capacidad de transporte se reduce hasta los 543.7MVA, se reduce un 4.4% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 3 metros se reduce hasta los 553.1MVA, se reduce un 2.7% la capacidad de transporte nominal de la LAT.

En vista a los resultados obtenidos, se puede observar que la influencia térmica de la canalización de AT vuelve a ser significativa sobretodo en el primer metro de distancia. En este caso, la influencia térmica de la canalización compuesta por dos ternas es significativa hasta una distancia de 1.7 metros, distancia en la que la capacidad de transporte de la LAT alcanza un valor del 95% de su capacidad de transporte nominal. Cuando la distancia es de 6 metros, se puede considerar que no hay influencia térmica entre canalizaciones, ya que la capacidad de transporte de la LAT es un 99% de la capacidad de transporte nominal.

El perfil térmico cuando la distancia entre las canalizaciones es de 2 metros se muestra en la figura 30, en él se puede ver que la influencia térmica de las líneas 1 y 2 a esta distancia es prácticamente despreciable.

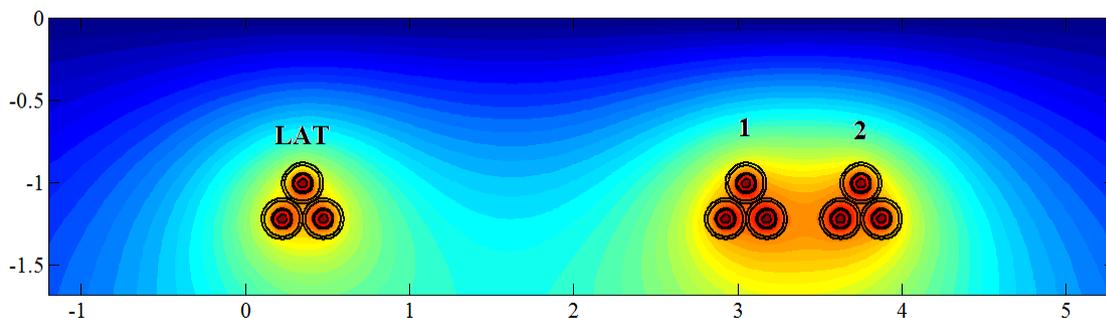


Figura 30: Perfil térmico de con distancia de 2 metros entre canalizaciones.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Además en la gráfica de la figura 28 se puede observar que los valores de la capacidad de transporte de las líneas 1 y 2 se acercan considerablemente a partir del segundo metro.

-Influencia de tres ternas de AT:

En este caso se va a estudiar la influencia de una canalización con tres ternas (líneas 1, 2 y 3), con las mismas características que las definidas en casos anteriores y con una separación entre ejes de dichas ternas de 700mm. La situación se puede observar en la figura 31:

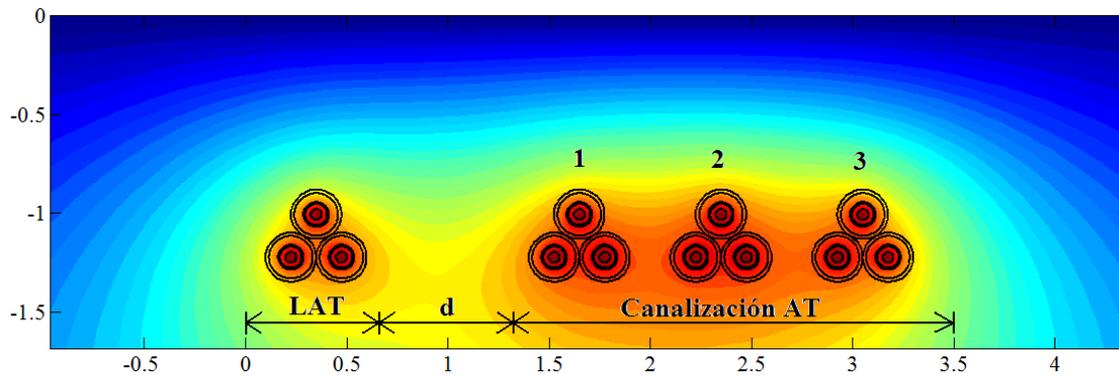


Figura 31: Perfil térmico de la LAT con influencia de otras tres ternas de AT.

Igual que en el anterior caso, se ha obtenido la evolución de la capacidad de transporte en función de la distancia existente entre la canalización de la LAT y la canalización compuesta por las ternas 1, 2 y 3. Los resultados obtenidos son los siguientes:

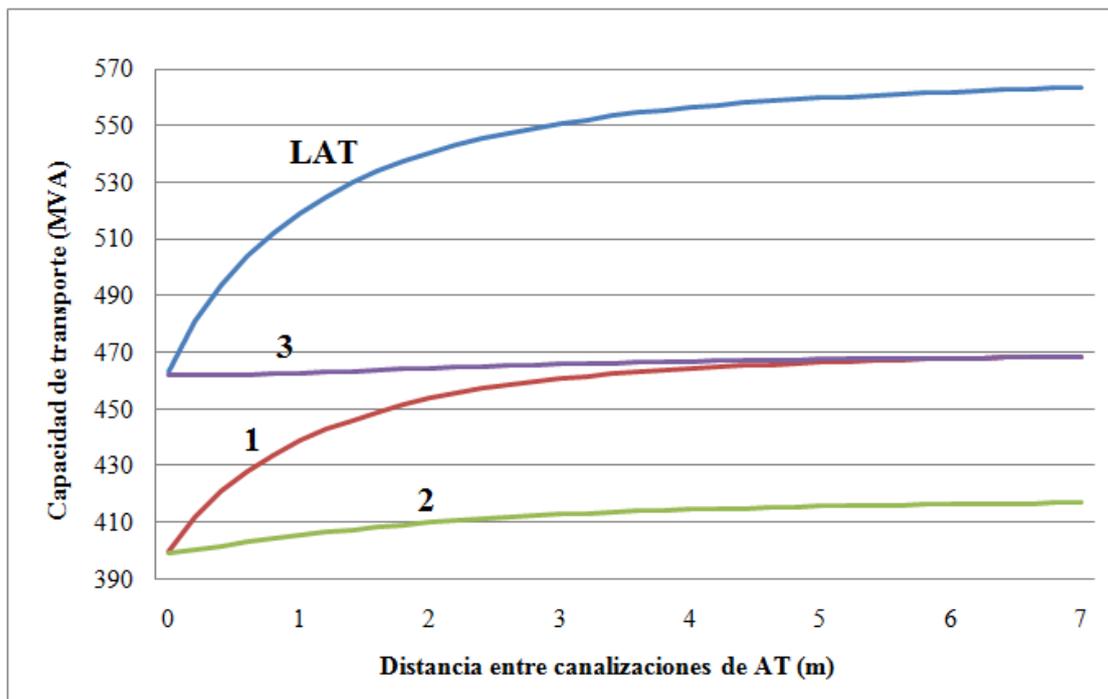


Figura 32: Variación de la capacidad de transporte de las LAT con la distancia.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

El perfil térmico cuando la distancia entre canalizaciones es nula es el siguiente:

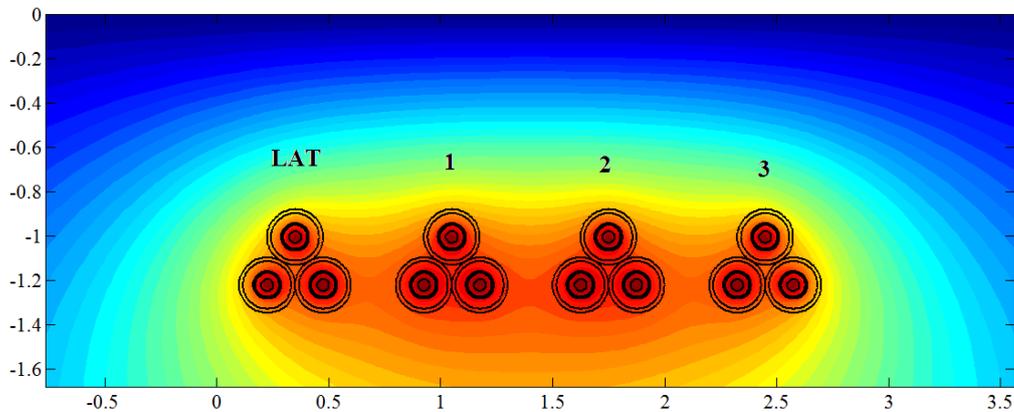


Figura 33: Perfil térmico con una distancia nula entre canalizaciones.

Como es lógico, se puede observar que cuando la distancia entre canalizaciones es mínima, la capacidad de transporte es la misma para las dos ternas que están situadas en los extremos (LAT y línea 3) y para las dos ternas que están en las posiciones intermedias respectivamente (líneas 1 y 2).

En la gráfica de la figura 30, se puede observar que a medida que aumenta la distancia, la capacidad de transporte de la LAT que se queda fija aumenta de forma típica. Por otra parte, se puede observar que las curvas correspondientes a las líneas 1, 2 y 3, pertenecientes a la otra canalización siguen dos patrones diferentes: la forma de la curva de las líneas 2 y 3 no es la misma que la de la línea 1.

La capacidad de transporte de la línea 1, que es la misma que la de la línea 2 cuando la distancia entre canalizaciones es nula, aumenta de forma más rápida conforme aumenta la distancia entre canalizaciones y se va igualando al valor de la capacidad de transporte de la línea 3. Esto se debe a que la influencia térmica entre canalizaciones va disminuyendo, y como las ternas 1 y 3 se encuentran en los extremos de su canalización, los valores de sus capacidades de transporte se van acercando. En cambio, la capacidad de transporte de la línea 2 es menor, ya que está situada entre las otras dos líneas y en consecuencia sufre un mayor calentamiento. Por lo tanto, cuando la capacidad de transporte de las dos ternas que están situadas en los extremos de la canalización de AT (ternas 1 y 3) es prácticamente la misma, se puede afirmar que no hay una influencia térmica significativa entre canalizaciones.

Los valores obtenidos para la capacidad de transporte de la LAT son los siguientes:

- 463.2MVA cuando la distancia entre canalizaciones es nula, lo que equivale a una disminución del 18.6% en la capacidad de transporte nominal de la línea.
- 519.1MVA cuando hay 1 metro de distancia entre canalizaciones, es decir, la capacidad de transporte de la línea disminuye un 8.7% de su valor nominal.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- 540.4MVA cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros, con lo que la capacidad de transporte disminuye un 5.0% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- 550.7MVA cuando la distancia es de 3 metros, es decir, la capacidad de transporte de la línea disminuye un 3.2% con respecto su valor nominal.

En este caso la influencia térmica de la canalización sobre la LAT es significativa hasta los 1.8 metros de distancia. Cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros, el perfil térmico de la situación es la que se muestra en la figura 34, como era de esperar, la influencia térmica entre canalizaciones no es significativa:

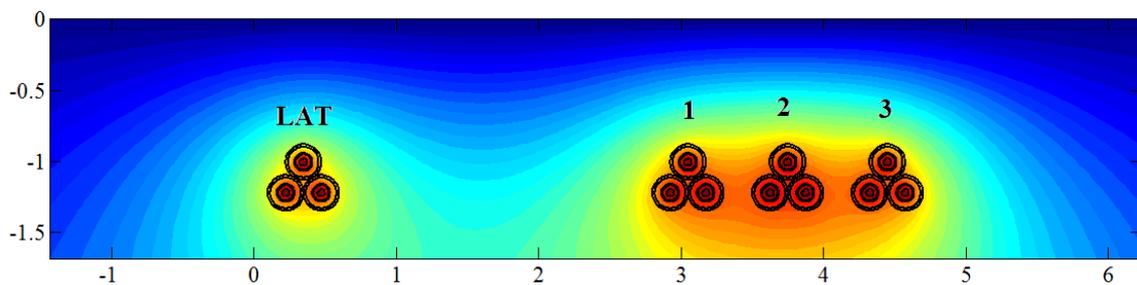


Figura 34: Perfil térmico de las canalizaciones con una distancia de 2 metros.

Por último, en este caso la distancia obtenida experimentalmente para la que no hay influencia térmica entre canalizaciones es de 6.7 metros.

-Influencia de cuatro ternas de AT:

En este caso se ha considerado que la LAT se encuentra situada entre dos canalizaciones de AT: una canalización a la derecha compuesta por tres ternas de AT (ternas 1, 2 y 3) y otra a la izquierda con una sola terna (terna 4). Al igual que en anteriores casos, las características de las LAT son las mismas y son las que se han definido al inicio de este apartado. La situación que se va a analizar se puede observar en la figura 35:

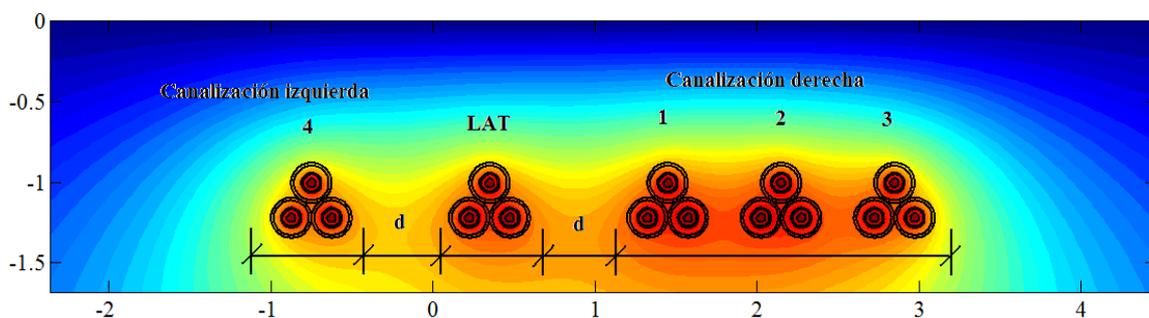


Figura 35: Perfil térmico de la LAT con influencia de otras cuatro ternas de AT.

La variación de la capacidad de transporte para las diferentes LAT, en función de la distancia a las otras dos canalizaciones, es la que se muestra en la gráfica de la figura 36:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

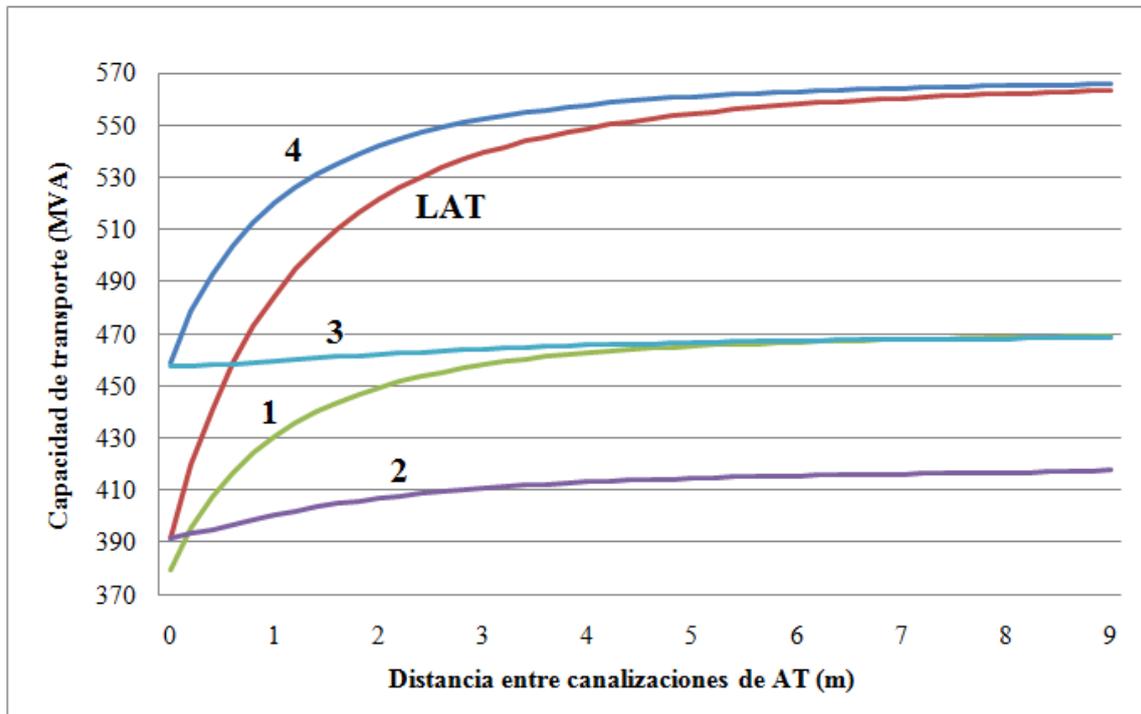


Figura 36: Variación de la capacidad de transporte de las LAT con la distancia.

El perfil térmico correspondiente a una distancia nula entre las diferentes canalizaciones es el que aparece en la figura 37:

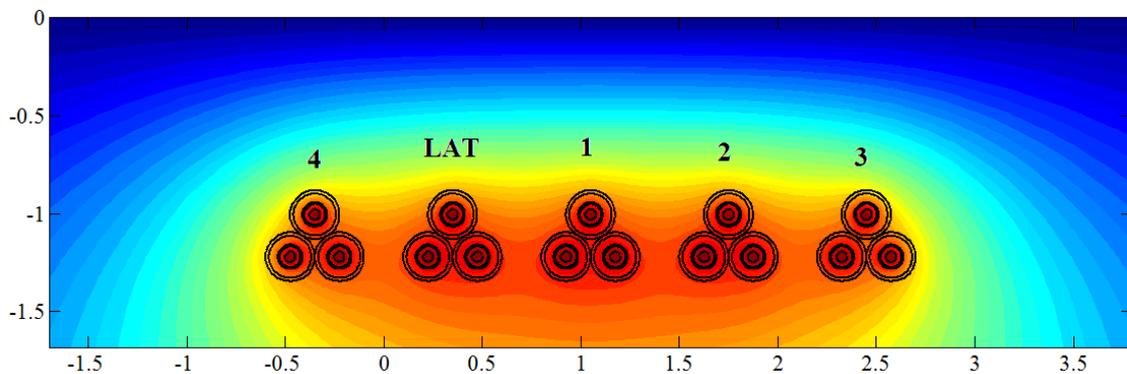


Figura 37: Perfil térmico con una distancia nula entre canalizaciones.

Como era de esperar, cuando la distancia entre canalizaciones es nula, la capacidad de transporte de las ternas que están situadas en los extremos (ternas 3 y 4) es mayor que la de las otras ternas (LAT, 1 y 2).

También se puede observar que al aumentar la distancia entre canalizaciones, la capacidad de transporte de las líneas de la canalización de la derecha (líneas 1, 2 y 3), aumenta del mismo modo en el que lo hacían en el anterior apartado, cuando no había canalización a la izquierda.

La capacidad de transporte de la línea objeto de estudio (LAT) también varía de la misma manera que en anteriores apartados, aunque con valores menores:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- La capacidad de transporte cuando la distancia entre canalizaciones es nula es de 391.6MVA, lo que supone una disminución del 31.1% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 1 metro, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 484.7MVA, es decir, disminuye un 14.8% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 521.7MVA, es decir, disminuye un 8.3% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 3 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 539.3MVA, es decir, disminuye un 5.2% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 4 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 548.8MVA, es decir, disminuye un 3.5% con respecto su capacidad de transporte nominal.

En este caso la influencia térmica de las dos canalizaciones consideradas deja de ser significativa a partir de una distancia de 3.1 metros. Igual que en el caso anterior, se puede observar cómo la capacidad de transporte de las líneas 1 y 3 se va igualando a partir de esta distancia, ya que se encuentran en los extremos de la canalización de la derecha y no hay influencia térmica significativa entre canalizaciones. En este caso además se puede observar que, a partir de esta distancia, la capacidad de transporte de las líneas LAT y 4 tienden al mismo valor debido a que no comparten canalización con otras ternas y no sufren influencia térmica significativa de otras canalizaciones.

En la figura 38 está representado el perfil térmico de las instalaciones cuando la distancia entre canalizaciones es de 3.2 metros y la influencia térmica no es significativa:

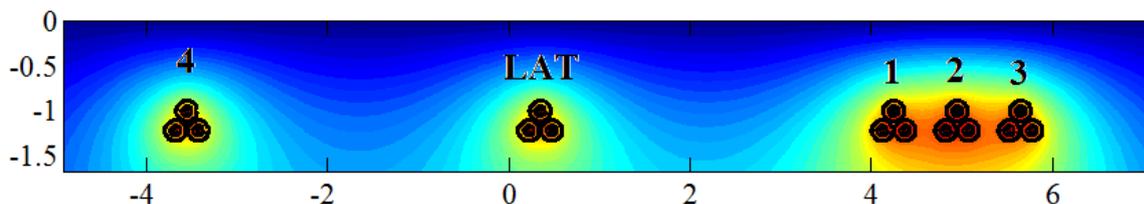


Figura 38: Perfil térmico de las canalizaciones con una distancia de 3 metros.

La distancia a partir de la cual la capacidad de transporte de la LAT alcanza un valor del 99% de su capacidad de transporte nominal, y por lo tanto no sufre influencia térmica de las otras canalizaciones, es de 8.8 metros.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

-Influencia de cinco ternas de AT:

De nuevo se tienen dos canalizaciones con influencia térmica sobre la línea objeto de estudio. En este caso la canalización de la derecha está formada por tres ternas (líneas 1, 2 y 3) y la de la izquierda está compuesta por dos ternas (líneas 4 y 5), como puede observarse en la figura 39:

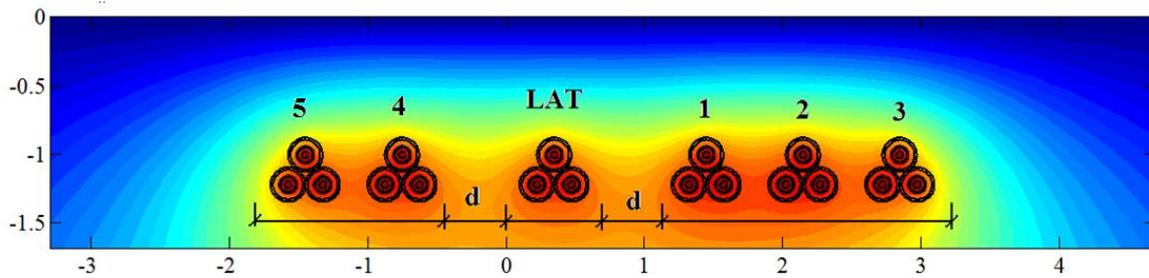


Figura 39: Perfil térmico de la LAT con influencia de otras cinco ternas de AT.

La variación de la capacidad de transporte de las LAT, en función de la distancia a entre las canalizaciones es la que se muestra en la figura 40:

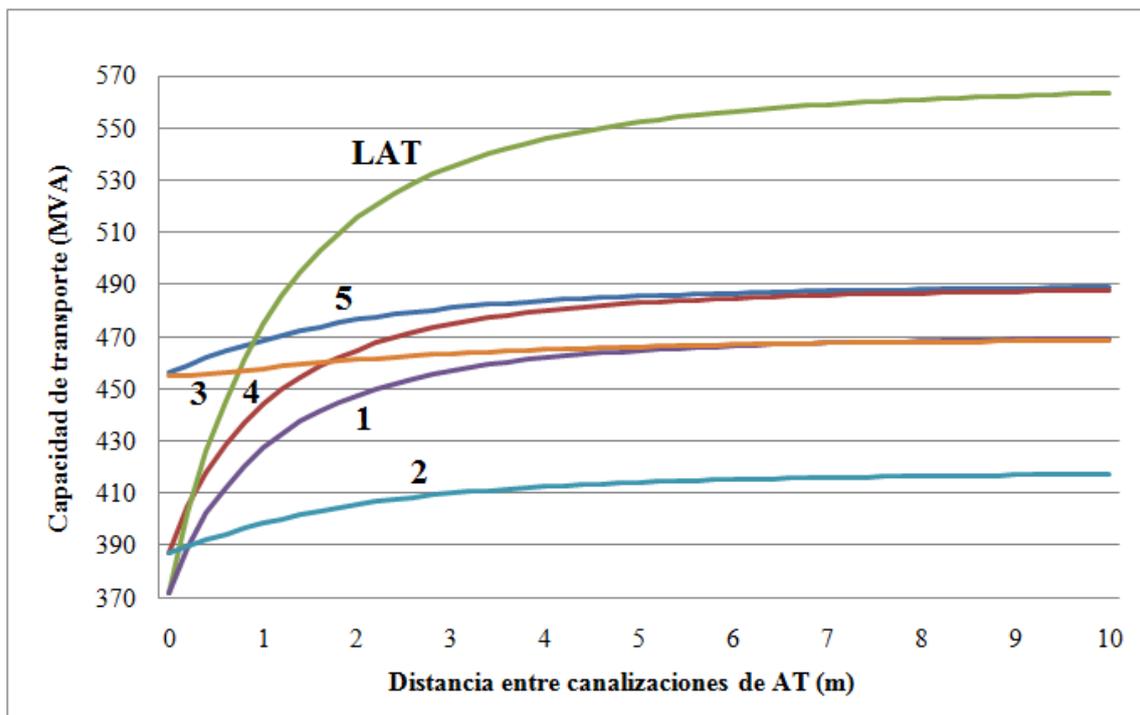


Figura 40: Variación de la capacidad de transporte de las LAT con la distancia.

Como se puede observar, la evolución de la capacidad de transporte de las líneas de la canalización de la derecha (1, 2 y 3) sigue con el mismo patrón que en los dos apartados anteriores. Por su parte, las líneas de la canalización de la izquierda (líneas 4 y 5) también tienen una variación en su capacidad de transporte que sigue un modelo similar al del caso en el que sólo había una canalización con dos líneas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Por su parte, la variación de la capacidad de transporte para la LAT es la siguiente:

- Para una distancia nula entre canalizaciones, la capacidad de transporte es de 371.6MVA, lo que equivale a una disminución de la capacidad de transporte nominal del 34.5%.
- Para una distancia entre canalizaciones de 1 metro, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 474.6MVA, es decir, disminuye un 16.4% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 515.6MVA, es decir, disminuye un 9.3% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Para una distancia entre canalizaciones de 3 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 535.3MVA, es decir, disminuye un 5.9% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Para una distancia entre canalizaciones de 4 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 545.9MVA, es decir, disminuye un 4.0% con respecto su capacidad de transporte nominal.

Para este caso, a partir de una distancia entre canalizaciones de 3.3 metros, la influencia térmica deja de ser significativa en la disminución de la capacidad de transporte de la LAT. Cuando la distancia es de 9.9 metros ya no hay influencia térmica entre canalizaciones. En la figura 41 se puede observar la situación para una distancia de 3.4 metros:

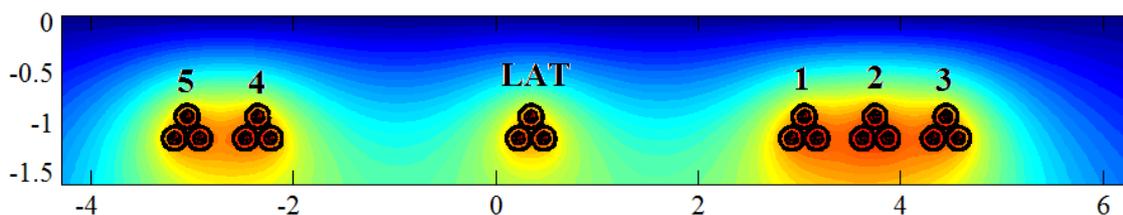


Figura 41: Perfil térmico de las canalizaciones con una distancia de 3.4 metros.

-Influencia de seis ternas de AT:

En este último caso, la canalización situada a la izquierda de la LAT está formada por tres ternas (líneas 1, 2 y 3), al igual que la que la canalización que está a la derecha (líneas 4, 5 y 6). La situación de las líneas se puede observar en la figura 42:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

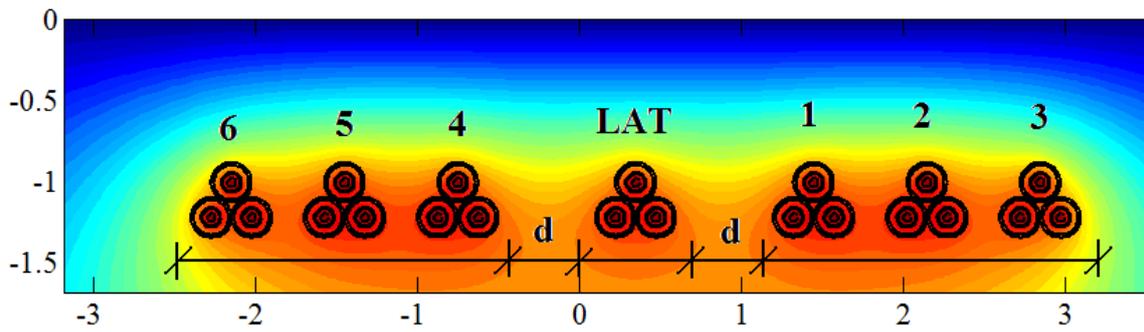


Figura 42: Perfil térmico de la LAT con influencia de otras seis ternas de AT.

La evolución de la capacidad de transporte de las líneas que forman las diferentes canalizaciones, en función a la distancia existente entre las mismas, es:

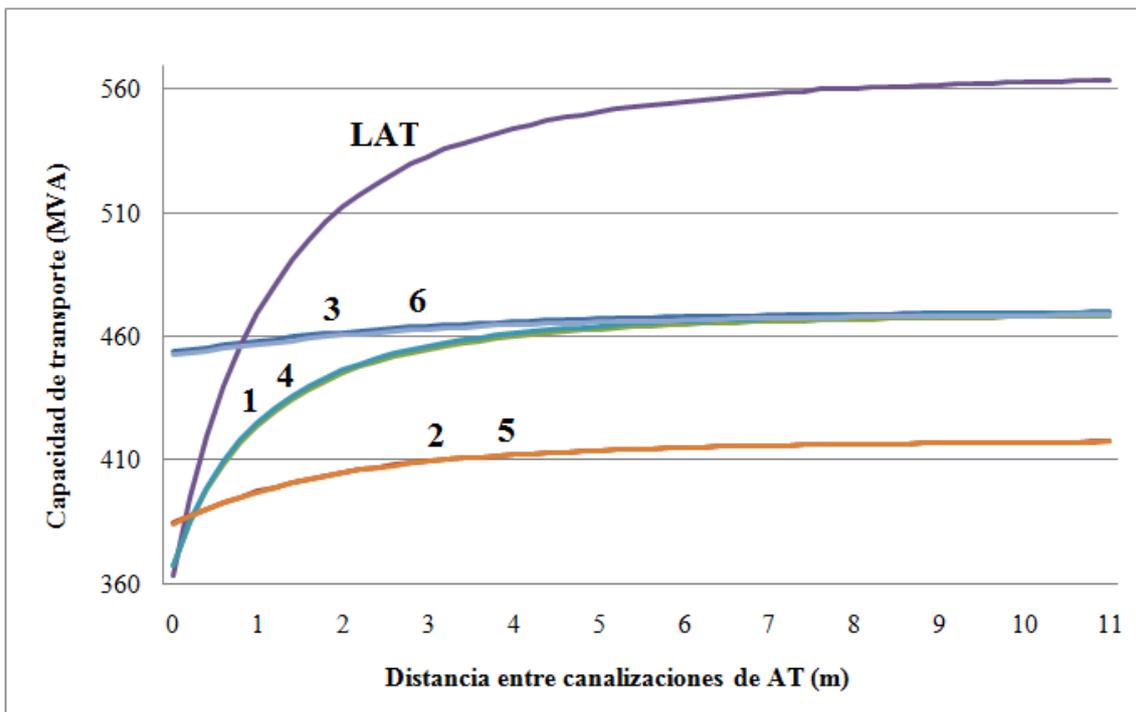


Figura 43: Variación de la capacidad de transporte de las LAT con la distancia.

Como se puede observar en las gráficas de la figura 43, la variación de la capacidad de transporte de las líneas 1 y 4, 2 y 5, 3 y 6 es la misma respectivamente. Esto se debe a que tenemos una situación simétrica, como puede observarse en las figuras 42 y 44.

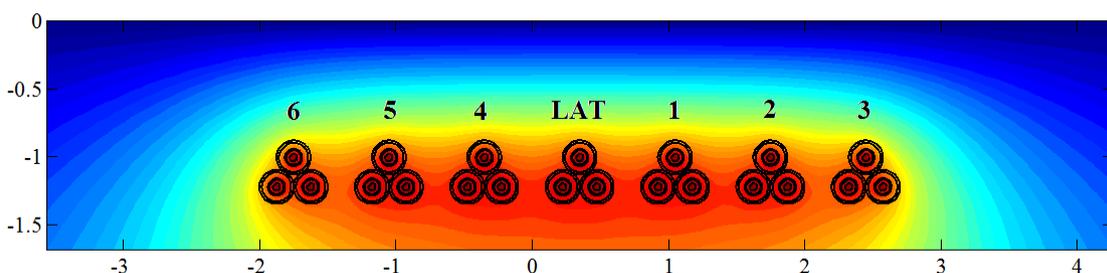


Figura 44: Perfil térmico con una distancia nula entre canalizaciones.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Los valores obtenidos para la capacidad de transporte de la LAT en este caso son:

- Cuando la distancia es nula entre canalizaciones, la capacidad de transporte de la LAT es de 363.3MVA, lo que equivale a una disminución del 36.1% con respecto a la capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 1 metro, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 469.6MVA, es decir, disminuye un 17.4% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Cuando la distancia entre canalizaciones es de 2 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 512.2MVA, lo que equivale a una disminución de un 9.9% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Para una distancia entre canalizaciones de 3 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 532.9MVA, es decir, disminuye un 6.1% con respecto su capacidad de transporte nominal.
- Para una distancia entre canalizaciones de 4 metros, la capacidad de transporte de la línea disminuye hasta los 544.1MVA, es decir, disminuye un 4.3% con respecto su capacidad de transporte nominal.

Para este caso, la influencia térmica de las otras canalizaciones es significativa hasta una distancia de 3.6 metros. A partir de los 10.1 metros de distancia, se puede considerar que no hay influencia térmica entre canalizaciones.

En la figura 45 se puede observar el perfil térmico de las instalaciones cuando la distancia es de 3.6 metros:

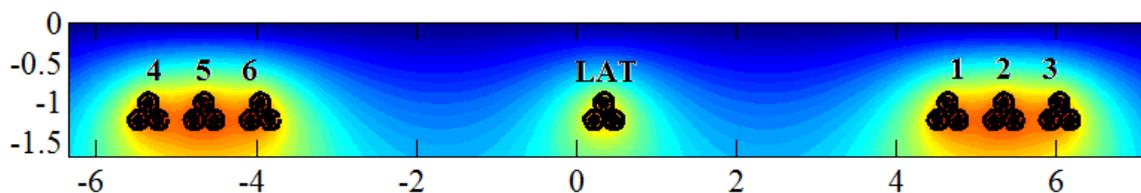


Figura 45: Perfil térmico de las canalizaciones con una distancia de 3.6 metros.

Como se puede ver en la figura, cuando las canalizaciones están a 3.6 metros de la LAT, la influencia térmica de éstas no es significativa.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5.2.2. Influencia de una canalización de media tensión en la capacidad de transporte nominal de una línea de alta tensión.

En este apartado se va estudiar la influencia que tiene una instalación de media tensión (MT), en la capacidad de transporte nominal de una línea eléctrica de alta tensión (LAT).

Para ello se va a obtener la capacidad de transporte de la LAT en función de las siguientes variables:

- Número de líneas existentes en la canalización de MT.
- Distancia entre las canalizaciones de AT y MT.
- Grado de carga de las líneas de MT.

La LAT es la misma que la del apartado 5.1.3 con la excepción de que se ha considerado encofrada en hormigón, las características son las de las tablas 43, 44 y 45:

Características generales:

Sistema	Corriente alterna trifásica
Tensión nominal (kV)	220
Frecuencia (Hz)	50
Longitud (m)	5898
Número de tramos	9
Número de empalmes	8
Sistema de puesta a tierra	Crossbonding Seccionado

Tabla 43: Datos generales de la instalación de AT.

Características del cable:

TIPO	Cobre 2000
Material del conductor	Cobre
Material de la pantalla	Cobre
Sección del conductor (mm ²)	2000
Diámetro del conductor (mm)	53,5
Material del aislamiento	XLPE
Diámetro del aislamiento(mm)	107
Sección de la pantalla(mm ²)	180
Diámetro medio de la pantalla(m)	116
Material de la cubierta	Polietileno
Diámetro exterior del cable (mm)	116
Tipo de tubo	Tubo monofásico
Diámetro interior del tubo (mm)	215
Diámetro exterior del tubo (mm)	250

Tabla 44: Datos de los cables de AT.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Características de la instalación:

Tipo	Hormigonada bajo tubo
Configuración de los conductores	Tresbolillo
Profundidad mínima, medida al eje de la terna (mm)	1150
Ancho mínimo de la canalización, por terna (mm)	700
Temperatura máxima del conductor (°C)	90

Tabla 45: Datos de la canalización de AT.

Los parámetros de las canalizaciones de media tensión, obtenidos a partir la Especificación de Materiales de Unión Fenosa [10], están definidos en las tablas 46 y 47:

Características de los cables de media tensión:

TIPO	CABLE RHZ1-OL 12/20 kV 1x240KAl + H16
Material del conductor	Aluminio
Material de la pantalla	Cobre
Sección del conductor (mm ²)	240
Diámetro del conductor (mm)	17.8
Material del aislamiento	XLPE
Diámetro del aislamiento(mm)	30.8
Sección de la pantalla(mm ²)	16
Diámetro medio de la pantalla(m)	32.4
Material de la cubierta	Polietileno
Diámetro exterior del cable (mm)	39.1
Tipo de tubo	Tubo trifásico
Diámetro interior del tubo (mm)	186
Diámetro exterior del tubo (mm)	200

Tabla 46: Datos de los cables de MT.

Datos de las instalaciones de media tensión:

Tipo	Enterrada bajo tubo (sin hormigonar)
Configuración de los conductores	Tresbolillo
Profundidad mínima, medida al eje de la terna (mm)	650
Ancho mínimo de canalización, por terna (mm)	300
Altura mínima de canalización, por terna (mm)	350
Temperatura máxima del conductor (°C)	90

Tabla 47: Datos de la canalización de MT.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSION

La capacidad de transporte obtenida para la LAT, sin tener en cuenta la influencia de otras líneas, es: 584.1MVA.

En este apartado se ha realizado el estudio de la variación de la capacidad de transporte de la LAT, en función de la distancia existente entre su canalización y la canalización de MT. En esta ocasión hay que tener en cuenta que el ancho mínimo de la canalización de la LAT es 700mm y el ancho mínimo considerado para cada terna de MT es 300mm, por lo tanto, una distancia nula entre canalizaciones de AT y MT es la correspondiente a una distancia de 500mm entre ejes de la terna de AT y la terna de MT que esté más próxima.

Se han considerado quince casos distintos para la canalización de MT: desde una canalización con una sola terna de MT en funcionamiento hasta una canalización con 15 ternas funcionando. Para la numeración de las ternas de MT se ha tenido en cuenta la colocación que suele existir en las instalaciones reales de media tensión. Además dentro de cada caso se han considerado varios grados de carga de las LMT: 100%, 50% y 25%. El caso más desfavorable es el que se muestra en la figura 46:

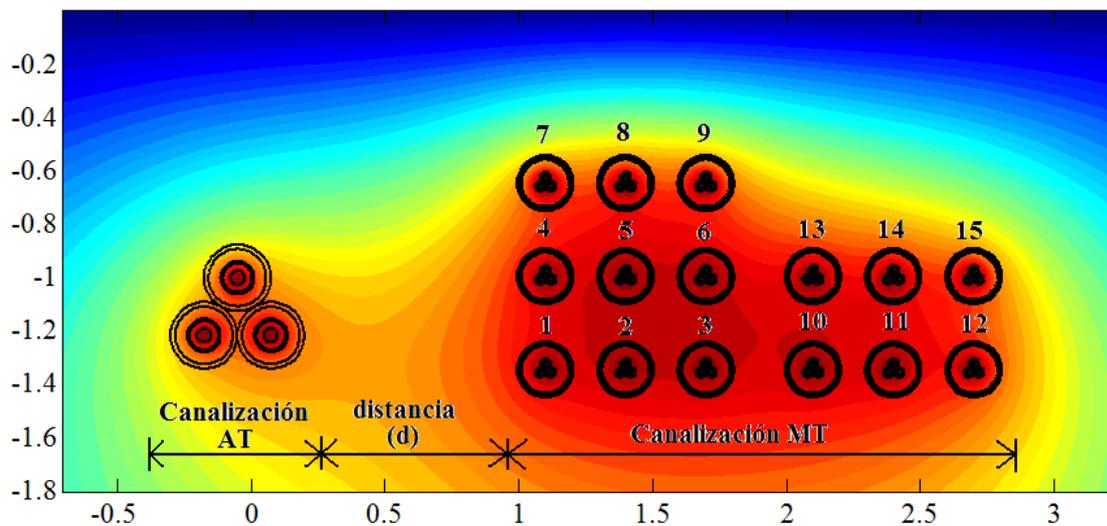


Figura 46: Perfil térmico con una canalización de MT compuesta por 15 ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Los resultados obtenidos en el estudio de la capacidad de transporte de la LAT, para los distintos casos, se muestran en las siguientes gráficas:

- Canalización de MT con una sola terna en funcionamiento:

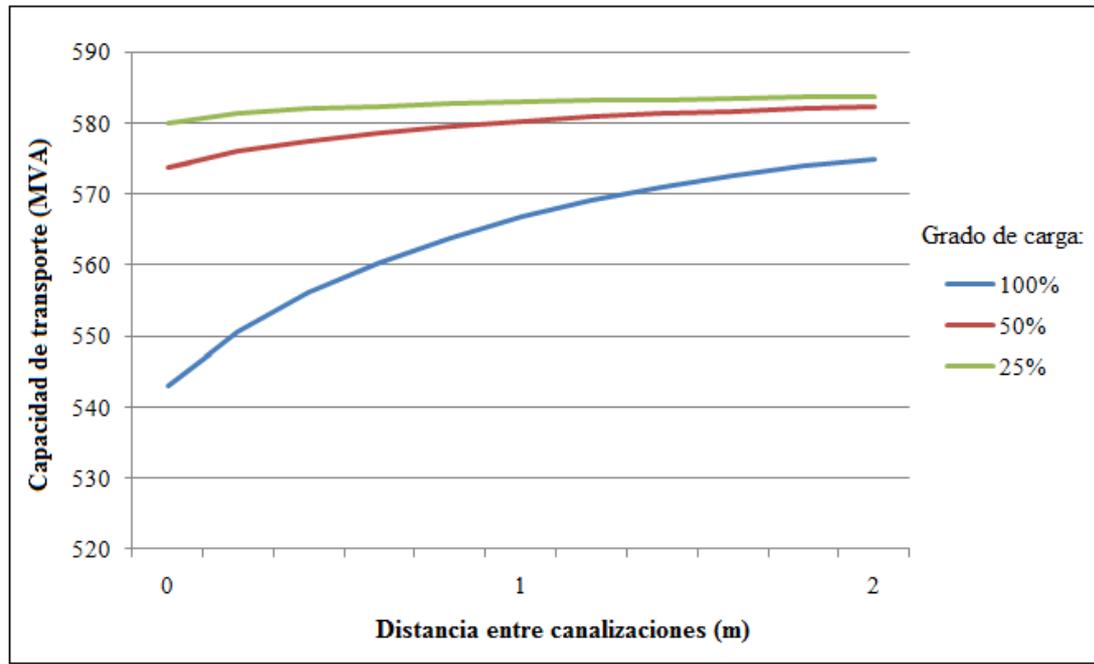


Figura 47: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 1terna.

- Canalización de MT con dos ternas:

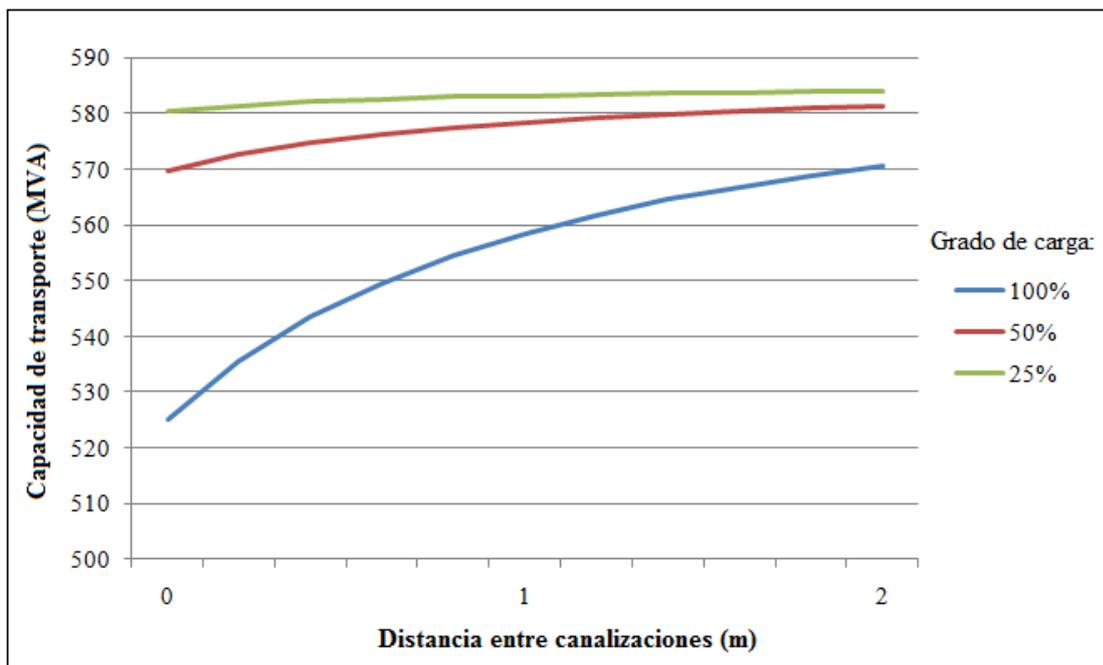


Figura 48: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 2ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con tres ternas:

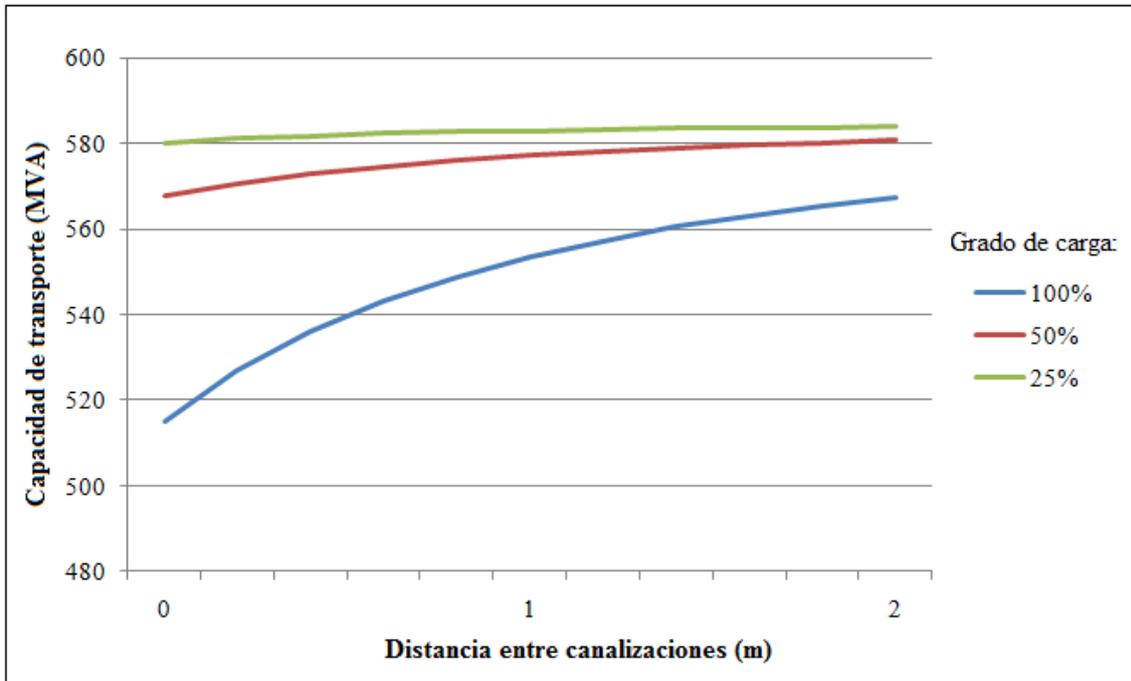


Figura 49: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 3ternas.

- Canalización de MT con cuatro ternas:

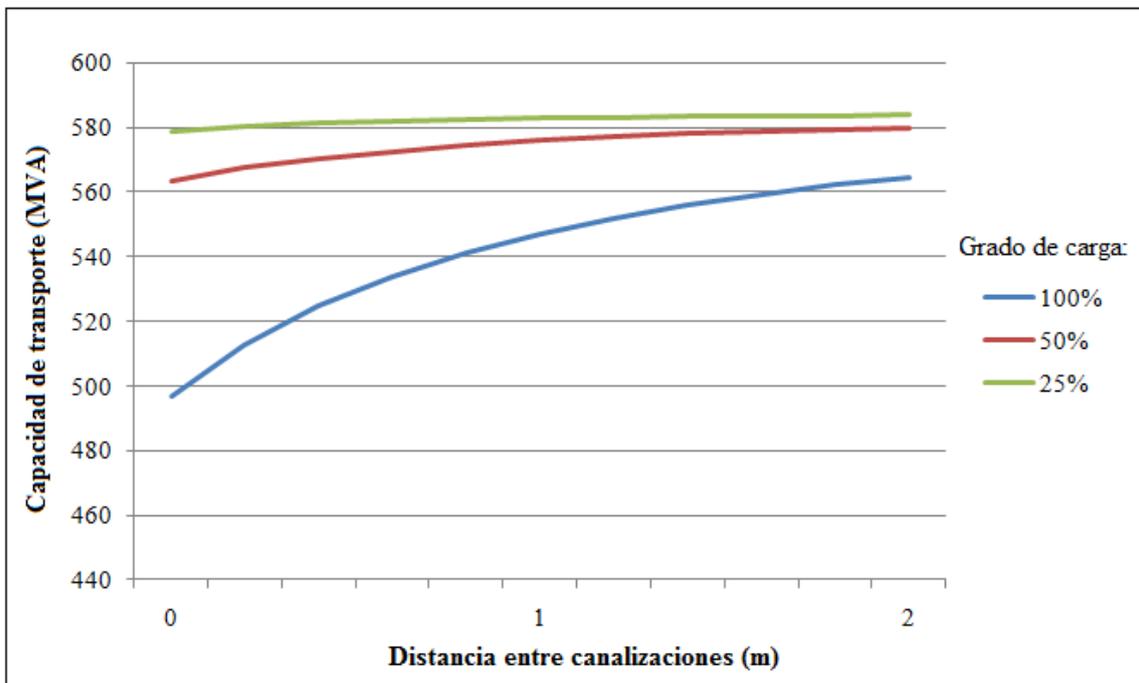


Figura 50: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 4ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con cinco ternas:

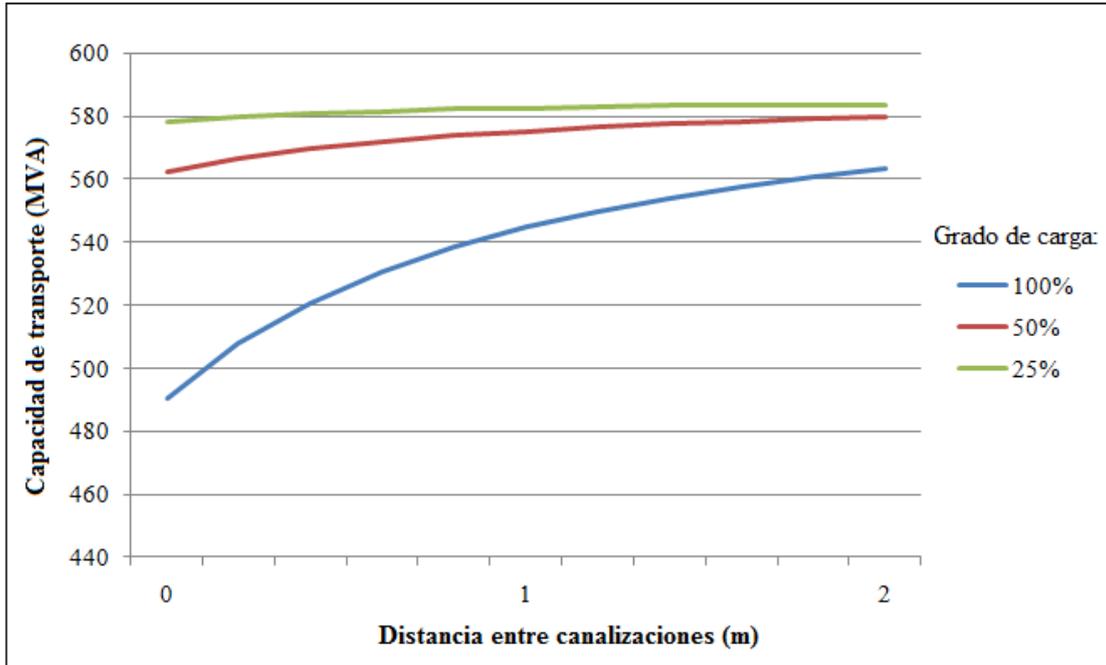


Figura 51: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 5ternas.

- Canalización de MT con seis ternas:

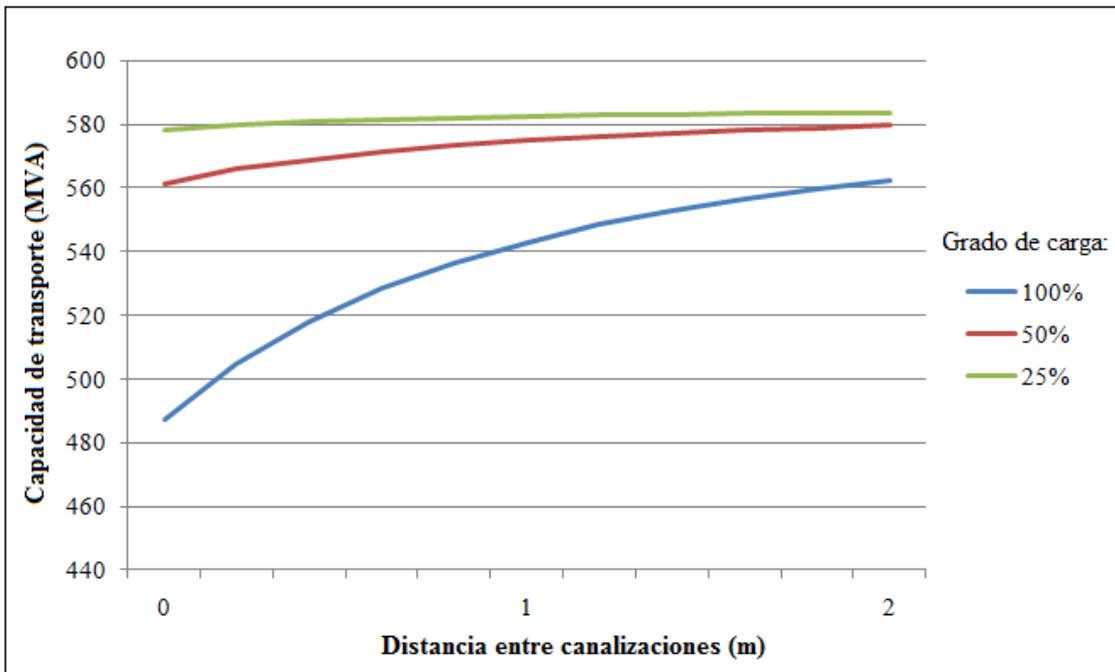


Figura 52: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 6ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con siete ternas:

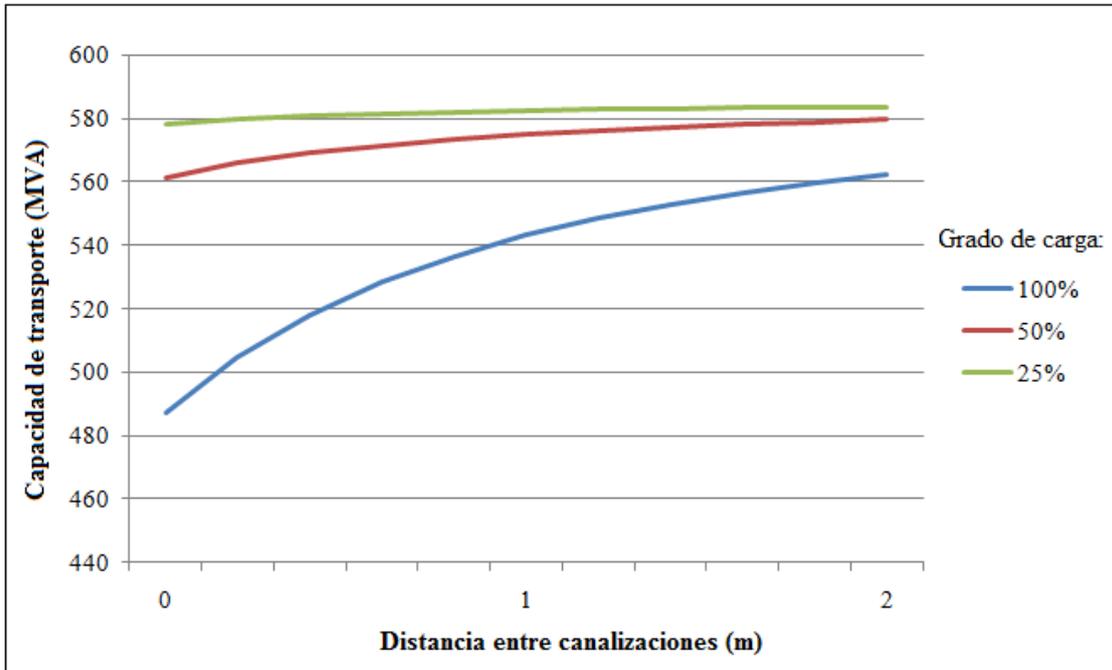


Figura 53: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 7ternas.

- Canalización de MT con ocho ternas:

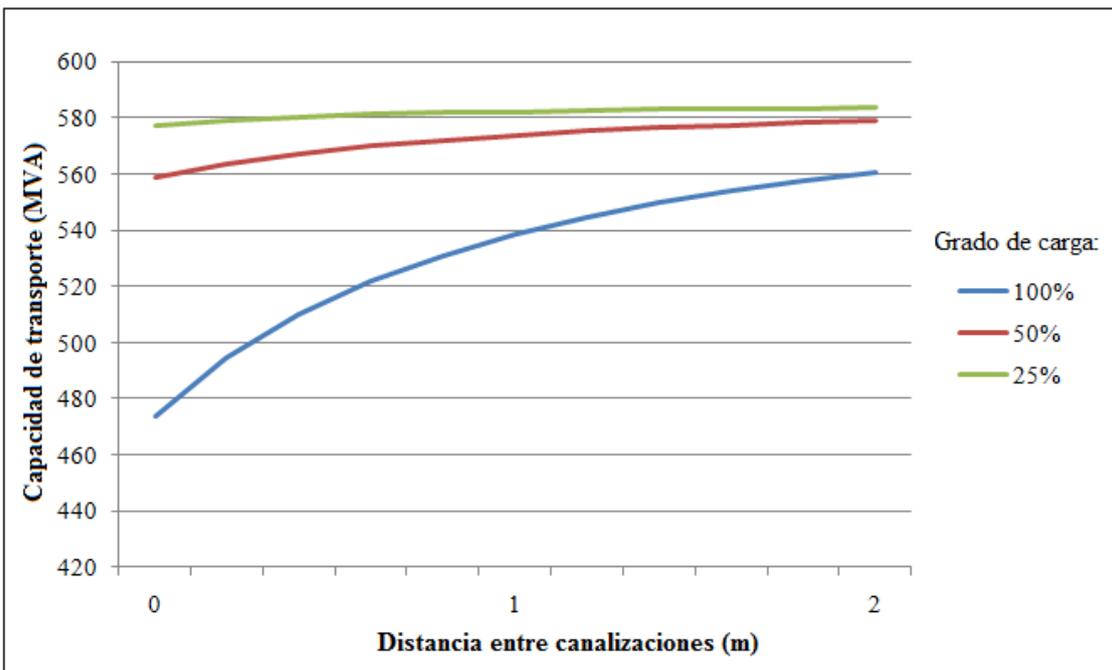


Figura 54: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 8ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con nueve ternas:

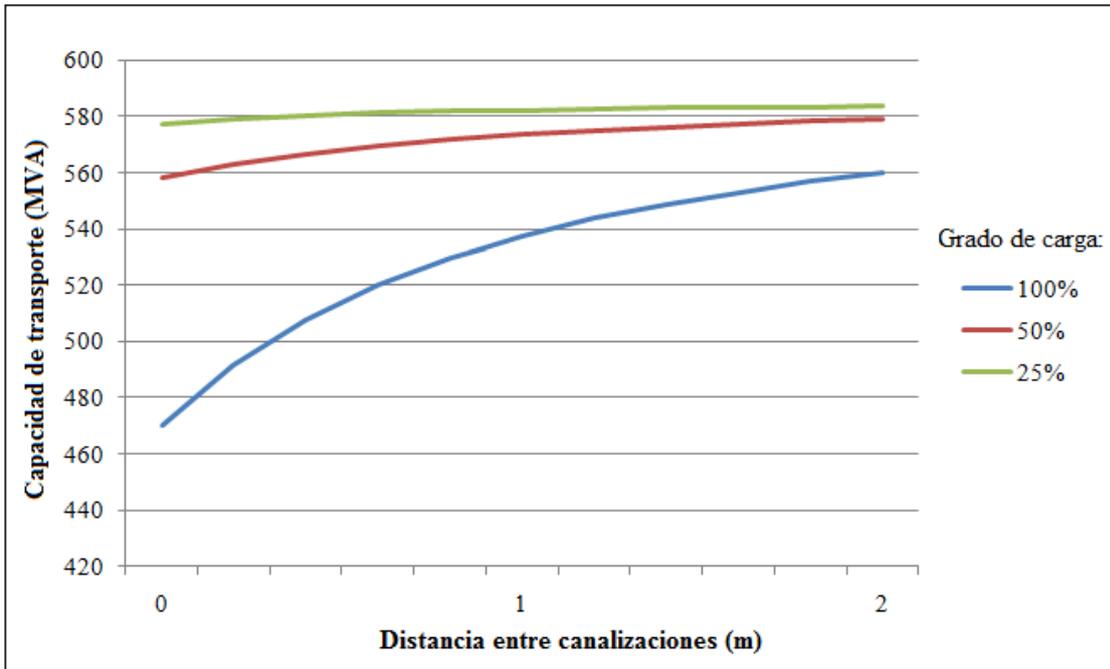


Figura 55: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 9ternas.

- Canalización de MT con diez ternas:

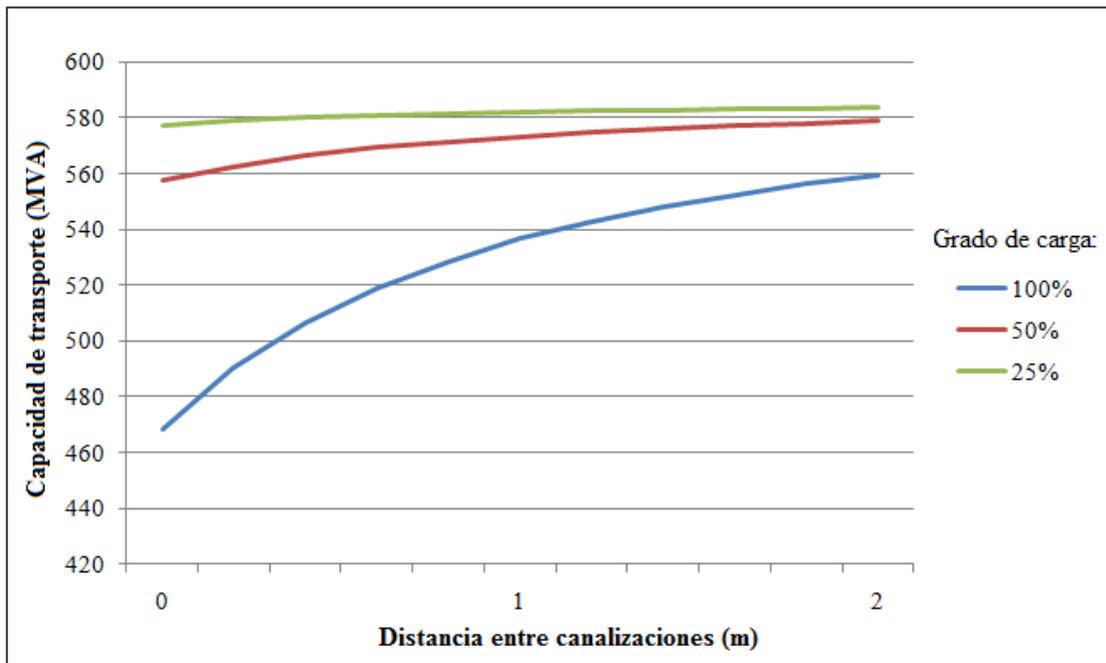


Figura 56: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 10ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con once ternas:

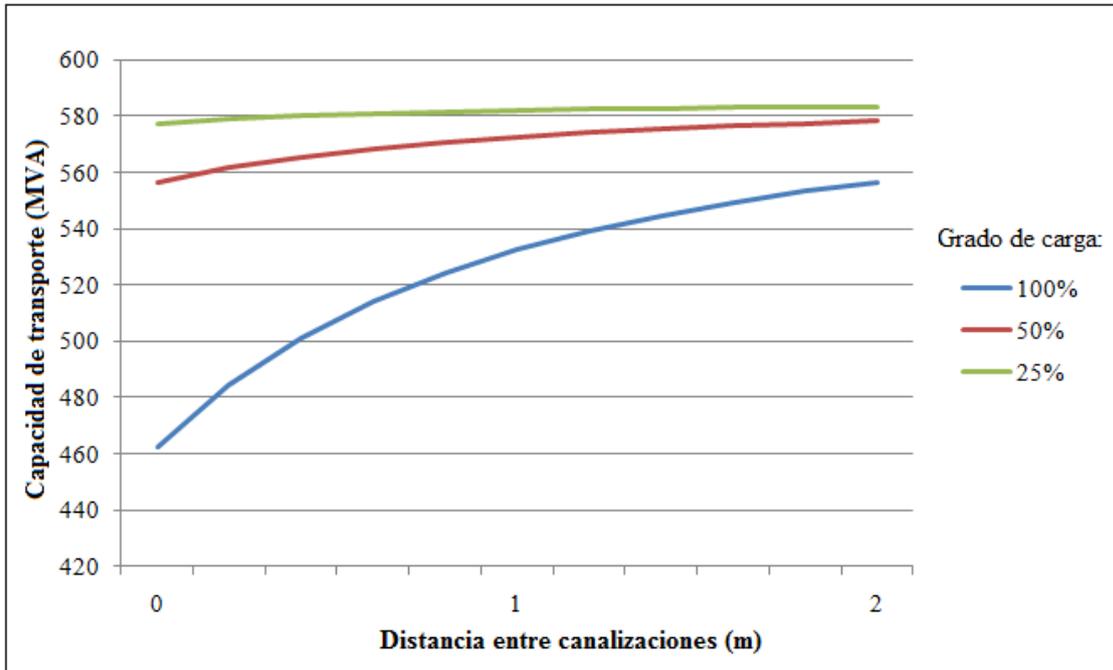


Figura 57: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 11ternas.

- Canalización de MT con doce ternas:

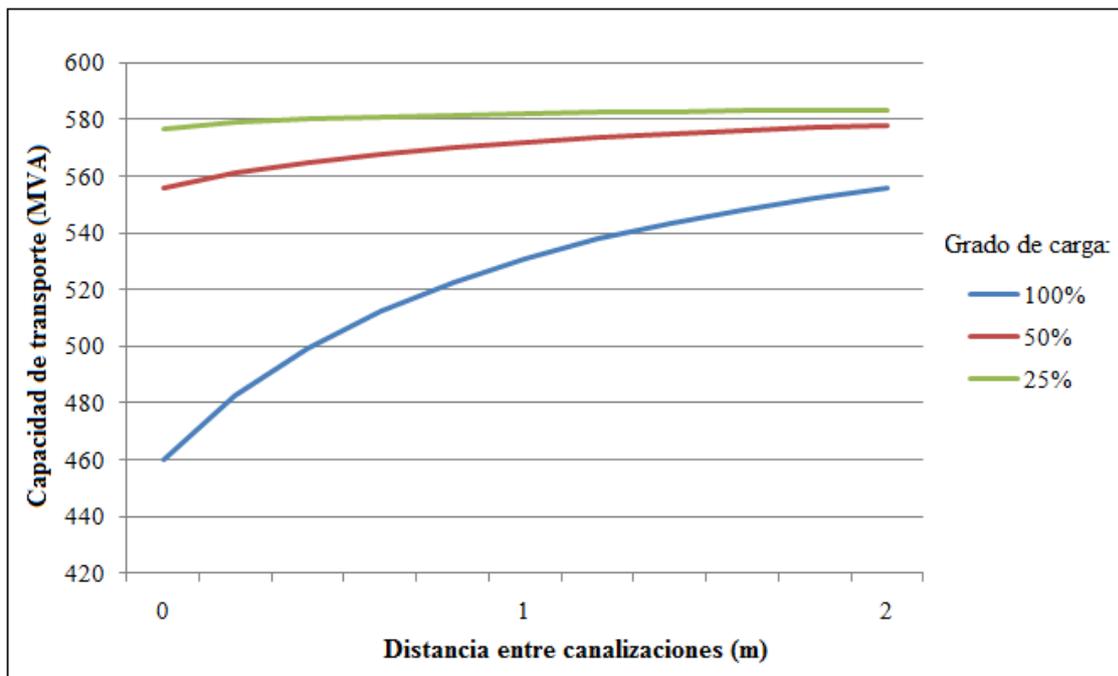


Figura 58: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 12ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con trece ternas:

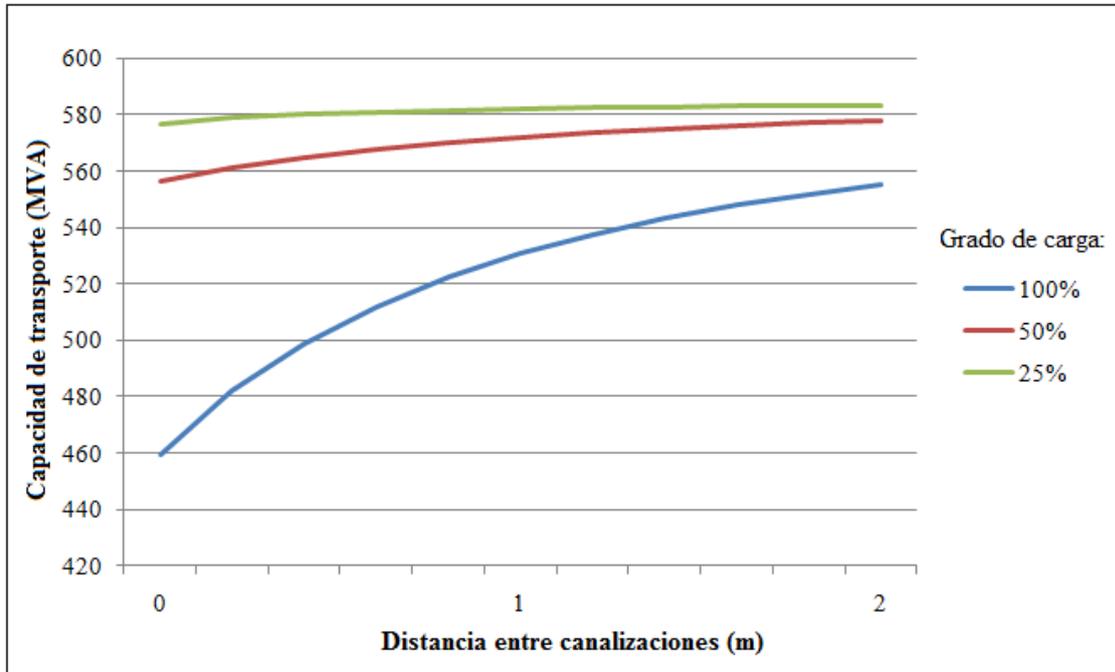


Figura 59: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 13ternas.

- Canalización de MT con catorce ternas:

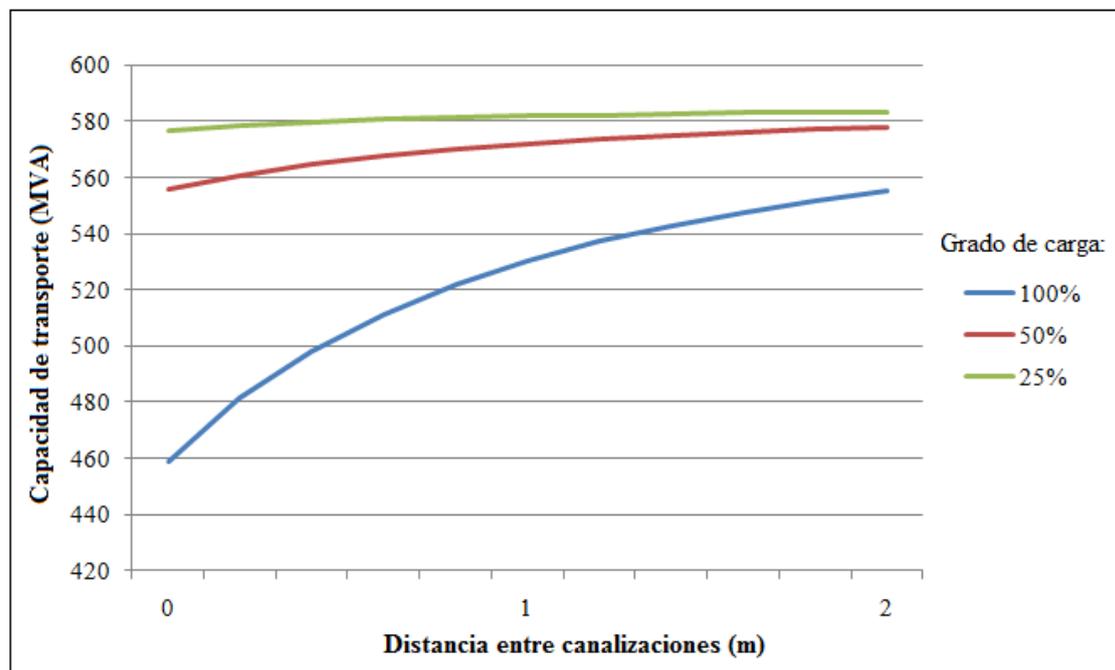


Figura 60: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 14ternas.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Canalización de MT con quince ternas:

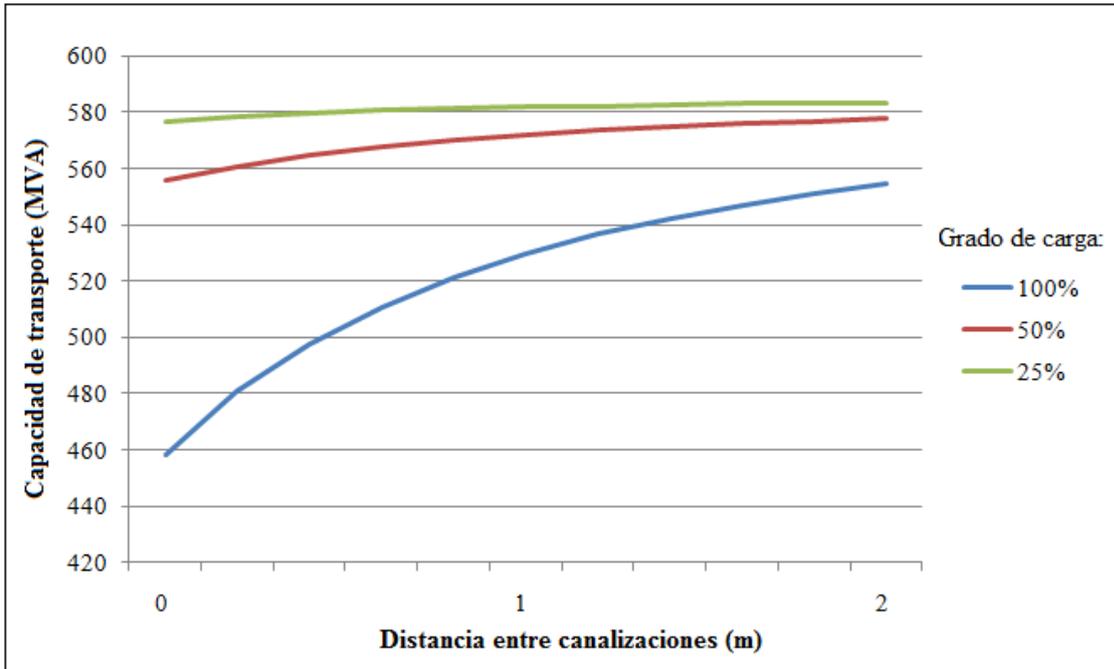


Figura 61: Variación de la capacidad de transporte con la distancia entre canalizaciones. 15ternas.

Las curvas correspondientes a la variación de la capacidad de transporte de la LAT para cada caso estudiado, cuando el grado de carga de las LMT es del 100% se muestran en la figura 62:

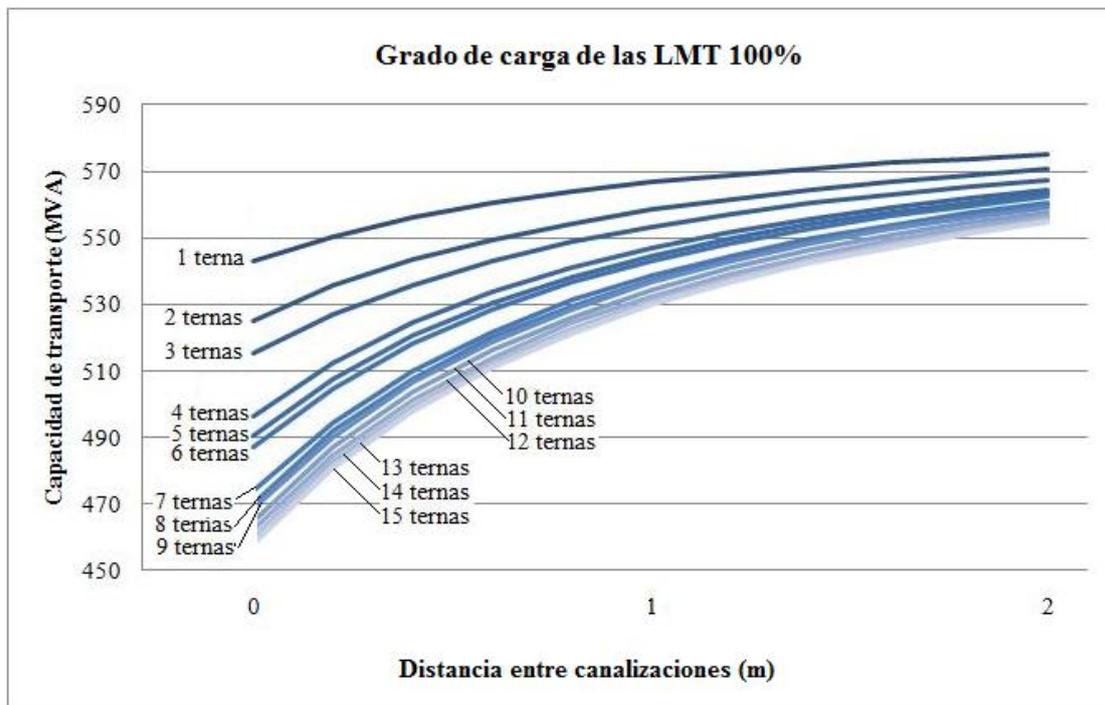


Figura 62: Variación de la capacidad de transporte con grado de carga del 100%.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Para un grado de carga del 50%, las curvas correspondientes a cada caso son las que aparecen en la gráfica de la figura 63:

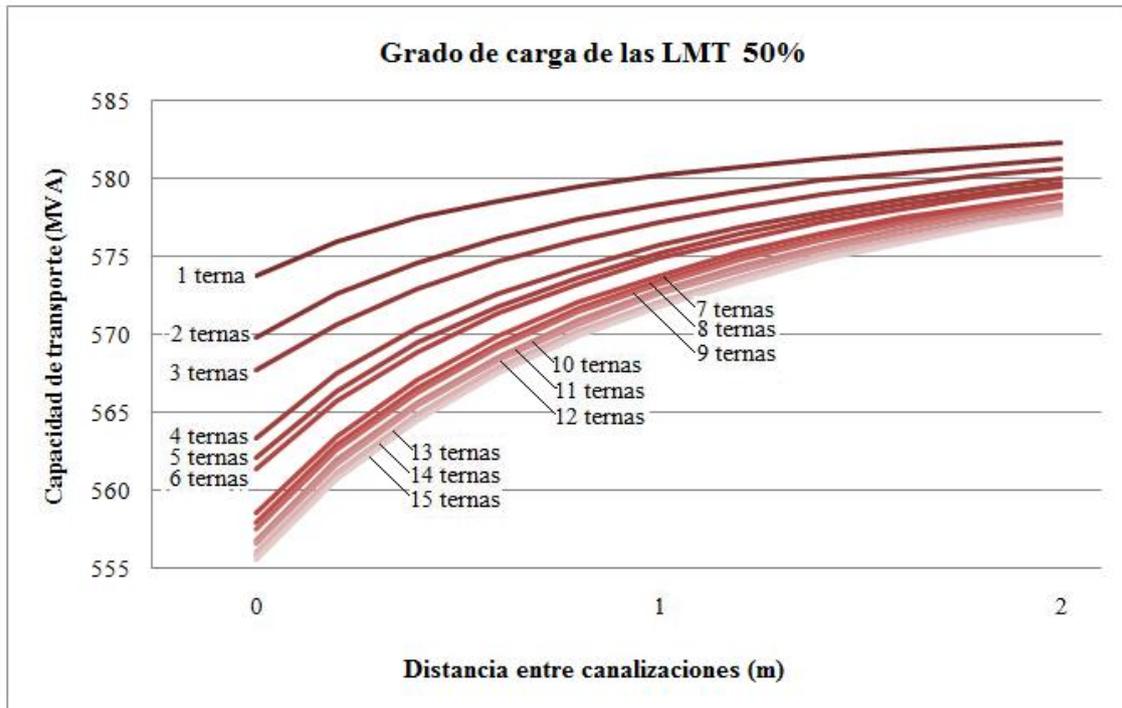


Figura 63: Variación de la capacidad de transporte con grado de carga del 50%.

Y para un grado de carga del 25%:

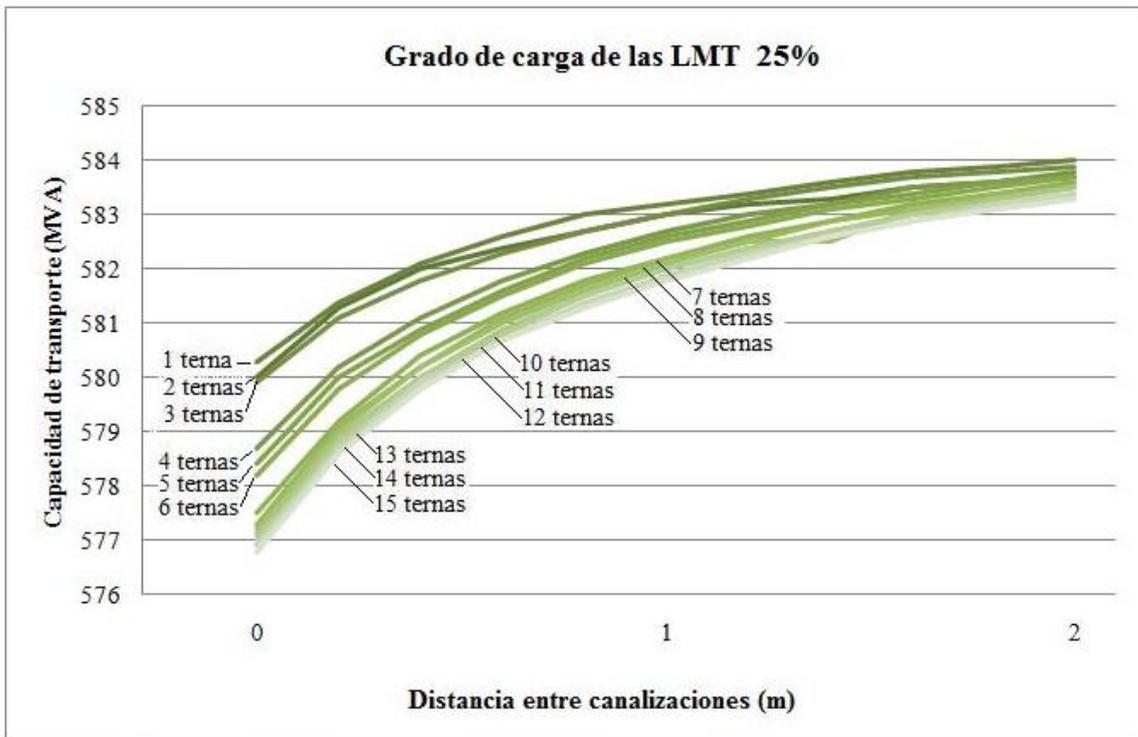


Figura 64: Variación de la capacidad de transporte con grado de carga del 25%.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

5.2.3. Caracterización de la influencia de otras líneas de alta tensión y media tensión en la capacidad de transporte nominal de una línea de alta tensión.

Como resumen de lo estudiado en los apartados 5.2.1 y 5.2.2, a continuación se muestran una serie de tablas y gráficos que reflejan la influencia que tienen otras líneas de alta y media tensión en la capacidad de transporte nominal de una línea de AT.

- Disminución de la capacidad de transporte debida a la influencia de otras líneas de alta tensión:

En la tabla 48 se muestran los valores de la reducción que sufre una LAT en su capacidad de transporte nominal como consecuencia de la influencia de otras LAT, en función del número de ternas de alta tensión pertenecientes a otras canalizaciones y de la distancia a dichas canalizaciones:

	d=0m	d=1m	d=2m	d=3m	d=4m
1 terna	13.7%	6.1%	3.3%	2.0%	1.3%
2 ternas	17.2%	7.9%	4.4%	2.7%	1.9%
3 ternas	18.6%	8.7%	5.0%	3.2%	2.2%
4 ternas	31.1%	14.8%	8.3%	5.2%	3.5%
5 ternas	34.5%	16.4%	9.3%	5.9%	3.8%
6 ternas	36.1%	17.4%	9.9%	6.1%	4.3%

Tabla 48: Reducción de la capacidad de transporte por la influencia de otras LAT.

Si se consideran los siguientes niveles para evaluar la influencia de cada caso:

- Influencia leve: si la capacidad de transporte es mayor del 95% de la capacidad de transporte nominal de la LAT.
- Influencia media: si la capacidad de transporte está entre el 90% y el 95% de la capacidad de transporte nominal de la LAT.
- Influencia alta: si la capacidad de transporte está entre el 80% y el 90% de la capacidad de transporte nominal de la LAT.
- Influencia muy alta: si la capacidad de transporte es menor del 80% de la capacidad de transporte nominal de la LAT.

Los resultados de la tabla 48 se pueden clasificar de la siguiente manera:

	d=0m	d=1m	d=2m	d=3m	d=4m
1 terna	ELEVADA	MEDIA	LEVE	LEVE	LEVE
2 ternas	ELEVADA	MEDIA	LEVE	LEVE	LEVE
3 ternas	ELEVADA	MEDIA	LEVE	LEVE	LEVE
4 ternas	MUY ELEV.	ELEVADA	MEDIA	MEDIA	LEVE
5 ternas	MUY ELEV.	ELEVADA	MEDIA	MEDIA	LEVE
6 ternas	MUY ELEV.	ELEVADA	MEDIA	MEDIA	LEVE

Tabla 49: Influencia de otras líneas de AT en la capacidad de transporte de una LAT.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Hay que tener en cuenta que en las simulaciones realizadas en el apartado 5.2.1, en los casos en los que se tienen 4, 5 y 6 ternas, se pasa de tener la influencia de una sola canalización a tener la influencia de dos canalizaciones, debido a que se considera que hay una canalización con un máximo de 3 ternas de AT a un lado de la línea objeto de estudio, y otra canalización para las restantes líneas, situada al otro lado de la LAT. Por todo esto, se puede observar una clara diferencia en los resultados obtenidos al estudiar la influencia en la capacidad de transporte cuando se tiene una sola canalización (casos con 1, 2 y 3 ternas) y cuando se tienen dos canalizaciones (casos con 4, 5 y 6 ternas).

En vista a los resultados obtenidos, se puede afirmar que la máxima disminución que se puede dar en la capacidad de transporte nominal de una LAT como consecuencia de la influencia de otras líneas de AT, es:

- Del 18.6% si hay influencia de una canalización de AT.
- Del 36.1% si hay influencia de dos canalizaciones de AT.

En la siguiente figura se muestra la disminución relativa de la capacidad de transporte de la LAT, en función del número de ternas de AT ajenas a su instalación:

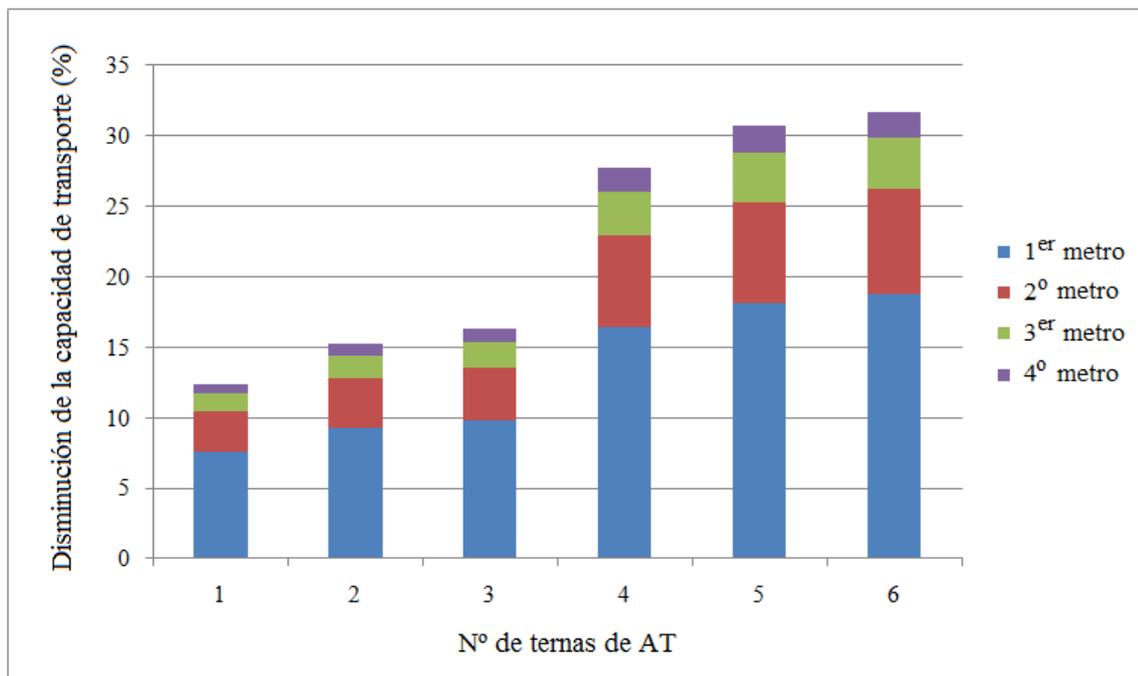


Figura 65: Variación relativa de la capacidad de transporte.

Como se puede observar en la figura 65, la disminución relativa de la capacidad de transporte se da sobretodo en el primer metro de distancia. Cuando se considera una sola canalización (hasta 3 ternas), la reducción de la capacidad de transporte en este tramo está entre el 7.5% y el 10%, mientras que con dos canalizaciones (a partir de 4 ternas) la reducción de la capacidad de transporte varía entre el 15% y el 20% en esta distancia.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

En el segundo metro, la influencia de las otras LAT no es significativa cuando se tiene una sola canalización, ya que la reducción de la capacidad de transporte no llega al 4%, en cambio cuando hay dos canalizaciones la capacidad de transporte disminuye entre un 6.5% y un 7.5%.

En el tercer metro la influencia de las otras canalizaciones deja de ser significativa: es menor del 2% con una canalización y menor del 4% cuando hay dos canalizaciones. En el cuarto metro de distancia, la influencia térmica de las otras canalizaciones es muy reducida: menor del 1% cuando se tiene una canalización, y menor del 2% cuando se tienen dos canalizaciones.

Como se puede ver con los resultados obtenidos, la disminución relativa de la capacidad de transporte nominal de una LAT es el doble cuando se tienen dos canalizaciones de AT que la que se tiene con una sola canalización, para un mismo número de ternas de AT en las respectivas canalizaciones.

Si se considera que la influencia térmica de las otras líneas es significativa si reducen en más de un 5% la capacidad de transporte de la LAT, y que cuando la capacidad de transporte de la LAT alcanza un valor del 99% de su capacidad de transporte nominal no hay influencia térmica de otras canalizaciones, en la figura 66 se muestra la distancia en la que la influencia térmica de las otras canalizaciones deja de ser significativa (d_{95}) y la distancia a partir de la cual no hay influencia térmica de otras líneas (d_{99}):

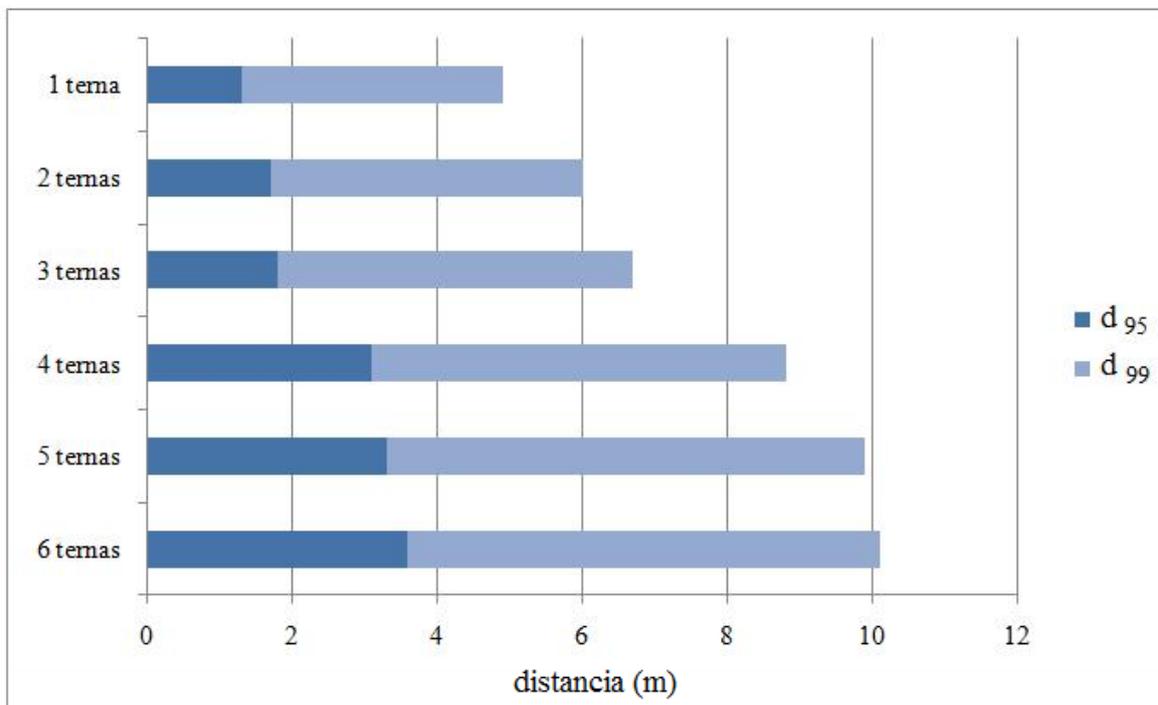


Figura 66: d_{95} y d_{99} para cada número de ternas de AT de otras canalizaciones.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Como se puede observar en la figura 66, la distancia d_{95} con una canalización varía entre 1.3 y 1.8 metros, y con dos canalizaciones entre los 3.1 y 3.6 metros de distancia. En el caso más desfavorable la d_{95} cuando hay dos canalizaciones es el doble que la d_{95} que se tiene con una canalización. Por otra parte, los valores de la distancia d_{99} cuando hay una canalización están entre los 4.9 y 6.7 metros, y entre los 8.8 y 10.1 metros cuando hay dos canalizaciones. Por lo tanto se puede afirmar que la máxima distancia en la que una LAT puede sufrir la influencia térmica de otras líneas de alta tensión, en el caso más desfavorable, es de 10.1 metros.

- Disminución de la capacidad de transporte debida a la influencia de otras líneas de media tensión:

Los valores de la máxima reducción que puede sufrir una LAT como consecuencia de la influencia térmica de una canalización de MT, esto es, cuando la distancia entre la LAT y la canalización de MT es mínima, obtenidos en función del número de ternas de MT y del grado de carga de dichas ternas, se muestran en la siguiente tabla:

	Grado de carga 100%	Grado de carga 50%	Grado de carga 25%
1 terna	4.5%	1.8%	0.65%
2 ternas	7.7%	2.4%	0.70%
3 ternas	9.4%	2.8%	0.72%
4 ternas	12.7%	3.5%	0.92%
5 ternas	13.8%	3.8%	0.98%
6 ternas	14.4%	3.9%	1.01%
7 ternas	16.7%	4.4%	1.13%
8 ternas	17.3%	4.5%	1.16%
9 ternas	17.6%	4.6%	1.18%
10 ternas	18.2%	4.7%	1.20%
11 ternas	18.7%	4.7%	1.22%
12 ternas	19.1%	4.8%	1.23%
13 ternas	19.2%	4.8%	1.23%
14 ternas	19.3%	4.9%	1.25%
15 ternas	19.4%	4.9%	1.25%

Tabla 50: Reducción de la capacidad de transporte por la influencia de otras LMT.

En la figura 67 pueden observarse estos mismos resultados de una forma más gráfica:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

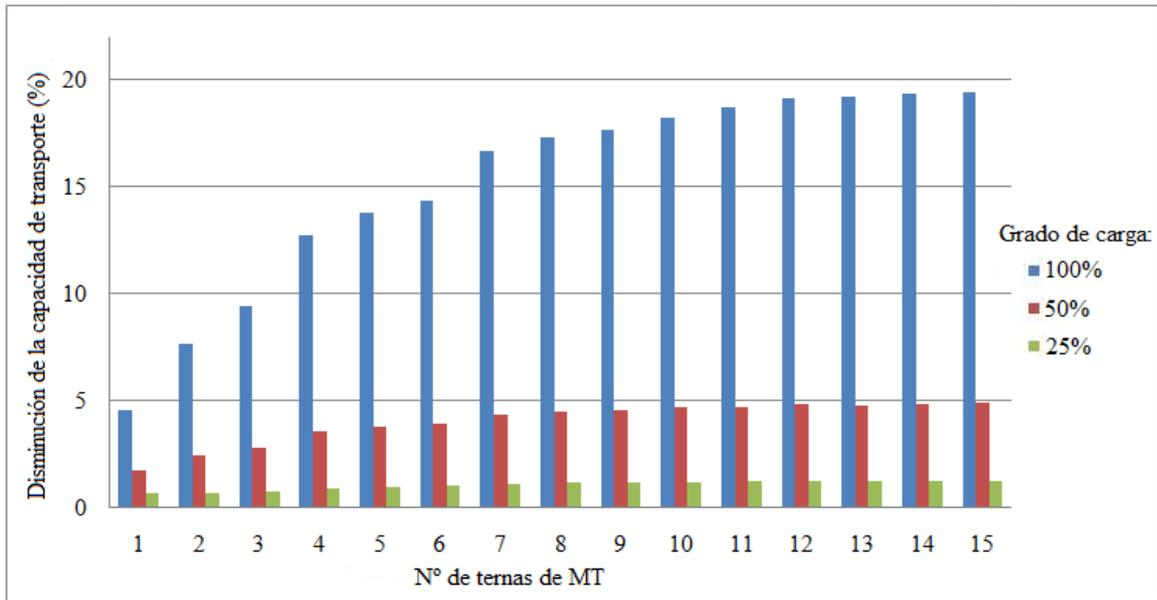


Figura 67: Disminución de la capacidad de transporte debido a la influencia de otras LMT.

Como puede observarse en las gráficas, cuando las líneas de MT están a un nivel de carga del 25%, afectan de manera muy leve a la capacidad de transporte de la LAT (la capacidad de transporte disminuye en torno al 1%), independientemente del número de ternas de MT.

Cuando el nivel de carga de las líneas de MT es del 50%, la disminución de la capacidad de transporte de la LAT depende del número de ternas de MT sobretodo de 1 a 6 ternas. A partir de las 6 ternas se puede observar que el número de ternas apenas influye, las disminución de la capacidad de transporte varía del 4.4% al 4.9%. Considerando los criterios utilizados en el proyecto, se puede afirmar que si las ternas de MT funcionan con un grado de carga del 50% no afectan significativamente a la capacidad de transporte de la LAT.

Finalmente, cuando las líneas de MT funcionan a plena carga, la influencia en la capacidad de transporte de la LAT es mucho mayor, y aumenta significativamente con el número de ternas de MT. A partir de las 9 ternas, la reducción de la capacidad de transporte depende en menor medida del número de ternas de MT. La disminución de la capacidad de transporte de la LAT varía de 4.5% hasta 19.4%, por lo que se puede considerar significativa la influencia de la canalización de MT cuando las líneas trabajan con un grado de carga del 100%, a excepción del caso en el que la canalización de MT se compone por una sola terna.

Para los casos en los que las LMT trabajan con un grado de carga del 100% y tienen una influencia térmica significativa sobre la capacidad de transporte de la LAT, la distancia d_{95} a partir de la cual su influencia deja de ser significativa en cada caso, se muestra en la figura 68:



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

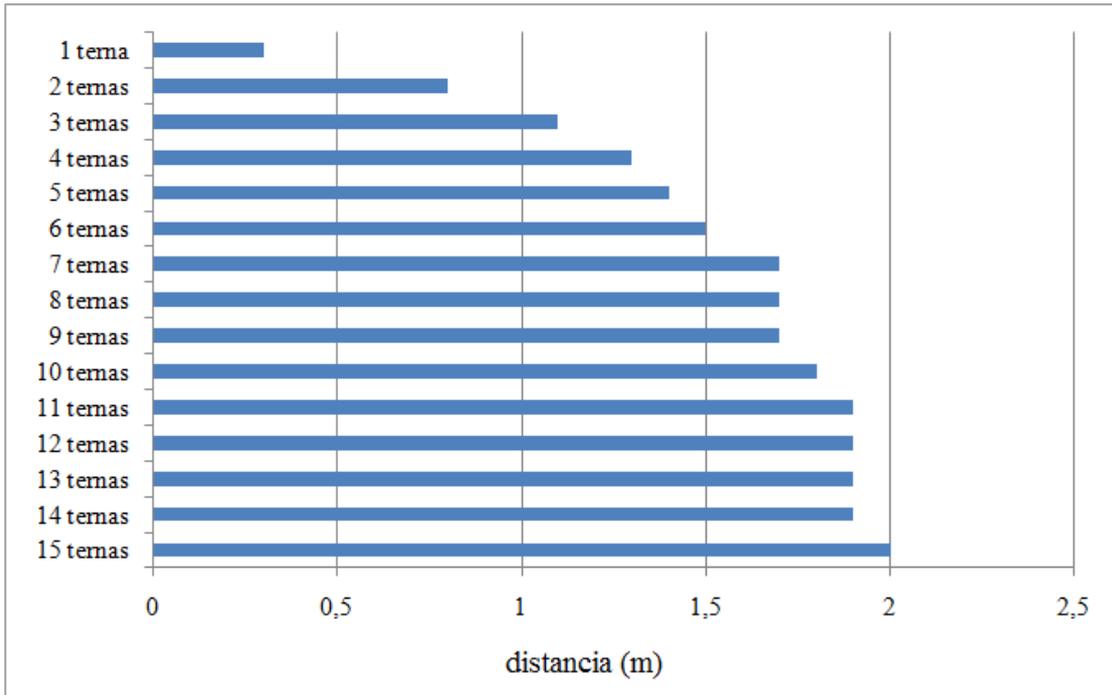


Figura 68: d_{95} para cada número de temas de MT de otras canalizaciones cargadas al 100%.

Viendo la figura 68 se puede afirmar que a partir de una distancia de 2 metros una LAT no sufre influencia térmica significativa de una canalización de MT, considerando el caso más desfavorable en el que todas las líneas trabajan al 100% y la distancia entre las mismas es mínima, independientemente del número de temas de la instalación.

Con todo esto, en el caso más desfavorable la máxima reducción que puede sufrir una LAT en su capacidad de transporte, como consecuencia de la influencia de una canalización de MT, es:

- Del 1.25% si las LMT trabajan al 25% de su capacidad.
- Del 4.9% si las LMT trabajan al 50% de su capacidad de trabajo.
- Y del 19.4% si las LMT trabajan a plena carga.



**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE
SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN**

5.3. Caso real: estudio de la capacidad de transporte de las líneas eléctricas subterráneas de la red de 220kV de Madrid.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL NO DISPONIBLE



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

6. Conclusiones.

Durante el desarrollo del presente proyecto se han llevado a cabo las siguientes actuaciones:

- Se ha descrito la metodología utilizada en el proyecto para calcular la capacidad de transporte de las instalaciones eléctricas subterráneas de alta tensión, observando las mejoras que presenta con respecto a la metodología empleada habitualmente (basada en las Normas UNE). Las ventajas que presenta la metodología son las siguientes:
 - Se basa en modelos continuos de conducción que consideran la distribución real de temperaturas en toda la instalación, obteniendo la distribución total de temperaturas por superposición de las distribuciones parciales de todas las fases de cada una de las líneas que componen la instalación. Con todo esto, la metodología utilizada en el presente proyecto permite obtener un modelado más real de la interacción térmica que existe entre las diferentes fases de las líneas que componen la instalación, a diferencia de la metodología de las Normas UNE, que no considera el acoplamiento térmico y utiliza simplificaciones tales como considerar isotermas y sin generación interna de calor las diferentes capas que se modelan. Además la metodología del proyecto localiza los puntos calientes y considera las pérdidas de cada capa como elementos con generación interna de calor.
 - Las Normas UNE evalúan las pérdidas en las pantallas a partir de un determinado coeficiente multiplicado por las pérdidas del conductor correspondiente, y no tienen en cuenta la influencia que tienen en una determinada pantalla las corrientes que circulan por el resto de conductores. La metodología empleada en este proyecto emplea modelos eléctricos reales que evalúan la relación existente entre las corrientes de cada uno de los conductores de la instalación y las corrientes que se inducen en las pantallas. Además esta metodología tiene en cuenta la influencia que tiene el tipo de puesta a tierra de las pantallas en las corrientes que se inducen en las mismas.

En consecuencia, el empleo de modelos continuos de conducción supone un cálculo más exacto de la capacidad de transporte nominal de las líneas eléctricas subterráneas.

- Con la ayuda de una herramienta informática, se ha realizado un estudio completo de la capacidad de transporte de una línea eléctrica subterránea genérica de alta tensión, definiendo todos los aspectos que intervienen en la misma y obteniendo los parámetros eléctricos que definen a la línea, la representación gráfica de las tensiones inducidas en las pantallas a lo largo de toda la línea y el perfil térmico del punto más caliente de la instalación.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Se ha estudiado la influencia que tienen otras instalaciones eléctricas en la capacidad de transporte nominal de una línea eléctrica subterránea de alta tensión, caracterizando la variación de la capacidad de transporte en función del tipo de instalación (de alta o de media tensión), del número de ternas que componen dicha instalación, del grado de carga de esas ternas y de la distancia existente entre la línea eléctrica y la otra instalación. Para ello se ha obtenido en cada caso, la reducción de la capacidad de transporte y las distancias a partir de las cuales la influencia de las otras líneas deja de ser significativa o en las que se puede considerar que la línea no sufre influencia térmica. Con los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes afirmaciones:
 - La máxima reducción que puede sufrir una línea subterránea de alta tensión, como consecuencia de la influencia térmica de una canalización de alta tensión compuesta por tres ternas, es del 18.6% con respecto su capacidad de transporte nominal en el caso más desfavorable, esto es, cuando todas las líneas funcionan con un grado de carga del 100% y la distancia entre canalizaciones es nula. Si se considera la influencia de dos canalizaciones (una a cada lado de la línea objeto de estudio), con las mismas condiciones que las indicadas para una sola canalización, la capacidad de transporte de la línea se puede reducir hasta un 36.1%.
 - Si se tiene en cuenta la influencia térmica de una canalización de media tensión compuesta por quince ternas, la reducción de la capacidad de transporte para la línea de alta tensión cuando la distancia entre canalizaciones es nula, en función del grado de carga de las líneas de media tensión es:
 - Del 1.25% con respecto su capacidad de transporte nominal si el grado de carga de las líneas de media tensión es del 25%.
 - Del 4.9% de su capacidad de transporte nominal si el grado de carga de las líneas de media tensión es del 50%.
 - Y del 19.4% de su capacidad de transporte nominal si las líneas de media tensión trabajan a plena carga.
 - Si se considera que la influencia térmica de las otras líneas es significativa si reducen en más de un 5% la capacidad de transporte nominal de la línea de alta tensión, la distancia a partir de la cual la influencia térmica de las otras canalizaciones deja de ser significativa es:
 - 1.8 metros si se considera el caso más desfavorable, cuando se tiene una canalización de alta tensión.
 - 3.6 metros si se tienen dos canalizaciones de alta tensión, para el caso más desfavorable.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

- Cuando se tiene una canalización de media tensión se puede afirmar que a partir de una distancia de 2 metros la línea de alta tensión no sufre influencia térmica significativa, considerando el caso más desfavorable: cuando la distancia entre canalizaciones es nula y todas las líneas trabajan a plena carga.
- Se ha llevado a cabo el estudio de la capacidad de transporte de las líneas subterráneas que componen la red de 220kV de Madrid perteneciente a Unión Fenosa Distribución. Para ello se ha simulado la situación real de las líneas en sus puntos críticos, considerando la influencia térmica de otras canalizaciones y analizando la evolución de la capacidad de transporte en función de la distancia existente entre canalizaciones.

Como resultado de este estudio se puede afirmar que todas las líneas de la red subterránea de 220kV sufren una influencia térmica significativa de otras canalizaciones en algún punto de su trazado si se considera la situación más desfavorable, es decir, cuando todas las líneas implicadas funcionan con un grado de carga del 100% y la distancia entre las mismas es mínima. Los datos más destacados son los siguientes:

- Las líneas compuestas por cable con aislamiento en papel impregnado (cable OF) sufren una reducción de su capacidad de transporte entre el 6.7% y el 12.3% con respecto su valor nominal si se considera el caso más desfavorable.
- Las líneas de cable con aislamiento seco en su gran mayoría sufren una reducción que supera el 15% de su capacidad de transporte nominal si se considera el caso más desfavorable, existiendo casos en los que la reducción de la capacidad de transporte de las líneas es mayor del 28%.
- Se han comparado los resultados obtenidos en el proyecto con los datos con los que las líneas están siendo explotadas actualmente y con los valores que se obtienen si se aplica la metodología empleada habitualmente para el cálculo de líneas subterráneas de alta tensión, observando que tradicionalmente se emplea una definición de la capacidad de transporte del caso más desfavorable, lo que supone despreciar el efecto de las características del tendido y de la puesta a tierra en cada instalación concreta. En muchos casos esto supone una infrautilización de las líneas, y en otros llevarlas inadvertidamente a la sobrecarga, con el consiguiente envejecimiento y merma de la vida útil de la instalación. Las conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos son las siguientes:
 - Al simular la situación real de las líneas, considerando el caso más desfavorable, se obtiene un valor de la capacidad de transporte menor que el valor con el que se están explotando las líneas de cable OF actualmente. Sin embargo, en el caso



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

de las líneas compuestas por cable con aislamiento seco, los valores obtenidos al considerar la influencia térmica de otras líneas son mayores que los utilizados actualmente por Unión Fenosa Distribución.

- Si se comparan los valores de la capacidad de transporte nominal de las líneas obtenidos en el proyecto con los que se obtienen utilizando la metodología basada en la Norma UNE, en el caso de las líneas de cable OF la diferencia entre ambos valores supera el 10%, siendo la metodología utilizada en el proyecto más conservadora que la metodología basada en la Norma UNE. Para el caso de líneas con cable con aislamiento seco, la diferencia entre ambos valores es muy reducida.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

7. Desarrollos futuros.

A partir de las conclusiones obtenidas en el presente proyecto, se proponen los siguientes desarrollos futuros:

- El estudio de la capacidad real de transporte que se ha realizado para las líneas subterráneas de 220kV se puede extender a las líneas subterráneas de 132, 66 y 45 kV de Madrid y otras regiones de España. Con todo esto, se podría obtener un esquema general con los valores máximo y mínimo de la capacidad de transporte de cada línea, que permitiría optimizar la explotación de las mismas y evitar sobrecargas en los puntos críticos de sus instalaciones que pueden reducir la vida útil de los cables.
- Como se ha visto en el proyecto, la herramienta informática utilizada en el mismo permite obtener la tensión inducida en las pantallas en cada punto de la línea. Se podría realizar un estudio de los aspectos y parámetros que intervienen en las tensiones de pantalla de los sistemas de cables aislados de potencia y del aislamiento necesario en cada caso.
- Conociendo la capacidad de transporte de las líneas eléctricas, sería interesante realizar un estudio sobre la influencia que pueden tener las sobrecargas en la temperatura de los cables y en consecuencia en la vida útil de los mismos, valorando, en función del histórico de carga del cable y las instalaciones adyacentes, que capacidad adicional dispone para asumir sobrecargas (en términos de duración-intensidad) y en su defecto que reducción de su vida útil se puede acarrear.
- De cara a completar el comportamiento en explotación de las líneas subterráneas también se podría extender el estudio de las líneas subterráneas de alta tensión a su comportamiento ante cortocircuitos, valorando en qué medida la magnitud y duración de los cortocircuitos pueden suponer una merma de su vida útil.



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SISTEMAS DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

8. Bibliografía.

- [1] Llorente Antón, Manuel. *Manual de cables eléctricos aislados*. Madrid: Profepro, 2002.
- [2] UNIVERSIDAD CORPORATIVA DE UNIÓN FENOSA. *Curso Reglamento de Líneas de Alta Tensión*. Facultad de Redes, 2008.
- [3] Norma española UNE 21144-1-1, UNE 21144-1-2, UNE 21144-2-1, UNE 21144-2-2 y UNE 21144-3-1. *Cables eléctricos. Cálculo de la intensidad admisible*. AENOR, 1997.
- [4] F.M. Echavarren Cerezo y L. Rouco Rodríguez. *Cálculo de la capacidad de transporte de líneas subterráneas*. Instituto de Investigación Tecnológica de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia de Comillas. Proyecto de colaboración con Unión Fenosa. Madrid, 2008.
- [6] *PROYECTO TIPO LÍNEAS SUBTERRÁNEAS 45, 66, 132 Y 220kV*. UNIÓN ELÉCTRICA FENOSA S.A., 1999.
- [7] *GUÍA DISEÑO LÍNEAS SUBTERRÁNEAS 45, 66, 132 Y 220kV*. UNIÓN ELÉCTRICA FENOSA S.A., 1999.
- [8] Fraile Mora, Jesús. *Manual Líneas e instalaciones eléctricas*. Febrero 2004.
- [9] *FICHAS TÉCNICAS DE CABLES 26/45 KV y 127/220 KV PARA LÍNEAS SUBTERRÁNEAS*. UNIÓN FENOSA distribución, 2008.
- [10] *ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES*. UNIÓN FENOSA distribución, 2008.