

Comité de Estudio B1 - Cables Aislados

**CALCULO DE CAMPO ELÉCTRICO EN EMPALMES PARA CABLES DE AISLACIÓN
SÓLIDA**

C. A. WALL*
IITREE-LAT-UNLP
Argentina

M. D. del POZO
IITREE-LAT-UNLP
Argentina

R. E. ALVAREZ
IITREE-LAT-UNLP
Argentina

M. B. BARBIERI
IITREE-LAT-UNLP
Argentina

***Resumen** – En este documento se presenta una herramienta para el cálculo de campo eléctrico basada en el método de los elementos finitos, esto permite llevar a cabo simulaciones y estimar tanto el valor como la distribución del campo eléctrico en empalmes de aislación seca empleados en cables de alta Tensión (AT). A su vez se presentan resultados de cálculos realizados sobre modelos empleados en la actualidad y algunas de las principales variantes que pueden presentarse.*

***Palabras clave:** Empalmes – campo eléctrico – materiales aislantes – cintas dieléctricas – solicitud dieléctrica – variantes geométricas – elementos finitos – modelos tridimensionales – Cross-Bonding – pantalla*

1 INTRODUCCIÓN

Durante las condiciones de operación las diferentes interfaces de los cables, se hallan expuestas a solicitaciones dieléctricas. Para estudiar los campos que generan estas solicitaciones, las principales características considerar son la amplitud y la distribución. Estas solicitaciones pueden afectar el comportamiento de los empalmes; considerados los puntos más sensibles de las redes de cables. Para verificar las condiciones de diseño y trabajo es de vital importancia conocer cuales serán los puntos de mayor solicitación.

El objetivo del estudio fue precisamente poner en evidencia aquellos puntos que pueden estar comprometidos, considerando conductores unipolares aislados en XLPE y aislantes empleados actualmente en la elaboración de empalmes.

En este trabajo se presentan estudios de cálculos de campo eléctricos en empalmes de AT por medio de un paquete de software de uso comercial que emplea el Método de los Elementos Finito (MEF). Se muestran resultados para distintas características de los empalmes.

2 GENERALIDADES

2.1 Características de los empalmes estudiados

En general los empalmes utilizados en la actualidad para cables de aislación seca están compuestos básicamente, por los conductores a empalmar y su correspondiente aislación (XLPE en este caso), el elemento de unión entre conductores (manguito), cintas semiconductoras para homogeneizar el campo y la aislación del empalme. En la Fig. 1 pueden apreciarse la disposición cada uno de estos elementos. Las correspondientes dimensiones de los componentes del empalme son las siguientes:

Las correspondientes dimensiones de los componentes del empalme son las siguientes:

a) Dimensiones del empalme

- Radio de la malla en la zona del empalme: 67 mm
- Radio del manguito: 20,75 mm
- Longitud del empalme: 1070 mm

b) Dimensiones del cable

- Sección del conductor: 500 mm²
- Radio de la pantalla en la zona del cable: 12,6 mm

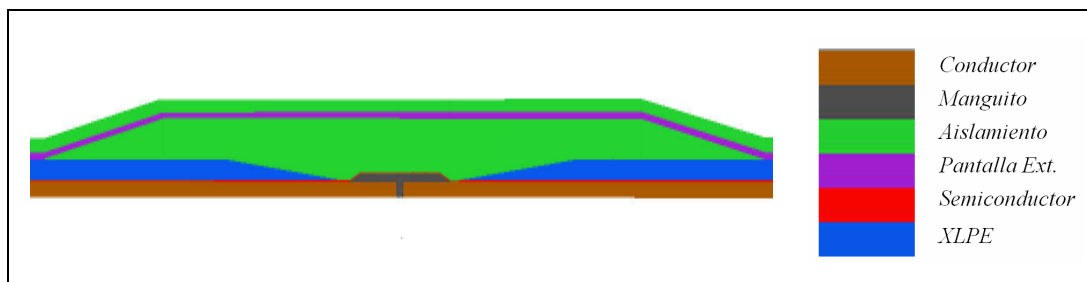


Fig. 1 - Vista en corte del modelo en la zona del empalme y referencia de los componentes

2.2 Materiales considerados

Para los casos analizados se consideró la aislación propia de los cables (XLPE) y la que se adiciona en la zona del empalme. En la actualidad para el aislamiento en la zona del empalme de A.T se utilizan diferentes tipos de cintas aislantes, por lo que se consideraron las características dieléctricas de las principales cintas disponibles en el mercado.

Los aspectos fundamentales considerados fueron la permitividad dieléctrica y el valor máximo de campo eléctrico que el aislante soporta (Rigidez Dieléctrica).

Para el caso aquí presentado los valores y constantes adoptados se muestran en la Tabla I.

Tabla I - Valores de la permitividad relativa y rigidez

Material	Valor (ϵ_r)	Rigidez dielectrica [kV/mm]
Aislación principal, XLPE	2,5	30 - 60
Aislación sobre el empalme	2,8	19,6 – 47,2
Aire	1	3

La rigidez dieléctrica de la cinta aislante se encuentra entre 19,6 y 47,2 kV/mm , que varía según el espesor y el estado de tensión logrado en el armado. Se considera el menor valor de modo de ubicarse en el caso más desfavorable en cuanto a solicitaciones.

3 SOLICITACIONES Y CONSECUENCIAS

3.1 Solicitaciones en cables

Por sus características las solicitaciones a las que se encuentran sometidos los materiales aislantes de los cables corresponden a campos eléctricos radiales. Existen distintas zonas en un empalme en donde debe prestarse especial atención a la distribución de campos.

Por tanto, resulta útil conocer previamente a la implementación del empalme, esta distribución y amplitud. A partir de ello, se podrá tener especial cuidado en las zonas mas solicitadas al momento de la ejecución, ya

que en este tipo de tareas se encuentra inevitablemente involucrada la mano de obra netamente artesanal. En la Fig. 2 se muestra un resumen de los puntos de particular interés en un empalme de A.T.

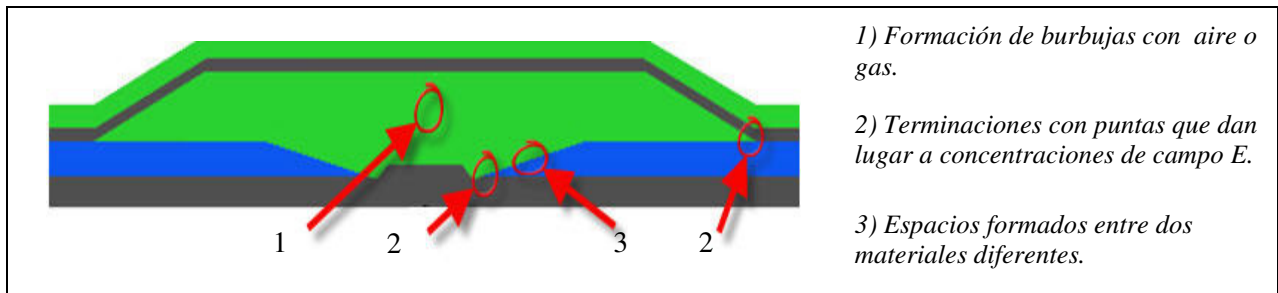


Fig. 2 – Corte de un empalme con la localización de posibles puntos de solicitaciones [Ref. 1]

3.2 Factores a tener en cuenta en interfaces

Para el diseño de las distintas interfaces con que se conforma un empalme de A.T deben considerarse factores [Ref. 2] entre los cuales se destacan:

- *Suavidad de las superficies.*
- *Presión entre las superficies en contacto.*
- *El lubricante utilizado en la interfaz (en caso de ser empleado).*
- *Distribución de campo eléctrico en la interfaz.*
- *La temperatura y los posibles cambios de temperatura que pueden tener lugar.*
- *Calidad de los accesorios utilizados en la instalación.*

Otro factor de gran influencia es la mano de obra empleada.

3.3 Consecuencias

En los puntos en donde se localizan altos valores de campo eléctrico existen mayores probabilidades de que se produzcan descargas parciales (DP). Si las DP no se mantienen por debajo de un cierto nivel pueden provocar que a lo largo de tiempo se degrade la aislación, y con ello aumentar la probabilidad de arcos que desencadenen la salida intempestiva de servicio del cable.

Sabido es que en las fronteras dieléctricas constituidas por dos materiales de distintas permitividades, el material con la menor permitividad se verá sometido a las mayores concentraciones de campo eléctrico. Esta es la razón fundamental por la cual debe prestarse especial cuidado al momento de asentar las interfaces del empalme.

Debido a este efecto debe prestarse especial atención a la forma en que se llevan a cabo estas interfaces. Del mismo modo cuando en el seno de un aislante se encuentran imperfecciones (por ej. burbujas con aire o algún gas), también se constituye una frontera dieléctrica con la consecuente concentración de campo en el interior de la burbuja, que se supone con menor permitividad.

Por otro lado el mismo fenómeno puede producirse en lugares en los que la superficie no es regular o en la que aparezcan imperfecciones (por ej. puntas) [Ref. 1].

4 METODOLOGÍA

4.1 Modelo tridimensional y herramienta de simulación

Se elaboraron modelos tridimensionales empleando un software utilizado a nivel internacional para este tipo de estudios, considerando las dimensiones reales y características eléctricas.

Este software emplea un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales ampliamente utilizado en la solución problemas de ingeniería, conocido como el método de los elementos finitos (MEF).

4.2 Detalles del modelo

En la Fig. 1 se representa una vista en corte del modelo realizado; indicando los materiales utilizados.

Dentro de los materiales dieléctricos y en el área de interés donde se calcula el campo eléctrico se consideraron los elementos más pequeños, con dimensiones del orden de los milímetros. En zonas lejanas al empalme, el tamaño de los elementos es mayor debido a que no es necesario obtener los valores de campo con una gran precisión.

En aquellos casos en que las dimensiones de los elementos fueran del orden de los milímetros (Como se muestra mas adelante en el caso de la introducción de una imperfección) el tamaño de los elementos se considero de las décimas de milímetros.

Para el análisis se consideró además, que las cintas semiconductoras se comportan como un conductor.

4.3 Validación de modelo

Para determinar si el modelo utilizado es adecuado, se calculó en forma teórica el valor del campo eléctrico en un punto en el cual no hubiera grandes deformaciones y luego se comparó dicho valor con el obtenido mediante la simulación.

El punto seleccionado para la validación fue uno próximo a la pantalla, en la zona donde se dispone el manguito de unión (Ver Fig. 3).

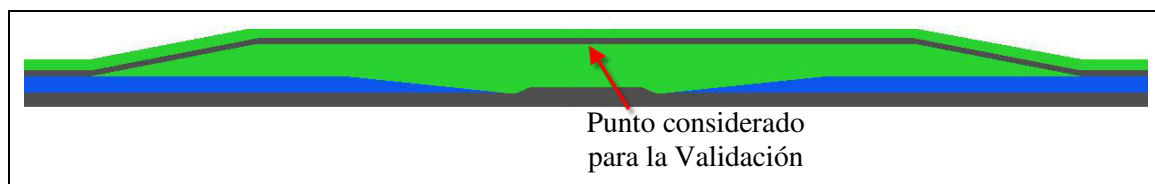


Fig. 3 - Punto de referencia seleccionado para la validación del modelo

Para el cálculo del campo en el punto seleccionado, se emplea la relación para campo radial dada por:

$$E_r = \frac{U}{r \ln \left(\frac{R}{r_1} \right)}$$

Donde:

U : es la tensión fase a la malla = 76,2 kV

R : es el radio de la malla externa (Radio de la pantalla sobre el empalme) = 67 mm

r_1 : es el radio del conductor interno (manguito) = 20,75 mm

Bajo estas consideraciones se obtuvieron los siguientes resultados:

- Campo eléctrico teórico calculado: **0,979 kV/mm**
- Campo eléctrico obtenido con el modelo (software): **0,912 kV/mm**

Es decir que la discrepancia entre ambos resultados es inferior al 7%, siendo una tolerancia adecuada para los fines del estudio. Esta verificación también se realizó para otros puntos del modelo (Cable), verificándose que la diferencia se mantuvo inferior al 7%.

A partir de ello, se considera entonces que el modelo utilizado es aceptable.

5 MODELOS Y VARIANTES CONSIDERADOS

Se llevaron a cabo simulaciones considerando distintas variantes, a continuación se menciona el modelo adoptado como de referencia y las distintas variantes con respecto al mismo.

5.1 Variante 1 - Modelo de referencia

En este caso se considera un modelo típico de empalme empleado actualmente, en donde se toma como referencia el “ángulo punta de lápiz” formado por el cono realizado sobre el XLPE a ambos lados del manguito de unión. En este caso se adoptó un ángulo de 14° (Ver Fig. 4).

5.2 Variante 2

Esta variante consiste en cambiar el ángulo de inclinación del aislante propio del cable, de forma tal de que este tenga uno menor y de con ello la terminación será más aguda. En este caso, el valor del ángulo es 7° .

5.3 Variante 3

Esta variante consiste en cambiar el ángulo de inclinación del aislante propio del cable, de forma tal que este tenga uno mayor y con ello lograr que la terminación sea menos aguda. El valor del ángulo adoptado es 28° .

Cada una de estas variantes se representan en la Fig. 4.

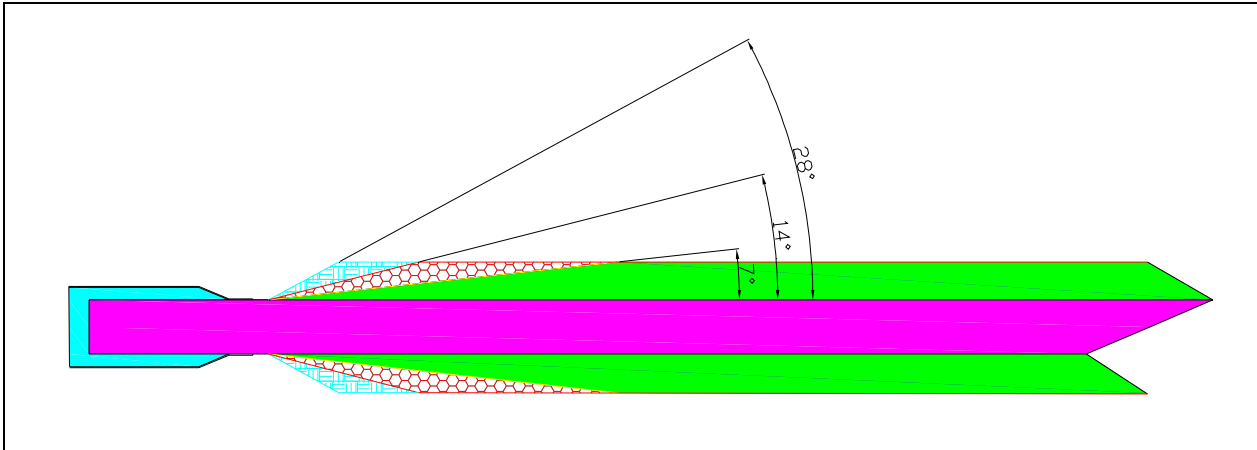


Fig. 4 – Diferentes variantes adoptadas para el cálculo en función del ángulo formado en el XLPE

5.4 Variante 1 con empalme tipo Cross-Bonding

Este tipo de empalmes tiene la particularidad de que la pantalla es seccionada, o sea que existe una discontinuidad en la pantalla, lo que podría provocar algún tipo de deformación del campo.

Tomando el modelo de referencia se realizó el cálculo de la distribución de campo eléctrico sobre la superficie de interfaz entre la aislación propia del cable y la que se le adiciona en el empalme. En la Fig. 5 se observa el modelo considerado.

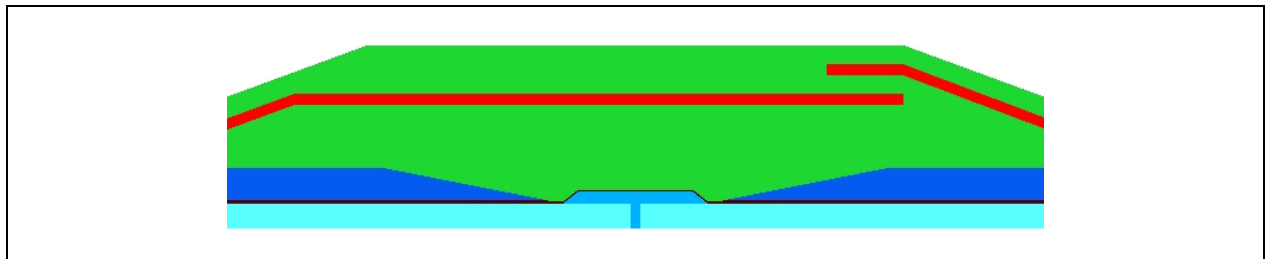


Fig. 5 - Modelo para empalme tipo Cross-Bonding

5.5 Variante 1 con una imperfección

Para esta variante se consideró que en el seno del aislamiento principal del empalme existe una imperfección, como por ejemplo una burbuja con gas o aire. Para ello, al modelo de referencia (variante 1) se introdujo una imperfección de forma tal que exista una discontinuidad en la aislación. Con ello se logra formar una frontera dieléctrica donde la relación entre las permitividades dieléctricas es mayor que la considerada en la interfaz XLPE / cinta empleada como aislante del empalme.

Al tratarse de un gas la constante relativa del mismo está alrededor de 1, con lo cual es de esperar que el valor del campo eléctrico en el interior de esta burbuja sea mayor que el que se tiene sobre el aislamiento.

Para este caso particular hay que aclarar que se analizó lo que ocurre en las inmediaciones de la imperfección introducida con el objeto de poner en evidencia el fenómeno allí producido.

Se supone que la imperfección introducida es de forma esférica, cuyo centro está ubicado en un radio de 50 mm sobre el eje del manguito de unión entre los conductores y su radio es de 1 mm. En la Fig. 6 se representa un corte del empalme con la localización de la misma.

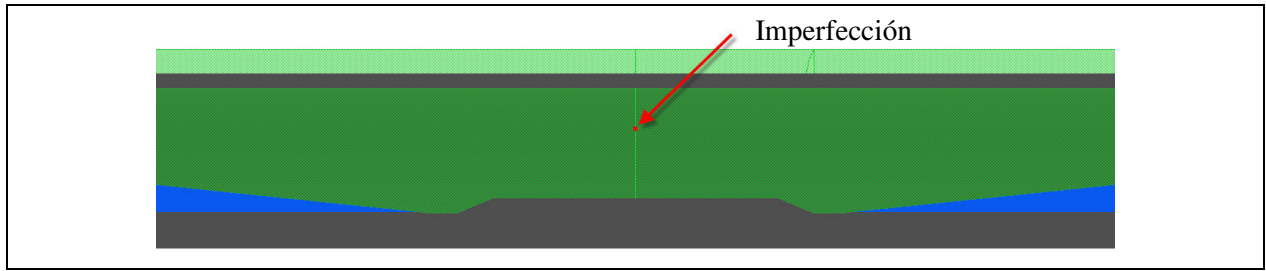


Fig. 6 – Localización de una imperfección en el modelo de la variante 1

6 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Fig. 7 se muestran los resultados obtenidos, todos ellos para una misma tensión de 76,2 kV entre el conductor y la pantalla, allí pueden observarse los valores para las distintas variantes de forma tal de permitir una comparación entre estos.

El campo eléctrico se calcula en la frontera dieléctrica formada por el aislamiento del cable (XLPE) y el empleado en el empalme, esto se debe a la mayor sollicitación en ese lugar.

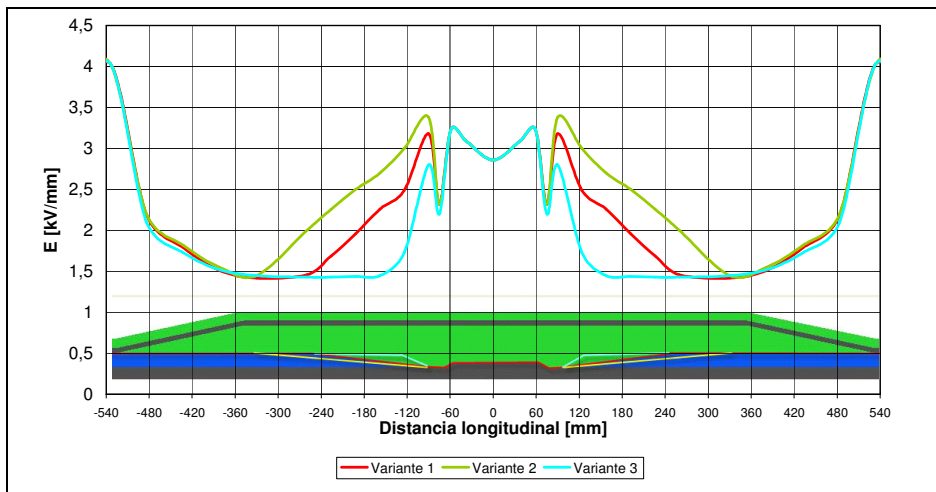


Fig. 7 - Distribución de Campo Eléctrico a lo largo del empalme para las variantes 1 a 3

Se observa que la variante 2 es la que se halla sometida a una mayor sollicitación y corresponde al caso en que el ángulo formado por el cono sobre el XLPE es menor. Se puede observar también que a medida que el ángulo punta de lápiz aumenta, la sollicitación en la interfaz es cada vez menor.

Si por otro lado ahora se considera la variante 1, tomada como referencia, y se la emplea para un empalme del tipo Cross-Bonding se encuentra que la sollicitación en la interfaz entre la dos aislaciones no difiere de la de la variante 1 a pesar de existir una discontinuidad en la pantalla exterior. Esto se representa en la Fig. 8.

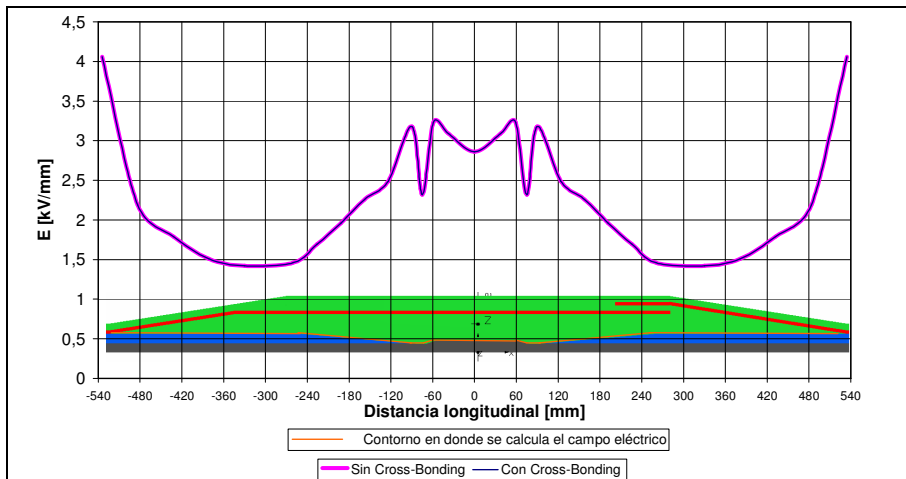


Fig. 8 - Distribución de Campo Eléctrico a lo largo del empalme tipo Cross-Bonding

A su vez, en la Fig. 9 a) y b) se representan las distribuciones de campo eléctrico y la variación de la tensión, respectivamente, en tres dimensiones para el caso denominado como variante 1. En función de los colores de referencia pueden observarse cuales son los puntos expuestos a mayores solicitaciones.

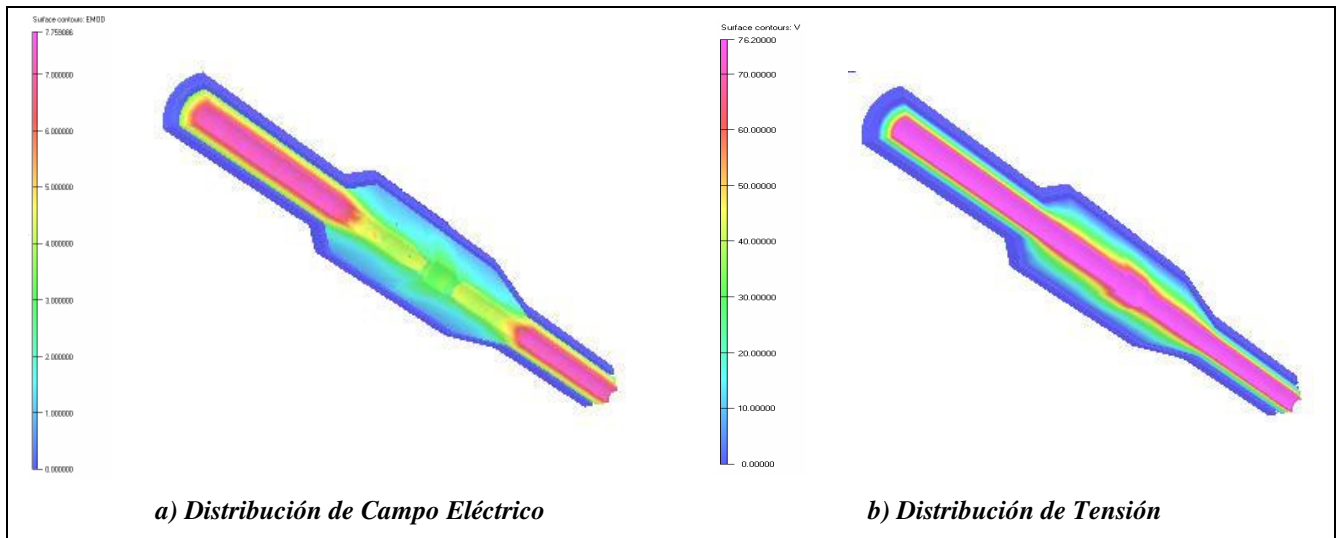


Fig. 9 - Distribución de Campo Eléctrico y tensión para la variante 1.

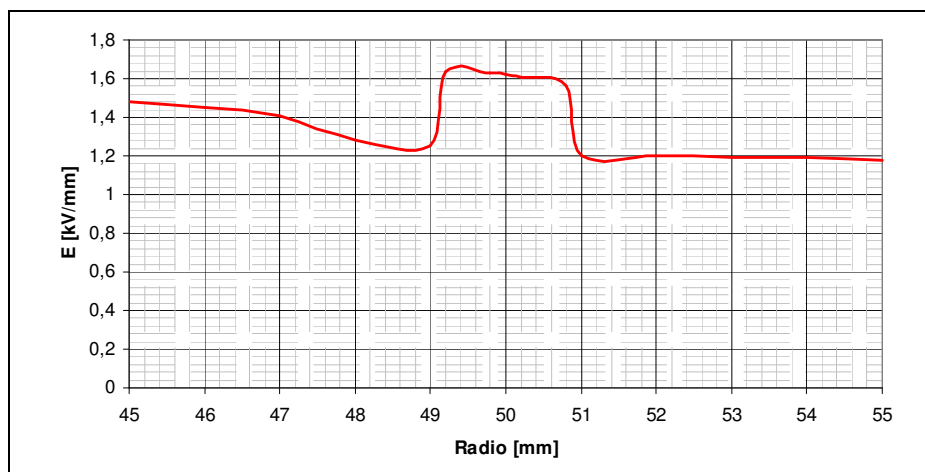


Fig. 10 - Distribución de Campo Eléctrico en las inmediaciones de una imperfección.

Por último en la Fig. 10 puede apreciarse la distribución de campo eléctrico en la imperfección introducida en el modelo de la variante 1, calculado en un radio desde el manguito que pasa por el centro de la esfera. Se observa que en el interior de la misma se incrementa el campo eléctrico debido al cambio de las permitividades relativas de los dos medios, siendo mayor el campo en el medio de menor permitividad dieléctrica relativa.

7 CONCLUSIONES

El empleo del MEF y con la capacidad de procesamiento actuales, es posible realizar estudios de diseño y de esta forma tomar la decisión de cual es la implementación que mejor se adapte a las solicitaciones previstas en el servicio.

A su vez, a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se concluye que:

- *Se obtuvo un modelo validado del empalme, acorde a la complejidad del estudio.*
- *Los valores máximos de campo eléctrico, sobre el aislamiento utilizado en el empalme, resultan del orden de los 4,5 kV/mm, inferior a los 19,6 kV/mm especificados para la cinta considerada,*

teniendo en cuenta las distintas variantes constructivas. Este valor corresponde al valor de campo eléctrico en la zona de la pantalla del cable y no se debe al modelo del empalme en sí.

- *En la zona en donde se ubica el elemento de unión entre los dos conductores se encontró que la intensidad del campo eléctrico es independiente de la variante adoptada, es decir que es independiente de la geometría utilizada en las zonas adyacentes.*
- *Se obtuvieron perfiles de campo iguales para el caso de empalmes con y sin Cross-bonding.*
- *En el caso de tener imperfecciones en el seno de aislantes se observan que en el interior de las mismas el valor del campo eléctrico crece dependiendo de los valores de permitividades relativas, por lo tanto si se tuviera aire en el interior y considerando que la rigidez dieléctrica de este es de aproximadamente es 3 kV/mm, valores de campo eléctrico por encima de este podrían provocar que en el interior de la imperfección se produzcan descargas del tipo localizadas o parciales.*

8 REFERENCIAS

- [1] D. König, Y. N. Rao, *Partial Discharge in Electrical Power Apparatus*. VDE - Verlag GMBH, 1993.
- [2] CIGRÉ Technical Brochure N° 210 “*Interfaces in Accessories for Extruded HV and EHV Cables*”, August 2002.
- [3] B. M. Weedy, *Underground Transmission of Electric Power*. John Wiley & Sons, 1980.