

Este documento está sometido a posibles cambios.
Póngase en contacto con ARTECHE para la
confirmación de las características y disponibilidades
aquí descritas.

Ángel Enzunza
© ARTECHE



Moving together

ÍNDICE

1. El campo eléctrico | 4
2. Cálculo del campo eléctrico | 5
 - 2.1. Métodos matemáticos | 5
 - 2.2. Métodos numéricos | 5
 - 2.3. Métodos experimentales | 5
3. Método de cargas | 6
4. El campo eléctrico en los transformadores de medida | 7
 - 4.1. Transformadores de media tensión | 7
 - 4.2. Anillos equipotenciales en transformadores de intensidad | 8
 - 4.3. Transformadores de alta tensión | 8
 - 4.4. Ejecuciones especiales | 9
5. Conclusiones | 10

RESUMEN

Al igual que cualquier máquina eléctrica, un transformador de medida está sometido a un campo eléctrico, y en tanto en cuanto el mismo está perfectamente controlado dentro de parámetros aceptables, se lograrán aparatos de comportamiento fiable.

A pesar de que de antiguo se conocen formas de determinar el campo eléctrico, o bien son fórmulas matemáticas aplicables a formas de electrodos muy determinados o bien métodos experimentales difícilmente extensibles a los contornos y dimensiones de las máquinas reales.

Es en los recientes años, cuando con la aparición de los potentes ordenadores se han desarrollado sistemas de cálculo aplicables a cualquier forma de electrodo, dimensión de los mismos y dieléctricos diferentes, con resultados prácticamente exactos, lo que permite poderosas alternativas de diseño.

El presente trabajo sólo pretende mostrar unos ejemplos de la aplicación de uno de estos métodos en el proceso de diseño de transformadores de medida.

1. EL CAMPO ELÉCTRICO

Llamamos campo a regiones en el espacio en las que existe alguna manifestación de energía. Conocemos así los campos gravitatorios, térmicos, magnéticos, eléctricos, etc.

Para el conocimiento de los fenómenos que ocurren en un campo eléctrico debemos tener en cuenta los conceptos de flujo y potencial. Asimilándolo con el campo gravitatorio, estos conceptos son fáciles de entender. Las curvas de nivel serían líneas equipotenciales y las curvas de pendiente serían las líneas de flujo.

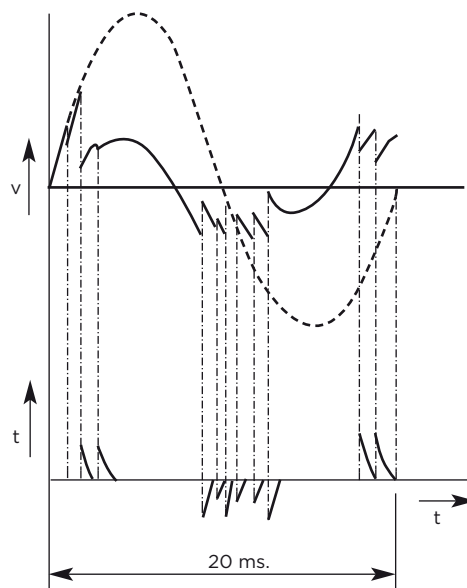
Los campos que en nuestra área hemos estudiado son los estacionarios, es decir, los que son independientes respecto al tiempo. Dichos campos satisfacen la ecuación de Laplace.

$$\nabla \phi = 0$$

El campo eléctrico debido a la corriente alterna puede considerarse estacionario, ya que los fenómenos físicos como el efecto corona o la descarga disruptiva, se producen a una velocidad muy superior a la variación de la tensión. En la fig. 1 podemos ver estos parámetros (Kreuger).

Una vez resuelta la ecuación de Laplace, conocemos la función del potencial ϕ y el gradiente o intensidad de campo.

$$E = -\text{grad } \phi$$



► Fig. 1

2. CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO

Sólo a modo de recordatorio citaremos los diferentes métodos de cálculo que existen:

2.1. MÉTODOS MATEMÁTICOS

- › Representación conforme.
- › Transformación de coordenadas.

Son procedimientos muy exactos pero de resolución matemática muy compleja, por lo que quedan limitados a electrodos de formas muy especiales.

2.2. MÉTODOS NUMÉRICOS

- › Diferencias finitas.
- › Montecarlo.
- › Método de cargas.

Consisten en general en la resolución de la ecuación de Laplace en series de Taylor, despreciando los términos de cierto orden dependiendo de la exactitud que se precise. Todos estos métodos exigen la utilización de ordenadores para la resolución de casos prácticos.

2.3. MÉTODOS EXPERIMENTALES

- › Papel conductor.
- › Cuba electrolítica.
- › Métodos directos.
- › Métodos reticulares.

Son sistemas sencillos y de bajo costo, que aunque no proporcionan una gran precisión, pueden servir para los primeros tanteos de un diseño.

- › Transformadores de intensidad (CX) y tensión (UT) de 72,5 kV. REE (España)



3. MÉTODO DE CARGAS

Este método se basa en el supuesto de que las cargas distribuidas en la superficie de los electrodos, se encuentran localizadas en un número finito de puntos o líneas dentro de dichos electrodos.

Como suponemos que las condiciones iniciales no se alteran por la existencia de un campo eléctrico, conocidos los valores de las cargas puntuales o la densidad de carga en el caso de las cargas lineales, podemos calcular el potencial y el gradiente en cualquier punto del espacio. Este método fue desarrollado por Steinbigler y Weiss (dos dieléctricos), y desde su aparición está siendo ampliamente utilizado y mejorado. (fig. 2).

El valor final del potencial y el gradiente en un punto es la suma algebraica de los potenciales y gradientes debidos a todas las cargas existentes en el sistema, lo que en forma matricial resulta

$$[A] \cdot [Q] = [P]$$

siendo A la matriz de coeficientes, más o menos complicados pero dependientes únicamente de las magnitudes geométricas, y P el potencial en la periferia de los electrodos, que generalmente también es conocido. Por tanto, sólo falta calcular el valor de las cargas Q para que se satisfagan las condiciones.

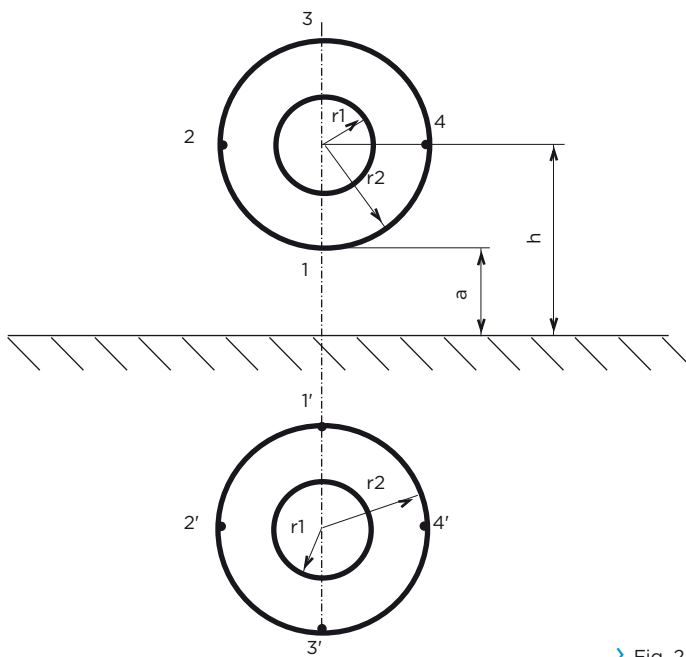
Como todos los métodos numéricos, precisa de ordenador para su resolución y el número máximo de cargas a utilizar está limitado por el mismo, así como la velocidad de respuesta. Actualmente esto no supone un problema. Al aplicar el método de cargas a un problema de campos, pueden surgir diversos errores ya sea por la incorrecta posición de las cargas, el número de las mismas, etc.

Existen métodos de control, admitiendo cierta tolerancia, que permiten verificar la bondad del sistema:

- > control del potencial en puntos de los electrodos.
- > curvatura del electrodo.
- > valor de la matriz de coeficientes.
- > valores de las cargas.

Una vez obtenida una adecuada resolución, se podrá continuar con la obtención de líneas de campo, gradientes, etc.

La precisión de un método matemático es superior a la de uno numérico, pero en la práctica generalmente no es posible conocer las fórmulas correspondientes a los electrodos utilizados, bien por su forma, bien porque hay que tener en cuenta los elementos de conexión, las paredes próximas, etc.



> Fig. 2

4. EL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Exponemos a continuación diversos ejemplos prácticos de aplicación de este método, desarrollados y utilizados en Artech para el diseño y definición de su gama de transformadores.

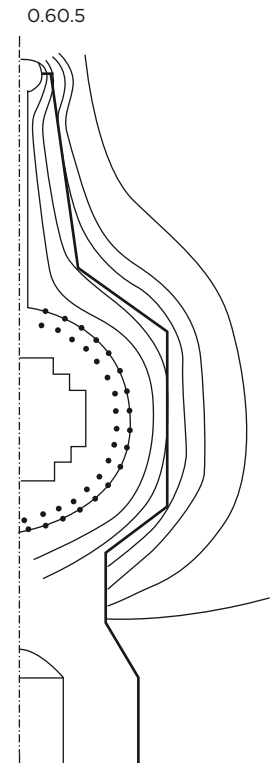
Obviamente, el método de cálculo es una herramienta más al servicio del ingeniero de diseño que completa su experiencia personal y los valores de parámetros obtenidos por ensayos de laboratorio y de vida.

4.1. TRANSFORMADORES DE MEDIA TENSIÓN

Son aparatos de relativa sencillez de fabricación y en los que el conocimiento del campo eléctrico así como de los gradientes ayuda a determinar espesores de dieléctrico, habitualmente resina sintética, así como a delimitar óptimamente los contornos exteriores del transformador para evitar o

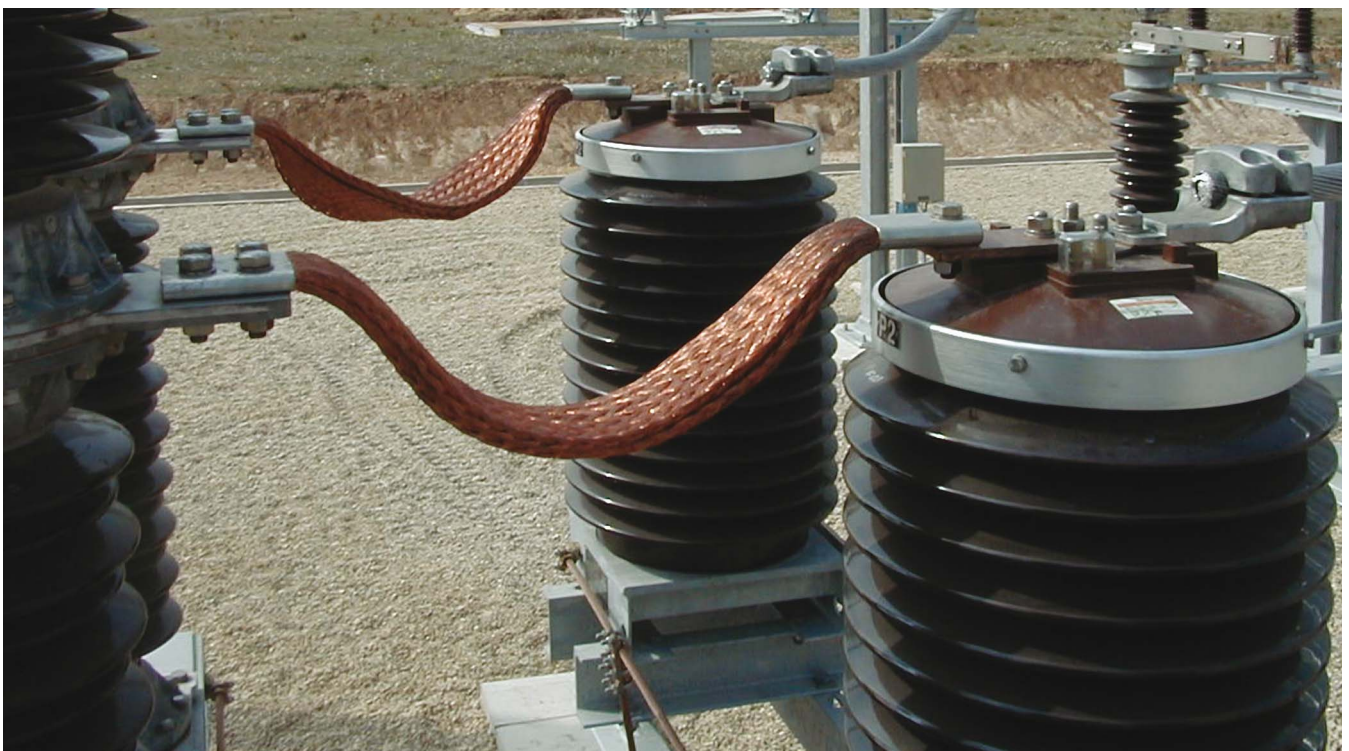
reducir el efecto de las descargas superficiales con el tiempo. (fig. 3).

La utilización del programa con uno o dos dieléctricos puede dar soluciones espectaculares en sus diferencias.



> Fig. 3

> Transformadores de intensidad (CX) con anillo equipotencial.



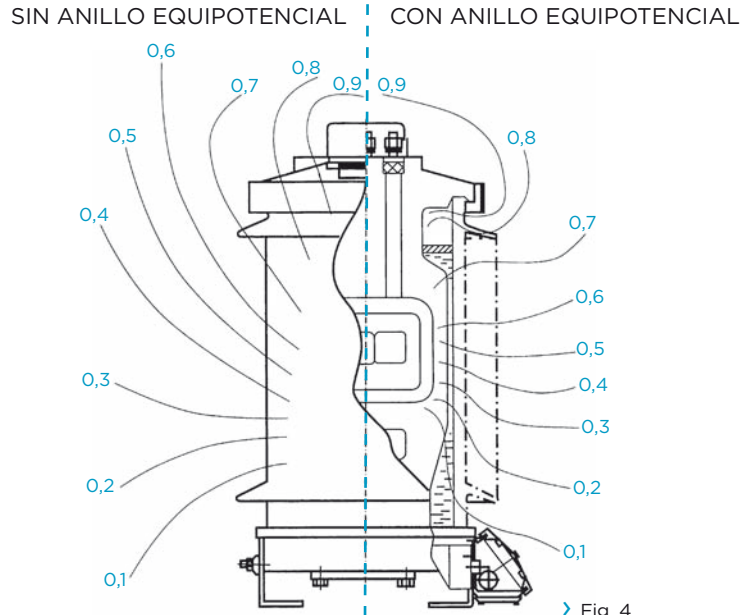
4.2. ANILLOS EQUIPOTENCIALES EN TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD

En los transformadores de aislamiento en resina y servicio intemperie, el problema de las descargas superficiales se acentúa debido a la polución atmosférica, humedad, etc.

Un aislante orgánico sometido a estos fenómenos y a campo eléctrico, puede degradarse superficialmente en tiempos relativamente cortos.

En la fig. 4 se observa la resolución del programa de cargas para un transformador con un anillo de alta tensión que rodea la cabeza del mismo y el diseño antiguo que carecía del mismo.

Mientras a la izquierda, solución antigua, la cabeza de resina está sometida a un gradiente superficial, en el nuevo transformador, el campo eléctrico es nulo, evitando de esta manera la degradación de la resina.

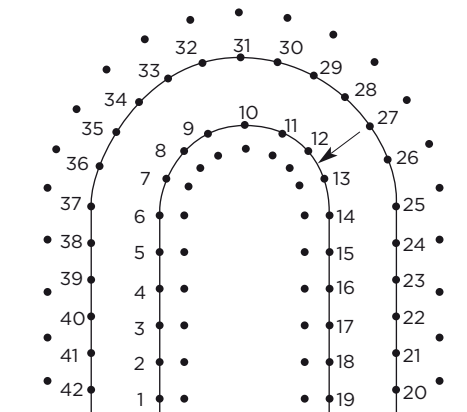


> Fig. 4

4.3. TRANSFORMADORES DE ALTA TENSIÓN

Los problemas de diseño se multiplican a medida que el nivel de tensión aumenta. Los dieléctricos más normales son el papel-aceite y la porcelana para subestaciones al aire libre, y el gas SF₆ y la resina para subestaciones blindadas.

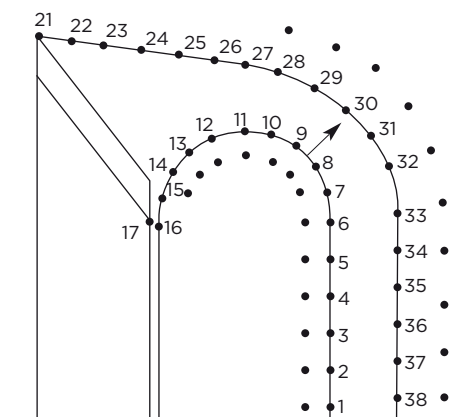
Tiene amplia aplicación el estudio del campo eléctrico en la determinación de formas de cajas de baja tensión, receptáculo de los núcleos y arrollamientos secundarios de los transformadores de intensidad, así como la definición de espesores mínimos de aislamiento. (fig. 5).



> Fig. 5

Igualmente se utiliza en los transformadores de tensión para el diseño del electrodo de alta tensión que rodea las bobinas y espesor de papel a rebatir. (fig. 6).

Otra aplicación práctica está en la definición de los bornes de distribución de tensión a lo largo del aislador así como la altura de los mismos aisladores.



> Fig. 6

4. EL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS TRANSFORMADORES DE MEDIDA

En efecto, el reparto del campo eléctrico de un transformador apoyado en el suelo o sobre un soporte es diferente y depende de la altura del mismo. Los valores de gradiente axial en el aire se reducen del orden del 15% para una altura de 2 m. (fig. 7).

Experimentalmente se sabe que la sección más peligrosa para que se produzca una descarga es la de separación de dieléctricos, por lo que se han determinado por este método de cálculo y por ensayos, los parámetros a vigilar.

Siempre controlando valores máximos y medios. El valor medio porque es un dato restrictivo del material dieléctrico utilizado. El valor máximo porque la parte de alta tensión concentra líneas equipotenciales, produciendo zonas de gradiente capaz de provocar descargas localizadas que pueden conducir a la descarga total.

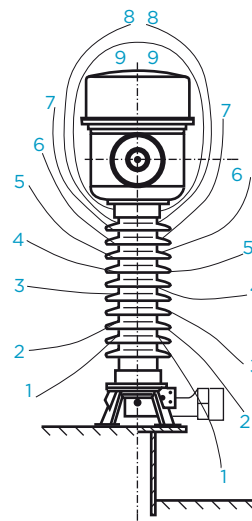
La simulación de los bordes de las pantallas (μm de espesor) es muy complicada y es necesaria una gran experiencia para extrapolar resultados.

Resulta curioso el distinto comportamiento de una misma borna posicionada hacia abajo (transformador de intensidad) o hacia arriba (transformador de tensión). Los valores de los gradientes son superiores en el primer caso. (fig. 8).

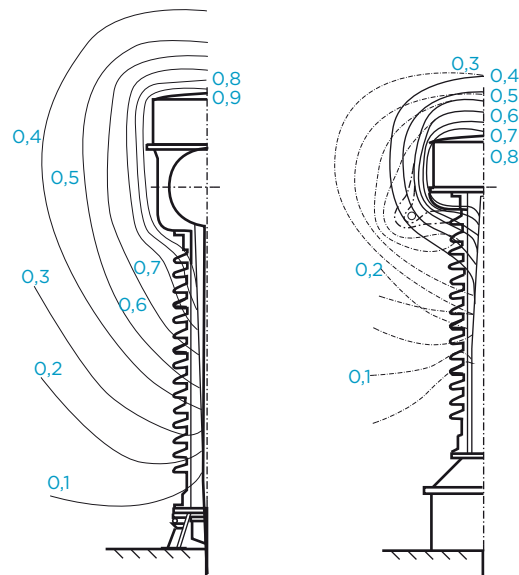
4.4. EJECUCIONES ESPECIALES

Es muy característico el ejemplo de cálculo de aparatos de muy alta tensión para laboratorios, donde debe extremarse el cuidado de aparición del efecto corona y permitir así ensayos de alta frecuencia.

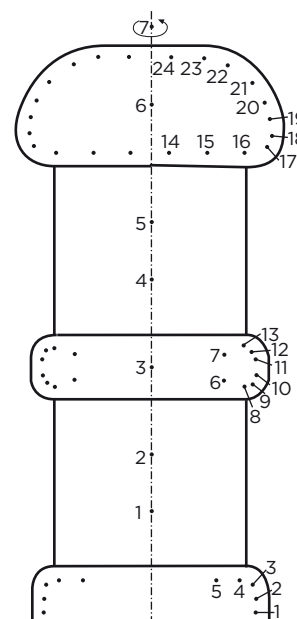
En la fig. 9 se puede ver el diseño de las formas exteriores del domo de alta tensión de un transformador elevador de 1000 kV.



> Fig. 7



> Fig. 8



> Fig. 9

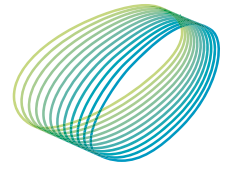
5. CONCLUSIONES

Las ventajas del conocimiento del campo eléctrico en el diseño de un transformador de medida son evidentes. Permite conocer de antemano el comportamiento teórico del mismo, así como un dimensionamiento adecuado de los dieléctricos haciendo del aparato fiable e industrial. No hay que olvidar que aún son recientes los diseños puramente empíricos y experimentales de estas máquinas.

Los conocimientos obtenidos por ensayos de laboratorio, de envejecimiento acelerado y de la experiencia en servicio, del comportamiento de los materiales aislantes y de los muchos factores que influyen en el aislamiento, tales como espesor, presión, temperatura, material de electrodos, formas de onda, etc., así como de los distintos mecanismos de fallo, juntamente con una utilización adecuada del cálculo del campo eléctrico serán fundamentales para conseguir transformadores de medida adecuados y fiables.







arteche
Moving together