

# Programa de Doctorado: Ingeniería de Sistemas y Automática



## Modelado y simulación de tensiones inducidas en cables aislados de alta tensión

Autor: Miguel Ángel Calafat Torrens

Directora: Matilde Santos Peñas

UNED – Dpto. Informática y Automática

ETSI de Informática

Curso 2011-12

## Contenido

1. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Estructura.....	7
2. ESTADO DEL ARTE. ....	9
2.1. Cables aislados. ....	9
2.1.1. Reseña histórica.....	9
2.1.2. Composición. ....	10
2.2. Inducción magnética en conductores.....	19
2.2.1. Tipo de conexión de pantallas.....	19
2.2.2. Cálculo de las tensiones inducidas. ....	31
2.2.3. Análisis de cortocircuitos.....	36
2.3. Simuladores de circuitos electrónicos basados en SPICE. ....	51
3. MODELADO DE LAS TENSIONES INDUCIDAS EN CABLES AISLADOS. ....	53
3.1. El conductor. ....	53
3.2. Las tensiones inducidas. ....	55
3.3. Las pantallas.....	57
3.4. La capacidad parásita del aislamiento.....	59
3.5. El cable en circuitos simples y múltiples.....	61
3.6. La conexión de las pantallas a tierra.....	65
3.7. Carga, alimentación y cortocircuitos. ....	68
4. SOFTWARE DESARROLLADO PARA LA SIMULACIÓN DE TENSIONES.....	73
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
5.1. Caso básico.....	81
5.2. Caso complejo.....	83

6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS. ....	85
6.1.	Conclusiones .....	85
6.2.	Trabajos futuros.....	85
7.	BIBLIOGRAFÍA. ....	89



## 1. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO

### 1.1. Introducción.

En los últimos años se está produciendo una mejora en la tecnología de fabricación e instalación de los cables subterráneos aislados de alta tensión. Por otra parte, cada vez son mayores las dificultades que se encuentran para la construcción de líneas aéreas de alta tensión. Varios son los factores que pueden influir en esto, tales como su mayor impacto visual, la fuerte oposición social, la dificultad de llevar a cabo las pertinentes expropiaciones de terreno con las restricciones de tiempo y coste que imponga el proyecto, etc.

De esta manera, es cada vez más habitual que se construyan líneas subterráneas de alta tensión con cable aislado y apantallado. Esto no ocurre solamente en entornos urbanos o periurbanos, donde las evidentes restricciones de espacio hacen que la tecnología aérea sea imposible, sino que también ocurre cada vez más en zonas rurales donde la sociedad reclama como punto más importante que no se produzcan los impactos visuales de las líneas aéreas.

Aquellas personas no entendidas en el tema podrían pensar que la solución subterránea sólo presenta ventajas, pero no es así. Si bien es claro que el impacto es nulo sobre la avifauna y desde el punto de vista visual – una vez construida la línea subterránea –, el coste de una línea subterránea puede ser notablemente mayor<sup>1</sup> para una misma longitud y capacidad de transporte, y además también puede presentar algunos problemas ambientales por obstrucción de escorrentías y por afección a animales del hábitat subterráneo.

Además, desde un punto de vista técnico, el ingeniero puede ahorrarse todos los cálculos mecánicos que se producen en una línea aérea debido al tense de los conductores y al correcto dimensionado de apoyos y cimentaciones. Sin embargo, los cálculos eléctricos en las líneas subterráneas presentan una serie de características propias que los hacen muy diferentes de aquellos realizados para las líneas aéreas.

---

<sup>1</sup> Podría ser de hasta 20 veces mayor

Los cables aislados presentan una pantalla envolvente de material conductor que aísla completamente el campo eléctrico, pero que al ser cortado por el campo magnético que generan las corrientes alternas, induce tensiones y/o corrientes en las citadas pantallas. Estas tensiones y corrientes deberán ser cuidadosamente calculadas, dado que influyen tanto en la capacidad de transporte de la línea como en el diseño de las protecciones a instalar. Además, dependiendo del tipo de conexión de las pantallas a tierra, se producirán corrientes que a su vez también inducirán tensiones en las pantallas próximas.

En el caso de que dos o más líneas discurren paralelas y cercanas la una a la otra, los campos magnéticos debidos a las corrientes de una afectarán a las tensiones inducidas en las pantallas de la otra y viceversa.

El objetivo de este proyecto es modelar matemáticamente y simular las tensiones inducidas en las pantallas de cables aislados para cualquier tipo de caso y configuración, con el objetivo de poder visualizar tanto magnitudes como ángulos de desfase entre ellas. Además, se pretende también poder desglosar las diferentes componentes de estas tensiones y poder visualizar, en tiempo de diseño, en qué medida afectan los diferentes parámetros (sección de los cables, resistencias de puesta a tierra, configuración de la conexión, longitudes de los tramos, etc.) a las citadas tensiones.

Dado que en líneas paralelas cercanas las corrientes de una línea inducen tensiones y/o corrientes en la otra, el modelo a generar deberá ser dinámico; es decir, el modelo para dos líneas paralelas no sale únicamente de replicar dos veces el modelo de una línea, ya que una línea se comporta diferente si tiene otra al lado, o si tiene dos, o tres, etc. Así pues, en el software desarrollado para este trabajo, este hecho deberá ser transparente para el usuario, que no deberá hacer mayor esfuerzo para ello que indicar que la simulación es de doble circuito, triple circuito, etc.

Para conseguir este objetivo se generará un modelo eléctrico que emule el funcionamiento de los diferentes casos a partir de los datos de la línea introducidos por el usuario. Automáticamente se generará un archivo de texto plano. Este texto

será la descripción completa de un circuito electrónico en términos de resistencias, inductancias, condensadores, fuentes de corriente, etc. Esta descripción que se generará automáticamente describirá completamente el modelo a simular y estará realizada en lenguaje SPICE, que es un estándar internacional para la descripción de hardware. Evidentemente, el texto ya incluirá el acoplamiento entre los  $n$  circuitos a simular.

Una vez realizada esta tarea, dado que existen simuladores SPICE libres y gratuitos, se simulará el circuito y de esta forma se tendrá acceso a todos los datos buscados.

Para ello en este proyecto se ha utilizado el software gratuito LT Spice IV.<sup>2</sup> El texto íntegro está basado en líneas de transporte de energía eléctrica de tensiones mayores o iguales a 66 kV.

Este método dinámico de modelado tiene una gran utilidad en cuanto a que permite desarrollar modelos que de otro modo serían largos y complicados, minimizando la posibilidad de errores e incrementando enormemente la velocidad de desarrollo.

## 1.2. Estructura.

Esta memoria está estructurada de la siguiente forma. A lo largo del capítulo 2 se hará un breve repaso de aquellos conceptos generales de interés para el caso que nos ocupa. Veremos, en 2.1 conceptos generales sobre los cables aislados, haciendo especial referencia a aquellos que forman parte fundamental del modelado que subyace en el presente trabajo.

En el capítulo 2.2 se describen los tipos habituales de conexión a tierra de las pantallas de los cables. Se presenta también el cálculo teórico de las tensiones inducidas y los diferentes tipos de cortocircuito que deben ser analizados.

---

<sup>2</sup> <http://www.linear.com/designtools/software/>

En el capítulo 2.3 se realizará una breve introducción a los simuladores basados en SPICE, mientras que en el capítulo 3 se desarrollará con detalle el modelo que se implementa, en lenguaje SPICE, en este trabajo.

En el capítulo 4 se describe el funcionamiento del software desarrollado desde el punto de vista del usuario final y en el capítulo 5 se analizan resultados de simulaciones.

Para acabar, en el capítulo 6 se tratan las conclusiones y líneas de trabajo futuras en las que podría desembocar este proyecto.



## 2. ESTADO DEL ARTE.

### 2.1. Cables aislados.

En la actualidad es cada vez más frecuente enfrentarse a problemas importantes a la hora de construir líneas eléctricas de alta tensión. La oposición social a las líneas aéreas y una mayor conciencia ambiental por parte de toda la población han hecho que, cada vez más, las líneas subterráneas aparezcan como una opción socialmente aceptable.

El continuo desarrollo de las tecnologías de fabricación ha hecho el resto, situando a las líneas con cable aislado como una opción técnicamente viable.

#### 2.1.1. Reseña histórica.

Los cables aislados de alta tensión han ido evolucionando a lo largo de los años. Fue por 1850 cuando empezaron a fabricarse los primeros aislamientos eléctricos con goma vulcanizada sobre cobre, pero no fue hasta treinta años después cuando empezaron a realizarse los primeros soterramientos de líneas.

Unos años más tarde aparece el primer cable de alta tensión aislado con papel de celulosa impregnado en aceite mineral. Fue el primer tipo de aislamiento que podía aislar de forma eficaz tensiones tan elevadas. Se trataba de un tipo de aislamiento con mejores propiedades aislantes que la goma vulcanizada, pero con muy susceptible a fallos por humedad.

Este inconveniente se solucionó en 1879 gracias a la prensa de plomo. Se pasó a fabricar una cubierta de plomo alrededor del papel como barrera efectiva contra la humedad. Sin embargo, la presencia del plomo desaconseja su uso en aquellas instalaciones que puedan variar de trazado, debido a su peso y mala manejabilidad.

Sobre el año 1900 ya se fabricaban cables flexibles de grandes longitudes y en 1914 llegó el primer cable tripolar.

Fue en 1920 cuando apareció el primer cable aislado con papel impregnado y aceite fluido por el interior (cables OF – *oil filled*). Este tipo de tecnología requiere un circuito hidráulico presurizado, la vigilancia de las presiones y conlleva cierta dificultad en el tendido y en la confección de accesorios.

Los tecnología de cables OF se realizó en 1960 el primer cable a 66 kV, en 1936 se construyó el primer enlace a 225 kV, y en 1952 se llegó a 400 kV.

Sin embargo, a pesar de sus buenas capacidades aislantes, la tecnología imperante en nuestros días no es la de papel impregnado, sino lo que se conoce como aislamiento seco (aislamiento con plásticos)

Alrededor del año 1950 empezó a utilizarse el aislamiento de PE (polietileno) y de PVC (policloruro de vinilo) aunque se comprobó que su capacidad de aislamiento y resistencia al envejecimiento eran notablemente peores que la de los cables OF, por eso se usó sólo en bajas tensiones.

Ya en 1970, con el proceso químico de reticulación llegó a la media tensión el aislamiento EPR (etileno propileno) y a la alta tensión el XLPE (polietileno reticulado).

En 1978 se instaló el primer cable con aislamiento XLPE de 245 kV. En 1996 se alcanzaron los 400 kV, y en el año 1999 se logró superar esa barrera llegando hasta los 525 kV.

Hacia finales del siglo XX los aislamientos de papel impregnado han ido evolucionando presentando nuevos tipos de papeles. Se trata de sucesivas capas laminadas de papel + polipropileno + papel. Este tipo de aislamiento recibe el nombre de PPLP (papel laminado de polipropileno).

### 2.1.2. Composición.

Los cables eléctricos se pueden clasificar según varios criterios tales como la tensión de servicio, su utilización, el número de fases y el tipo de aislamiento.

En este texto se hará especial referencia a cables unipolares con aislamientos de XLPE para tensiones mayores o iguales a 66 kV y para uso subterráneo (en contraposición al uso submarino)

La composición general de estos cables puede verse en la Figura 1.

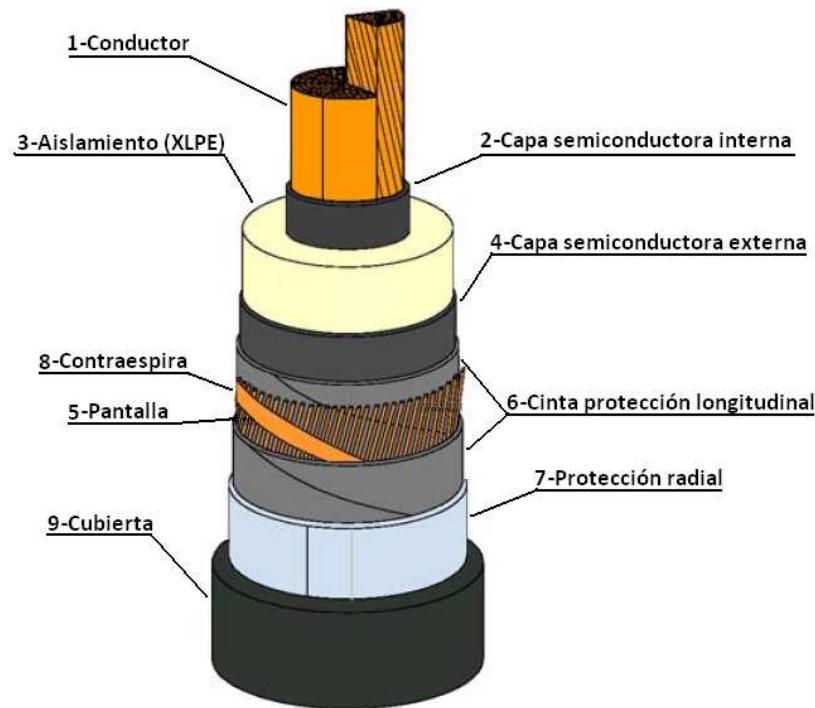


Figura 1 – Componentes de un cable eléctrico aislado de alta tensión.

A lo largo de este texto sólo se explicarán aquellos apartados que tengan especial interés en el modelo implementado, dejando el resto de componentes simplemente comentados de forma anecdótica en la figura anterior.

#### Conductor:

El conductor es la parte central de los cables aislados. Puede ser de cobre o de aluminio. Aparte de la evidente función eléctrica de transportar la corriente, también una función mecánica consistente en soportar los esfuerzos longitudinales del tendido del cable.

Las características básicas que debe reunir un conductor es tener una buena conductividad y una superficie exterior regular. Por ello los materiales utilizados son el cobre templado de alta conductividad y el aluminio de pureza superior al 99.5%.

Tres fenómenos eléctricos son especialmente notables en el comportamiento del conductor: las pérdidas óhmicas, el efecto piel y el efecto proximidad.

Las pérdidas óhmicas son las pérdidas de energía transportada por los cables debido a la resistencia óhmica del conductor. Son proporcionales a esta resistencia y al cuadrado de la intensidad que circula por ellos.

El efecto piel (también llamado efecto *skin*) o efecto pelicular tiende a concentrar el paso de la corriente eléctrica por la periferia de los conductores, aumentando este fenómeno con la sección del conductor utilizado y con la frecuencia. En la Figura 2 se aclara gráficamente este concepto.

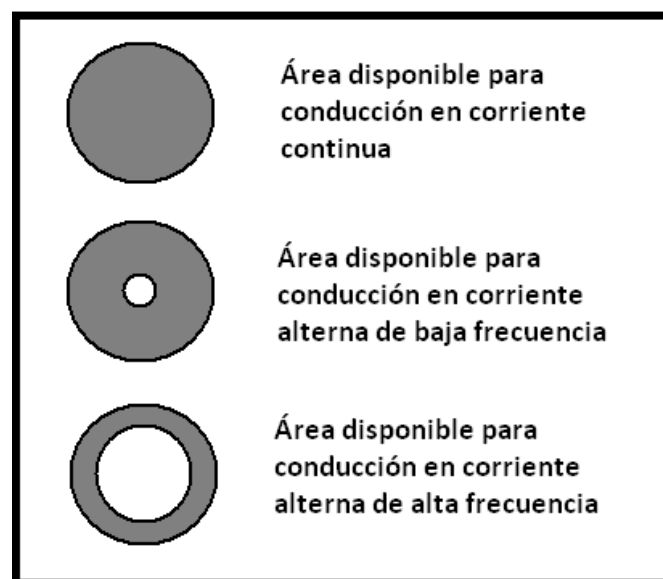


Figura 2 – Efecto piel o pelicular.

El efecto piel se corresponde con una modificación del reparto del flujo de corriente en un conductor debido al efecto del campo magnético interno.

El efecto proximidad se produce cuando la distancia que separa las fases de un mismo enlace es pequeña. Corresponde a la deformación del reparto de corriente en el

conductor originada por las corrientes inducidas por el campo magnético de los diferentes alambres de los conductores y por los propios conductores.

Cuando la distancia que hay entre las fases es pequeña con relación al diámetro de los conductores, la corriente eléctrica tiende a concentrarse en las caras próximas a los conductores, ya que la corriente circula preferentemente por las fibras de menor inductancia, y son las fibras de las caras enfrentadas las que tienen una menor inductancia respecto a las fibras alejadas (la inductancia de un circuito aumenta con la superficie ocupada por el circuito). En la Figura 3 se muestra gráficamente este concepto.

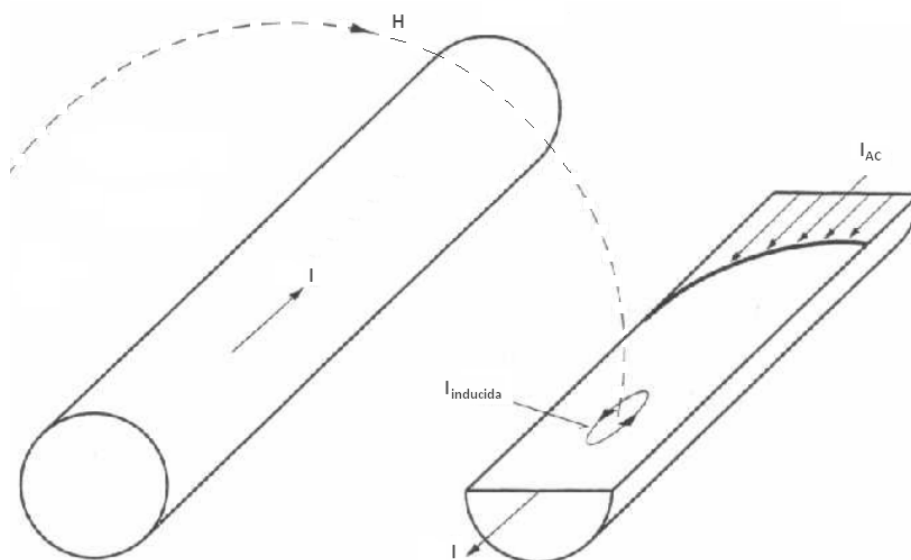


Figura 3 – Efecto proximidad.

En la práctica, el efecto de proximidad es menor que el efecto pelicular, y disminuye rápidamente cuando se separan los cables entre sí. Cuando el espacio entre dos fases de un mismo circuito o de dos circuitos cercanos es al menos igual a 8 veces el diámetro exterior del conductor del cable, el efecto de proximidad puede considerarse despreciable.

Cabe destacar que la capacidad de transporte de un cable está limitada por la máxima temperatura a la que va a trabajar el conductor del cable (unos 80 – 90°C). La intensidad máxima admisible para un cable, depende de la manera cómo éste disipa el calor generado durante su funcionamiento en régimen permanente y de las

condiciones de contorno. Entre estas condiciones, en este trabajo se resalta especialmente la influencia de otros circuitos próximos, la disposición de los cables y el tipo de conexión de las pantallas a tierra (que determina si habrá o no corrientes por ellas)

#### Aislamiento:

Los cables aislados de alta tensión pueden tener dos tipos de aislamientos según sean encintados o extruidos.

Los aislamientos encintados están formados por capas de papel fabricado a base de fibras de celulosa, impregnadas por un aceite normalmente sintético del tipo alkylbenceno (DDB, DoDecil-Benceno) y pueden utilizarse en dos tipos de diseño: aceite fluido (OF – *oil filled*) o de impregnación en masa (*Mass Impregnated*). En los primeros el aceite circula por el interior del conductor empapando a su vez el papel que forma el aislamiento. Véase en la Figura 4 como el centro del cable está hueco para la conducción del aceite. En los segundos el aceite está confinado en las capas de papel aislante.



Figura 4 – Cable *oil filled*.

Una variante de más moderna del papel es el llamado PPLP (papel laminado de polipropileno) que utiliza capas sucesivas de papel+polipropileno+papel. Estos papeles tienen la gran ventaja de reunir en ellos la tecnología experimentada de la fabricación e instalación de los cables tradicionales de papel impregnado con las excelentes propiedades eléctricas y dieléctricas de los aislamientos sintéticos. Su precio, aún elevado, restringe su utilización sólo a líneas de muy alta tensión.

Sea cual sea el tipo de aislamiento su función, como su propio nombre indica, es aislar el conductor (sometido a alta tensión) de la pantalla metálica (puesta a potencial de tierra). El aislamiento debe resistir el campo eléctrico tanto en régimen nominal como en régimen transitorio (sobretensiones transitorias).

La principal característica del aislamiento de un cable es el valor de su rigidez eléctrica, medido en kV/cm. El campo eléctrico máximo al que esté sometido el aislamiento debe ser menor que su rigidez eléctrica para poder soportar la tensión de servicio.

Debido al aislamiento se producen unas pérdidas de energía transportada por los cables. Son las llamadas pérdidas dieléctricas, que dependen fundamentalmente de las dimensiones del conductor, del tipo de aislamiento y del cuadrado de la tensión. El valor de estas pérdidas dieléctricas es mucho menor para aislamiento XLPE que para aislamientos de papel.

En este punto cabe destacar, aunque no se trate de una característica propia del aislamiento como tal, que el hecho de tener dos materiales conductores (el conductor y la pantalla) separados por un material dieléctrico (el aislamiento) constituye un condensador eléctrico y deberá ser modelado como tal en caso de que quiera considerarse este efecto. En la práctica, los propios fabricantes ofrecen este dato en sus hojas de características.

### Pantalla:

La pantalla es el elemento metálico que se encuentra entre el aislamiento (a través de la capa semiconductor externa) y la cubierta exterior en los cables subterráneos. Suele estar rodeada de otros elementos que sirven para la protección de entrada de agua al aislamiento.

Las funciones principales de la pantalla metálica en los cables aislados son las siguientes:

- Anular el campo eléctrico en el exterior del cable, con lo cual el campo eléctrico sobre el aislamiento es radial. Como ya se ha dicho anteriormente, los cables aislados tienen el campo eléctrico completamente confinado. El elemento que produce este efecto es la pantalla.
- Ser un conductor activo para las corrientes capacitivas (que atraviesan el aislamiento), las inducidas por los campos magnéticos de cables cercanos y la corriente homopolar, drenándolas a tierra. Esta función permite en la práctica dimensionar la pantalla metálica. Además esto implica la necesidad de conectar esta pantalla a tierra, y de estudiar atentamente el diseño de esta conexión.
- Contribuir a la protección mecánica ante agresiones externas.
- Según el diseño, dar estanqueidad radial a la entrada de agua hacia el aislamiento.





Figura 5 – Vista en sección de cable con pantalla estanca.

Según las necesidades concretas de la línea existen distintos diseños de pantallas metálicas, pero básicamente se dividen en estancas y no estancas. En la Figura 5 se muestra la vista en sección de un cable con pantalla estanca.

Dentro de las pantallas estancas se encuentran los tubos extruidos de aleación de plomo y las láminas de aluminio liso o corrugado soldada longitudinalmente. El primer diseño (estancas) se utiliza más habitualmente en cables con aislamiento impregnado y cables submarinos, y el segundo (no estancas) en cables subterráneos de muy alta tensión con aislamiento XLPE.

Las pantallas de plomo tienen muy buena resistencia a la corrosión y alta resistencia eléctrica (lo que significa pocas pérdidas en las líneas con puesta a tierra directa de las pantallas). En contrapartida, el peso y coste son elevados y la capacidad de soportar elevadas corrientes (en caso de cortocircuito) es baja.

Por el contrario, las pantallas de aluminio soldado permiten construcciones más ligeras y una capacidad elevada de soportar cortocircuitos, aunque a costa de ser un

procedimiento de fabricación más complejo (no disponible en muchas fábricas de cables) y de presentar poca resistencia eléctrica, lo cual hace necesario la conexión especial de las pantallas entre sí y a tierra.

Sea como sea, para los efectos de este proyecto es importante tener en cuenta los mismos efectos eléctricos que pueden afectar a los conductores; es decir, pérdidas por resistencia óhmica, efecto piel y efecto proximidad.

El efecto piel es prácticamente imperceptible en un conductor cuya forma en sección es la de una corona, ya que todo el conductor está ya físicamente en el exterior de la circunferencia que lo contiene. Así, pues, este dato deberá tenerse en cuenta en el modelado

#### Cubierta:

La cubierta es la capa exterior que envuelve los cables y tiene la función de aislar el cable del medio externo, protegiendo los elementos metálicos interiores tanto mecánicamente (de agresiones externas durante el tendido y la operación, de la humedad y de la corrosión), como eléctricamente (aislando la pantalla metálica de tierra).

Debe tenerse en cuenta que en aquellos cables de potencia enterrados directamente (sin ir entubados), la rigidez dieléctrica de la cubierta deberá soportar toda la tensión que se produzca entre la pantalla y tierra.

En cables subterráneos es habitual la adición de una capa exterior semiconductora extrusionada conjuntamente con la cubierta o una pintura grafitada para permitir comprobar su integridad realizando los ensayos dieléctricos de esta al finalizar el tendido. Además en este tipo de cables, si van a instalarse en galería, para la cubierta se suele exigir un comportamiento ante el fuego de no propagador de la llama, no propagador del incendio y sin liberación de halógenos en el humo.

## 2.2. Inducción magnética en conductores.

### 2.2.1. Tipo de conexión de pantallas.

La corriente alterna  $I$  que circula por un conductor genera una inducción magnética  $B$  variable que es concéntrica al conductor, como se muestra en la Figura 6.

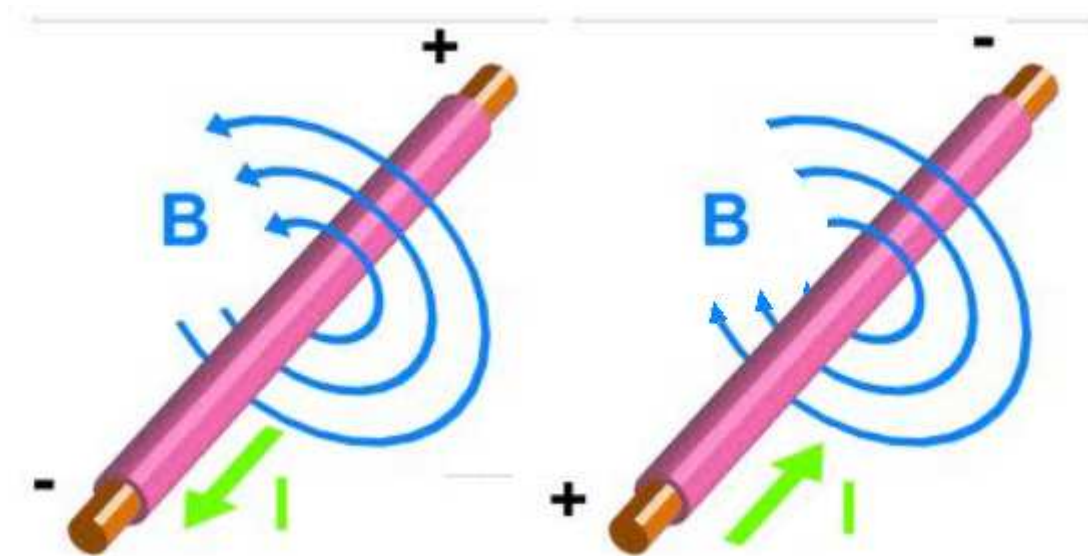


Figura 6 – Campo magnético debido a la corriente por un conductor rectilíneo.

Al actuar sobre una superficie un campo magnético  $B$  como el dibujado anteriormente, aparece un flujo magnético  $\varphi$  cuya magnitud depende del área de esta superficie y el ángulo de incidencia del campo magnético sobre ella.

La Ley de inducción electromagnética, como es sabido, establece que el voltaje inducido en el perímetro de una superficie dada es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que atraviesa la citada superficie.

Evidentemente, si resulta que se induce tensión en un conductor y este conductor forma parte de un circuito cerrado eléctricamente, entonces circularán corrientes; de ahí que el tipo de conexión de las pantallas de los cables juegue un papel determinante en las tensiones y corrientes que nos podemos encontrar.

La capacidad de transporte de los circuitos se calcula mediante un balance de calor; dicho de otra manera, la intensidad máxima que puede circular por un cable dependerá de cuánto calor pueda disipar este cable.

El cable se irá calentando debido a la intensidad que pasa por él hasta que en estado estacionario llegue a una temperatura máxima que no lo dañe. Este cálculo fija la corriente máxima por el cable y, por tanto, su capacidad de transporte de potencia.

Evidentemente, si hay una fuente de calor externa que no es la corriente del cable (como por ejemplo la corriente por las pantallas), más fácil le resultará a éste llegar a su temperatura límite, de manera que habrá menos calentamiento disponible para la corriente útil y por tanto, el cable se podrá explotar a un régimen menor.

En definitiva, si pasa corriente por las pantallas se resiente la capacidad de transporte de energía del cable.

En la industria hay varias maneras normalizadas de realizar las conexiones a tierra de las pantallas. A partir de estos esquemas básicos se pueden formar combinaciones de unos y otros. En el capítulo siguiente se describen los tipos fundamentales de conexión y se da una breve explicación sobre sus características.

No es objeto de este texto profundizar excesivamente en la descripción teórica de los tipos de conexión ni presentar otros métodos más sofisticados de conexión de pantallas. Todo ello puede encontrarse en la bibliografía que versa sobre el tema y más específicamente en las referencias que el lector encontrará en este texto en el capítulo 7, siendo especialmente recomendable para este objetivo la guía IEEE que aparece en la Referencia [1]

#### **2.2.1.1. Conexión tipo *solid bonding* (SB) o *both ends*.**

Este tipo de conexión de las pantallas a tierra rara vez es usado en líneas de alta tensión. Es más propio de líneas de media tensión (hasta 45 kV) y ocasionalmente puede aparecer en alguna línea corta de 66 kV.

Como su propio nombre indica, *both ends*, se ponen las pantallas a tierra en ambos extremos de la línea o del tramo a considerar, como puede verse en la Figura 7.

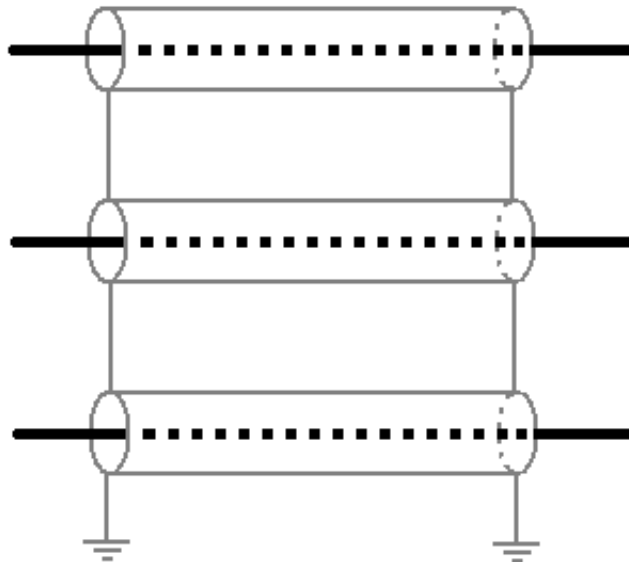


Figura 7 – Conexión de pantallas tipo *solid bonding* o *both ends*.

Atendiendo al hecho de que el circuito formado por las pantallas y tierra es un circuito cerrado, se entiende que este tipo de conexión de pantallas va a tener corrientes circulando permanentemente por ellas y, por tanto, va a tener que asumir una pérdida de capacidad de transporte que puede llegar a ser importantísima.

En líneas de alta tensión estas pérdidas podrían ser del orden del 50 % de la corriente nominal de la línea.

Por lo general se dice que la tensión inducida en este sistema de conexión no es muy importante y ciertamente es así en régimen permanente; sin embargo, si la línea es muy larga, será conveniente realizar varios tramos de SB para poner a tierra las pantallas. De lo contrario, si hay una corriente elevada de cortocircuito la tensión inducida podría llegar a dañar la cubierta del cable.

Las ventajas de este tipo de conexión son las siguientes:

- La tensión entre pantalla y tierra en régimen permanente es de poca magnitud.

- En caso de defecto desequilibrado fuera del cable, se inducirá una tensión en las pantallas debido al acoplamiento magnético que generará una corriente. Esta corriente por las pantallas es de signo tal que tiende a reducir la tensión inducida a lo largo de éstas.

El principal inconveniente de esta configuración, como ya se ha indicado anteriormente, es la pérdida de capacidad de transporte.

#### 2.2.1.2. Conexión tipo *single point* (SP).

Este tipo de conexión de pantallas consiste en conectar directamente a tierra en un extremo y dejar el otro extremo abierto. En realidad, el extremo abierto no es tal cosa; se conecta a tierra a través de descargadores. En la Figura 8 aparecen fotos de descargadores comerciales y la forma de la curva característica.

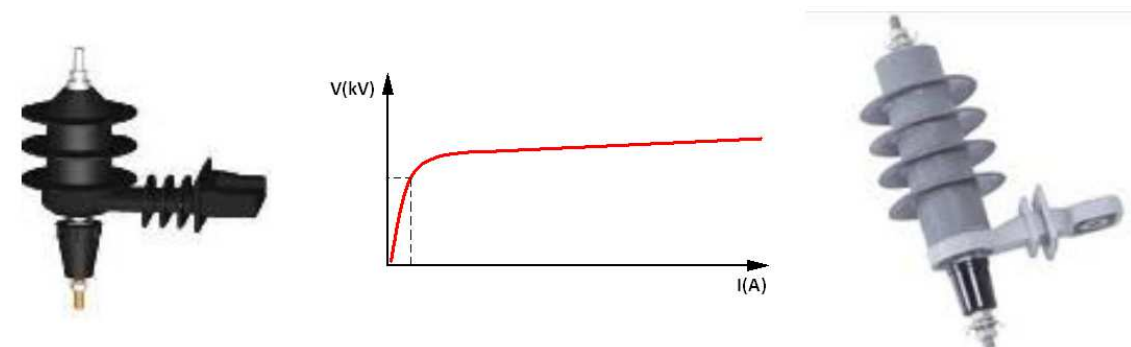


Figura 8 – Descargadores comerciales y modelo de curva característica.

Los descargadores son un tipo de válvulas que en la actualidad se fabrican con óxido de zinc. Su curva característica es tal que, a partir de una determinada tensión, conducen bruscamente la corriente, evitando así que la tensión se eleve en el punto donde están situados. Son elementos de protección que, en el caso que nos ocupa, protegerían el cable para que no hubiera en la pantalla tensiones superiores a lo que puede soportar la cubierta.

El esquema de conexión tipo *single point* sería el mostrado en la Figura 9.

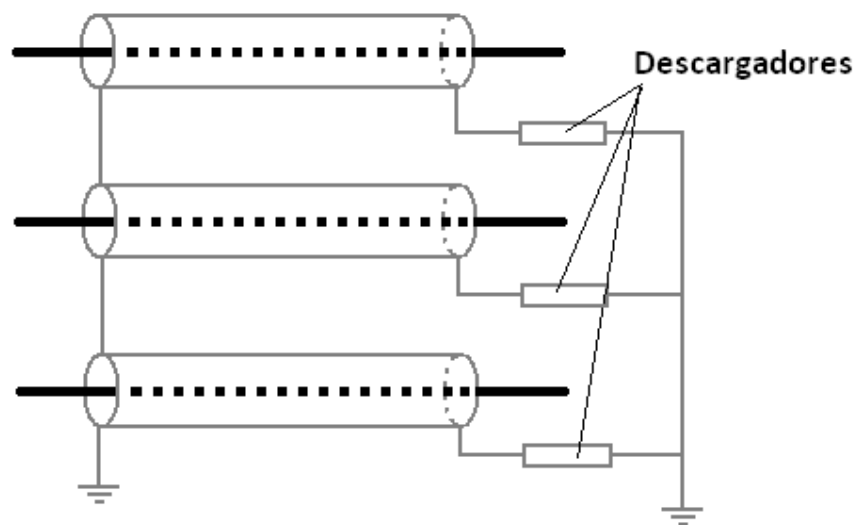


Figura 9 – Esquema de conexión de pantallas tipo single point (SP)

Cabe destacar que es importante en este tipo de conexión de pantallas disponer de un cable de conexión equipotencial (ecc) conectado a tierra en los extremos. Este cable, que también recibe el nombre de cable de acompañamiento, se transpone a mitad del trazado con el fin de minimizar corrientes de circulación en régimen permanente y, por tanto, pérdidas. Lo ideal sería que la transposición fuera de tal manera que se establecieran tres tramos de igual longitud y simétricos respecto a la inducción magnética por parte de las tres fases. Esto, cuya zanja tipo se ve en la Figura 10, en la práctica es difícil de ejecutar, de manera que se opta por una única trasposición a mitad del trazado (Figura 11).

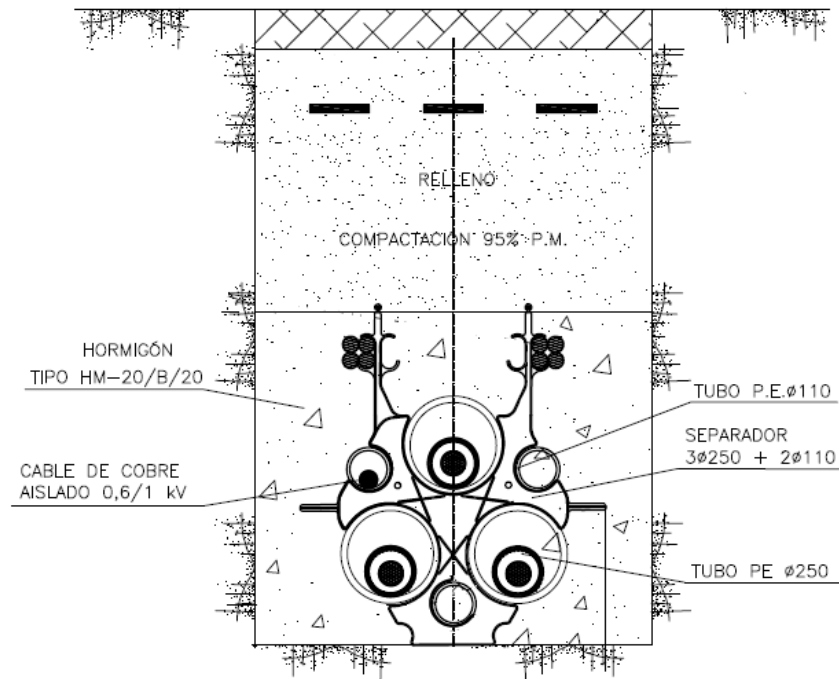


Figura 10 – Sección ideal de canalización preparada para tres tramos simétricos del  
ecc.

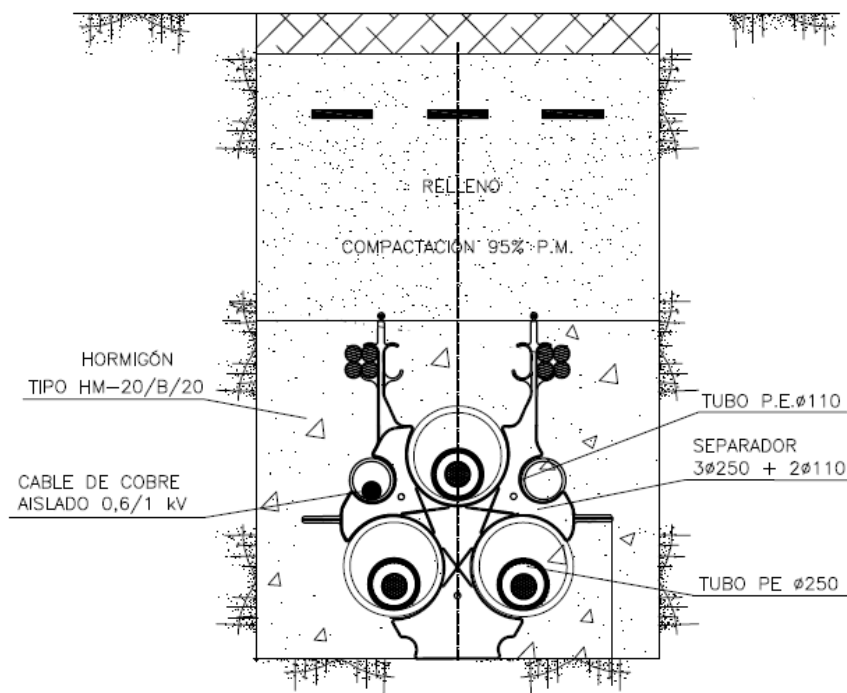


Figura 11 – Sección real habitual de canalización preparada para una trasposición del  
ecc.



Otra posibilidad, representada en la Figura 12, sería situar el cable de acompañamiento en mitad de las tres fases (en una disposición al tresbolillo) de manera que se equilibrasen las inducciones; pero esto también es difícil de ejecutar en la práctica. Realmente, ésta última opción sería la ideal.

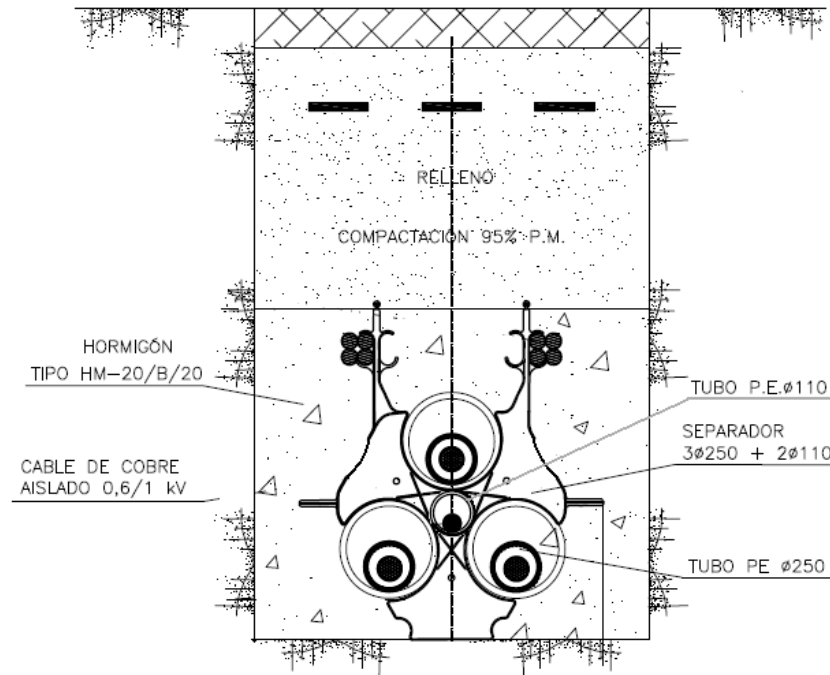


Figura 12 – Sección ideal de canalización con el cable de acompañamiento en el centro.

Finalmente, el esquema de la configuración single point se confecciona plasmando la presencia de este cable de acompañamiento (Figura 13).

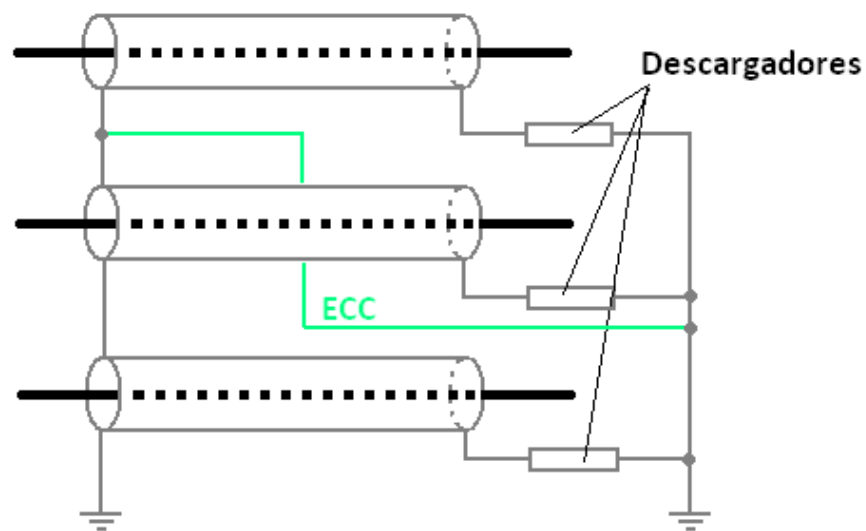


Figura 13 – Esquema de configuración SP con cable de conexión equipotencial.

La función principal del cable de conexión equipotencial no es otra que la que su propio nombre indica; es decir, mantener las tierras locales a un mismo potencial aproximado.

En caso de falta en el extremo con descargadores, si no hubiera un cable equipotencial, toda la corriente de cortocircuito retornaría a la fuente por tierra, como se muestra en la Figura 14.

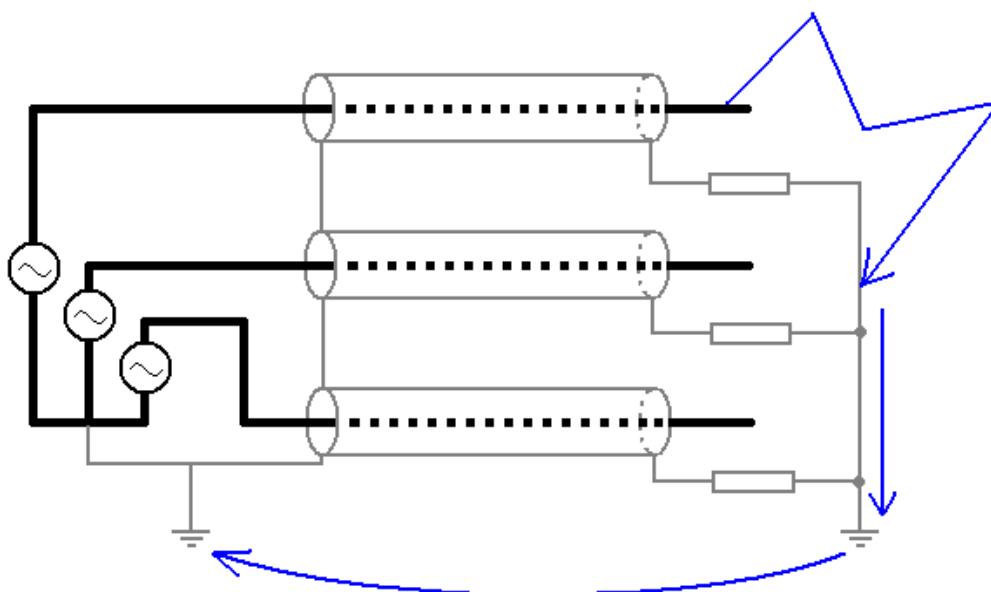


Figura 14 – Falta monofásica en conexión SP sin cable de conexión equipotencial.

Este hecho es importante porque toda la corriente de cortocircuito estaría induciendo tensión en las pantallas, especialmente en la pantalla del conductor en falta, y podría fácilmente obligar a los descargadores a actuar para proteger la instalación.

Sin embargo, si esta misma falta se produjera existiendo un cable de acompañamiento (Figura 15), una parte de la corriente retornaría por tierra y otra por el citado cable (la proporción de una y otra dependerían de las impedancias vistas por cada camino). Es importante resaltar que la corriente de falta que retorna por el cable de conexión equipotencial va en sentido contrario que la corriente de falta que circula por el conductor de fase; por lo tanto, la tensión inducida por ésta será contraria a la otra. Este efecto tiende a reducir las tensiones inducidas en las pantallas y es la principal funcionalidad del cable de conexión equipotencial.

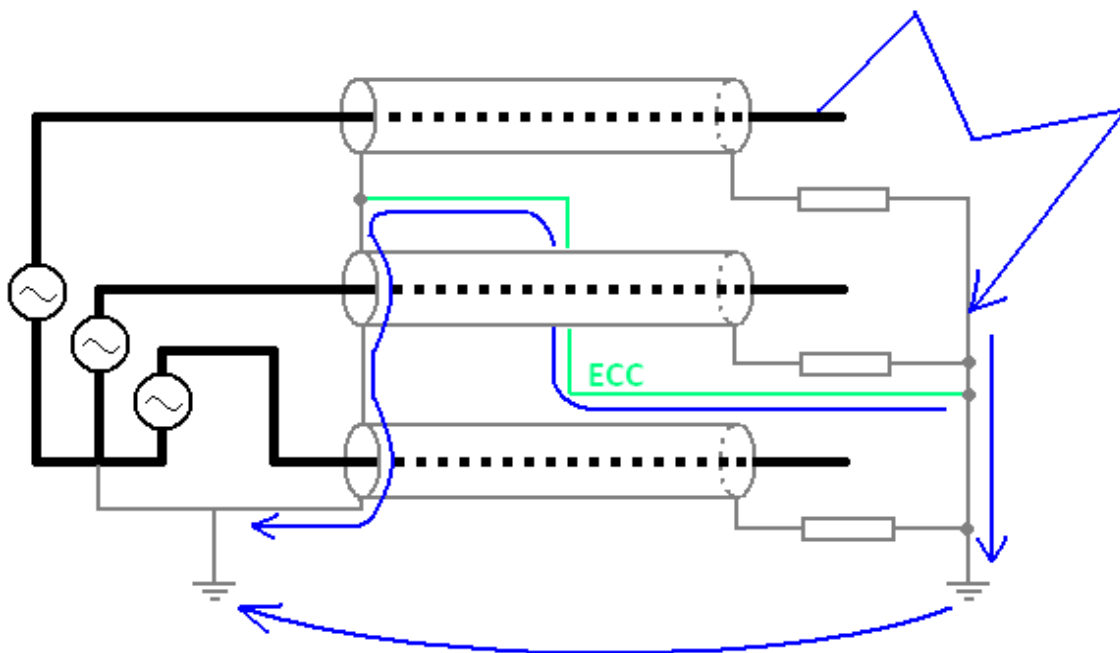


Figura 15 – Falta monofásica en conexión SP con cable de conexión equipotencial.

La principal ventaja de tener este tipo de conexión de las pantallas a tierra es que no circula corriente por las pantallas en régimen permanente porque están todas en circuito abierto. Esto hace que no haya pérdida de capacidad de transporte.

El inconveniente es que se genera una tensión inducida en el lado de los descargadores. Esta tensión es proporcional a la distancia de la línea y en régimen

permanente podrían ser de magnitud tal que fueran peligrosas para las personas. Los tramos SP pueden tener unas longitudes máximas del orden de 600 metros.

En caso de cortocircuito, las tensiones que se inducen pueden llegar a ser peligrosas incluso para la cubierta del cable (que habitualmente suele estar diseñada para soportar 10 kV en cables de transporte de 66, 132 y 220 kV). Este es el motivo por el cual se protege la línea con descargadores.

Una variación de la conexión tipo *single point* es la llamada *mid point bonding* (Figura 16). Básicamente es lo mismo que poner dos tramos SP unidos por la conexión a tierra.

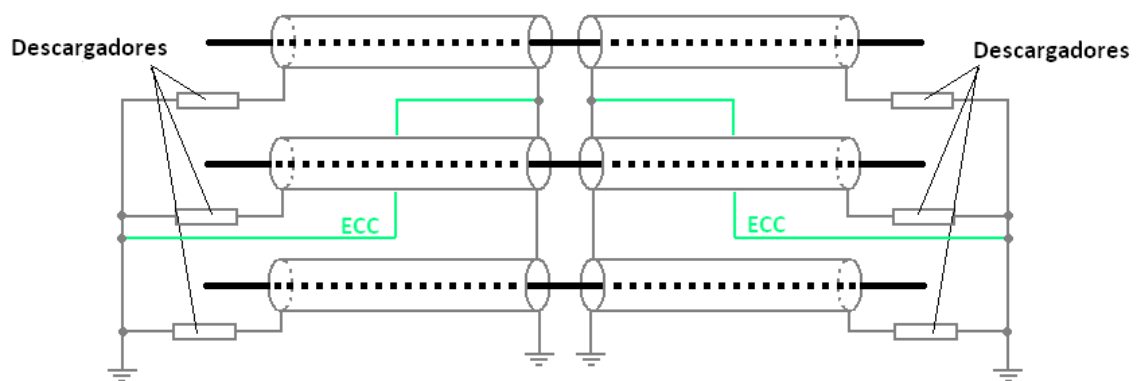


Figura 16 – Conexión de pantallas tipo *mid point bonding*.

La ventaja de esto es muy evidente, y es que se puede conseguir el doble de longitud que en un *single point* con la misma magnitud de tensión inducida.

Sea como sea, adolecerá de los mismos inconvenientes en cuanto a las altas tensiones inducidas en caso de cortocircuito que limitan la longitud máxima de los tramos.

Es habitual que los tramos SP o *mid point bonding* se pongan en los extremos de líneas largas como continuación de otro tipo de conexión (*cross bonding*) que se verá en el punto siguiente.

### 2.2.1.3. Conexión tipo *cross bonding* (CB).

Este tipo de conexión de pantallas puede parecer, por una parte, similar al SB visto con anterioridad. Se trata de conectar a tierra ambos extremos de un bloque CB. Cada bloque CB está formado por tres tramos elementales de igual longitud (en la medida de lo posible). En el punto de unión entre tramos elementales se realiza una trasposición de las pantallas, de manera que la pantalla que durante el primer tramo elemental estaba con la fase 1, pase a estar con la fase 2; la pantalla que estaba con la fase 2, pase a estar con la fase 3; y la pantalla que estaba con la fase 3 pase a estar con la fase 1<sup>3</sup>.

En la Figura 17 puede verse una representación de un bloque *cross bonding* (CB) con sus tres tramos elementales.

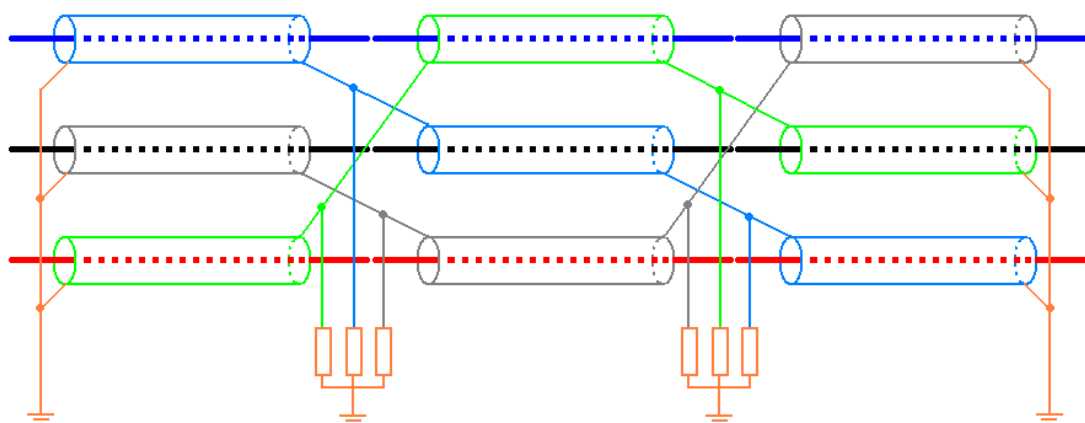


Figura 17 – Bloque *cross bonding*.

Esta trasposición de pantallas se llevará a cabo en las dos uniones del tramo CB. Si los tramos elementales son iguales (y las corrientes también), entonces la corriente inducida en la pantalla 1 del tramo 1, se compensará con la corriente inducida en esta misma pantalla (recordemos que se traspone) en el tramo 2, y se compensará definitivamente con la tensión inducida en el tramo 3, suponiendo una disposición al tresbolillo (Figura 18).

<sup>3</sup> Es habitual llamar a las fases R, S y T o bien 0, 4 y 8 (como indicación del desfase en unidades horarias), aunque esto es criterio de cada compañía. En este texto se llamarán 1, 2 y 3 para mayor simplicidad.

Hay que tener en cuenta que como cada pantalla se transpone, va siendo afectada en mayor medida por cada fase de forma alternativa. Así pues, una pantalla dada que esté con la fase 1 en el primer tramo tenderá a inducir una tensión que estará desfasada  $120^\circ$  eléctricos con la misma tensión inducida en esta pantalla cuando esté en el tramo 2. Lo mismo ocurrirá cuando esté en el tramo 3, de manera que al final la suma fasorial se cancela.

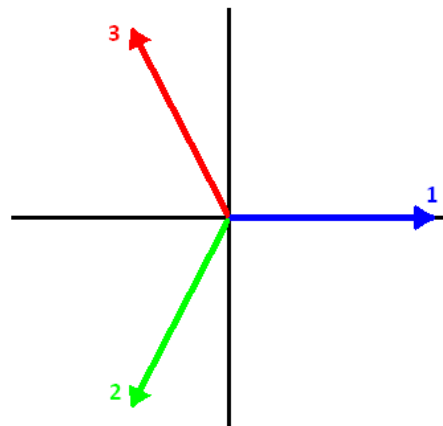


Figura 18 – Representación fasorial de las tres componentes de tensión inducida en cada tramo elemental de un CB equilibrado, cuya suma algebraica es cero.

La magnitud de la tensión inducida a lo largo de toda la línea (los tres tramos elementales) teniendo en cuenta el desfase indicado anteriormente, tendrá un aspecto como el que se muestra a continuación en la Figura 19.

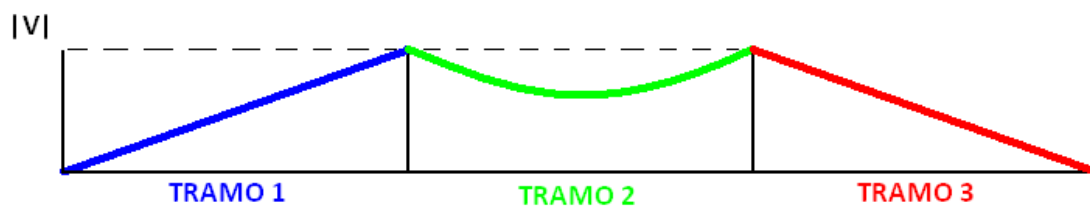


Figura 19 – Evolución del módulo de la tensión a lo largo de la longitud de la línea.

La ventaja del *cross bonding* se hace evidente durante toda la explicación. La tensión resultante es nula (en el caso ideal), de manera que no hay circulación de corriente y por tanto no se pierde capacidad de transporte.

Por otra parte, se puede conseguir el triple de longitud que en el caso de una conexión tipo SP con la misma tensión máxima inducida (en régimen permanente)

Cabe destacar que, al igual que la conexión SP, hay que situar colocar descargadores en los puntos de tensión máxima; es decir, en la unión de los tramos elementales. Esta unión de los tramos elementales en la práctica coincide con las cámaras de empalme. Las longitudes de los tramos elementales pueden tener del orden de 600 metros.

### 2.2.2. Cálculo de las tensiones inducidas.

Para el cálculo de las tensiones inducidas se utilizan las ecuaciones empíricas de Carson. En primer lugar hay que conocer las impedancias inducidas<sup>4</sup>.

- Las impedancias mutuas entre los conductores de fase y las pantallas.
- Las impedancias mutuas entre las pantallas.
- La impedancia propia de la pantalla.

La ecuación de Carson a aplicar es la siguiente<sup>5</sup>:

$$Z_{c,p} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2} \left( \frac{1}{4} + j \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_e}{r_{c,p}} \right) \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

$Z_{c,p} \rightarrow$  Impedancia inducida entre conductor y pantalla ( $\Omega/\text{m}$ )

$\omega \rightarrow$  Pulsación ( $\text{rad./s}$ )

$\mu_0 \rightarrow$  Permeabilidad del vacío ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ )

$r_{c,p} \rightarrow$  Distancia entre conductor y pantalla (m)

$D_e \rightarrow$  Distancia equivalente del retorno por tierra (m)

Para llevar a cabo estos cálculos es preciso hacer ciertas consideraciones. En primer lugar, el retorno equivalente por tierra se calcula mediante la ecuación siguiente.

<sup>4</sup> Aquellas impedancias que aparecen entre dos elementos no conectados eléctricamente como fruto de su acoplamiento magnético.

<sup>5</sup> Tanto la ecuación de la impedancia mutua como la de la distancia equivalente por tierra pueden encontrarse con más detalles en las referencias 1 y 2 de la bibliografía.

$$D_e = \frac{1.85}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}}$$

Ecuación 2

$D_e \rightarrow$  Distancia equivalente del retorno por tierra (m)

$\omega \rightarrow$  Pulsación (rad./s)

$\mu_0 \rightarrow$  Permeabilidad del vacío ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

$\rho \rightarrow$  Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ )

Por otra parte, se indica que  $r_{c,p}$  es la distancia entre el centro del conductor y de la pantalla cuya impedancia de acoplamiento queremos calcular. Si lo que se pretende calcular es el acoplamiento entre dos pantallas, la fórmula será exactamente igual, ya que la distancia entre sus centros es la misma que entre el centro de conductor de una y el centro de la pantalla de la otra.

Para el caso en que se quiera calcular la impedancia mutua entre un conductor y su misma pantalla, dado que la distancia entre centros es cero,  $r_{c,p}$  valdrá el radio medio geométrico de la pantallas.

El radio medio geométrico de una pantalla (de un conductor hueco) vale prácticamente lo mismo que el radio exterior de la pantalla; por tanto, puede utilizarse aquel en sustitución de éste cometiendo un error muy leve.

En caso de que se esté calculando la impedancia propia de un cable de acompañamiento (impedancia mutua con sí mismo), entonces  $r_{c,p}$  valdrá el radio medio geométrico del cable de acompañamiento. Este dato puede calcularse multiplicando el radio exterior del conductor por el factor  $e^{(-1/4)}$ .

$$RMG = r_{ext} \cdot e^{-1/4}$$

Ecuación 3

$r_{ext} \rightarrow$  Radio exterior del conductor (m)

$RMG \rightarrow$  Radio medio geométrico del conductor (m)

Resumiendo, la fórmula que se utiliza en este trabajo de la impedancia inducida es siempre la misma y en ella está implicada una distancia entre los centros de los dos elementos a tener en cuenta. El caso conductor–pantalla es exactamente igual que el



caso pantalla–pantalla. Cuando se calcule el caso pantalla–pantalla del mismo elemento consigo mismo (pantalla1–pantalla1, pantalla2–pantalla2, etc.), entonces la distancia a considerar, en lugar de ser cero, será el radio de la pantalla (lo mismo es aplicable al caso del conductor con su propia pantalla). Para el caso de un cable de acompañamiento, como es un conductor macizo, la distancia a considerar será el radio medio geométrico de conductor.

En el modelado hay que tener especial cuidado cuando se considera la impedancia de un elemento dado (pantalla o cable de acompañamiento), ya que a la impedancia inducida calculada habrá que añadirle la impedancia natural que corresponda a la propia del elemento y que estará indicada en la hoja de características técnicas.

A partir de aquí el cálculo de las tensiones inducidas se explica con facilidad. El elemento A induce en el elemento B una tensión igual a la corriente que circula por A multiplicada por la impedancia mutua entre A y B. Es decir, básicamente se trata de aplicar la ley de Ohm teniendo en cuenta la existencia de esa impedancia mutua que se acaba de calcular, como si fuera atravesada por toda la intensidad del elemento generador de inducción. Nota: Se trata de vectores.

$$\vec{I}_A = \frac{\vec{V}_{B-A}}{\vec{Z}_{A-B}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$I_A \rightarrow$  Corriente que circula por el elemento A (A)

$V_{B-A} \rightarrow$  Tensión inducida en el elemento B debido a la corriente que circula por A (V)

$Z_{A-B} \rightarrow$  Impedancia mutua entre los elementos A y B ( $\Omega$ )

Todos los elementos por los que circule corriente serán generadores de tensiones inducidas en todos los elementos próximos. En un circuito trifásico el conductor 1, el conductor 2 y el conductor 3 generarán tensiones inducidas en la pantalla 1, 2 y 3.

Además, si el tipo de conexión es tal que permite el paso de la corriente, entonces las corrientes por las pantallas 1, 2 y 3 generarán tensiones inducidas en las otras pantallas y en ellas mismas.

Si existe un cable de acompañamiento también recibirá tensiones inducidas y también las generará.

A la vista está que si hay que hacer todos estos cálculos se genera un sistema de ecuaciones que crece rápidamente. Téngase en cuenta que todo lo dicho es válido para todos los elementos cercanos, de manera que si se analiza un doble circuito las seis fases y inducirán tensión en las seis pantallas, y también las seis pantallas inducirán tensión en sí mismas si tienen corriente.

Veamos un ejemplo de cálculo sencillo usando como base un simple circuito. Definimos un par de matrices de impedancias.

$$[Z_{c-p}] = \begin{bmatrix} Z_{c1-p1} & Z_{c1-p2} & Z_{c1-p3} \\ Z_{c2-p1} & Z_{c2-p2} & Z_{c2-p3} \\ Z_{c3-p1} & Z_{c3-p2} & Z_{c3-p3} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$[Z_{p-p}] = \begin{bmatrix} Z_{p1-p1} & Z_{p1-p2} & Z_{p1-p3} \\ Z_{p2-p1} & Z_{p2-p2} & Z_{p2-p3} \\ Z_{p3-p1} & Z_{p3-p2} & Z_{p3-p3} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 6}$$

La matriz  $Z_{c-p}$  (conductor – pantalla) no es exactamente igual que la matriz  $Z_{p-p}$  (pantalla – pantalla) porque los elementos de la diagonal principal de la segunda incluyen las impedancias naturales de los elementos (la resistencia óhmica de la pantalla).

Ambas matrices son simétricas respecto a su diagonal principal; es decir, el elemento 1-2 es exactamente igual que el elemento 2-1. Además, todos los elementos de la diagonal principal son iguales entre sí en una misma matriz (entendiéndose, claro está, que todos los cables son iguales)

Así, el cálculo de las tensiones inducidas sería el siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{p1c} \\ V_{p2c} \\ V_{p3c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{p1p} \\ V_{p2p} \\ V_{p3p} \end{bmatrix} = [Z_{c-p}] \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} + [Z_{p-p}] \begin{bmatrix} I_{p1} \\ I_{p2} \\ I_{p3} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 7}$$

$V_{pi} \rightarrow$  Tensión en la pantalla i-esima (V/m)

$V_{pic} \rightarrow$  Tensión en la pantalla i-esima (V/m) debida a la corriente por los conductores.

$V_{pip} \rightarrow$  Tensión en la pantalla i-esima (V/m) debida a la corriente por las pantallas.

$I_{ci} \rightarrow$  Corriente por el conductor i-ésimo (A)

$I_{pi} \rightarrow$  Corriente por la pantalla i-ésima (A)

$Z_{c-p} \rightarrow$  Impedancias conductor – pantalla ( $\Omega/m$ )

$Z_{p-p} \rightarrow$  Impedancia pantalla - pantalla ( $\Omega/m$ )

En un sistema de ecuaciones como este, las incógnitas son las corrientes por las pantallas y las tensiones en los extremos de estas. Las intensidades por los conductores son iguales en magnitud y tienen un desfase de  $120^\circ$  eléctricos, mientras que las impedancias ya las conocemos.

El resto de ecuaciones se obtienen de las condiciones de contorno. Por ejemplo, en caso de un SB las tensiones  $V_{pi}$  son iguales porque las pantallas están juntas antes de conectarse a tierra en los extremos. Además, se plantea la ecuación de malla que se deduce de la Figura 20, y ya se tiene todo para realizar el cálculo.

$$(\vec{I}_{p1} + \vec{I}_{p2} + \vec{I}_{p3}) \cdot (R_1 + R_2) = -V_{p1} = -V_{p2} = -V_{p3} \quad \text{Ecuación 8}$$

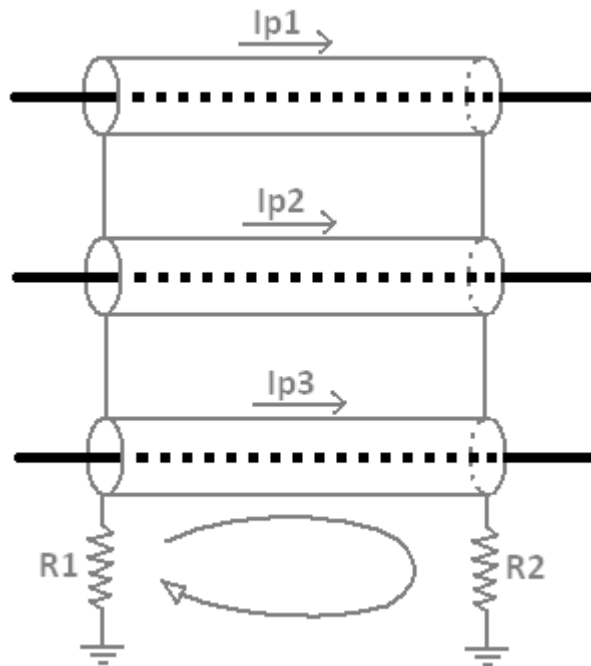


Figura 20 – Ecuación de malla gráficamente en caso *solid bonding*

Para el caso de tener una configuración SP, las corrientes por las pantallas sería iguales y de valor cero, de manera que las tensiones en las pantallas serían directamente las inducidas debidas a las corrientes por los conductores.

En el caso de un *cross bonding* la resolución es igualmente sencilla (para el caso ideal de tramos elementales equilibrados, corrientes equilibradas e impedancias equilibradas). Las corrientes son nulas y las tensiones en los extremos a tierra también. Los tramos elementales inicial y final, que tienen un lado puesto a tierra directa y el otro a través de descargadores, se tratarían como un *single point*. El tramo intermedio también se trataría como un *single point*, pero con la salvedad que la tensión en el nudo de referencia no sería cero sino sería la tensión resultante del cálculo del tramo anterior.

Conceptualmente ésta es la manera de hacer cualquier cálculo de tensiones inducidas en las pantallas. Las configuraciones en tresbolillo y otras consideraciones pueden dar lugar a numerosas simplificaciones que ayudan a hacerse una idea de los órdenes de magnitud que se manejan; sin embargo, en un cálculo más preciso, todos estos desequilibrios reales deberán ser calculados, lo que puede dar lugar a sistemas de ecuaciones enormes.

### 2.2.3. Análisis de cortocircuitos.

En este punto se analizarán los diferentes tipos de cortocircuitos monofásicos. No se analizarán los trifásicos porque, además de ser muy poco habituales, su funcionamiento conceptual es el mismo que el del circuito normal en régimen permanente, pero con mucha más intensidad. Así pues, el cálculo de los cortocircuitos trifásicos sería igual que el planteado en el punto anterior sin ninguna otra consideración añadida que un incremento de la corriente.

Por su parte, los cortocircuitos monofásicos son con gran diferencia los que más se producen en situaciones reales. En función de diversos parámetros estos cortocircuitos

pueden ser desde poco significativos a tremendamente peligrosos desde el punto de vista de las tensiones inducidas.

Cuando ocurre un cortocircuito en una red mallada, el cortocircuito se alimenta desde las dos subestaciones extremas. Partiendo de los datos de potencia de cortocircuito en las subestaciones se puede saber con cuánta intensidad contribuirá cada línea. Normalmente debería considerarse este caso por ser el más desfavorable; es decir, se analiza el tramo subterráneo de la línea completa como si el cortocircuito ocurriera en el extremo final de ésta, y la línea contribuye con su máxima potencia de cortocircuito. El final de la línea podrá ser el propio tramo subterráneo en estudio o quizás un tramo aéreo que está fuera del alcance de este trabajo, pero que en cierta manera veremos que también entra en consideración.

En los apartados siguientes se utilizará una nomenclatura que posiblemente resulte desconocida para el lector. Así, pues, con el objetivo de evitar malentendidos, la nomenclatura es la siguiente.

Cuando se habla de falta lejana o cercana se está haciendo referencia a la distancia desde el punto donde se produce la falta hasta el tramo subterráneo objeto del análisis. Consideramos el cortocircuito al final de la línea (en la subestación del extremo), entonces una falta cercana es aquella que se produce en la tierra local del tramo subterráneo o muy cerca de ésta, y por tanto la inyección de corriente (en el modelado) se realiza en ésta. Por el contrario, la falta lejana se produce en una tierra aislada de la tierra del tramo subterráneo objeto de estudio; es decir, en la subestación que tiene la llegada en aéreo.

La explicación gráfica de este concepto puede verse en la Figura 21.

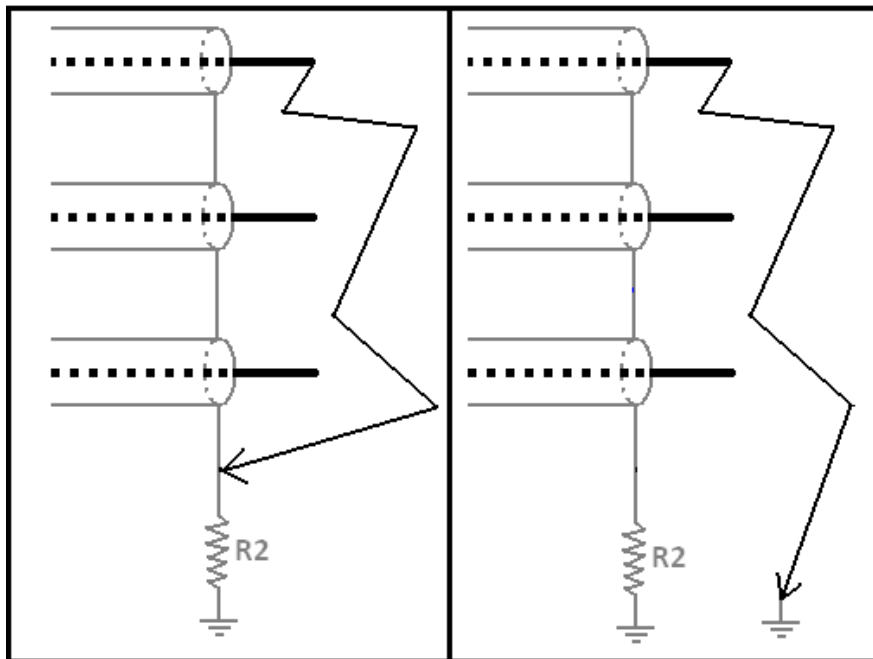


Figura 21 – Falta cercana (izquierda). La tierra local del final del tramo subterráneo se corresponde con el fin de línea. Falta lejana (derecha). La tierra local y la de fin de línea están aisladas.

Cuando se hable de falta en sifón o en semi-sifón se refiere a lo siguiente. Una instalación en sifón es aquella que consta de un tramo subterráneo comprendido entre dos tramos aéreos, mientras que una línea en semi-sifón sale de la subestación en subterráneo y luego pasa a aéreo (o viceversa, pero esto es lo mismo visto desde el otro lado y ya hablaríamos de faltas cercanas y lejanas)

En esencia podríamos visualizar el problema como si se tratase de dos lazos de corriente, uno es el de los conductores y el otro el de las pantallas. El nexo de unión de los dos lazos de corriente son las resistencias de puesta a tierra en los extremos del cable (siempre y cuando se trate de una falta en semi-sifón y cercana). En la Figura 22 se visualiza esta situación genérica, siendo los trazos gruesos los conductores y los finos las pantallas.

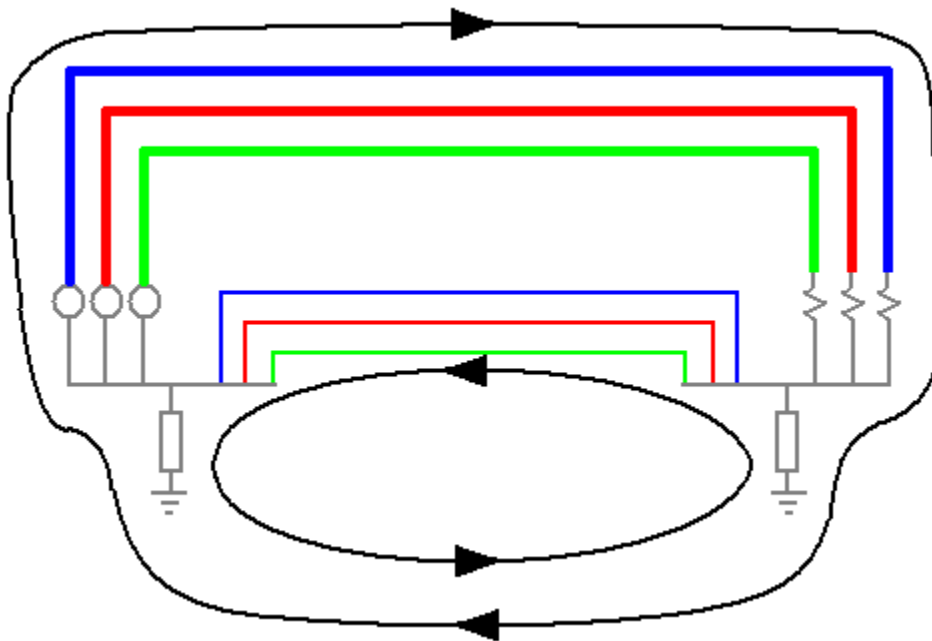


Figura 22 – Lazos de corriente. El lazo mayor es el de corrientes de cortocircuito y el lazo menor es el de corrientes inducidas.

Así pues, pueden aparecer cuatro diferentes combinaciones de cortocircuito en función de si las resistencias de puesta a tierra de los extremos son efectivamente o no nexos de unión de ambos lazos de corriente. Estos cuatro casos se analizan a continuación.

#### 2.2.3.1. Cortocircuito monofásico tipo I (falta cercana en semi-sifón)

El cortocircuito tipo I es el que se conoce como “falta cercana en semi-sifón” o bien “falta entre subestaciones”. Se daría en el caso de que se tenga una línea completamente subterránea entre dos subestaciones y hubiera un cortocircuito monofásico en una de ellas. También podría darse en una línea que tuviera un primer tramo subterráneo a la salida de la subestación y se produjera el cortocircuito en el apoyo de paso de aéreo a subterráneo. Se muestra en la Figura 23 un escenario tipo de este caso.

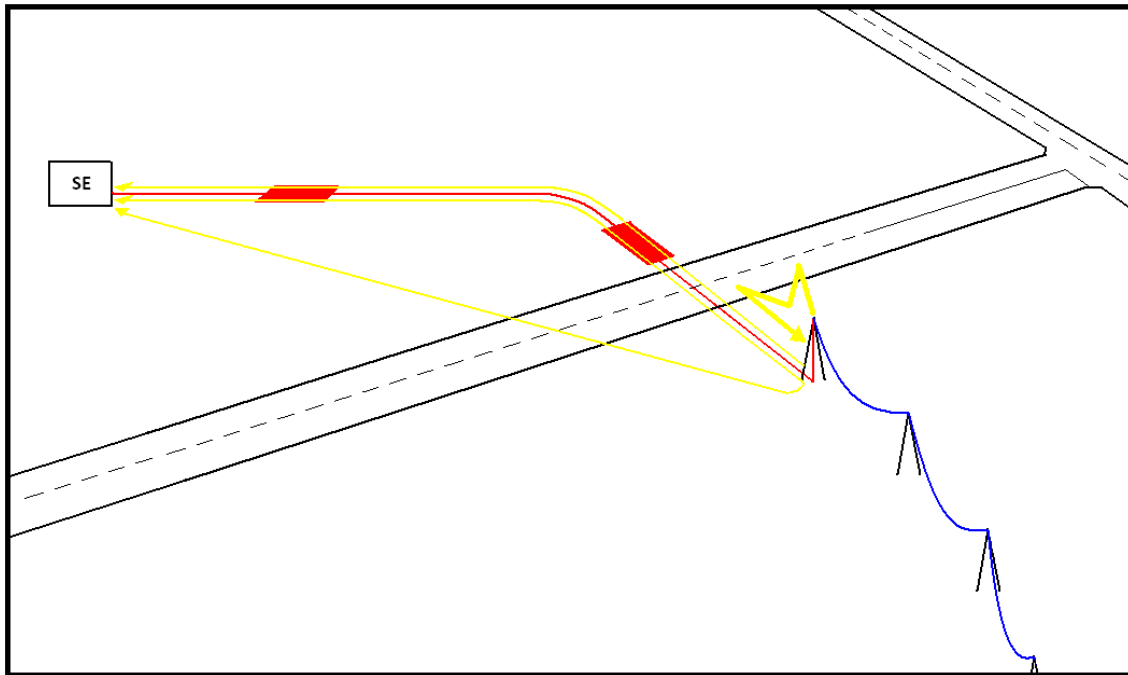


Figura 23 – Escenario de cortocircuito tipo I.

La mayor parte de la corriente de cortocircuito retornaría a la fuente a través de las pantallas; mientras que una pequeña proporción lo haría directamente por tierra.

Desde un punto de vista eléctrico, ocurriría lo que se ve en la Figura 24.

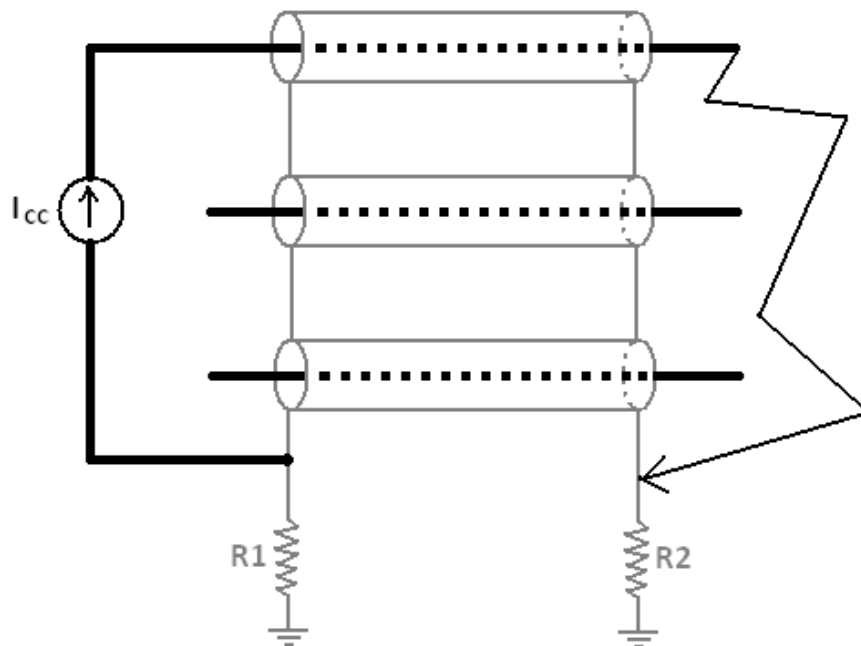


Figura 24 – Cortocircuito monofásico tipo I.



Toda la corriente de falta se deriva a un punto entre las pantallas y la resistencia de puesta a tierra ( $R_2$ ), de tal manera que casi toda la corriente circulará por las tres pantallas. La fracción de la corriente que circule por tierra dependerá de la relación entre la impedancia del camino de tierra ( $R_1 + R_2$ ) y la del camino de las pantallas. En la Figura 25 se insertan flechas mostrando las corrientes de cortocircuito.

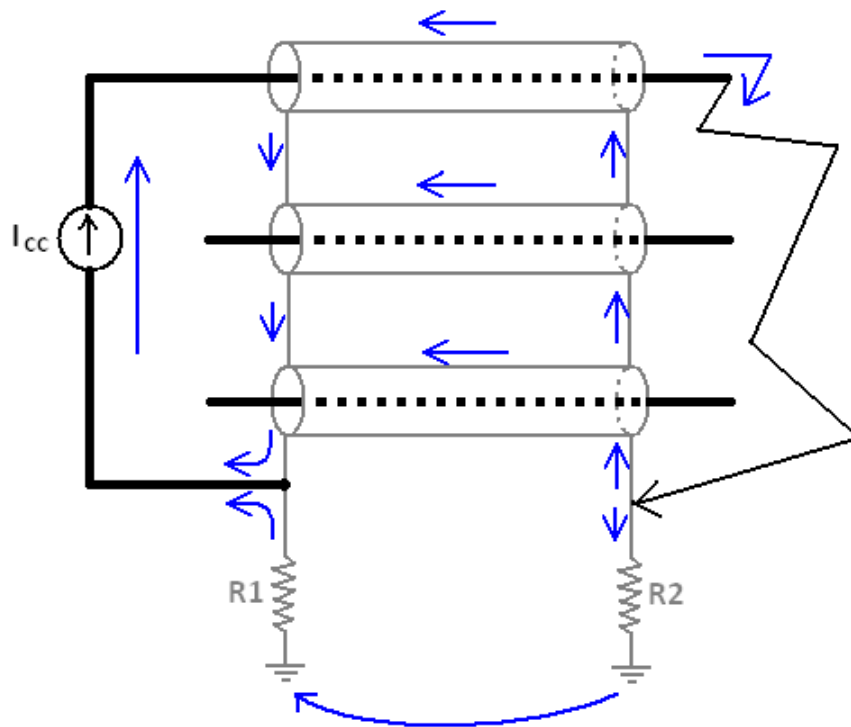


Figura 25 – Circulación de corrientes de cortocircuito en caso de cortocircuito tipo I.

En la figura anterior que todas las corrientes que circulan por las pantallas lo hacen en sentido contrario a la corriente de cortocircuito que circula por el conductor. Esto en la práctica es una ventaja.

El hecho de que las corrientes de cortocircuito circulen en sentido contrario por las pantallas y por el conductor genera un cierto efecto de apantallamiento que reduce la tensión inducida en las pantallas. Las tensiones inducidas en las pantallas debidas a las corrientes que circulan por las pantallas van a ser de signo contrario a las tensiones inducidas en las pantallas debidas a la corriente que circula por el conductor.

En la figura se ha representado en las pantallas el sentido de la corriente debido al cortocircuito; pero evidentemente existirá una componente de corriente inducida que tendrá el desfase correspondiente que establezcan las impedancias.

Estableciendo las ecuaciones de contorno y realizando un análisis clásico de teoría de circuitos se pueden obtener las expresiones analíticas para un caso general en el que se simplifiquen muchos elementos, pero que sea útil para poder hacer un cálculo rápido y tener una idea de órdenes de magnitud.

Las fórmulas para realizar el cálculo de las tensiones inducidas en las tierras locales (en  $R_1$  y en  $R_2$ ) en una conexión de pantallas SB, con una distribución al tresbolillo y sin corriente por los otros conductores son las siguientes.

$$V_{R1} = -\varepsilon \cdot I_{cc} \cdot R_1 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$V_{R2} = \varepsilon \cdot I_{cc} \cdot R_2 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\varepsilon = \frac{R_p}{3 \cdot (R_0 + R_1 + R_2) + R_p + jX_{cp} + 2 \cdot jX_m} \quad \text{Ecuación 11}$$

$V_{R1} \rightarrow$  Tensión en R1 (V)

$V_{R2} \rightarrow$  Tensión en R2 (V)

$I_{cc} \rightarrow$  Intensidad de la fase en cortocircuito (A)

$\varepsilon \rightarrow$  Fracción de corriente de falta que circula por tierra (adimensional)

$R_0 \rightarrow$  Resistencia inducida entre conductor y pantalla ( $\Omega$ )

$R_p \rightarrow$  Resistencia propia de la pantalla ( $\Omega$ )

$X_{cp} \rightarrow$  Reactancia inducida entre conductor y pantalla de un mismo cable ( $\Omega$ )

$X_m \rightarrow$  Reactancia mutua entre conductor y pantalla de cables diferentes ( $\Omega$ )

### 2.2.3.2. Cortocircuito monofásico tipo II (falta lejana en semi-sifón)

Este escenario (Figura 26) es el mismo que en el caso anterior (Figura 23), pero con la falta produciéndose más alejada del tramo subterráneo.

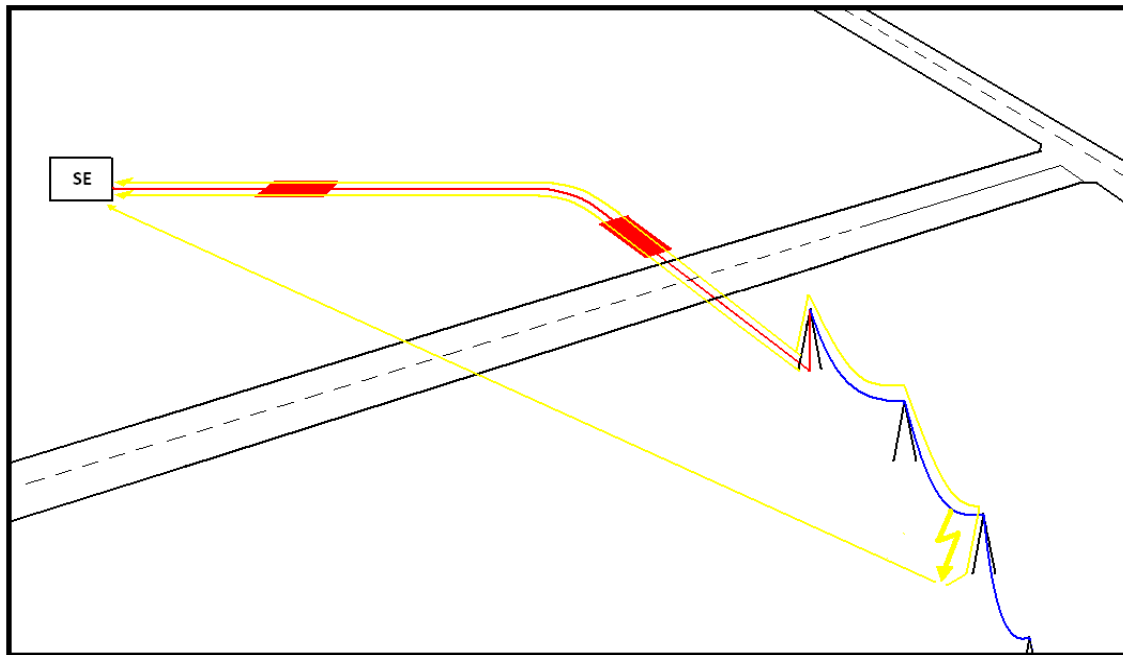


Figura 26 – Falta lejana en semi-sifón.

Una falta lejana que quiera ser estudiada con rigor, presenta una dificultad añadida porque hay que someter a estudio la parte aérea de la instalación. Aún así, se pueden hacer una serie de aproximaciones que arrojen resultados razonables.

Normalmente, cuando se produce una falta lejana en un apoyo, la mayor parte de la corriente de cortocircuito retorna por tierra, siendo una proporción menor la que lo hace por el cable de guarda. Esto puede calcularse mediante un factor de reducción  $r$ , que indica la proporción de la corriente de falta que va a tierra, y que depende de la impedancia a secuencia homopolar. En la [2], P. Simón et al. 2011, en los puntos 5.1 y 5.3 muestran detalladamente cómo se realiza este cálculo.

El camino del cable de tierra conduciría la corriente directamente hasta la tierra local del tramo subterráneo. Cabe destacar que en cada apoyo se encontraría una bifurcación de esta corriente, que en parte podría bajar por el apoyo hacia tierra y otra parte podría seguir por el cable de tierra<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Este cálculo se realiza mediante la llamada impedancia de cadena infinita y debería estar considerado en el factor de reducción.

Esta corriente circularía por las pantallas (o cable de acompañamiento) contribuyendo a reducir las tensiones inducidas en éstas; por tanto, ayudando a reducir el peligro que entraña la falta.

En la práctica, uno se sitúa del lado de la seguridad si considera que no hay ningún retorno por el cable de guarda, de manera que el 100% de la corriente de falta se inyecta en el terreno. Sería como considerar que la impedancia del cable de guarda es infinita (Figura 27).

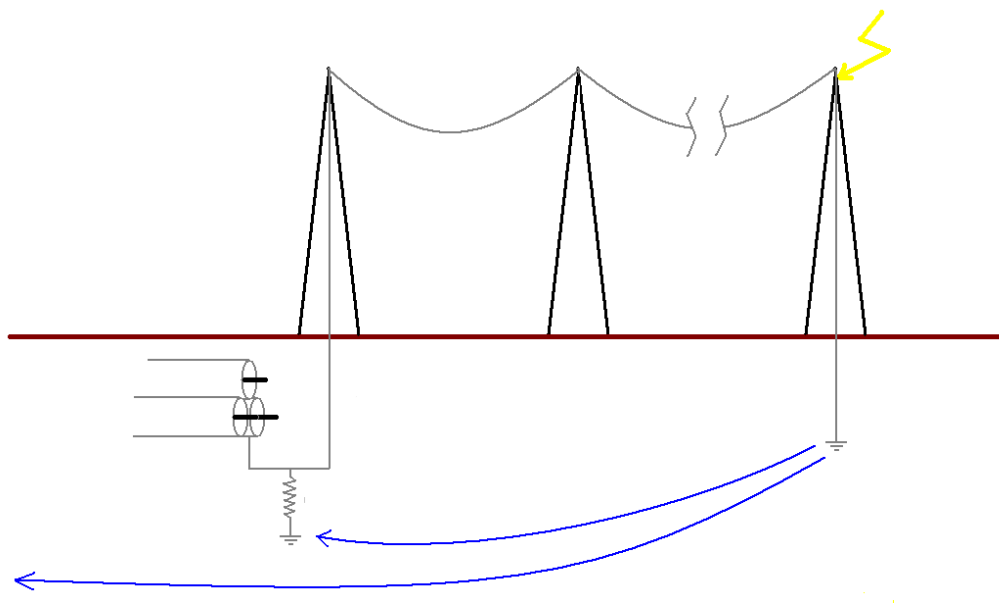


Figura 27 – Falta en apoyo alejado del tramo subterráneo.

En definitiva, la situación que sitúa el problema del lado de la seguridad es sencillamente considerar la falta directa a tierra sin ninguna otra consideración; dicho de otra manera, considerar el cable de tierra con resistencia infinita o inexistente. Si se quiere realizar un cálculo más preciso, siempre se pueden modelar todas las impedancias del tramo aéreo, aunque esto se escapa del objeto de este trabajo.

El esquema eléctrico de lo que ocurre en este caso sería el mostrado en la Figura 28.

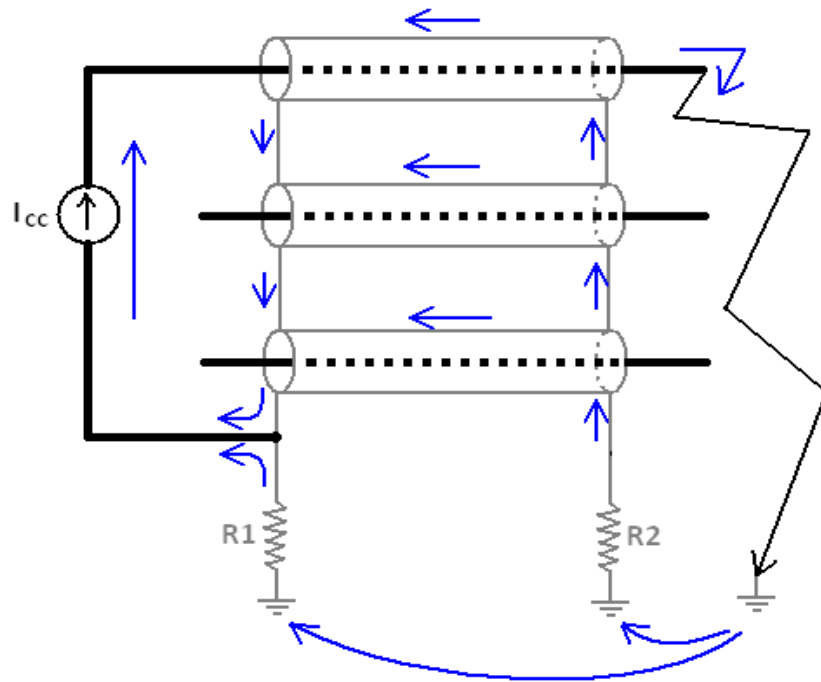


Figura 28 – Cortocircuito monofásico tipo II.

Las fórmulas para el cortocircuito tipo 2 en las mismas condiciones descritas para el cortocircuito anterior son las siguientes.

$$V_{R1} = -R_1 \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$V_{R2} = -R_2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (R_2 - R_1 - R_0) + R_p - jX_{cp} - 2 \cdot jX_m}{3 \cdot (R_0 + R_1 + R_2) + R_p + jX_{cp} + 2 \cdot jX_m} \quad \text{Ecuación 14}$$

$V_{R1} \rightarrow$  Tensión en R1 (V)

$V_{R2} \rightarrow$  Tensión en R2 (V)

$I_{cc} \rightarrow$  Intensidad de la fase en cortocircuito (A)

$\varepsilon \rightarrow$  Fracción de corriente de falta que circula por tierra (adimensional)

$R_0 \rightarrow$  Resistencia inducida entre conductor y pantalla ( $\Omega$ )

$R_p \rightarrow$  Resistencia propia de la pantalla ( $\Omega$ )

$X_{cp} \rightarrow$  Reactancia inducida entre conductor y pantalla de un mismo cable ( $\Omega$ )

$X_m \rightarrow$  Reactancia mutua entre conductor y pantalla de cables diferentes ( $\Omega$ )

### 2.2.3.3. Cortocircuito monofásico tipo III (falta cercana en sifón)

El cortocircuito monofásico tipo III es el que se conoce como “falta cercana en sifón”. Se podría dar en un caso en el que en una línea aérea hubiera un tramo subterráneo entre tramos aéreos, y el cortocircuito se produjera en el apoyo de transición de aéreo a subterráneo, de tal manera que podríamos considerar separadas las tierras del tramo subterráneo y del tramo aéreo. Se muestra el escenario tipo en la Figura 29.

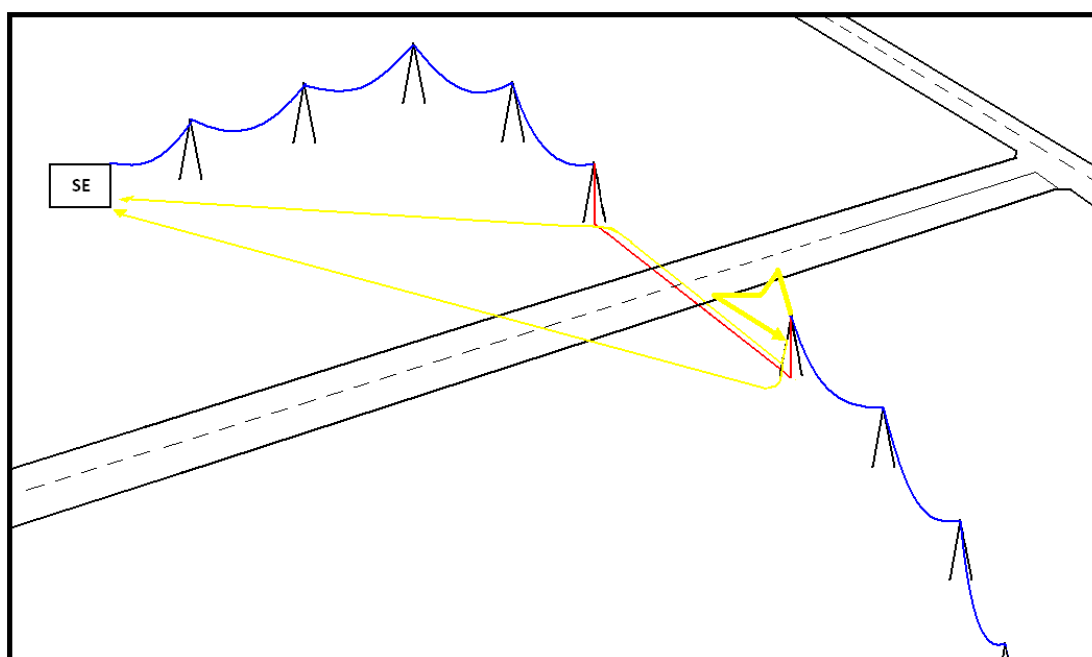


Figura 29 – Falta cercana en sifón.

En esta ocasión una parte de la corriente volverá a la fuente por tierra directamente y la otra lo hará por tierra después de haber pasado a través de las pantallas (o cable de acompañamiento, dependiendo del tipo de conexión). La proporción de una y otra dependerá nuevamente de la relación de impedancias que se encuentre cada camino de retorno. Como en los otros casos, se inserta figura que muestra la corriente de cortocircuito (Figura 30)

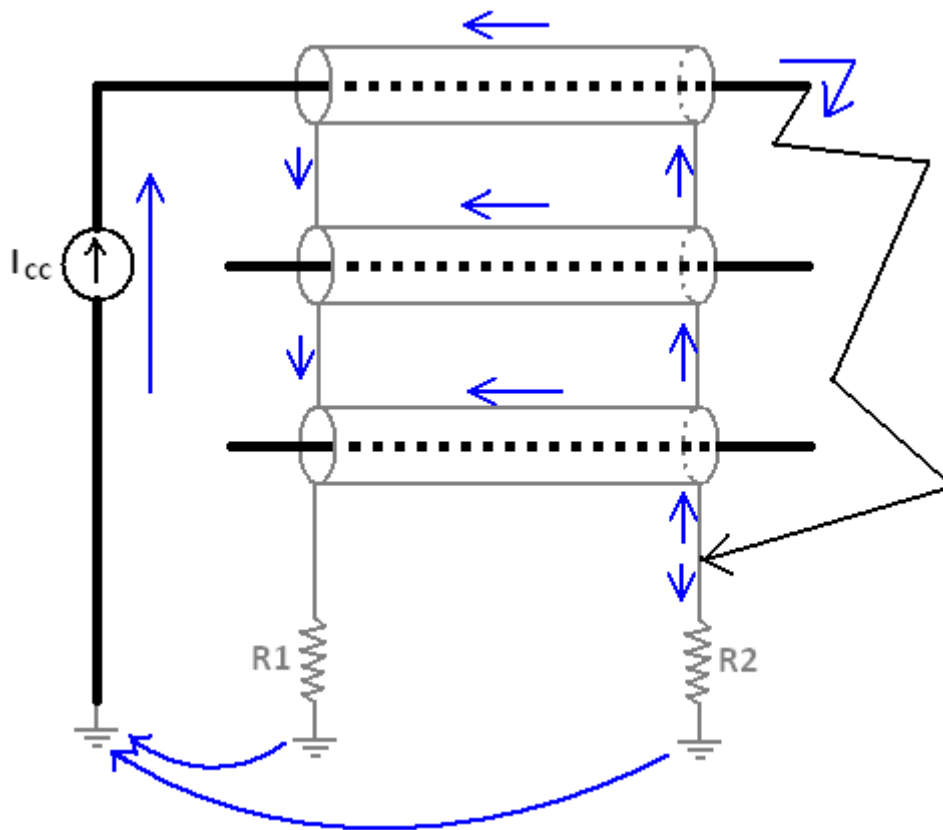


Figura 30 – Cortocircuito monofásico tipo III.

Al circular toda la corriente de retorno por las resistencias de puesta a tierra, la elevación de la tensión en estos puntos puede resultar crítica a la hora de dimensionar las pantallas y sus protecciones.

El lector ya se habrá dado cuenta de que aquí existe cierta similitud con el caso anterior. Aparentemente el escenario mostrado daría lugar a una corriente de retorno por el cable de tierra del tramo aéreo.

Efectivamente, así sería. De hecho, una falta de este tipo sólo podría darse si el tramo aéreo no tuviera cable de tierra o si la conexión de éste estuviera muy deteriorada. En caso contrario, una parte de la corriente retornaría a la fuente por el cable de tierra como se muestra en la Figura 31.

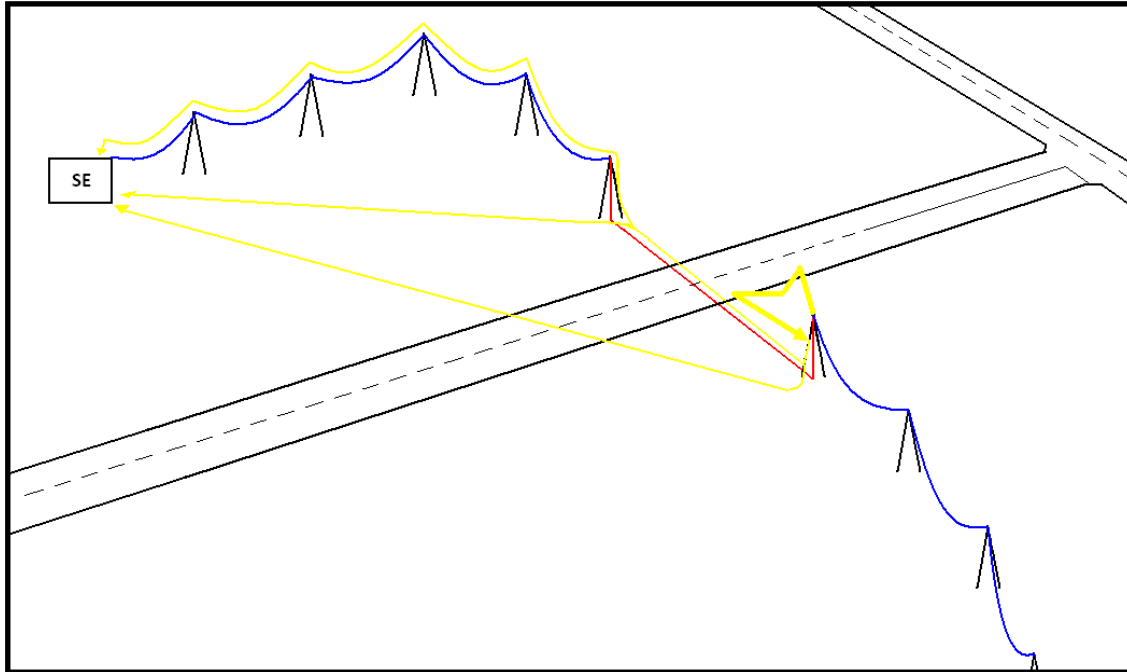


Figura 31 – Falta cercana en sifón con corriente por el cable de guarda.

Las consideraciones que se pueden hacer en este caso son análogas a las realizadas para el cortocircuito tipo II. De hecho, ambos casos son iguales vistos desde el lado contrario. De esta manera, con el fin de realizar un modelado desde el lado de la seguridad, se puede considerar que no hay camino de retorno desde las pantallas hasta la fuente a través del cable de guarda.

Las expresiones de cálculo básico de este tipo de cortocircuito se muestran a continuación.

$$V_{R1} = R_1 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$V_{R2} = R_2 \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (R_1 - R_2 - R_0) + R_p - jX_{cp} - 2 \cdot jX_m}{3 \cdot (R_0 + R_1 + R_2) + R_p + jX_{cp} + 2 \cdot jX_m} \quad \text{Ecuación 17}$$

$V_{R1} \rightarrow$  Tensión en R1 (V)

$V_{R2} \rightarrow$  Tensión en R2 (V)

$I_{cc} \rightarrow$  Intensidad de la fase en cortocircuito (A)

$\varepsilon \rightarrow$  Fracción de corriente de falta que circula por tierra (adimensional)



$R_0 \rightarrow$  Resistencia inducida entre conductor y pantalla ( $\Omega$ )

$R_p \rightarrow$  Resistencia propia de la pantalla ( $\Omega$ )

$X_{cp} \rightarrow$  Reactancia inducida entre conductor y pantalla de un mismo cable ( $\Omega$ )

$X_m \rightarrow$  Reactancia mutua entre conductor y pantalla de cables diferentes ( $\Omega$ )

#### 2.2.3.4. Cortocircuito monofásico tipo IV (falta lejana en sifón)

El cortocircuito monofásico tipo IV es el que se conoce como “falta lejana en sifón”. Se podría dar en un caso en el que en una línea aérea hubiera un tramo subterráneo entre tramos aéreos, y el cortocircuito se produjera en la parte aérea lejos de este tramo, de tal manera que podríamos considerar separadas las tierras del tramo subterráneo y de la subestación. El escenario tipo sería el mostrado en la Figura 32.

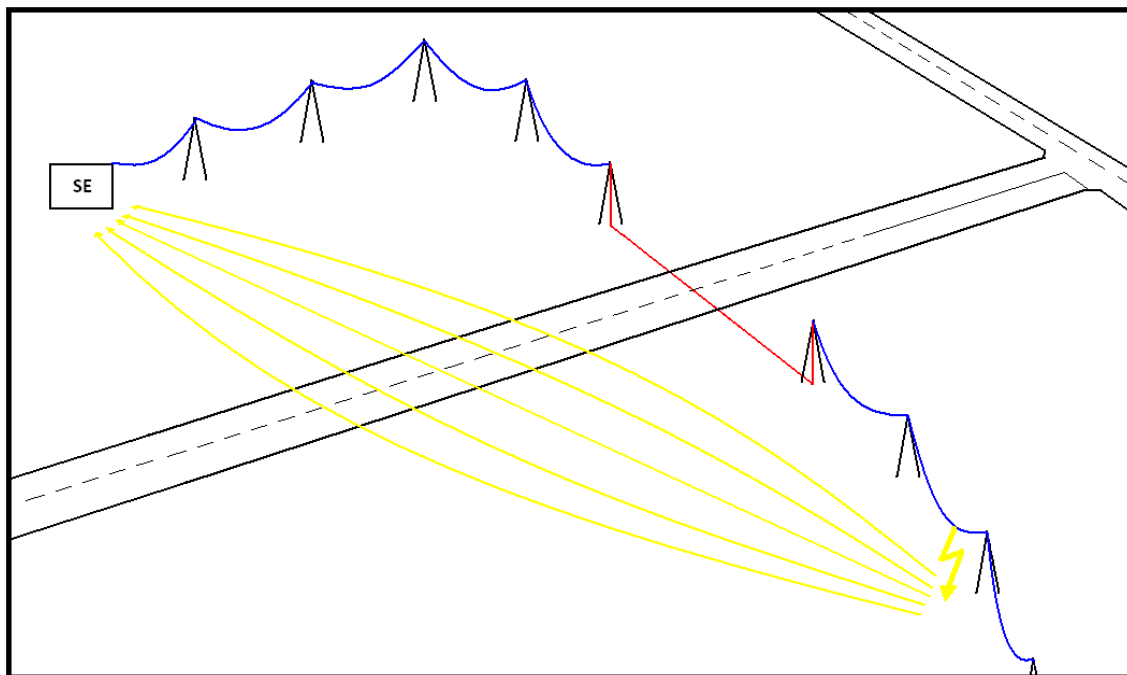


Figura 32 – Falta lejana en sifón.

Se caracteriza porque toda la corriente de cortocircuito retorna a la fuente sin pasar por las pantallas. Las únicas corrientes que hay en las pantallas son las inducidas por la corriente en el conductor donde se produce el cortocircuito. La gran diferencia con los cortocircuitos anteriores es que parte de la corriente de cortocircuito del conductor acababa pasando por las pantallas o cable de acompañamiento y en este caso no. Se

muestran las corrientes en la Figura 33. Téngase en cuenta que en este caso las flechas de corriente por las pantallas no corresponde a la intensidad de cortocircuito.

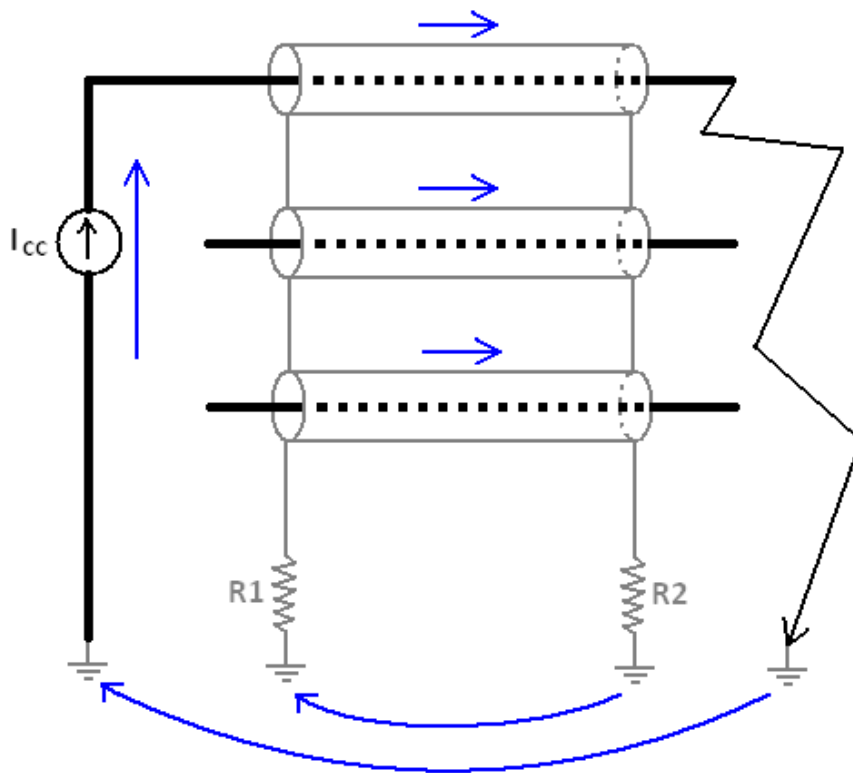


Figura 33 – Cortocircuito monofásico tipo III.

Este caso puede darse cuando las puestas a tierras de las pantallas estén separadas de las que son atravesadas por la corriente de cortocircuito. En rigor, una falta lejana de este tipo no es posible en la red de transporte en España, ya que todos los tramos aéreos van provistos de cable de tierra. Aún así, debido a las consideraciones realizadas en casos anteriores, puede considerarse esta falta como una composición de las ya vistas. Así las cosas, siempre visto desde el lado restrictivo de la mayor seguridad, no habría circulación de corriente por los cables de guarda ni anterior ni posterior al tramo en sifón.

Las expresiones para el cálculo de las tensiones locales en este cortocircuito son las siguientes.

$$V_{R1} = -R_1 \cdot \varepsilon \quad \text{Ecuación 18}$$

$$V_{R2} = R_2 \cdot \varepsilon$$

Ecuación 19

$$\varepsilon = \frac{-3 \cdot R_0 - jX_{cp} - 2 \cdot jX_m}{3 \cdot (R_0 + R_1 + R_2) + R_p + jX_{cp} + 2 \cdot jX_m}$$

Ecuación 20

$V_{R1}$  → Tensión en R1 (V)

$V_{R2}$  → Tensión en R2 (V)

$I_{cc}$  → Intensidad de la fase en cortocircuito (A)

$\varepsilon$  → En este caso es el sumatorio de las corrientes que circulan por las pantallas (A)

$R_0$  → Resistencia inducida entre conductor y pantalla ( $\Omega$ )

$R_p$  → Resistencia propia de la pantalla ( $\Omega$ )

$X_{cp}$  → Reactancia inducida entre conductor y pantalla de un mismo cable ( $\Omega$ )

$X_{cp}$  → Reactancia mutua entre conductor y pantalla de cables diferentes ( $\Omega$ )

### 2.3. Simuladores de circuitos electrónicos basados en SPICE.

SPICE es un acrónimo inglés de “*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*”; es decir, un programa de simulación con énfasis en circuitos integrados.

Con el tiempo se ha convertido en un estándar internacional cuyo objetivo es la simulación de todo tipo de circuitos electrónicos compuestos por componentes discretos tales como resistencias, bobinas, condensadores, transistores, etc.

SPICE nació en el laboratorio de investigación electrónica de la Universidad de California, Berkeley de la mano de Larry Nagel y bajo la dirección de su asesor de investigación, Donald Pederson.

La primera versión se llamó SPICE1 y era un derivado del programa CANCER (acrónimo de “*Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation*”). Hasta ese momento varios simuladores de circuitos eléctricos habían sido desarrollados bajo la tutela del departamento de defensa de los Estados Unidos, tratando de evaluar la radiación de un circuito.

Originalmente, CANCER tenía una licencia sujeta a derechos de autor; pero cuando el director del proyecto original abandonó Berkeley, su sustituto en el puesto (el profesor

Donald Pederson) consiguió que el programa fuera reescrito. Así pudo poner esta nueva versión del programa, llamada SPICE1, bajo dominio público.

- R → Resistencia
- L → Bobina
- C → Condensador
- I → Fuente independiente de intensidad
- V → Fuente independiente de tensión
- E → Fuente de tensión dependiente de tensión
- F → Fuente de intensidad dependiente de intensidad
- X → Subcircuito definido por el usuario

La estructura de cada línea de código, en un componente simple, sería la siguiente:

```
Rnombre nudo1 nudo2 valor
```

donde habría una resistencia llamada “nombre” conectada entre los nudos “nudo1” y “nudo2” de valor igual a “valor”.

Al final del archivo aparecen algunas instrucciones que indican parámetros de simulación. Los textos acaban siempre con la sentencia “.end”. Cualquier dato escrito posteriormente no será tenido en cuenta por el simulador.

### 3. MODELADO DE LAS TENSIONES INDUCIDAS EN CABLES AISLADOS.

El modelo empleado en este trabajo se ha ido describiendo, en parte, a la vez que se explicaba la teoría asociada (capítulo 2.2). En este punto se hace referencia directa a la forma de modelar cada componente del circuito.

A continuación se desglosa con detalle el modelo que se ha decidido implementar.

#### 3.1. El conductor.

El modelo de un conductor es ampliamente conocido y ha sido desarrollado en numerosos libros de texto. Por ejemplo, en [3] John J. Grainger y William D. Stevenson, a partir del punto 4.1, describen las impedancias serie que suelen ser objeto de cálculo en líneas aéreas. Para el caso de líneas subterráneas, la impedancia serie podría ser calculada de forma análoga. Sin embargo, en este caso se va a prescindir de todas aquellas consideraciones referentes a la inductancia interna de un conductor debida al flujo interno, y esto se justificará debidamente.

El objeto de este trabajo es fundamentalmente el cálculo de las tensiones inducidas en las pantallas de los cables y su relación (desfase) entre unas corrientes/tensiones y otras. Las corrientes que atraviesen las pantallas, dependiendo de cada caso, tendrán su origen en la propia fuente de cortocircuito directamente, o bien en las tensiones inducidas debidas a las corrientes que atraviesan los conductores.

Sea cual sea el caso, el punto de partida para resolver este problema es la corriente por los conductores y no la tensión de la fuente, teniendo ésta, al fin y al cabo, un papel puramente testimonial en el caso que nos ocupa.

Dicho de otra manera, puesto que son las corrientes quienes inducen tensión en las pantallas, lo mismo da que la tensión de línea sea 22 V que 220 kV, ya que el resultado de la tensión inducida para una misma corriente será prácticamente idéntico.

A continuación se muestran resultados de una simulación de un tramo de circuito con conexión tipo SP y cable de acompañamiento. La simulación corresponde a un cortocircuito trifásico con una alimentación de 220 kV. Se muestran las tensiones eficaces en los extremos de las pantallas. A la derecha aparece la misma simulación (misma corriente y configuración) con una tensión de fuente de 22 kV. La reducción de un factor 10 en la tensión de entrada no origina apenas ningún cambio en los valores de las tensiones inducidas.

kV	Alimentación 220 kV	Alimentación 22 kV
Tensión absoluta en pantalla 1	5,878	5,887
Tensión absoluta en pantalla 2	4,938	4,934
Tensión absoluta en pantalla 3	5,996	5,990

Tabla 1 – Comparativa de tensiones inducidas con diferente nivel de tensión de línea.

De hecho, las primeras versiones del programa resultante de este trabajo incluían las inductancias propias de los conductores, pero al comprobar su nulo efecto en el objeto de estudio, se eliminaron.

En definitiva, los conductores se modelarán únicamente por su resistencia óhmica. Esta resistencia, ciertamente, tampoco tiene mucha importancia en el caso que nos ocupa, pero a efectos de mejorar el funcionamiento del simulador es conveniente incluirla.

Para ello, el modelo elegido para un conductor es de dos resistencias en serie. Se ponen dos resistencias en lugar de una sola para así poder tener acceso a un punto en el interior del conductor. Este punto se utilizará para el modelado del condensador que representa la capacidad parásita del cable.

Además, cada conductor presentará al principio (lado izquierdo) una fuente de tensión continua de valor 0V. Esto puede parecer absurdo, pero es de tal importancia que la simulación no funcionaría sin esta fuente.

La fuente de tensión al inicio del conductor representa un sensor de corriente. Esto se hace de esta manera porque en lenguaje SPICE sólo se puede hacer referencia a las

corrientes que circulan por fuentes de tensión. Es decir, para todos los efectos esta fuente es un sensor de corriente. Por tanto, atendiendo a lo descrito en los párrafos anteriores, el modelo de conductor quedaría como se muestra en la Figura 34.

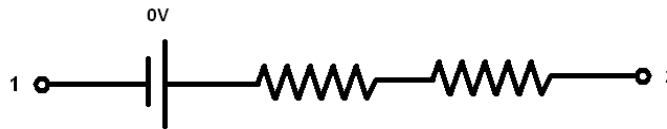


Figura 34 – Modelo de conductor utilizado.

Evidentemente, no hace falta decir que el valor de cada una de las resistencias será igual al valor de la mitad del valor resistivo del tramo existente.

Esta parte es tremendamente sencilla y, aunque normalmente habría que hacer ciertas consideraciones sobre la resistencia en continua, en alterna y en función de la temperatura, en este caso no es aplicable por los motivos citados anteriormente.

### 3.2. Las tensiones inducidas.

Para inducir tensión en un conductor dado, sea pantalla o cable de acompañamiento, deberá haberse calculado previamente la impedancia mutua entre el elemento inductor y el elemento que recibe la inducción.

Este cálculo ha sido descrito en el apartado correspondiente y se realiza mediante la fórmula de Carson (Ecuación 1). Teniendo la impedancia mutua y sabiendo la corriente que circula por el conductor, se calcula la tensión inducida sin más que multiplicar una por otra. En esta multiplicación, al hablar de magnitudes fasoriales, es importante tanto la magnitud como la fase.

Aquí es donde cobra importancia la fuente de tensión que ha sido usada como sensor en el conductor. Si se modela un pequeño circuito independiente de todo lo demás, en el que se introduce una fuente de corriente dependiente de la corriente que pasa por el conductor, y con ganancia unitaria, entonces se tendrá vía libre para utilizar esa corriente sin afectar al resto del circuito.

A partir de aquí se introduce la impedancia calculada y se obtiene, en los bornes de ésta, la tensión inducida. Gráficamente sería lo que se muestra en la Figura 35.

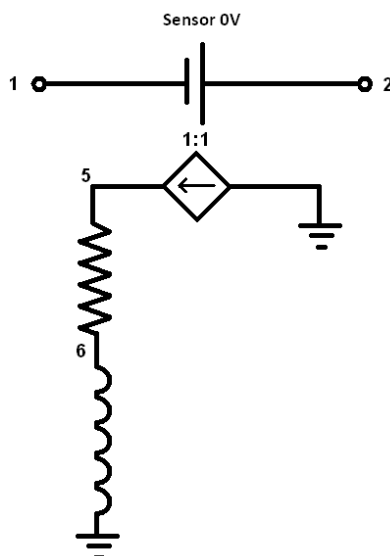


Figura 35 – Fuente de corriente dependiente de fuente de tensión utilizada como sensor.

Así, si la impedancia utilizada es unitaria (por unidad de longitud), se tendrá la ventaja de tener acceso rápido a este dato que normalmente suele ser de interés.

Finalmente, para inducir la tensión en el elemento receptor, bastará con incluir una fuente de tensión dependiente de la tensión en la impedancia mutua calculada (entre nudos 5 y tierra según figura anterior) con magnitud de la ganancia igual a la longitud de la línea.

En definitiva, el modelo total del sistema para inducir tensión se muestra a continuación (en la Figura 36). La fuente de tensión que hace de sensor estaría en un elemento (el conductor), la impedancia mutua con la fuente de intensidad estarían aparte de cualquier otro elemento del circuito, y la fuente de tensión inducida estaría ubicada en un tercer elemento (la pantalla)



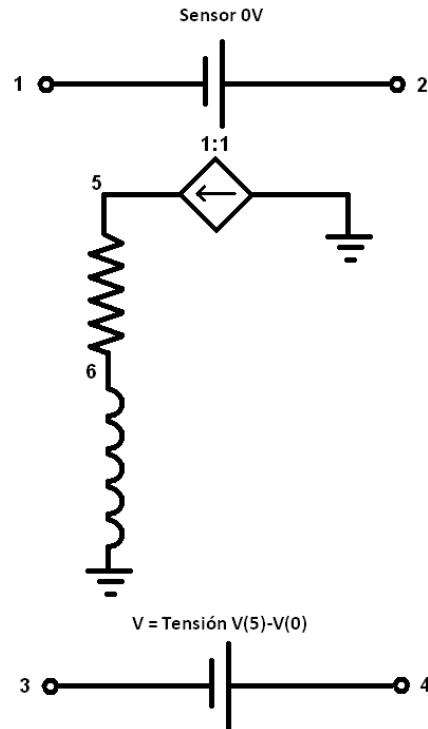


Figura 36 – Modelo eléctrico completo de la tensión inducida en el elemento afectado por la impedancia mutua indicada, debido a la corriente que atraviesa el sensor.

### 3.3. Las pantallas.

Los apartados anteriores dan pie a modelar la pantalla, ya que no es más que una combinación de los diferentes elementos explicados.

Por una parte se utilizarán dos resistencias para modelar el efecto resistivo y dos inductancias para la inductancia propia de la pantalla. En este aspecto el modelado de la pantalla difiere sustancialmente del modelado del conductor. Aquí sí que es importante incluir esta inductancia porque puede afectar notablemente al resultado buscado, ya que toda la corriente que pase por la pantalla atravesará esta inductancia.

Las resistencias a incluir en el modelo deberán ser las resistencias finales; es decir, la resistencia de la pantalla a 50 Hz y a la temperatura de servicio, considerando los factores de corrección que el usuario estime oportuno.

En las hojas de características de los cables se suele dar la resistencia de la pantalla a 20°C y en continua. Es sencillo a partir de ésta y del resto de datos que aparecen en las hojas de características calcular la resistencia a temperatura de servicio en alterna. Es habitual que las personas que trabajan asiduamente con estos parámetros ya tengan un conjunto de valores estandarizados sin necesidad de tener que ir a buscarlos a las hojas de características. Este es nuestro caso, de manera que en este trabajo es éste el punto de partida, entendiendo que no habría dificultad en hallar estos valores si no se cuenta con ellos.

Por otra parte, como comentario oportuno, hay que destacar que la tensión en la pantalla no suele ser especialmente sensible a este valor. De hecho, a la vista está el caso de una conexión de pantallas tipo SP, que al no haber corriente por la pantalla, la resistencia de ésta no tiene ninguna importancia. Evidentemente no todos los casos son como el de la conexión SP.

Como en el caso del conductor, se ubicará un sensor en el origen de la pantalla para poder hacer referencia a la corriente que la atraviesa.

Finalmente, habrá que insertar todas las fuentes de tensión que sean necesarias con tal de modelar las tensiones inducidas. Esto se verá con más detalle en el apartado en el que se describe el cable completo. Por el momento, en este caso se incluye el ejemplo en la Figura 37 de una pantalla de un simple circuito sin cable de acompañamiento. En ella se pueden apreciar las fuentes de tensión que modelan las tensiones inducidas por las corrientes que atraviesan las tres fases (F1, F2 y F3), y las tensiones inducidas por las corrientes que atraviesan las otras dos pantallas (P2 y P3). La inductancia propia ya se modela en las bobinas.

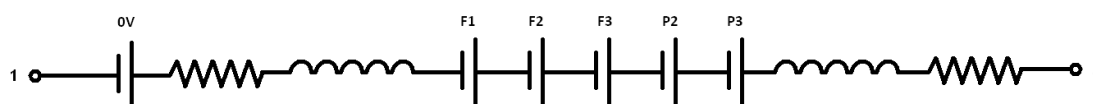


Figura 37 – Modelo de una pantalla en un simple circuito sin cable de acompañamiento.

### 3.4. La capacidad parásita del aislamiento.

Ciertamente la capacidad del cable tampoco es un elemento muy importante a la hora de calcular las tensiones inducidas. Cierto es que existirá esa corriente capacitiva entre conductor y pantalla, pero no es menos cierto que el orden de magnitud de las corrientes capacitivas, dadas las longitudes de los tramos considerados, es poco importante respecto a las corrientes por los conductores. Tanto es así que en el primer método de cálculo expuesto en [4] donde se indica que el hecho de ignorar estas corrientes es la primera de las simplificaciones común a todos los métodos de cálculo.

Una capacidad típica de un cable de cobre de 2000 mm<sup>2</sup> de sección con una pantalla de 250 mm<sup>2</sup> podría tener una capacidad del orden de 0,3  $\mu\text{F}/\text{km}$ , lo que supone una reactancia capacitiva a 50 Hz de unos 12,7 M $\Omega/\text{km}$ . Con estos valores es fácil ver que la corriente capacitiva con tensiones de línea de 220 kV será del orden de 10 mA/km, lo cual no parece que vaya a ser muy significativo para el cálculo de las tensiones en la pantalla.

Aún así, esta corriente existe y podría ganar importancia en otros casos y, al fin y al cabo, ya se deja preparado el modelo para futuros trabajos en los que sea más relevante; por ejemplo, para el cálculo de las pérdidas de potencia.

Sea como sea, debido a dificultades del simulador para llevar a cabo simulaciones con condensadores convencionales, se ha optado por poner un modelo avanzado de condensador que incluye, además de la propia capacidad, otras capacidades, inductancias y resistencias, y que facilita la simulación.

Los valores de estos otros componentes se seleccionan cuidadosamente de forma proporcional a la capacidad a modelar, de manera que el valor del módulo sea aproximadamente del 95% del que sería si sólo se pusiera un condensador, y el valor del ángulo imponga un desfase de 78° en lugar de los 90° ideales.

Esto se corresponde más con una capacidad parásita real, a la que se le consideran las pérdidas resistivas. No está dentro del alcance de este proyecto computar estas

pérdidas, pero como ya se ha comentado, se deja preparado el modelo para mejorarlo y utilizarlo en futuros trabajos.

En definitiva, el modelo del condensador utilizado es el de la Figura 38 (este modelo lo puede incorporar el programa LTSpice sustituyendo al modelo básico):

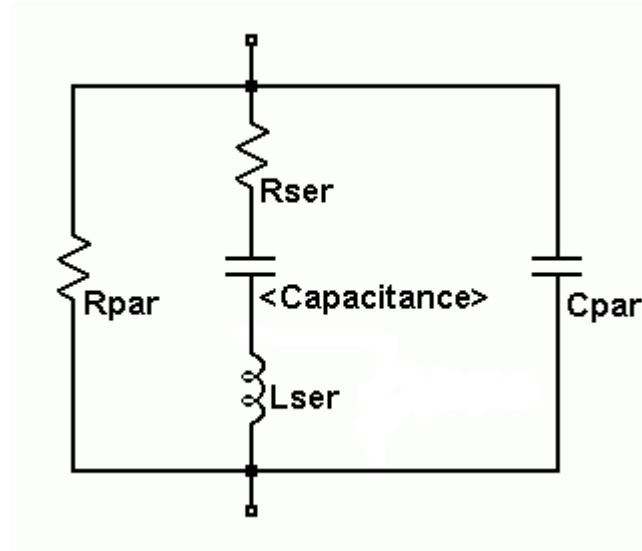


Figura 38 – Modelo de condensador avanzado.

Los valores seleccionados para los componentes se calculan según las expresiones que se muestran a continuación, que han sido seleccionadas con los objetivos descritos anteriormente.

$$L_{\text{ser}} = \frac{1}{1.5 \times 10^5 \cdot \pi^2 \cdot C} \quad R_{\text{ser}} = \frac{1}{500 \cdot \pi \cdot C} \quad C_{\text{par}} = \frac{C}{2 \times 10^{22}} \quad R_{\text{par}} = \frac{3 \times 10^6}{\pi \cdot C} \quad \text{Ecuación 19}$$

$L_{\text{ser}} \rightarrow$  Inductancia serie (H)

$R_{\text{ser}} \rightarrow$  Resistencia serie ( $\Omega$ )

$C_{\text{par}} \rightarrow$  Capacidad paralela (F)

$R_{\text{par}} \rightarrow$  Resistencia paralela ( $\Omega$ )

$C \rightarrow$  Capacidad del condensador original (F)

### 3.5. El cable en circuitos simples y múltiples.

En este momento ya estamos en disposición de modelar el cable completo. El modelo de un cable de potencia en un simple circuito sin cables de acompañamiento sería el que se muestra en la Figura 39<sup>7</sup>.

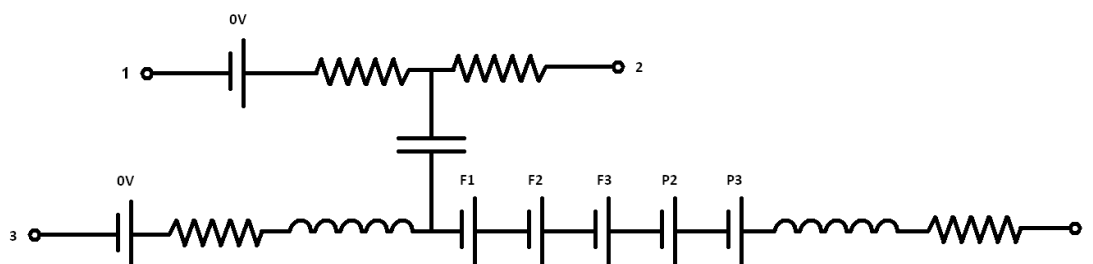


Figura 39 – Modelo de cable de potencia en simple circuito sin cable de acompañamiento (I)

En la Figura 39 falta algo; falta lo más importante que es determinar el valor de las fuentes de tensión. Como ya hemos visto esto forma parte del propio modelado y no es, por tanto, un parámetro que se asigne directamente antes de realizar la simulación.

Así pues, de forma rigurosa, no se puede decir que lo presentado en la Figura 39 sea realmente el modelo de un cable, ya que forzosamente está asociado a las impedancias mutuas de acoplamiento con todos los elementos que inducen tensión. Es decir, lo que se muestra en la Figura 40.

<sup>7</sup> La capacidad parásita se muestra como un condensador simple.

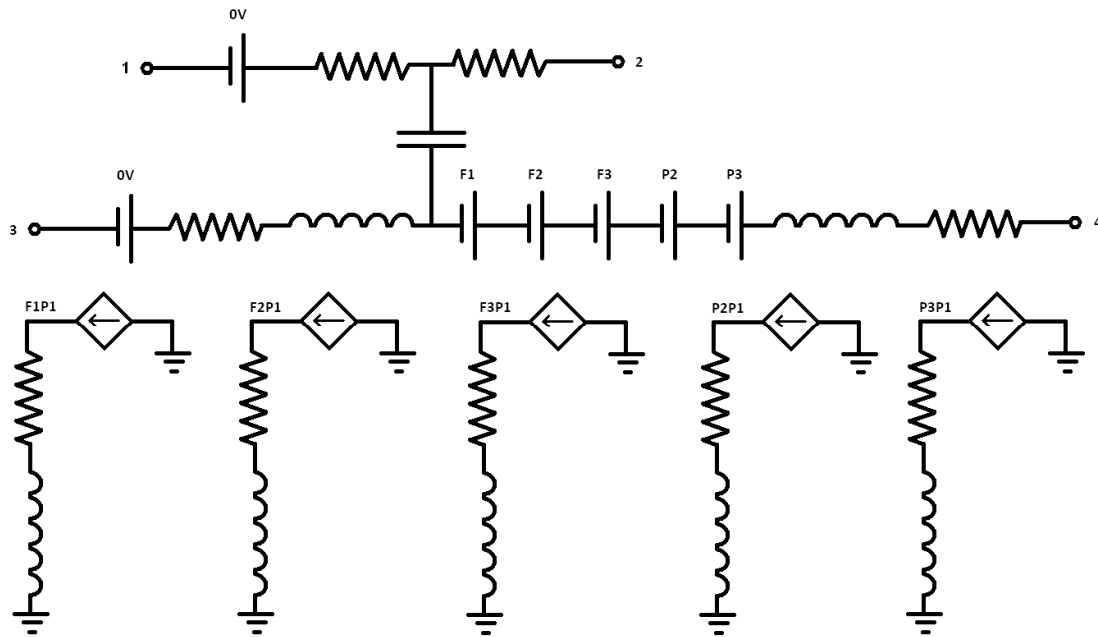


Figura 40 – Modelo de cable de potencia en simple circuito sin cable de  
acompañamiento (II)

La nomenclatura utilizada en este caso para la comprensión de la explicación indica los dos elementos entre los cuales se ha plasmado la impedancia mutua. Es decir, F1P1 indica que en ese pequeño circuito está la inductancia mutua entre la fase (F) 1 y la pantalla (P) 1. Se muestran los circuitos correspondientes a las impedancias mutuas entre todas las fases y las dos pantallas restantes.

Aún así sigue faltando algo. Los circuitos de tensiones inducidas implican ciertas fuentes de corriente dependientes de corriente; de manera que el modelo de un cable depende también de los otros cables que estén cercanos a él; es decir, lo que se muestra en la Figura 41 (en la página siguiente).

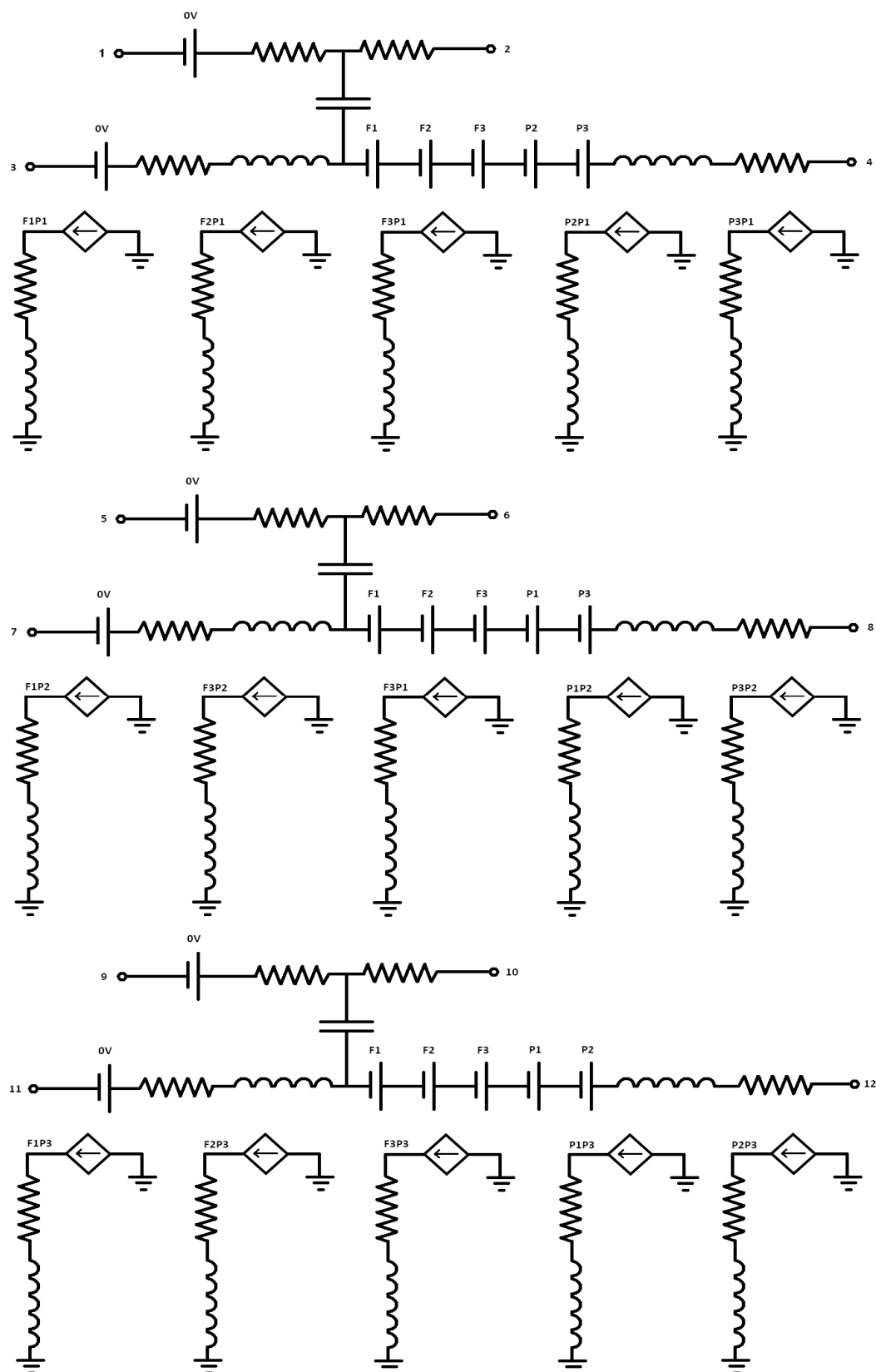


Figura 41 – Modelo de cables de potencia en simple circuito sin cable de  
acompañamiento (III)

Todos los pequeños circuitos de tensiones inducidas son diferentes entre sí. Cada uno de ellos corresponde a un elemento de la matriz de impedancias mutuas. De hecho, la propia distribución del dibujo indica de forma aproximada el elemento al que se hace referencia. Así pues, por filas de arriba hacia abajo se hace referencia a la pantalla 1, 2 y 3 respectivamente; mientras que por columnas se hace referencia a la fase 1, fase 2, fase 3 y después las dos pantallas restantes, que serán la pantalla 2 y pantalla 3 cuando se compute la pantalla 1, la pantalla 1 y pantalla 3 cuando se compute la pantalla 2, etc.

En caso de que en este circuito existiera un cable de acompañamiento, su modelado sería igual al de las pantallas de la figura anterior; es decir, además de tener un sensor, un par de resistencias y un par de inductancias propias, debería tener una fuente de tensión inducida por cada fase y pantalla, por lo tanto seis fuentes de tensión.

Además, todas las pantallas deberían añadir una fuente de tensión más, que modelaría la tensión inducida en la pantalla debida a la corriente por el cable de acompañamiento. Evidentemente, cada fuente de tensión estaría asociada a un pequeño circuito formado por la impedancia mutua entre el cable de acompañamiento y la pantalla en cuestión, y la fuente de corriente dependiente de la corriente por el cable de acompañamiento.

Para un simple circuito con un cable de acompañamiento hay que poner seis fuentes de tensión en cada rama que modela una pantalla. En caso de que tuviéramos un doble circuito, todas las fases, pantallas y cables de acompañamiento del circuito 2 inducirían tensión en todos los elementos (pantallas y cables de acompañamiento) del circuito 1 y viceversa.

Así pues, en el caso de tener dos dobles circuitos con cable de acompañamiento, habría que poner en cada pantalla trece fuentes de tensión (las tres fases de los dos circuitos, las dos pantallas restantes del propio circuito, las tres pantallas del otro circuito y los dos cables de acompañamiento)



En definitiva, el modelado de un circuito en caso de tener un doble circuito no se obtiene sencillamente replicando dos veces el modelo de un simple circuito, sino que cambia y crece con rapidez.

A título de comentario, si se ponen nueve circuitos en paralelo con doble cable de acompañamiento cada uno (esto es lo máximo que soporta el programa desarrollado) habría en cada pantalla 71 fuentes de tensión. A estos efectos hay que tener en cuenta que a medida que aumenta la distancia entre circuitos disminuye el acoplamiento magnético hasta tal punto que puede considerarse que no están acoplados, de manera que le corresponde al usuario decidir si hacer uso de este esfuerzo de cálculo, ya que podría ser que no aportase más de lo que pudiera aportar simular, por ejemplo, tres circuitos.

### 3.6. La conexión de las pantallas a tierra.

A lo largo de toda la teoría vista anteriormente se han ido mostrando figuras de circuitos eléctricos que daban ya una clara muestra de lo que se pretende hacer. Al fin y al cabo, la conexión de las pantallas a tierra no es más que las condiciones de contorno del problema (como se ha visto en los cálculos teóricos)

Así pues, no vamos a extendernos en este aspecto. Veamos cada tipo de conexión:

La conexión de las pantallas tipo *solid bonding* se realiza conectando las pantallas directamente a tierra. Como en la realidad hay una resistencia de puesta a tierra que no es despreciable, esta conexión se modela sencillamente con una resistencia.

En la Figura 42, por simplicidad, sólo se ha representado parte de las tres pantallas y en ellas se han suprimido las fuentes de tensión inducida.

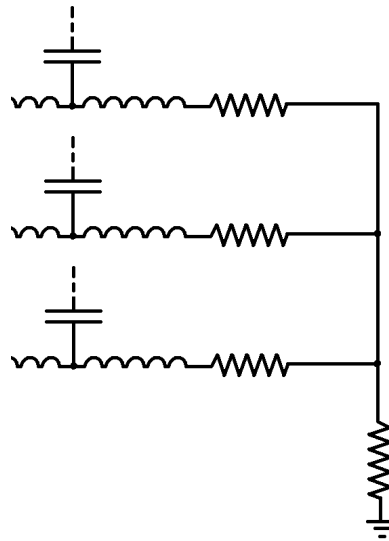


Figura 42 – Conexión SB. Las tres pantallas juntas a la resistencia de puesta a tierra.

La conexión de pantallas tipo SP tiene un extremo a través de descargadores. Los descargadores son resistencias muy elevadas en funcionamiento normal. Idealmente, una pantalla conectada a un descargador es un circuito abierto. En este trabajo, con el fin de evitar ciertos problemas en la simulación, en lugar de dejarlo en circuito abierto se ha preferido conectar las pantallas a una resistencia de valor muy elevado ( $1\text{M}\Omega$ )

Cabe destacar que hay algunos simuladores Spice que no permiten dejar nudos abiertos. Este no es el caso del programa que se ha usado para este trabajo, el LT Spice IV; pero aún así, se ha decidido conectar la citada resistencia para que el nudo no quede flotante (Figura 43).

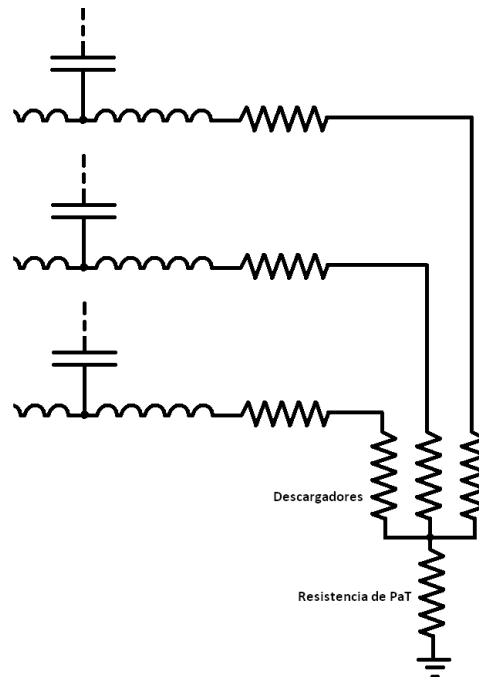


Figura 43 – Conexión SP a través de resistencias de valor muy elevado modelando descargadores.

La conexión tipo *cross bonding* (CB) también establece una conexión a tierra a través de descargadores. En este caso, si no se pone ninguna resistencia el nudo no queda flotante. Recordemos que en un CB se realiza un cruzamiento de las pantallas de manera que cada pantalla de un cable del primer tramo está conectada a una pantalla de otro cable del segundo tramo.

Por tanto, además de realizar la citada trasposición, no se hace ninguna otra consideración respecto a la conexión de pantallas en este caso; es decir, no se conectan a tierra en modo alguno.

Aunque realmente no hay ningún otro tipo de conexión de las pantallas a tierra que no sea directamente o a través de descargador. Cabe destacar que en el programa desarrollado se da otra opción, que consiste en conectar directamente la pantalla de un tramo a la pantalla del tramo siguiente. Esto, a todos los efectos, es como si no hubiera un punto de conexión; pero puede resultar de utilidad para cuando se modelan dos circuitos paralelos y uno de ellos cambia la configuración en un punto

mientras que el otro permanece igual. La conexión de las pantallas del que permanece igual no queda alterada.

### 3.7. Carga, alimentación y cortocircuitos.

En este tipo de cálculos el parámetro de salida es la corriente, ya que tanto para cálculos de funcionamiento de estado estacionario como para cortocircuitos es éste el primer parámetro fundamental que hay que conocer.

Así pues, la alimentación se ha modelado como tres fuentes de corriente en estrella desfasadas  $120^\circ$  eléctricos con las magnitudes que correspondan según la simulación.

El neutro de la estrella se conectará a la tierra local de las pantallas; es decir, se considera (en principio) que la tierra local de las pantallas y de las fuentes (la subestación) es la misma. Esta disposición se muestra gráficamente en la Figura 44.

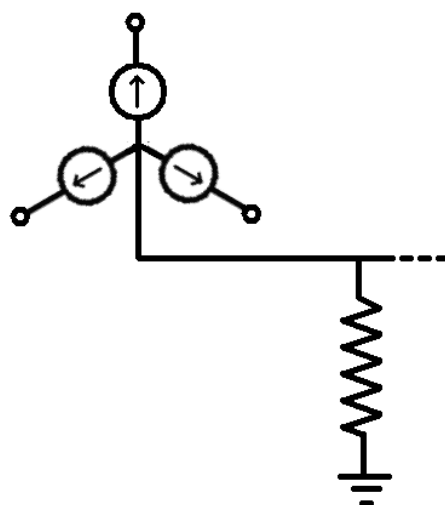


Figura 44 – Modelo de fuente de alimentación trifásica conectada a tierra.

En esta situación, las cargas se modelarán de tal manera que la tensión en bornes sea la nominal. Es cierto que la tensión de los conductores de potencia no desempeña un papel relevante en el tipo de problema a resolver, pero no cuesta nada poner un valor de resistencia tal que ocasione la caída de tensión requerida.

Al igual que en el caso de las fuentes, el neutro de la carga trifásica se conectará a la misma tierra que las pantallas; es decir, se considera que la tierra local de las pantallas y de la carga es la misma (Figura 45).

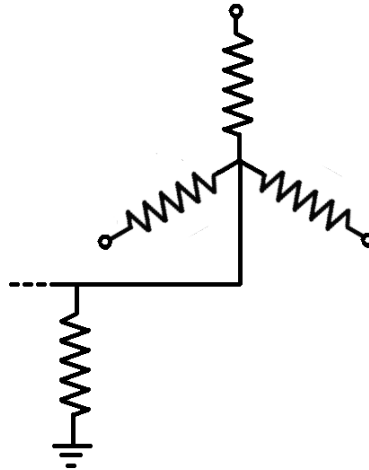


Figura 45 – Modelo de carga trifásica conectada a tierra.

Vistas las fuentes de alimentación, los cables y las cargas, poco queda de modelar más allá de los cortocircuitos.

#### Falta trifásica:

No hay prácticamente nada que comentar aquí. La falta trifásica se modela poniéndole a las fuentes de tensión alterna la amplitud requerida para que pase la corriente RMS de cortocircuito.

Como ya se ha comentado, los valores de las cargas se reducen en la misma medida que se incrementa la corriente para que las tensiones permanezcan en sus valores nominales.

#### Falta monofásica cercana en semi-sifón:

Este caso, al igual que el anterior, también presenta un modelado inmediato a partir de manipular adecuadamente el valor de la fuente de corriente y de la carga de la correspondiente fase.

Esto ocurre de esta manera porque en el modelado básico, como se ha dicho anteriormente, la tierra local de las pantallas se corresponde con las tierras de las subestaciones extremas; es decir, de la carga y de las fuentes.

Así pues, el modelado de este cortocircuito consiste en incrementar la amplitud de la fuente de corriente en la fase donde está el cortocircuito y reducir en la misma proporción la carga de dicha fase.

#### Falta monofásica lejana en semi-sifón:

En la falta monofásica lejana en semi-sifón, en el caso más desfavorable toda la corriente de cortocircuito se inyecta directamente al terreno, pero el usuario quizás tendrá interés en modelar no sólo el caso más desfavorable (siempre recomendable) sino otros casos no tan restrictivos si se tiene conocimiento de que la falta no puede considerarse absolutamente lejana.

Así pues, el modelado se hace de tal manera que manejando el factor de reducción de falta lejana entre 0 y 1 puedan simularse todos los casos. El circuito es el de la Figura 46.

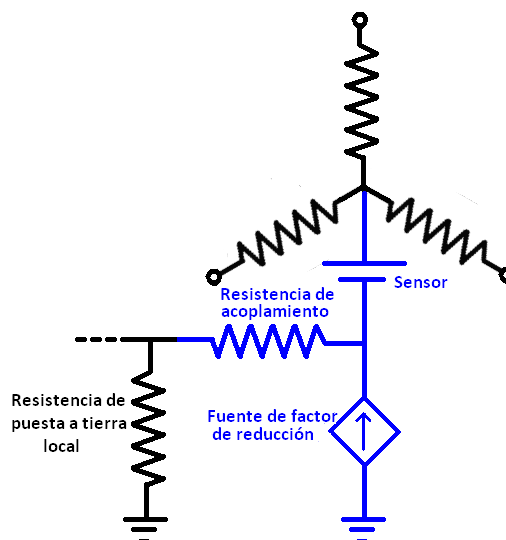


Figura 46 – Modelado de falta lejana.

Se inserta una fuente de tensión de 0V en el neutro de la carga a modo de sensor. Se inserta entre el sensor y tierra una fuente de corriente dependiente de la corriente que pasa por el sensor, con una ganancia comprendida entre 0 y 1.

Si la ganancia de la fuente dependiente es 1, entonces toda la corriente que circula por el neutro es derivada a tierra, conformándose así el modelado de falta lejana. Si el valor de la ganancia de la fuente dependiente es 0, entonces toda la corriente que circula por el neutro se inyecta en la tierra local del tramo subterráneo a través de una resistencia de acoplamiento de valor despreciable, modelándose así una falta cercana.

Los infinitos valores intermedios es la herramienta de que dispone el usuario para modelar su caso concreto.

#### Falta monofásica cercana en sifón:

En la teoría vista en capítulos anteriores se ha comentado que el efecto sifón es similar al efecto lejano, pero visto desde el lado contrario.

Efectivamente, en este tipo de falta toda la corriente de cortocircuito que regresa a la fuente lo hace directamente desde tierra (o desde la tierra local de la subestación) y no

desde la tierra local del tramo subterráneo. Así pues, el modelado podrá ser simétrico al anterior. Se muestra en la Figura 47.

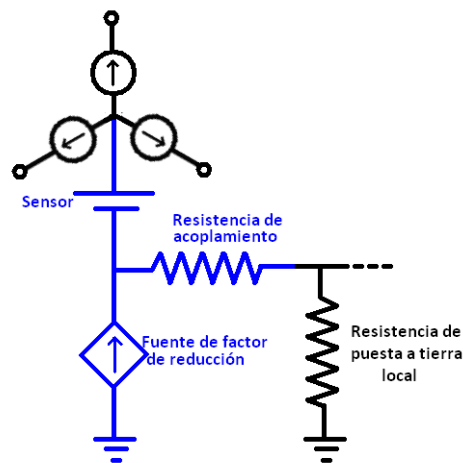


Figura 47 – Modelado de falta en sifón.

Asimismo, al igual que en el caso anterior, se dota al programa de la posibilidad de insertar un factor reductor de efecto sifón entre 0 y 1, que es directamente la ganancia de la fuente. Toda la corriente que no se inyecte mediante esta fuente tendrá que retornar por las pantallas o por la puesta a tierra de éstas, ponderando así el efecto sifón.

Si la ganancia de la fuente dependiente es 1, entonces se tiene una falta en sifón pura. Si la ganancia de la fuente es 0, entonces se tiene una falta en semi-sifón pura.

#### Falta monofásica lejana en sifón:

El modelado de este tipo de falta será una combinación de las dos anteriores. Sencillamente se insertarán en el modelo los dos subcircuitos recién explicados del mismo modo que en los casos vistos anteriormente, con el fin de modelar el efecto de falta lejana y el efecto sifón.

Ambas, como en el caso anterior, podrán tener su factor de reducción del efecto que modelan.



#### 4. SOFTWARE DESARROLLADO PARA LA SIMULACIÓN DE TENSIONES.

El software desarrollado ha sido generado en VBA para Excel. Su uso es muy intuitivo y por este motivo las explicaciones aquí aportadas no van a ser muy extensas.

Para usarlo hay que tener instalado el Excel y el programa gratuito de simulación LT Spice IV<sup>8</sup>.

Al abrirlo hay que recordar permitir las macros; si no, no funcionará.

La pantalla de inicio es que vemos en la Figura 48:

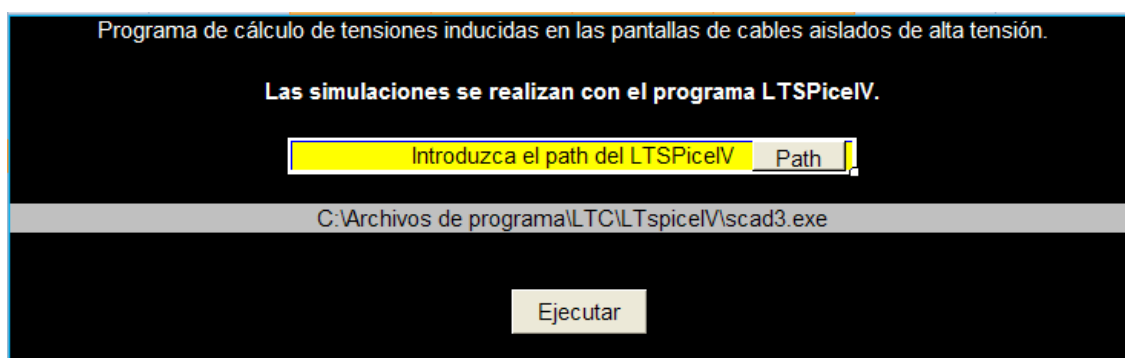


Figura 48 – Pantalla de inicio al hacer doble clic sobre el archivo de Excel.

Lo único que se puede hacer aquí es poner el path (está puesto aquel en el que se instala por defecto el LT SPice IV) y ejecutar el programa.

La pantalla principal es la siguiente (Figura 49):

<sup>8</sup> <http://www.linear.com/designtools/software/>

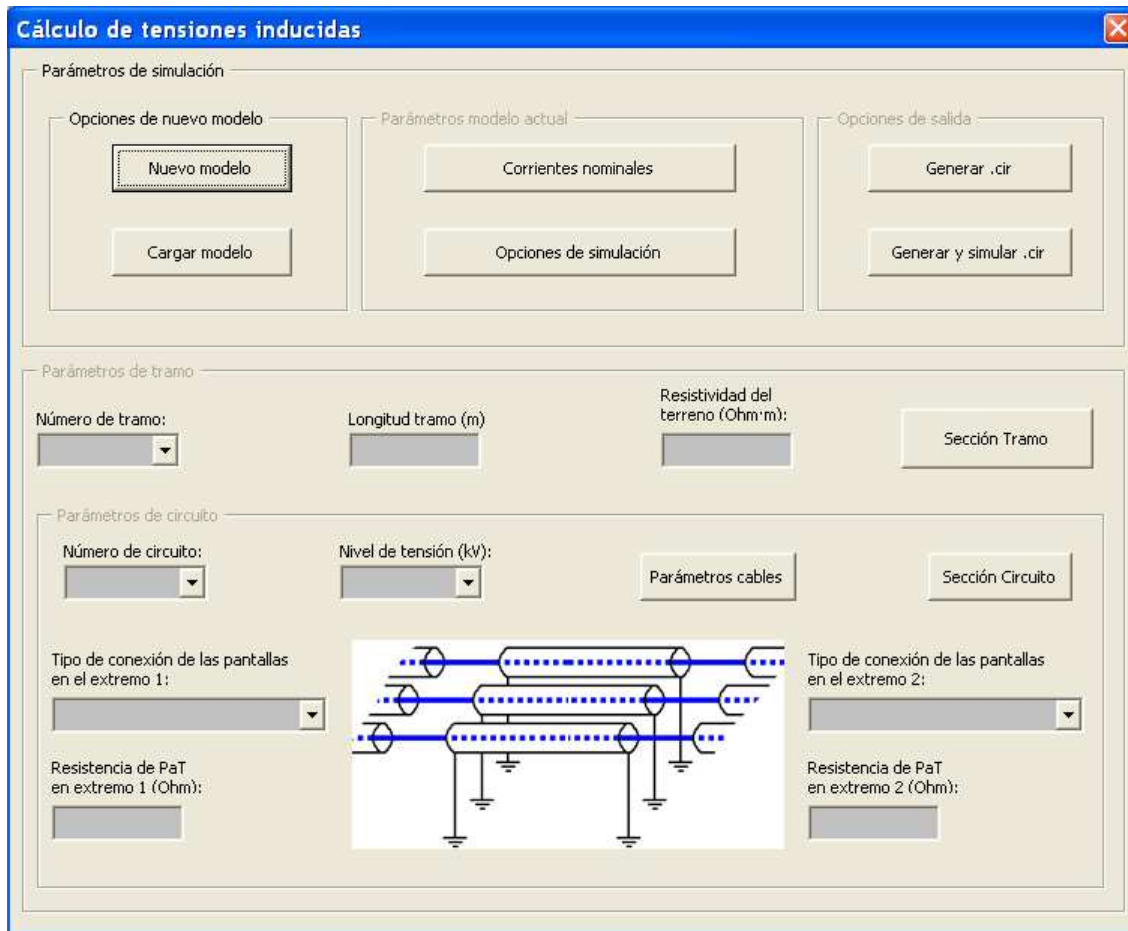


Figura 49 – Pantalla de inicio al ejecutar el programa.

En este punto se pueden hacer dos cosas, cargar un modelo o bien generar uno nuevo. Ambos botones están arriba a la izquierda.

Si se decide cargar un modelo, simplemente hay que cargar un documento anteriormente generado por este programa (con extensión .cir) que son los mismos documentos que se envían al simulador describiendo el circuito.

En caso de que se opte por generar un nuevo modelo, se pedirá al usuario que introduzca el número de tramos y de circuitos. Después, de forma opcional, se puede introducir una descripción del circuito que aparecerá en el documento generado.

A partir de aquí se pueden hacer las consideraciones que uno estime oportunas. La mayor parte de los controles son muy intuitivos. Es evidente que el marcador control “Longitud” sirve para indicar la longitud del tramo.

Sólo indicar que en el panel de abajo están las opciones del circuito que se tenga seleccionado, en el panel central están las opciones del tramo (afectando a todos los circuitos del mismo tramo), y arriba están los parámetros de simulación y cortocircuitos.

Pinchando en el botón de “Parámetros cable” se podrán modificar las resistencias del conductor y de la pantalla, la capacidad del cable y el radio exterior de la pantalla. También se pueden modificar los datos del cable de acompañamiento, como se ve en la Figura 50.

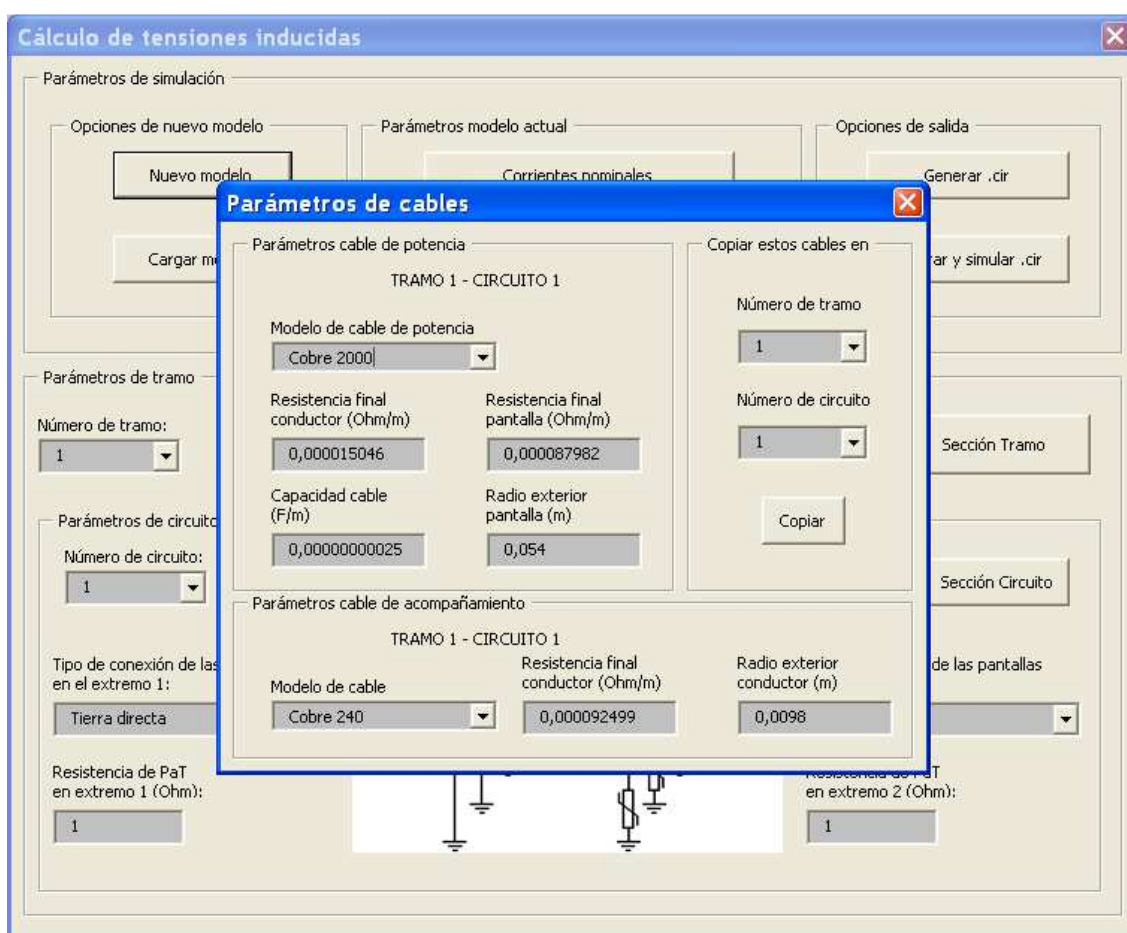


Figura 50 – Formulario de parámetros del cable.

Algunos módulos, como en este caso, llevan un panel para poder copiar lo que se haya seleccionado en otro tramo y/o circuito. El botón “Parámetros cable” está en el panel de abajo; es decir, el del circuito, de manera que las modificaciones que se introduzcan en esta ventana afectarán sólo al tramo y circuito actual (indicado arriba a la

izquierda). Para poder copiar este cable en el resto de tramos del mismo circuito, sólo hay que seleccionar el tramo y circuito correspondiente en el panel de “Copiar estos cables en” y pulsar el botón.

En el botón “Sección circuito” se podrán seleccionar las coordenadas de los cables de potencia y cables de acompañamiento del circuito actual en el tramo actual. El dibujo de referencia no deja lugar a dudas (Figura 51).

The screenshot shows the 'Cálculo de tensiones inducidas' software interface. A dialog box titled 'Sección circuito' is open, displaying the following information:

- Elemento actual:** TRAMO 1, CIRCUITO 1
- Coordenadas:**
  - Disposición tipo: Zanja 220 kV
  - COORDENADAS (m) X Y
  - Fase 1: -0,16, -1,42
  - Fase 2: 0, -1,142
  - Fase 3: 0,16, -1,42
  - CA 1: -0,212, -1,186
  - CA 2: 0, 0
- Cables de acompañamiento:**
  - Número de cables de acompañamiento: 1
  - Punto de trasposición de los cables de acompañamiento (en PU): 0,5
- Copiar esta disposición en:**
  - Número de tramo: 1
  - Número de circuito: 1

A diagram within the dialog box shows the layout of cables with coordinates (0,0), (x1,y1), (x2,y2), and (x3,y3). The background window shows various simulation parameters and buttons like 'Nuevo modelo', 'Cargar', 'Generar .cir', and 'y simular .cir'.

Figura 51 – Formulario de datos geométricos del circuito visto en sección.

También pueden introducirse el número de cables de acompañamiento y el punto en que estos se transponen en tanto por uno (por defecto se trasponen en 0,5; es decir, a la mitad del tramo)

En el botón “Sección tramo” se seleccionan las coordenadas de referencia de los diferentes circuitos dentro de un mismo tramo. El dibujo explicativo (Figura 52) también parece suficientemente clarificador.

The image shows a software window titled "Cálculo de tensiones inducidas". A modal dialog box titled "Sección tramo" is in the foreground. It contains the following elements:

- Coordenadas origen circuitos:** A section for defining circuit coordinates. It includes "TRAMO NÚMERO 1" and input fields for "Coordenada X" (0) and "Coordenada Y" (0). Below this is a "Número circuito" dropdown set to 1.
- Copiar esta disposición en:** A section with a "Número de tramo" dropdown set to 1 and a "Copiar" button.
- Circuit Diagram:** A schematic showing three circuit locations: "Circuito 1 (0,0)", "Circuito 2 (X2,Y2)", and "Circuito n (Xn,Yn)". Each location is represented by a box containing a three-phase symbol (three circles with red, green, and blue dots).

The background window has several tabs and buttons:

- Parámetros de simulación:** Includes "Opciones de nuevo modelo" (with "Nuevo modelo" and "Cargar" buttons), "Parámetros modelo actual" (with "Corrientes nominales" button), and "Opciones de salida" (with "Generar .cir" and "y simular .cir" buttons).
- Parámetros de tramo:** Includes a "Número de tramo:" dropdown set to 1.
- Parámetros de circuito:** Includes a "Número de circuito:" dropdown set to 1.
- Tipo de conexión de en el extremo 1:** A button labeled "Tierra directa".
- Resistencia de PaT en extremo 1 (Ohm):** An input field set to 1.
- Resistencia de PaT en extremo 2 (Ohm):** An input field set to 1.

Figura 52 – Formulario de coordenadas de los diferentes circuitos dentro de un mismo tramo.

En el botón de “Parámetros de simulación” se puede seleccionar el tipo de simulación (funcionamiento normal, cortocircuito trifásico o monofásico en sus cuatro diferentes modalidades). También puede seleccionarse el circuito que sufre el cortocircuito, la corriente de cortocircuito y los factores de reducción de falta lejana y de efecto sifón.

Por último, aunque resulta obvio, en el botón de “Corrientes nominales” se seleccionarán las intensidades de fase de cada circuito.

Una vez hecho esto hay dos opciones representadas en los dos botones de arriba a la derecha. Una de ellas genera el documento con extensión .cir, y la otra lo genera y abre el LTSpiceIV para simularlo.

El documento siempre se genera en la misma carpeta que está el libro de Excel que contiene el programa. El nombre siempre es el mismo que el libro de Excel más una numeración y con la extensión identificativa de que es un circuito.

Al finalizar la simulación, si uno no quiere visualizar ninguna señal y le basta con saber el valor de las tensiones en las pantallas, bastará con pulsar CTRL+L y aparecerá el informe que se muestra en la Figura 53.

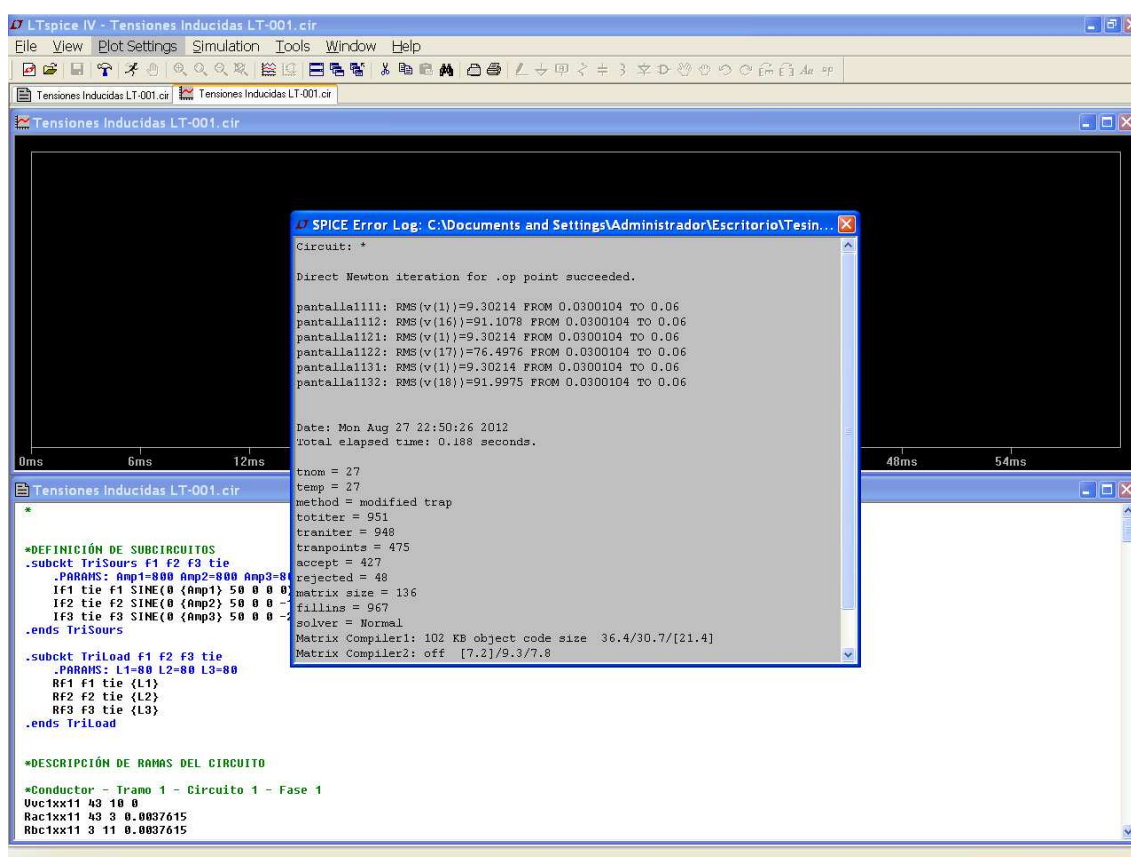


Figura 53 – Vista del informe de simulación.

En el informe hay unas medidas de tensión RMS en los extremos de todas las pantallas. La etiqueta identificativa de la medida pone la palabra “pantalla” seguida de 4 dígitos. El primero indica el tramo, el segundo el circuito, el tercero la fase y el cuarto el extremo (extremo 1 ó 2 del tramo, siendo extremo inicial y final respectivamente)

Por ejemplo, en el extremo 2 de la pantalla de la fase 1 del circuito 1 del tramo 1 hay, en esta simulación, 91,1078 V de tensión eficaz.

Cabe destacar que el documento generado presenta un gran número de comentarios que ayudan a seguirlo con facilidad y, si se da el caso, a realizar las modificaciones que uno estime oportunas con rapidez.

Así pues, se pueden distinguir en él varios apartados:

- Descripción de conductor con indicación del tramo, circuito y fase.
- Descripción de la pantalla con indicación del tramo, circuito, y descargador si corresponde.
- Descripción del cable de acompañamiento con indicación del tramo, circuito y número (puede haber uno o dos cables de acompañamiento)
- Descripción de las fuentes de tensiones inducidas con indicación del elemento inductor (cable o pantalla, tramo, circuito y fase) y del elemento que recibe la inducción (pantalla o cable de acompañamiento, circuito, tramo y fase)
- Descripción de la alimentación (fuentes de corriente)
- Descripción de las cargas (resistencias en estrella)
- Descripción de los valores iniciales que se impondrán en los diferentes nudos del circuito.
- Descripción de las medidas que se toman en las pantallas con indicación de a qué nudo del circuito corresponde cada medida.
- Otras indicaciones técnicas que sólo serán de utilidad si se conoce el lenguaje Spice.

Con tantas indicaciones, es sencillo que se pueda visualizar la tensión o corriente en cualquier punto del circuito. Los simuladores Spice, además, permiten expresiones complejas a la hora de visualizar, de manera que uno puede ver la tensión en un nudo menos la tensión en otro y multiplicar ambos por una constante. Así pues, se puede ver fácilmente la tensión en bornes de un descargador o la corriente que atraviesa una pantalla, o bien la componente de tensión en la pantalla 2 del circuito 1 debido a la corriente que circula por la pantalla 3 del circuito 2.



Por ejemplo, a continuación (Figura 54) vemos las tensiones locales inducidas en las pantallas de un simple circuito a 220 kV que consta de un tramo de 500 m con conexión SP con cable de acompañamiento traspuesto a la mitad del recorrido y en funcionamiento normal.

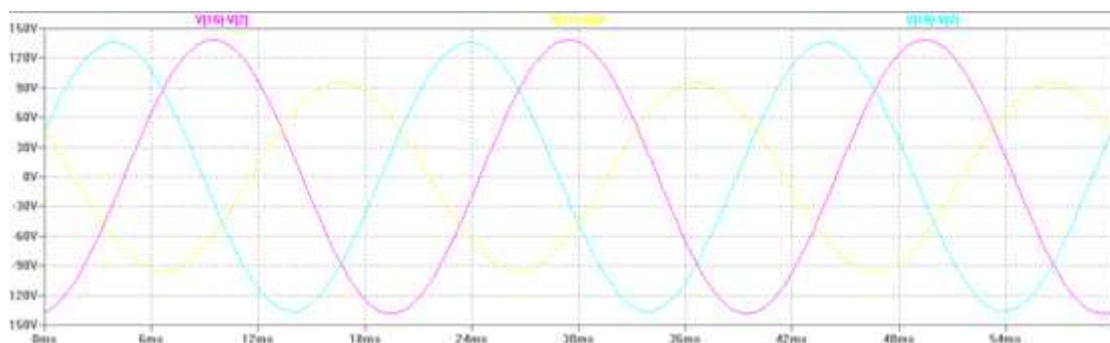


Figura 54 – Gráfica obtenida con el simulador.

Vemos como dos pantallas tienen la misma tensión inducida en magnitud (aproximadamente) y están desfasadas  $120^\circ$ . Estas pantallas corresponden a las fases que se sitúan abajo en la disposición al tresbolillo. El cable de acompañamiento está muy cerca de ellas sólo durante la mitad del recorrido. Por otra parte, la tensión inducida en la fase central del tresbolillo es menor en magnitud. Esto es debido a que esta fase tiene cerca el cable de acompañamiento durante todo el recorrido. Esto provoca que sea ésta la fase que induce más tensión en el cable de acompañamiento y por tanto, la corriente por el cable de acompañamiento esté en oposición de fase respecto a la corriente por el conductor. Así, la componente de la tensión inducida en las pantallas debido a la corriente por el cable de acompañamiento es tal, que provoca que la magnitud total de la tensión inducida en esta pantalla sea menor, y en las otras dos pantallas sea mayor de lo que sería si no existiera tal corriente.



## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de validar el correcto funcionamiento del simulador y del modelado subyacente, se han realizado una serie de simulaciones sencillas con resultados conocidos de antemano que pueden ser calculados fácilmente usando la teoría que se describe en este texto.

Después se han realizado otras simulaciones más complejas que han sido comparadas con los resultados obtenidos de simulaciones análogas obtenidas de entornos profesionales.

### 5.1. Caso básico.

Como caso básico vamos a presentar el de un tramo de simple circuito con conexión de pantallas tipo *solid bonding* (Figura 55). Se comparan los resultados teóricos y los resultados ofrecidos por el software desarrollado para este trabajo.

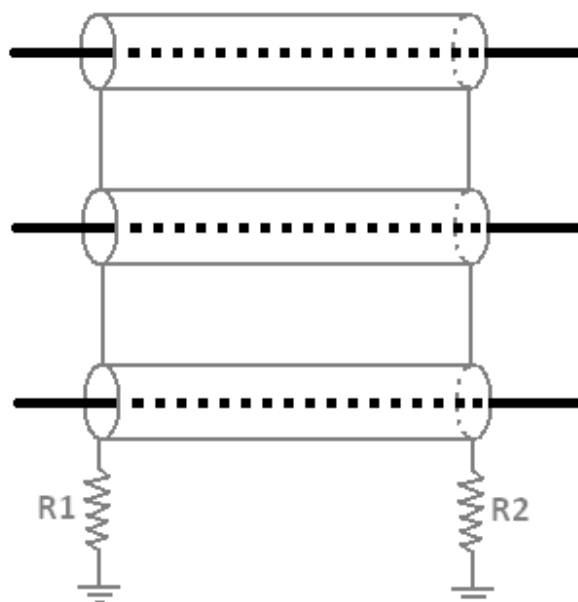


Figura 55 – Circuito con conexión *solid bonding*.

Se analiza el circuito anterior en el caso de cortocircuito monofásico (en sus cuatro tipos diferentes) y se indica el valor de tensión en la tierra local (en bornes de R1 y R2).

El test se realiza para una distancia de línea de 1 km, una distribución al tresbolillo con distancia de 250 mm entre fases y diferentes combinaciones de valores de resistencia de puesta tierra. Los resultados se ofrecen en V/kA de defecto.

Resultados teóricos<sup>9</sup>:

L(km)	R1(ohm)	R2(ohm)	s(mm)	Semisifón cercana		Sifón lejana		Semisifón lejana		Sifón cercana	
1	0,25	0,25	250	-9,4	9,4	-172,7	172,7	-87,6	-196	196	87,6
1	0,25	0,5	250	-7,5	15,1	-138,6	277,1	-133,1	-314,4	195,3	140,5
1	0,5	0,5	250	-12,3	12,3	-227,6	227,6	-218,7	-320,8	320,8	218,7
1	0,25	10	250	-0,7	28,3	-13,3	532,5	-242,4	-604,2	243,3	269,9
1	0,5	10	250	-1,4	27,6	-26	519,9	-473,4	-732,9	475,1	499,6
1	10	10	250	-14,6	14,6	-274,2	274,2	-4993,1	-5010,6	5010,6	4993,1
1	10	20	250	-9,7	19,4	-183,1	366,1	-6657,9	-6690,9	6667	6667,6
1	20	20	250	-14,6	14,6	-274,8	274,8	-9994	-10007,8	10007,8	9994

Tabla 2 – Resultados teóricos.

Resultados del programa de simulación:

L(km)	R1(ohm)	R2(ohm)	s(mm)	Semisifón cercana		Sifón lejana		Semisifón lejana		Sifón cercana	
1	0,25	0,25	250	-9,2	9,2	-172,3	172,3	-87,4	-195,5	195,5	87,4
1	0,25	0,5	250	-7,4	14,8	-138,2	276,4	-132,8	-313,8	194,9	140,2
1	0,5	0,5	250	-12,2	12,2	-227,1	227	-218,2	-320,2	320,2	218,2
1	0,25	10	250	-0,7	28,5	-13,3	531,6	-242	-603,6	242,8	269,7
1	0,5	10	250	-1,4	27,8	-26	519	-472,5	-732,3	474,2	498,9
1	10	10	250	-14,7	14,7	-274,3	273,3	-4983,7	-5001,5	5001,6	4983,8
1	10	20	250	-9,8	19,6	-183,5	365	-6645,7	-6679,2	6654,8	6655,2
1	20	20	250	-14,7	14,7	-275,4	273,5	-9975,4	-9989,5	9989,6	9975,5

Tabla 3 – Resultados del software de simulación desarrollado en este trabajo.

Error relativo:

Semisifón cercana		Sifón lejana		Semisifón lejana		Sifón cercana	
-2,1%	-2,1%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,3%	-0,3%	-0,2%
-1,3%	-2,0%	-0,3%	-0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%
-0,8%	-0,8%	-0,2%	-0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%
0,0%	0,7%	0,0%	-0,2%	-0,2%	-0,1%	-0,2%	-0,1%
0,0%	0,7%	0,0%	-0,2%	-0,2%	-0,1%	-0,2%	-0,1%
0,7%	0,7%	0,0%	-0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%
1,0%	1,0%	0,2%	-0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%
0,7%	0,7%	0,2%	-0,5%	-0,2%	-0,2%	-0,2%	-0,2%

Tabla 4 – Error relativo de los resultados del software desarrollado respecto a los teóricos.

<sup>9</sup> Esta misma tabla ampliada puede encontrarse en la página 863 de la referencia 1 con resultados muy similares. Las diferencias mínimas serán debidas, probablemente, a que el autor no haya utilizado realmente las fórmulas del cálculo teórico, sino que cuente también con un simulador.

El error promedio de esta tabla es del 0,2 %. Como vemos el error cometido es mínimo para todas las combinaciones de resistencias y en todos los tipos de cortocircuito, comprobándose así la fiabilidad del programa y el método de modelado.

Cabe destacar, además, que el cálculo teórico no tiene en cuenta la existencia de condensadores como sí ocurre en el modelo. Su influencia en el resultado es baja, ya que sólo implica una corriente de pequeño valor; pero es más notable cuanto menores son los resultados de tensión inducida.

## 5.2. Caso complejo.

Como caso complejo se muestran los resultados de una simulación realizada con el programa ATP. Para su validación se han usado resultados obtenidos en un entorno profesional para una línea real de 132 kV, cuyas características se citan a continuación.

Se trata de una línea subterránea de simple circuito con un sistema de puesta a tierra tipo *cross bonding*. La configuración de la zanja es en tresbolillo con una separación entre fases de 200 mm.

La línea consta de tres tramos CB con unas longitudes de 1060 m., 1135 m. y 1165 m. respectivamente. La resistencia a 90°C de la pantalla es de 87,9  $\mu\Omega/\text{m}$  y su radio es de 5,4 cm.

Las resistencias de puesta a tierra en las subestaciones se consideran de 1  $\Omega$ , mientras que en las cámaras de empalmes intermedias se consideran de 5  $\Omega$ .

La simulación se realiza para un cortocircuito monofásico en sifón y cercano de 40 kA. La gráfica de las tensiones absolutas en las pantallas en las cámaras de empalme, obtenida directamente del informe de la citada línea, es la que se muestra en la Figura 56.

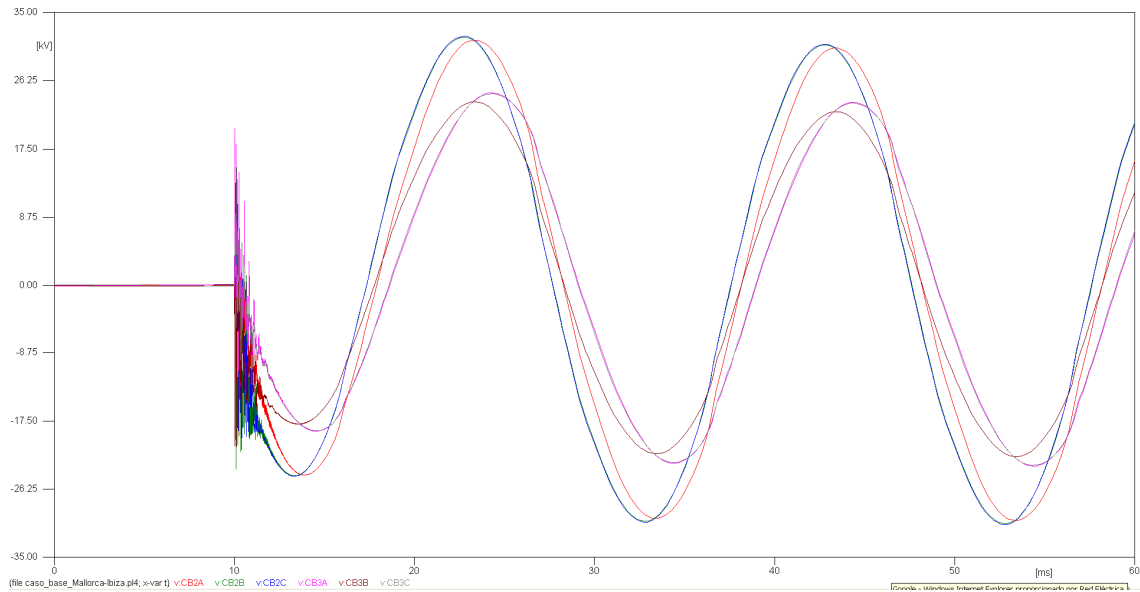


Figura 56 – Tensiones absolutas en las pantallas

La gráfica de las mismas tensiones absolutas en la misma situación, obtenidas con el programa desarrollado en este trabajo, puede verse a continuación en la Figura 57.

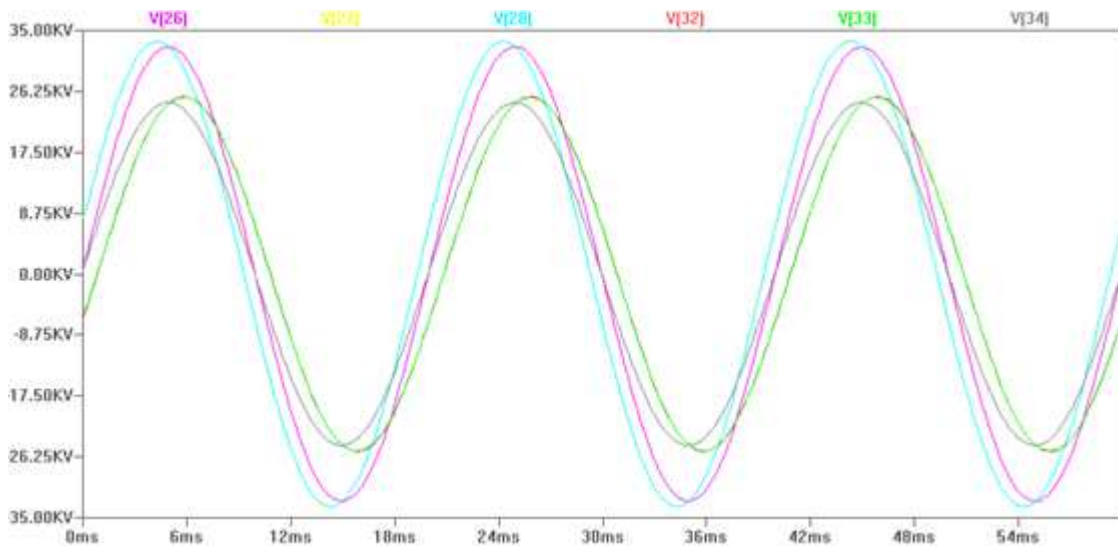


Figura 57 – Tensiones absolutas en las pantallas.

Tanto los valores como los desfases son muy similares; quedando así validado el modelo y el funcionamiento del programa.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

### 6.1. Conclusiones

El modelado que se realiza en este trabajo es bastante fiel a la realidad, en cuanto a que modela la línea subterránea en todos aquellos parámetros existentes que desempeñan un papel importante en el cálculo de las tensiones inducidas.

A diferencia de otros modelos, por ejemplo el que se puede ver en el apéndice B de la referencia [4], esta manera de hacer el modelado permite una mayor velocidad de desarrollo porque es dinámica y el modelo en sí no aparece plasmado en lenguaje SPICE hasta el final. Si se realiza un modelado elemento a elemento mediante un entorno gráfico (como en ATP o en SPICE usando el módulo gráfico Schematics) no resulta posible vincular una línea con otra de forma eficiente si no se cuenta con un módulo para doble circuito. Evidentemente, esto es aplicable a un módulo para triple circuito, cuádruple circuito, etc.

Por este motivo es habitual ver en entornos profesionales como se modela una línea de simple circuito en lugar de dos (cuando es el caso) asumiendo que el hecho de que sea un doble circuito no variará mucho las tensiones inducidas en el primero en caso de cortocircuito. Sin duda es así; pero quizás pueda ser de interés el saber qué ocurre exactamente, o bien saber la tensión inducida en las pantallas del circuito que no sufre la falta.

Todo ello es perfectamente modelable con gran velocidad por medio del software desarrollado para este trabajo.

### 6.2. Trabajos futuros

Muchas son las posibles líneas de desarrollo que pueden salir de este trabajo inicial y el trabajo asociado a ellas podría extenderse tanto como uno quiera.

Un primer trabajo podría consistir en completar con más detalles el ya realizado. Por una parte se podría dotar al programa de un modelado que pudiera ponderar los

valores de reducción del efecto falta lejana y del efecto sifón en los cortocircuitos monofásicos. Estos valores no son intuitivos y pueden obtenerse con una buena aproximación sin necesidad de modelar completamente todo el tramo aéreo. De hecho, ésta es una línea de trabajo cuyo estudio ya ha sido empezado con el objetivo de implementarlo en un futuro cercano, y se pueden encontrar datos sobre este tema en la referencia [2] y [4].

Por otra parte, el modelado del cortocircuito de una manera más fiel a la que se produce en la realidad sería también una mejora sustancial que podría tener aplicaciones interesantes. En este trabajo se modelan los cortocircuitos únicamente por su componente estacionaria, cuando en la realidad hay unos transitorios que pueden tener importancia.

En la práctica no se considera el efecto transitorio para el cálculo de tensiones inducidas en las pantallas, pero podría tener importancia en el diseño de la geometría de los terminales o incluso de la aparamenta de la propia subestación. Durante las maniobras de los interruptores se producen ondas de frente rápido que pueden dar lugar a arcos que dañen los cables si el diseño no tiene en cuenta esta circunstancia. En la [5] se discute brevemente este tema.

Otra línea de trabajo, más ambiciosa, consistiría en desarrollar un modelo térmico de los cables. Hay que tener en cuenta que al programa desarrollado se le entrega como parámetro la intensidad que circulará por la línea. La intensidad máxima admisible depende, además de la capacidad de disipar calor del propio cable y entorno, de las otras fuentes de calor presentes. Cabe recordar a estos efectos que el tipo de conexión de las pantallas a tierra, dependiendo de la configuración, origina corrientes que son a todos los efectos fuentes de calor. Por lo tanto, en cierto modo las tensiones inducidas influyen en la capacidad de transporte, y la capacidad de transporte influye en las tensiones inducidas.

Destacar también que hay ya desarrollados modelos térmicos del comportamiento de líneas subterráneas y en principio, esto no es una novedad. Lo interesante sería que el

modelo térmico y el eléctrico estuvieran vinculados en un mismo circuito descrito en lenguaje Spice (el lenguaje Spice permite hacer consideraciones térmicas).

Por último, dado que todo el estudio se basa en cálculos eléctricos de líneas de alta tensión, se podría desarrollar el modelo completo también para líneas aéreas.





## 7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] – *IEEE Guide for the application sheath-bonding methods for single conductor cables and calculation of induced voltages and currents in cable sheaths*. IEEE Std. 575-1988.
- [2] – Simón Comín P., Garnacho Vecino F., Moreno Mohíno J., González Sanz A. – *Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión*. Editorial Garceta, 2011.
- [3] – Grainger J., Stevenson Jr. W. – *Análisis de Sistemas de Potencia*. Editorial McGraw-Hill, 1996.
- [4] – WG B1.26 (Cigré) – *Earth potential rises in specially bonded screen systems*. Brochure 347, 2008.
- [5] – Skipper D.J. – *The design of specially bonded cable systems II*. Electra 47, 1976.
- [6] – Brookes A.S. – *The design of specially bonded cable systems*. Electra 28, 1973.
- [7] – WG 21.07 (Cigré) – *Guide to the protection of specially bonded cable systems against sheath overvoltages*. Electra 128, 1990.
- [8] – Wedepohl M., Indulkar C. – *Switching overvoltages in short crossbonded cable systems using the Fourier transform*. Proc. IEE, Vol. 122(11), pp. 1217-1221, 1975.
- [9] – Documentación de “Máster en Proyectos, Construcción y Mantenimiento de Infraestructuras Eléctricas de Alta Tensión impartido por la Universidad Pontificia de Comillas”. ICAI, 2010.
- [10] – Curso de puesta a tierra de pantallas. Documentación del Curso de Formación a personal de Red Eléctrica de España S.A.U número UF522A, 2010.
- [11] – Linear Technology – *LT Spice IV User's Guide*. 2011.