

# Proyecto Fin de Carrera

Estudio de la distribución de tensión frente a  
impulso tipo rayo en un transformador seco  
de potencia

Autor

**Carlos Roy Martín**

Director

**Angel Antonio Bayod Rújula**

Ingeniería Industrial – Mención Sistemas Eléctricos

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Junio 2014

Quiero agradecer la ayuda que me han prestado mis  
compañeros de trabajo en ABB.

Aunque mencionando a alguien soy injusto con los demás,  
sería más injusto si no se lo agradeciera en especial a  
Antonio Nogués.

# Estudio de la distribución de tensión frente a impulso tipo rayo en un transformador seco de potencia

## RESUMEN

El trabajo ha consistido en calcular la distribución de tensión ante un impulso tipo rayo en los arrollamientos de un transformador seco de 1600 kVA de potencia con relación de transformación 20.000 / 725 V y en comprobar si el cálculo es correcto midiendo la distribución de tensión real.

En primer lugar se han calculado mediante FEM (método de los elementos finitos) las capacidades e inductancias que forman el circuito equivalente del arrollamiento de AT (alta tensión). Se han resuelto dos modelos, ambos a una frecuencia de 50 Hz: uno eléctrico, realizado con ElecNet, para obtener las capacidades y otro magnético, mediante MagNet, para calcular las inductancias. Para tener una idea de la complejidad de cada modelo, el eléctrico está formado por unos 30 elementos y el magnético por más de 1000 espiras. Para detectar posibles errores, los resultados de la simulación FEM se han cotejado con los obtenidos mediante cálculo manual aproximado a partir de expresiones analíticas.

En segundo lugar, con los valores obtenidos mediante FEM se ha ensamblado el circuito equivalente del arrollamiento de AT, formado por unos 300 elementos, y se ha resuelto con el programa de simulación de circuitos PSPICE, empleando como excitación un impulso tipo rayo. Esta primera simulación del circuito no es el resultado final, tan sólo se emplea para obtener la frecuencia natural del arrollamiento. Esta a su vez es necesaria para calcular los valores de las resistencias del circuito equivalente, que se obtienen mediante una nueva simulación FEM magnética resuelta esta vez a la frecuencia natural.

Finalmente, se ha obtenido la distribución de tensión ante un impulso tipo rayo en el arrollamiento de AT resolviendo de nuevo su circuito equivalente con PSPICE, que ahora incluye las resistencias que se acaban de obtener.

Se ha fabricado un arrollamiento de AT igual al que se ha simulado para medir la distribución de tensión con un generador de impulso de baja tensión y un osciloscopio, comparándola con el cálculo.

Este trabajo (simulación FEM para obtener los valores de las capacidades e inductancias, cálculo aproximado para cotejar los resultados, resolución del circuito equivalente con PSPICE para obtener la frecuencia natural, nueva simulación FEM a esta frecuencia para calcular las resistencias, resolución final del circuito equivalente para obtener la distribución de tensión y medida de la distribución real) se ha realizado también para el arrollamiento de BT (baja tensión). Este caso no es una mera repetición del primero, ya que cada arrollamiento está fabricado con una tecnología diferente y, por lo tanto, tienen circuitos equivalentes diferentes.

Durante la medida del arrollamiento de BT el generador de impulso se averió. Para no retrasar el proyecto se ha diseñado y construido un nuevo generador con suficiente capacidad como para ensayar este arrollamiento.

La distribución de tensión simulada es muy similar a los valores que se han medido: la exactitud para el arrollamiento de BT ha sido excelente, mientras que para el de AT la diferencia ha sido algo mayor.

## INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción .....	5
2. Origen de las sobretensiones de alta frecuencia que afectan a los transformadores .....	7
3. Distribución de tensión en un arrollamiento ante transitorios de alta frecuencia .....	9
3.1. Circuito equivalente a alta frecuencia de un transformador .....	9
3.2. Distribución de tensión inicial, transitoria y final .....	10
4. Estado del arte en arrollamientos para mejorar su comportamiento ante sobretensiones de alta frecuencia .....	12
4.1. Aislamiento reforzado .....	12
4.2. Aros de guarda .....	13
4.3. Arrollamientos entrelazados .....	13
4.4. Arrollamientos con espiras de apantallamiento .....	14
5. Método seguido en la simulación .....	15
6. Simulación de la distribución de tensión en el arrollamiento de alta tensión .....	17
6.1. Características y geometría del arrollamiento .....	17
6.2. Cálculo del circuito equivalente .....	18
6.3. Resultado de la simulación .....	21
7. Simulación de la distribución de tensión en el arrollamiento de baja tensión .....	22
7.1. Características y geometría del arrollamiento .....	22
7.2. Cálculo del circuito equivalente .....	22
7.3. Resultado de la simulación .....	24
8. Medida de la distribución de tensión mediante generador de impulso recurrente .....	25
8.1. Montaje experimental .....	25
8.2. Resultado de las medidas en el arrollamiento de alta tensión .....	26
8.3. Resultado de las medidas en el arrollamiento de baja tensión .....	27
9. Comparación simulaciones vs medidas .....	28
10. Conclusiones .....	30
11. Bibliografía .....	31



ANEXO 1. Cálculo aproximado de los elementos de circuito en el arrollamiento de alta tensión .....	32
1.1. Capacidad entre espiras .....	32
1.2. Capacidad entre discos .....	32
1.3. Capacidad a tierra .....	33
1.4. Autoinductancia de un disco .....	34
1.5. Inductancia mutua entre discos .....	35
1.6. Resistencia serie .....	36
ANEXO 2. Cálculo FEM de los elementos de circuito en el arrollamiento de alta tensión .....	40
2.1. Capacidad entre espiras .....	40
2.2. Capacidad entre discos y a tierra .....	41
2.3. Autoinductancia e inductancia mutua entre discos .....	44
2.4. Resistencia serie .....	47
ANEXO 3. Cálculo aproximado de los elementos de circuito en el arrollamiento de baja tensión .....	49
3.1. Capacidad entre espiras .....	49
3.2. Autoinductancia e inductancia mutua entre espiras .....	50
3.3. Resistencia serie .....	52
ANEXO 4. Cálculo FEM de los elementos de circuito en el arrollamiento de baja tensión .....	54
4.1. Capacidad entre espiras .....	54
4.2. Autoinductancia e inductancia mutua entre espiras .....	56
4.3. Resistencia serie .....	58
ANEXO 5. Generadores de impulso tipo rayo .....	59
5.1. Generador de alta tensión .....	59
5.2. Generador recurrente de baja tensión Haefely RSG-482 .....	61
5.3. Generador recurrente de baja tensión de construcción propia .....	62
ANEXO 6. Formas de onda simuladas y medidas en el arrollamiento de alta tensión .....	64
6.1. Tensiones a tierra .....	64
6.2. Tensiones entre discos .....	69
ANEXO 7. Formas de onda simuladas y medidas en el arrollamiento de baja tensión .....	74
7.1. Tensiones a tierra .....	74
7.2. Tensiones entre discos .....	79

## 1. INTRODUCCION

El problema de las sobretensiones transitorias en los transformadores lleva siendo un tema de interés desde hace más de un siglo, como lo atestigua la abundante bibliografía existente que empieza con el desarrollo de las primeras líneas aéreas y sigue hasta hoy. El problema es complejo porque no se conoce la forma y el número de las sobretensiones a las que el transformador se verá expuesto. Además, buena parte de los transformadores de potencia son diseños únicos y, por lo tanto, su respuesta ante una misma sobretensión es diferente. El problema también se puede ver agravado por fenómenos de resonancia, tanto entre el transformador y la red como en los propios arrollamientos.

Si se tiene en cuenta que un transformador es uno de los elementos más costosos del sistema eléctrico y que su avería también acarrea costes por interrupción del suministro, se comprende el grado de fiabilidad que se le exige a su aislamiento. Y aunque es cierto que existen sistemas de protección frente a las sobretensiones, su uso no garantiza completamente la ausencia de fallos. El primer paso para definir el aislamiento es conocer la tensión que debe soportar; éste valor es evidente a bajas frecuencias, pero debe calcularse en el caso de sobretensiones transitorias de alta frecuencia.

El objetivo de este proyecto es calcular la distribución de tensión en los arrollamientos de un transformador seco de potencia cuando se ve afectado por un impulso tipo rayo 1.2/50  $\mu$ s. En concreto se va a simular una fase de un transformador trifásico de 1600 kVA de potencia con relación de transformación 20.000 / 725 V. Su arrollamiento de AT es de tecnología de discos mientras que el de BT es de banda, de modo que es de esperar que su respuesta sea diferente y, por lo tanto, el cálculo se hará en ambos arrollamientos.

La forma en la que se aborda el problema consiste en obtener el circuito equivalente de alta frecuencia de cada arrollamiento para así poder calcular las tensiones a tierra que aparecen cuando una sobretensión alcanza el transformador. Para lograr este objetivo se sigue el siguiente esquema:

- Cálculo de los elementos del circuito equivalente del arrollamiento mediante expresiones aproximadas. Este cálculo solamente se emplea para cotejarlo con la solución del mismo problema mediante FEM que se hace posteriormente.
- Cálculo de los mismos elementos del circuito equivalente anterior, pero ahora mediante FEM. Se emplean los programas de simulación ElecNet, para el cálculo eléctrico, y MagNet para el magnético.
- Ensamblaje del circuito equivalente del arrollamiento, empleando los valores de los elementos de circuito calculados mediante FEM, y obtención de su respuesta ante un impulso tipo rayo. Se emplea el programa de simulación de circuitos eléctricos PSPICE.
- Medida de la distribución de tensión en un arrollamiento igual al que se ha simulado. Se emplea como excitación un generador de impulso de baja tensión, de modo que puede usarse un osciloscopio convencional para la medida.
- Comparación entre la simulación y la medida y valoración de los resultados.

Aunque lo anterior es la parte central del proyecto, la memoria también incluye una breve explicación del origen de las sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos, del circuito equivalente a alta frecuencia de un transformador y sobre el estado del arte en la fabricación de arrollamientos para mejorar la distribución de tensión.

El autor del proyecto trabaja en la fábrica de transformadores secos de ABB en Zaragoza, aunque este trabajo no es un proyecto interno. De todas formas, se han empleado las instalaciones de ABB para fabricar los arrollamientos, realizar su simulación FEM y medir su respuesta en el laboratorio.

El contenido de la memoria, aparte de esta introducción, se encuentra organizado de la siguiente forma:

- En la sección 2 se explican las causas de las sobretensiones de alta frecuencia que puede sufrir un transformador, así como los ensayos que se realizan para comprobar que las soporta.
- En el siguiente apartado se expone cómo estas sobretensiones se reparten de forma no lineal en un arrollamiento: cómo éste puede modelarse con su circuito equivalente y cuál es su respuesta.
- La sección 4 es un resumen del estado del arte en la fabricación de devanados para mejorar su comportamiento ante sobretensiones de alta frecuencia.
- En la sección 5 se explica el método de cálculo que se ha seguido en la simulación.
- En el apartado 6 se describe la geometría del devanado de AT y cómo a partir de ella se calculan los elementos de su circuito equivalente. Finalmente se simula su respuesta ante un impulso tipo rayo.
- El siguiente apartado es análogo al anterior, solo que aquí se trata del arrollamiento de BT.
- En la sección 8 se describe el montaje experimental que se ha realizado para medir la distribución de tensión. En el siguiente apartado se comparan estas medidas frente a las simulaciones.
- Finalmente, en el último apartado se expone un resumen del trabajo realizado, se valora el grado de cumplimiento de los objetivos y se sugieren posibles líneas de ampliación.

La memoria también consta de los siguientes 7 anexos:

- En el anexo 1 se obtienen los valores de los elementos de circuito del arrollamiento de AT empleando expresiones aproximadas.
- En el anexo 2 se repite el cálculo anterior empleando simulación FEM.
- Los anexos 3 y 4 son similares a los dos anteriores, solo que ahora respecto al arrollamiento de BT.
- En el anexo 5 se explican los generadores de baja tensión empleados en las medidas.
- Los dos últimos anexos son la recopilación de las tensiones simuladas y medidas. Se adjuntan las tensiones a tierra y las diferencias de tensión internas más significativas.

## 2. ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES DE ALTA FRECUENCIA QUE AFECTAN A LOS TRANSFORMADORES

Los transformadores en el sistema eléctrico pueden sufrir sobretensiones transitorias de diferentes magnitudes, frecuencia y formas de onda. Estas sobretensiones están causadas por descargas atmosféricas o por cambios bruscos en la configuración de la red. El tipo y número de sobretensión que se puede esperar afecte a un transformador depende de su localización en la red, situación geográfica, protecciones, etc.

Con el fin de dar una idea de la multitud de fenómenos que pueden causar sobretensiones de alta frecuencia, se enumeran a continuación los más comunes.

- Caída de un rayo en una línea o cerca de esta: es una de las causas más importantes a tener en cuenta y aunque el uso de autoválvulas reduce en gran medida la probabilidad de fallo, no lo elimina completamente. El fallo es posible porque la autoválvula limita la tensión en el terminal donde está conectada, pero es incapaz de limitar las sobretensiones en puntos internos del arrollamiento.
- Corte brusco de la corriente (*chopping*) al abrir un interruptor: se produce cuando la corriente es cortada antes de su paso por cero y en un tiempo muy pequeño. Esta variación rápida de la corriente causa una sobretensión en la inductancia que es el arrollamiento. Aunque este problema aparece en todas las tecnologías, es especialmente grave en interruptores de vacío y de SF<sub>6</sub>.
- Pre-arcos (*pre-strikes*) al cerrar un interruptor: ocurre cuando se ha iniciado la maniobra y la separación entre contactos ya es pequeña. En esta situación, la TRV<sup>1</sup> del interruptor puede superar su capacidad de aislamiento y la corriente empieza a circular a pesar de que los contactos aún están abiertos; pero esta corriente puede sufrir *chopping*, como se ha visto, causando sobretensiones.

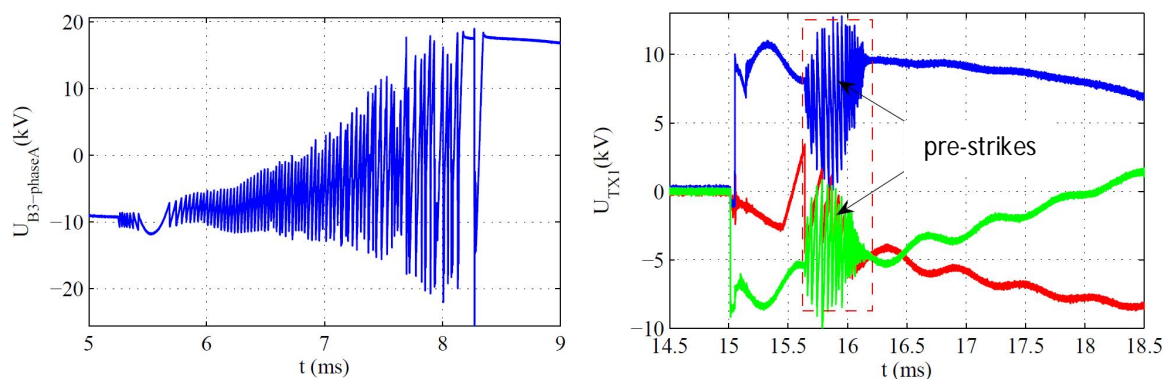


fig. 1 – sobretensión por chopping al abrir un interruptor (izda.) y por pre-strikes al cerrarlo (dcha.)

- Energización o fallo a tierra en una línea con un transformador en su extremo: en ambos casos se produce una perturbación que se propaga a través de la línea. Cuando esta onda llega al transformador la diferencia de impedancias entre ambos hace que se refleje y viaje en dirección opuesta. Si la distancia entre el punto donde se ha iniciado la perturbación y el transformador es

<sup>1</sup> TRV: *transient recovery voltage*, es la tensión que aparece entre los terminales de un interruptor después de la interrumpir la corriente. Depende del tipo de interruptor, de las características de la red y del tipo de maniobra.

parecida a un cuarto de onda de la frecuencia natural del arrollamiento, las sucesivas reflexiones están en fase y se produce una escalada de la tensión.

- Maniobras en subestaciones aisladas en gas: las especiales características de las conexiones aisladas con gas, que se comportan como una guía de ondas con una capacidad muy pequeña, hacen que cualquier maniobra genere sobretensiones con un frente de onda muy rápido. Aunque la frecuencia de estas oscilaciones es demasiado elevada para excitar la frecuencia natural del arrollamiento, sí puede afectar a las secciones del devanado localizadas más cerca del terminal.

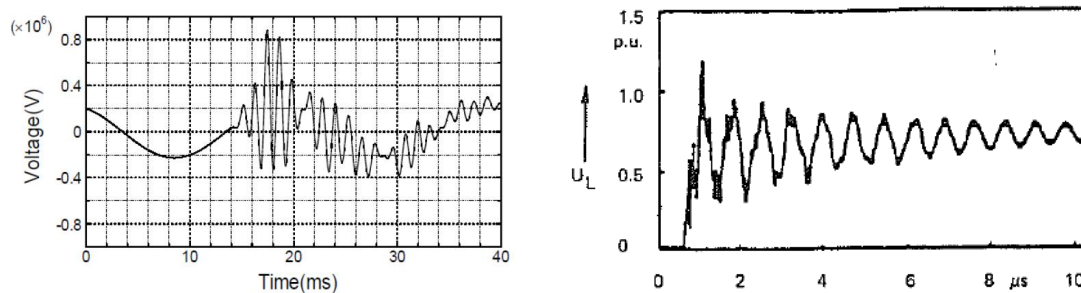


fig. 2 – sobretensión por resonancia (izda.) y por maniobra en una subestación aislada en gas (dcha.)

El aislamiento de un transformador debe ser capaz de soportar estas sobretensiones, y en general, el diseño y proceso de fabricación se valida mediante ensayos. Aunque puede ser objeto de requisitos particulares por parte del usuario, los ensayos aplicables están definidos por las normas IEC o ANSI correspondientes, que representan la mayor parte de las condiciones que pueden ocurrir en la red.

Pero es evidente que no todas las formas de onda de las sobretensiones que pueden ocurrir en un sistema eléctrico están cubiertas por las normas, estas más bien tratan de dar unas envolventes de onda que acoten los casos prácticos que pueden darse. En este sentido, se muestra a continuación un impulso tipo rayo 1.2/50  $\mu$ s, que es la forma de onda normalizada para reproducir los efectos de una sobretensión transitoria de alta frecuencia en un transformador.

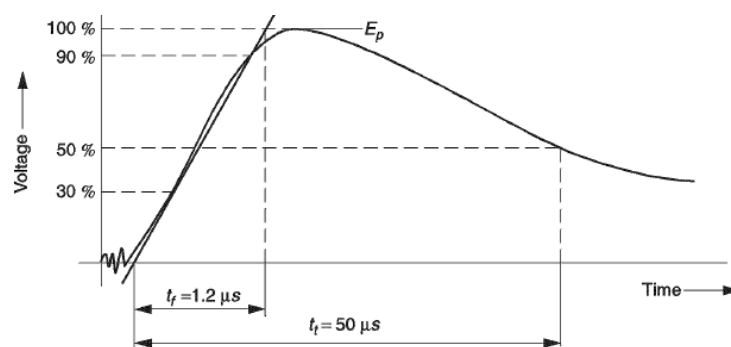


fig. 3 – impulso normalizado tipo rayo 1.2/50  $\mu$ s

El impulso tipo rayo trata de cubrir tanto el caso de descargas atmosféricas como el de cualquier sobretensión transitoria de alta frecuencia como las que se acaban de explicar. Este ensayo puede ser destructivo por perforación del aislamiento a causa de las elevadas tensiones que hay en juego. Por ejemplo, a un transformador con una tensión nominal de 20 kV le corresponde un impulso con un valor de pico de 145 kV.

### 3. DISTRIBUCION DE TENSION EN UN ARROLLAMIENTO ANTE TRANSITORIOS DE ALTA FRECUENCIA

Incluso el transformador más sencillo tiene una estructura de arrollamientos compleja y por lo tanto cualquier método que se emplee para resolver la distribución de tensión es, en el mejor de los casos, una aproximación. Se ha elegido el método del circuito equivalente, tanto por su sencillez como porque cada elemento del circuito tiene un claro significado físico, de modo que es un método adecuado para comprender los fenómenos físicos sin perder de vista el transformador real.

#### 3.1. Circuito equivalente a alta frecuencia de un transformador

Durante un transitorio, la distribución de tensión es el resultado de los campos electromagnéticos que aparecen en el arrollamiento y que son función de la posición y el tiempo. Las inductancias (propias y mutuas), las capacidades y las resistencias están distribuidas a lo largo del arrollamiento y los fenómenos se pueden describir mediante ecuaciones en derivadas parciales, pero su manejo y solución es difícil. Sin embargo, si el arrollamiento se divide en secciones en las que los elementos de circuito están concentrados, el problema de campos se convierte en uno de circuitos, mucho más fácil de resolver [1].

El circuito equivalente consiste en una serie de ramas acopladas magnéticamente entre sí. Estas ramas tienen igual geometría en el sentido de que están formadas por los mismos elementos de circuito *RLC*, aunque sus valores individuales son diferentes, en general, para cada rama.

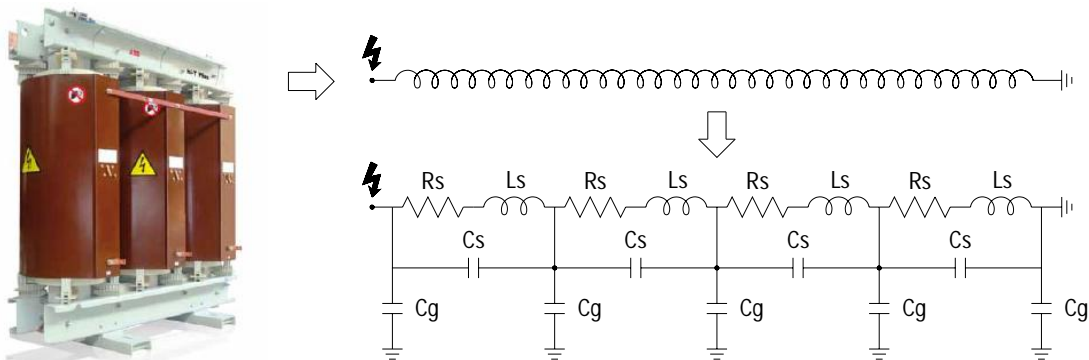


fig. 4 – transformador real, arrollamiento ideal y arrollamiento real aproximado

El modelo debe cumplir dos características para reproducir con suficiente exactitud el comportamiento transitorio del transformador real [2]:

En primer lugar, el transformador debe ser modelado con suficiente nivel de detalle en relación a la frecuencia de las sobretensiones que se pretenden estudiar. En un modelo válido, la longitud de onda de la tensión aplicada debería ser, al menos, un orden de magnitud mayor que la dimensión de cualquier rama. Esta condición define una longitud de onda mínima ( $\lambda_{MIN}$ ) pero, como es habitual caracterizar las ondas por su frecuencia, se puede expresar como:

$$f_{MAX} = \frac{v}{\lambda_{MIN}}$$

Donde ( $v$ ) es la velocidad de propagación de las ondas en los arrollamientos, que es aproximadamente igual a la mitad de la velocidad de la luz en el vacío.

En segundo lugar, los valores de los elementos de circuito calculados deben obtenerse de forma suficientemente precisa, de manera que reflejen la geometría y las propiedades de los materiales reales.

### 3.2. Distribución de tensión inicial, transitoria y final

El fenómeno que se produce cuando una sobretensión incide sobre un transformador se puede explicar dividiendo el proceso en tres periodos: inicial, intermedio y final [3]. La separación temporal entre uno u otro es arbitraria en el sentido de que no hay separación estricta entre una fase u otra, aunque esta clasificación cualitativa es útil de cara a entender el proceso.

Cuando una onda con frente escarpado del tipo impulso tipo rayo alcanza el terminal de un transformador, la parte inductiva de su circuito equivalente se comporta como un circuito abierto debido a que la corriente no puede establecerse en ellas instantáneamente. De forma inversa, la parte capacitiva del circuito reacciona como un cortocircuito. Estas capacidades son atravesadas por una corriente de desplazamiento, de forma que se establece una distribución de tensión a lo largo del arrollamiento. El circuito equivalente en este caso se muestra a continuación.

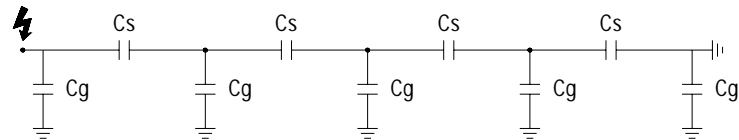


fig. 5 – circuito equivalente en el periodo inicial

Esta situación se corresponde con el periodo inicial y acaba cuando los condensadores se cargan, lo que ocurre en un tiempo mínimo, en general en décimas de microsegundo. En esta etapa el transformador se comporta como una red puramente capacitiva y por lo tanto la tensión que aparece en cada nodo depende únicamente del valor de estas capacidades.

Se puede demostrar [4] que la distribución inicial de tensión en el punto  $x$  de un arrollamiento de longitud  $l$ , cuando se le aplica un escalón de tensión en un extremo con el opuesto a tierra, corresponde a la representada en la figura.

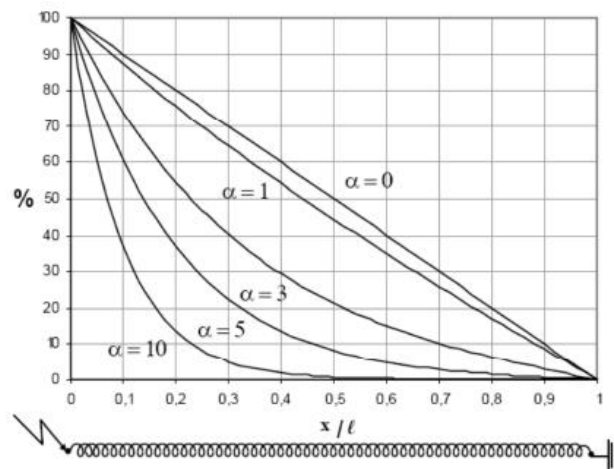


fig. 6 – distribución inicial de tensión para diferentes valores de  $\alpha$

El factor  $\alpha$  que aparece como parámetro en la figura anterior es una constante que depende de la geometría del transformador y es función de las capacidades a tierra ( $C_g$ ) y en serie ( $C_s$ ) de su circuito equivalente. Donde  $(C_g)_{total}$  es la asociación paralelo de las capacidades  $C_g$ , y  $(C_s)_{total}$  es la asociación serie de las capacidades  $C_s$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{(C_g)_{total}}{(C_s)_{total}}}$$

La presencia de la capacidad a tierra causa una no uniformidad en la distribución de tensión. A mayor  $\alpha$ , mayor es la sobretensión en el extremo del arrollamiento que recibe el impulso y menor es en el extremo a tierra, por lo que se comprende la necesidad de minimizar el valor de  $\alpha$ .

El periodo intermedio empieza cuando se establece una corriente a través de las inductancias del circuito equivalente y se producen una serie de oscilaciones amortiguadas entre las capacidades y las inductancias. La tensión a lo largo del arrollamiento tiene una amplitud diferente en cada momento, como se muestra en la siguiente figura para diferentes instantes hasta los primeros 40  $\mu s$ . Estas tensiones oscilan alrededor del valor correspondiente a la distribución final, representada con una línea recta, y son mayores cuanto mayor es la diferencia entre la distribución inicial y final.

Las excursiones de la tensión pueden superar el valor del impulso que alcanza al transformador, como se ve en la envolvente a trazos de la figura. Nuevamente, ahora a causa de las oscilaciones, se ve lo deseable que es tener un valor de  $\alpha$  mínimo para evitar las sobretensiones.

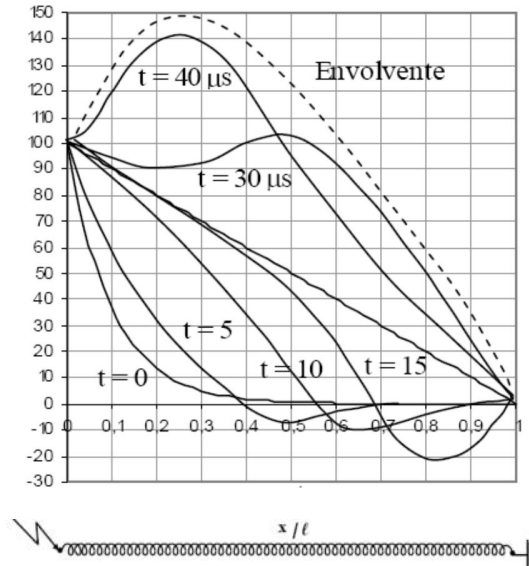


fig. 7 – oscilaciones de tensión en diferentes instantes, para  $\alpha = 10$

El periodo final es el más simple de todos, se alcanza cuando ha transcurrido un tiempo suficiente como para que las oscilaciones se amortigüen totalmente. En estas condiciones estacionarias la parte capacitiva del circuito equivalente tiene una impedancia muy elevada, y la parte inductiva es la que determina la distribución de tensión. Por lo tanto la distribución final es simplemente un reparto lineal de la tensión a lo largo del arrollamiento.



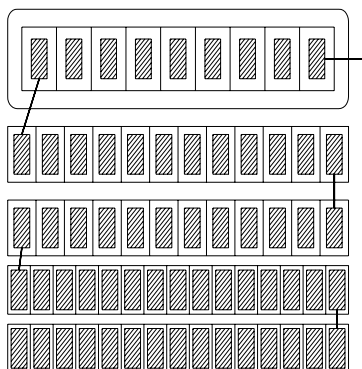
#### 4. ESTADO DEL ARTE EN ARROLLAMIENTOS PARA MEJORAR SU COMPORTAMIENTO ANTE SOBRETENSIONES DE ALTA FRECUENCIA

Hay múltiples soluciones para evitar que las sobretensiones de alta frecuencia produzcan un fallo de aislamiento. Para los niveles más bajos de tensión el método habitual es aumentar el aislamiento, mientras que para los niveles más altos se han desarrollado tipos de arrollamientos, disposición de los conductores y técnicas de apantallamiento que consiguen un reparto más homogéneo de la tensión. Estas soluciones no son incompatibles entre sí y a menudo se pueden encontrar todas ellas combinadas en un mismo arrollamiento.

A continuación se muestran las principales soluciones constructivas, agrupadas según el principio de funcionamiento en que se basan.

##### 4.1. Aislamiento reforzado

Una primera solución al problema es aceptar que el reparto de la tensión a lo largo de los arrollamientos es irregular y aumentar el aislamiento donde sea necesario. Las zonas más estresadas son los extremos de los arrollamientos y cualquier punto donde exista un cambio en la geometría, como puede ser la regulación<sup>2</sup>.



*fig. 8 – aislamiento reforzado en los tres primeros discos*

Pero el aumento en el espesor de aislamiento a su vez suele conllevar un aumento de la tensión en la zona reforzada. Esto es así porque el aislamiento adicional aumenta la separación entre espiras y entre discos, reduciéndose la capacidad serie, sin que se produzca un aumento de la capacidad a tierra en la misma proporción, y el factor  $\alpha$  aumenta. De modo que es necesario asegurar que el aumento en aislamiento es mayor que el aumento en tensión, de lo contrario estaremos reduciendo la resistencia a las sobretensiones a pesar de tener un mayor aislamiento [3].

A pesar de este inconveniente, el aislamiento reforzado es el método empleado hasta tensiones de impulso en torno a los 170 kV, y se suele usar en tensiones mayores combinándolo con otros métodos más efectivos que se ven a continuación.

---

<sup>2</sup> La regulación es una sección de un arrollamiento, o incluso un arrollamiento dedicado entero, que se emplea para variar la relación de transformación modificando el número de espiras activas. En función de la conexión que se establezca en cada momento se tendrá una geometría diferente.

#### 4.2. Aros de guarda

Una mejor solución consiste en disminuir la capacidad a tierra o aumentar la capacidad serie para lograr un factor  $\alpha$  menor, lo que conlleva una distribución más homogénea de la tensión. El único método usado en la práctica es el aumento de la capacidad serie, ya que disminuir la capacidad a tierra supone aumentar la separación entre arrollamientos y no es económico. Una forma sencilla de aumentar la capacidad serie es emplear aros de guarda.

Un aro de guarda es una superficie equipotencial de dimensión radial similar a la del arrollamiento, con una fina capa conductora en su superficie para reducir las pérdidas inducidas por el campo magnético y abierto en un punto para no formar una espira cerrada. Generalmente se conecta al terminal de línea.

El efecto del aro de guarda es cargar las espiras del disco donde se inserta de forma directa, sin que sea necesario hacerlo pasando de espira en espira. Cuanto más cerca del disco se sitúa el aro, mayor es el aumento de la capacidad y mayor es su efecto.

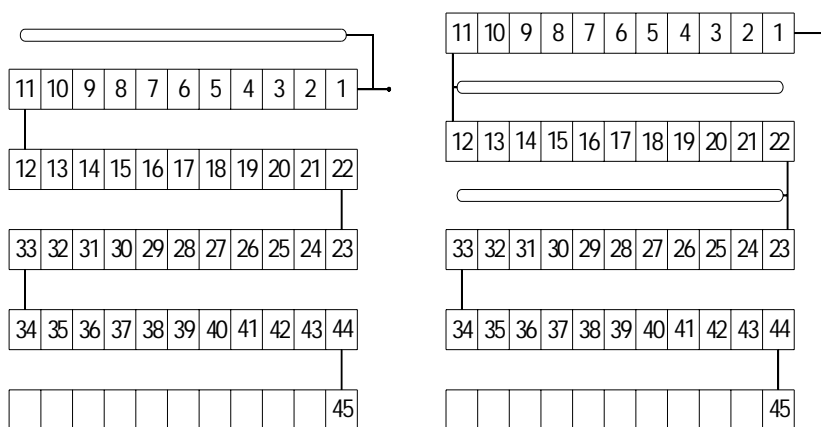


fig. 9 – aro de guarda en el extremo del arrollamiento (izda.) y entre los tres primeros discos (dcha.)

Un efecto adicional muy beneficioso del aro de guarda es que, gracias a su extensa superficie equipotencial y a sus cantos redondeados, reduce el campo eléctrico en los extremos de los arrollamientos. Sólo por esta razón se emplea en tensiones elevadas aunque su reparto no sea un problema [5].

#### 4.3. Arrollamientos entrelazados

Un arrollamiento entrelazado aprovecha la posibilidad de distribuir las espiras de uno o varios discos de forma que aumente su capacidad serie sin que afecte a su inductancia. Se bobina como un arrollamiento convencional, pero empleando al menos dos conductores que van cambiando de orden en cada disco mediante entrecruzamientos y, sólo si es necesario, también empalmes. La ventaja de este método es que, a diferencia de los dos casos vistos anteriormente, no requiere espacio adicional.

Su principio de funcionamiento es el siguiente: la capacidad serie total depende de las capacidades entre espiras y entre discos que, aunque son grandes, están conectadas en serie y su valor total es mucho menor. Con el entrelazamiento se consigue que espiras alejadas geoméricamente se encuentren próximas eléctricamente, favoreciendo una distribución más homogénea de la tensión.

Es posible aumentar la capacidad serie de tal forma que la distribución de tensión sea prácticamente lineal, aunque no es lo habitual porque la fabricación de estos arrollamientos es compleja y se busca una solución de compromiso. En este sentido, es habitual tener un entrelazado gradual a lo largo del arrollamiento: se empieza en un extremo con un fuerte entrelazado implicando cuatro discos, uno algo más reducido después implicando dos discos y se termina con discos sin entrelazar. Así se obtiene un reparto de la tensión suficientemente bueno, con transiciones graduales entre diferentes secciones y sin complicar en exceso la fabricación [4].

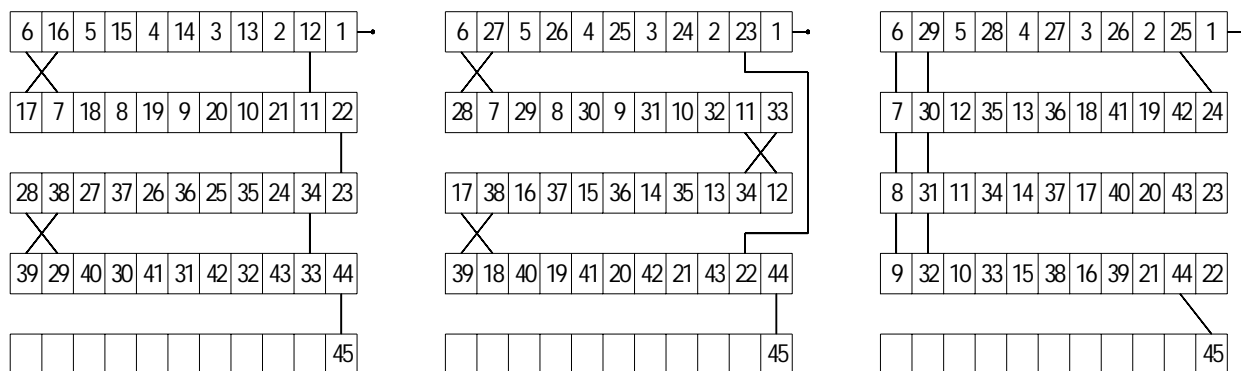


fig. 10 – arrollamiento entrelazado implicando dos discos (izda.) y cuatro discos (centro y dcha.)

#### 4.4. Arrollamientos con espiras de apantallamiento

El arrollamiento que incluye las denominadas espiras de apantallamiento, a pesar de lograr un aumento de la capacidad serie menor que el entrelazado, se emplea habitualmente al ser más fácil de fabricar. La espira de apantallamiento es un conductor aislado de la misma altura y con menor espesor que el conductor activo, que se bobina intercalado con este. Estas espiras, que pueden estar flotantes o conectarse a una espira activa, se unen por parejas entre dos discos consecutivos, consiguiendo un efecto similar al que se logra con dos discos entrelazados. Aunque este tipo de arrollamiento también tiene sus inconvenientes, debido a que hay espiras no activas se aprovecha peor el espacio y se usa una mayor cantidad de conductor comparado con uno entrelazado

Al igual que se hacía con los arrollamientos entrelazados, es habitual tener un apantallamiento gradual: se empieza con varias espiras de apantallamiento en los primeros discos y se va reduciendo su número hasta que se emplean discos sin apantallar [1].

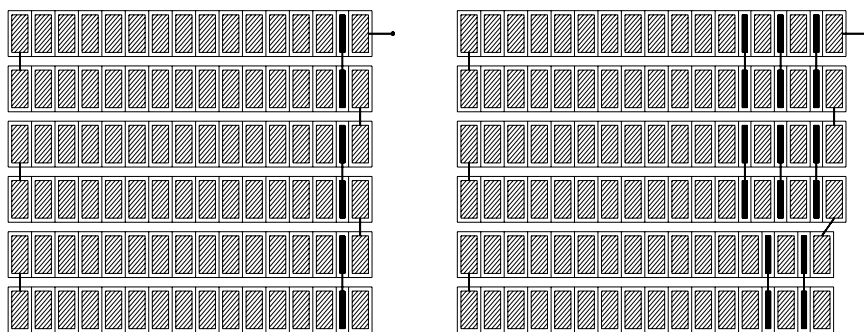


fig. 11 – arrollamiento con espiras apantalladas (izda.) y con apantallamiento gradual (dcha.)

## 5. METODO SEGUIDO EN LA SIMULACION

En los apartados anteriores se ha introducido el tema de los transitorios de tensión en transformadores. De aquí en adelante se va a describir el trabajo realizado simulando la distribución de tensión en los arrollamientos de AT y BT de un transformador seco de 1600 kVA de potencia.

El método de cálculo seguido se muestra en el siguiente esquema. El proceso comienza con el cálculo de los elementos (resistencias, inductancias y capacidades) con los que se construirá el circuito equivalente del transformador. Este cálculo se realiza mediante simulación FEM a una frecuencia baja (50 Hz). Para el cálculo de capacidades se emplea ElecNet y para el de inductancias y resistencias MagNet.

Posteriormente se vuelven a calcular los valores de los mismos elementos de circuito, pero ahora mediante cálculo manual aproximado a partir de expresiones analíticas. A causa de las simplificaciones realizadas, las soluciones obtenidas pueden tener un error relativamente grande en algún caso.

Se comparan ambos resultados, aunque en todo caso la solución FEM es la que se toma como correcta y la analítica se emplea sólo para detectar posibles errores en la simulación.

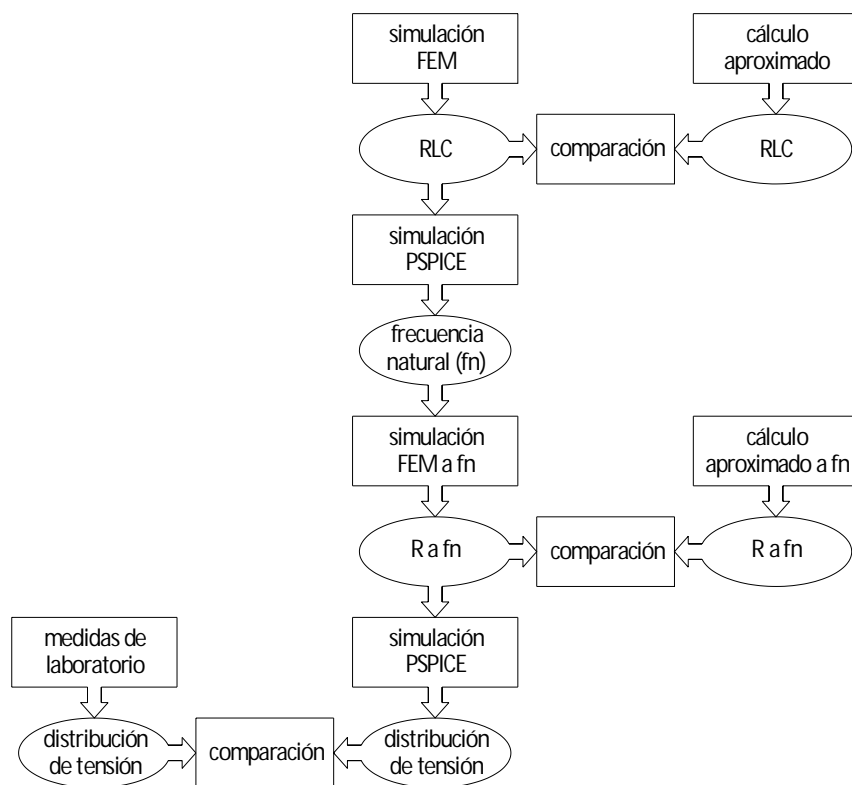


fig. 12 – método seguido en la simulación

Con los valores de los elementos obtenidos anteriormente se ensambla el circuito equivalente del arrollamiento y se realiza una primera simulación mediante PSPICE de su respuesta ante un impulso tipo rayo. Esta simulación de la distribución de tensión no es la definitiva porque se está cometiendo un error en el cálculo de las resistencias.

En efecto, el valor de la resistencia de un conductor por el que circula corriente alterna es la suma de su resistencia en corriente continua (resistencia óhmica) más la causada por el efecto *skin*<sup>3</sup>. Si además, como es el caso de un arrollamiento, el conductor se encuentra afectado por el campo magnético originado por las corrientes alternas que circulan por otros conductores, a las dos resistencias ya mencionadas hay que añadir la causada por el efecto proximidad<sup>4</sup>. La diferencia entre la resistencia en alterna y la óhmica es la resistencia adicional, y para determinarla es necesario conocer la frecuencia de la corriente. Como el cálculo de la resistencia se ha hecho en corriente continua, su efecto no se ha tenido en cuenta por ahora.

De modo que esta primera simulación PSPICE se emplea solamente para estimar la frecuencia de las corrientes y poder calcular así la resistencia adicional. El problema es más difícil de lo que pudiera parecer, porque la corriente tiene una forma de onda compleja: no es periódica y su forma cambia según circula por el arrollamiento.

Como solución de compromiso, se obtiene mediante la simulación con SPICE la onda de corriente a través de cada rama del circuito equivalente donde hay una resistencia, y se toma como única frecuencia de cálculo su frecuencia fundamental aproximada.

Esta aproximación en el cálculo de la frecuencia fundamental es válida a pesar de que se hayan subestimado los valores de las resistencias en la simulación PSPICE. Esto es así porque la frecuencia natural depende de los valores de capacidades e inductancias, mientras que las resistencias son las que determinan el factor de amortiguamiento de las oscilaciones. Por ahora sólo necesitamos una aproximación de la frecuencia para poder calcular la resistencia adicional, por lo que esto no es un problema.

Una vez estimada la frecuencia natural, se repite la simulación FEM con MagNet a esta frecuencia para obtener el valor de las resistencias. Se hace también un cálculo manual aproximado de la resistencia adicional, aunque dada la complejidad del problema, no es más que una comprobación del orden de magnitud de la solución.

Con los valores de capacidad e inductancia obtenidos en la primera simulación FEM y con los de resistencia de la segunda, se ensambla el circuito equivalente y se vuelve a simular con PSPICE; el resultado es la distribución de tensión que se buscaba.

Finalmente, se comprueba la exactitud de la simulación comparándola con los resultados obtenidos en las medidas de laboratorio del mismo arrollamiento. El ensayo se realiza aplicando un impulso tipo rayo con una tensión reducida y midiendo las tensiones a tierra con un osciloscopio en los mismos puntos en los que se ha simulado.

---

<sup>3</sup> Efecto *skin*: aumento de la resistencia de un conductor en corriente alterna respecto al valor en continua causado por un desigual reparto de la corriente en su sección, que es mayor en su periferia. Se origina a causa del campo magnético creado por la corriente que circula por el propio conductor.

<sup>4</sup> Efecto proximidad: efecto *skin* originado por el campo magnético creado por las corrientes que circulan por conductores cercanos.

## 6. SIMULACION DE LA DISTRIBUCION DE TENSION EN EL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION

Los arrollamientos que se han simulado se han fabricado ex profeso para poder medir la distribución de tensión en ellos. Gracias a que se les han añadido tomas conectadas a puntos internos ha sido posible realizar las medidas, porque, a diferencia de otros tipos de devanado, los conductores no son accesibles una vez que el arrollamiento está acabado. Es necesario destacar que, salvo esta particularidad, son arrollamientos normales y representativos de su tipo.

### 6.1. Características y geometría del arrollamiento

El arrollamiento de AT está fabricado mediante tecnología de discos, de modo que está formado por varias bobinas independientes para repartir la tensión y así facilitar el aislamiento. Todas estas bobinas están conectadas en serie, el final de una con el principio de la siguiente, de arriba abajo del arrollamiento. El devanado tiene una tensión nominal de 20.000 V y un aislamiento (tensión más elevada para el material) de 24 kV. La tensión de ensayo del impulso tipo rayo correspondiente a este nivel de aislamiento es de 145 kV.

El arrollamiento está dividido en 22 discos de 50 espiras, sumando 1100 espiras en total, con un aislamiento entre discos de 16 mm. El conductor empleado es cinta de aluminio de sección 35x0.5 mm, con poliéster de 111  $\mu\text{m}$  de espesor como aislamiento entre espiras. Una vez bobinado el arrollamiento se introduce en un molde y se encapsula con resina epoxi bajo vacío, para evitar que se formen burbujas. El conjunto está reforzado con malla de fibra de vidrio en la superficie interior y exterior, formando junto con la resina un material compuesto de gran resistencia mecánica.



*fig. 13 – estructura de un disco (izda.), estructura de un arrollamiento sin encapsular completamente (centro) y arrollamiento empleado en los ensayos (dcha.)*

Se han aprovechado los puentes serie entre discos para añadir los puntos de medida. Estos puentes son conexiones en diagonal entre la última espira de un disco y la primera del siguiente que se realizan doblando o soldando el conductor. En este caso los puentes se han hecho doblados, con la única particularidad de que sobresalen del devanado para, además de conectar los discos en serie, atornillarlos a unos pernos que se encuentran distribuidos en la parte frontal (ver fig. 13 dcha.). Como el devanado tiene 22 discos hay 21 puentes serie y, además de los terminales de principio y final del arrollamiento, tenemos 21 terminales de medida.

El primer paso antes de calcular el circuito equivalente del transformador es decidir el nivel de discretización a emplear, es decir, definir en el arrollamiento el conjunto de nodos donde se calculará la tensión. A más nodos más información sobre el reparto de tensión, pero también aumenta la complejidad del circuito y la potencia de cálculo necesaria. Aunque si el incremento en el número de nodos no se acompaña con un cálculo suficientemente exacto de los elementos de circuito que los unen, se obtendrán más datos pero no serán significativos. Por otro lado, si se elige un nivel de discretización adecuado es posible conocer la tensión aproximada de espiras que no eran nodos. Precisamente este es el caso de un arrollamiento de discos, donde la distribución de tensión en el interior de cada disco es aproximadamente proporcional al número de espiras [6].

El cálculo de los elementos de circuito se describe en detalle en los anexos 1 y 2, aunque a continuación se hace una breve descripción del significado de cada uno de ellos y de cómo se han calculado:

- 18 -

- Autoinductancia de un disco ( $L_s$ ): la formada por todas las espiras de un disco conectadas en serie.
- Inductancia mutua entre discos ( $M_{ij}$ ): representa el acoplamiento magnético entre pares de discos.
- Resistencia serie ( $R_s$ ): el equivalente serie de las resistencias de las espiras de un disco. Ya se ha visto en el apartado 5 que se debe a la suma de la resistencia óhmica, efecto skin y efecto proximidad.

Para el cálculo manual de los elementos de circuito se han empleado expresiones clásicas en la bibliografía. En unos casos se trata de aproximaciones de la solución exacta para evitar realizar cálculos complejos y en otros se obtienen de medidas de laboratorio. La única condición que hay que cumplir en ambos casos es que la geometría cumpla las restricciones que garantizan un error máximo aceptable.

En el cálculo mediante FEM se han empleado dos programas diferentes, ElecNet para la simulación eléctrica y MagNet para la magnética, aunque como ambos son de Infolytica su interfaz es similar.

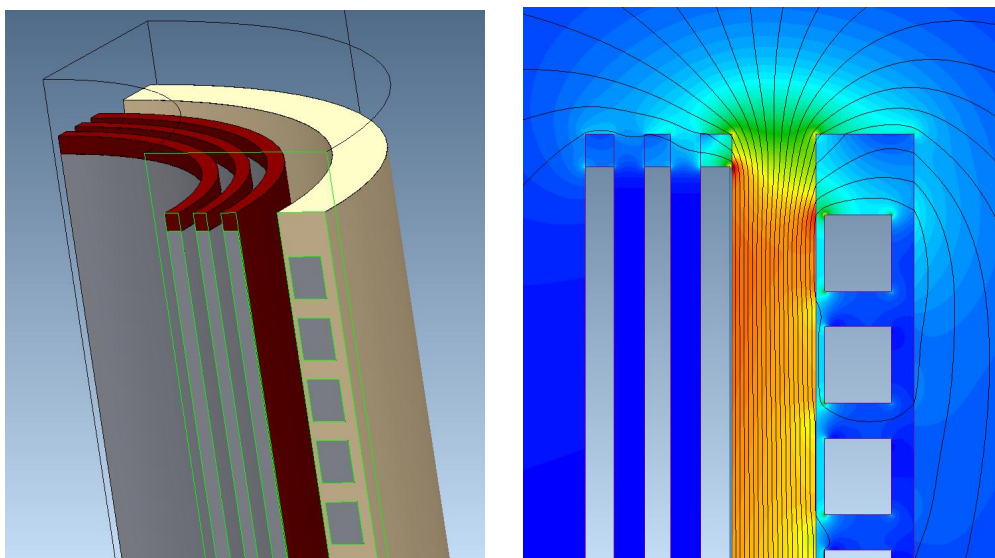


fig. 15 – modelo en ElecNet para calcular la capacidad a tierra del AT (izda.) y su solución (dcha.)

El primer paso de la simulación consiste en definir la geometría, y aunque es posible hacerlo directamente en ElecNet o MagNet, su editor gráfico es muy limitado y no se ha empleado. Así, para ElecNet se ha dibujado en AutoCAD y posteriormente se han importado los datos, mientras que para MagNet se ha hecho un algoritmo en VBA (*Visual Basic for Applications*) que genera la geometría. La razón para emplear dos métodos es que en el cálculo eléctrico cada disco es un único electrodo y tenemos sólo unas decenas de elementos, mientras que en el cálculo magnético se han incluido todas las espiras y hay más de mil. Los modelos son 2D porque los arrollamientos tienen simetría axial, lo que simplifica el trabajo.

El segundo paso es asignar las propiedades físicas a los distintos materiales. Para los aislamientos se han tomado los datos de [7] y [8], donde aparecen sus constantes dieléctricas en función de la frecuencia.

A continuación es necesario definir el mallado. Aunque se genera automáticamente, se ha elegido manualmente el tamaño máximo de la malla para cada elemento en función de su dimensión menor. También se ha dividido el modelo en áreas para poder emplear un mallado más fino sólo donde es



necesario y obtener un buen resultado sin que aumente mucho el tiempo de cálculo. El paso final antes de resolver es asignar las condiciones de contorno y definir las tensiones o corrientes conocidas.

ElecNet calcula directamente la matriz de capacidades entre todos los electrodos, pero MagNet no tiene esta opción, así que es necesario construirla manualmente. Para ello se ha hecho un pequeño algoritmo en VBA que inyecta corriente en un disco con los demás abiertos y lo repite para todos. El valor de las inductancias se obtiene como la relación entre el flujo concatenado y la corriente inyectada y el de las resistencias como la relación entre tensión inducida y corriente.

Una vez obtenidos los valores de las capacidades, inductancias y resistencias ya se pueden conectar entre sí como se ha visto en la fig. 14 para, después de simplificarlo mediante asociaciones de elementos, ensamblar el siguiente circuito equivalente:

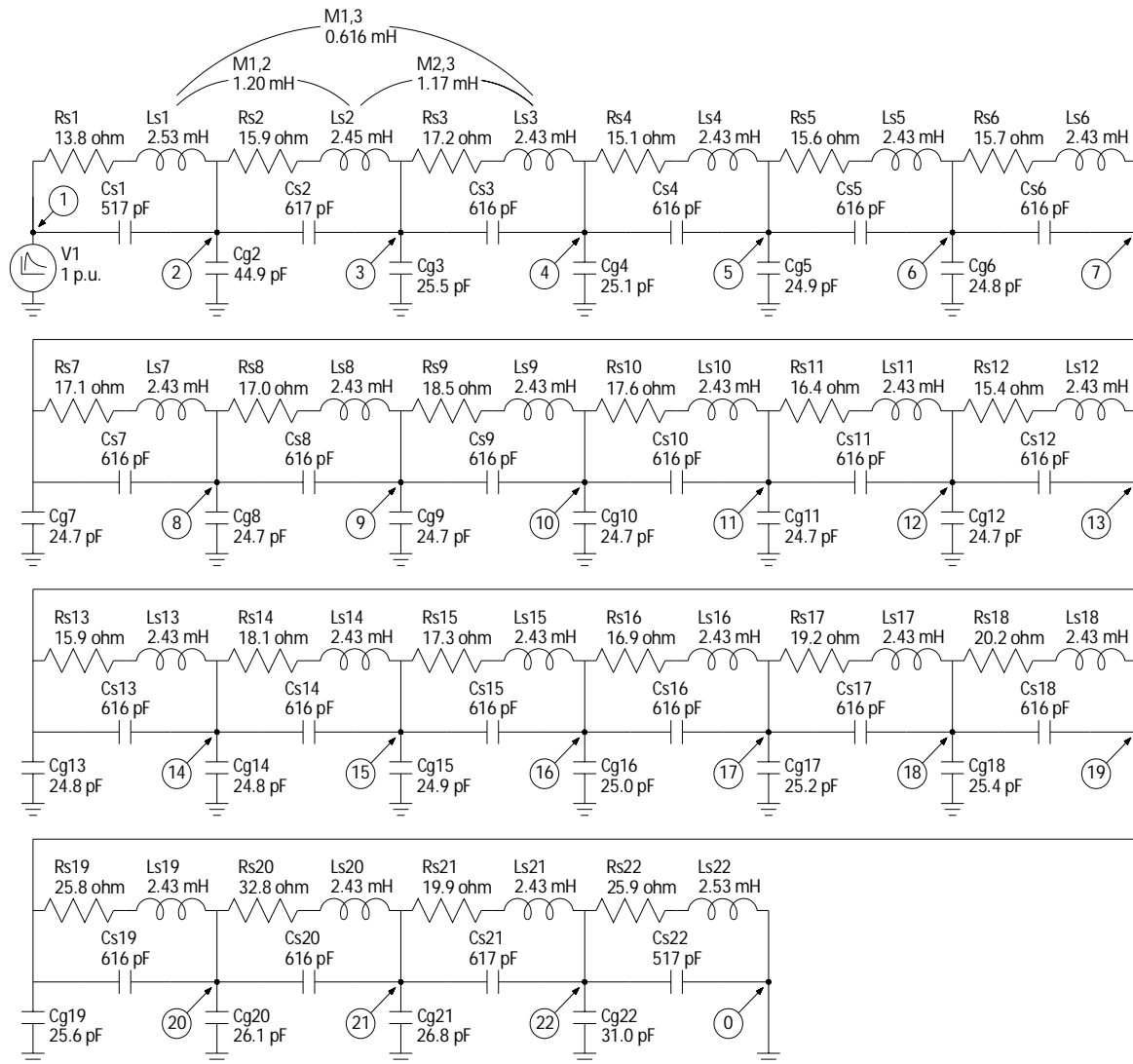


fig. 16 – circuito equivalente de AT (para simplificar sólo se han incluido las tres primeras inductancias mutuas)

### 6.3. Resultado de la simulación

Una vez obtenido el circuito equivalente, se calcula su respuesta frente a un impulso tipo rayo 1.2/50  $\mu\text{s}$  con el programa de simulación de circuitos PSPICE. El análisis que se hace es la respuesta transitoria en los primeros 80  $\mu\text{s}$ . No es posible emplear su editor gráfico para definir el circuito porque la versión para estudiantes está limitada a 50 elementos y tenemos más de 300. Para solucionar este inconveniente se ha introducido el circuito en formato fichero de texto (*netlist*), que tiene menos limitaciones que el editor gráfico.

La respuesta obtenida se muestra en la siguiente figura, donde se han representado las tensiones a tierra en función del tiempo y de la distancia al terminal del arrollamiento donde se ha aplicado el impulso. Se ha normalizado a 1 p.u. la tensión de impulso, que tiene un valor de pico de 145 kV. Estos mismos resultados se han incluido en el anexo 6 con la tensión en función del tiempo y los nodos como parámetro, lo que se facilita la comparación. En este anexo también se pueden ver las tensiones entre discos consecutivos, que es un dato fundamental para definir el aislamiento necesario.

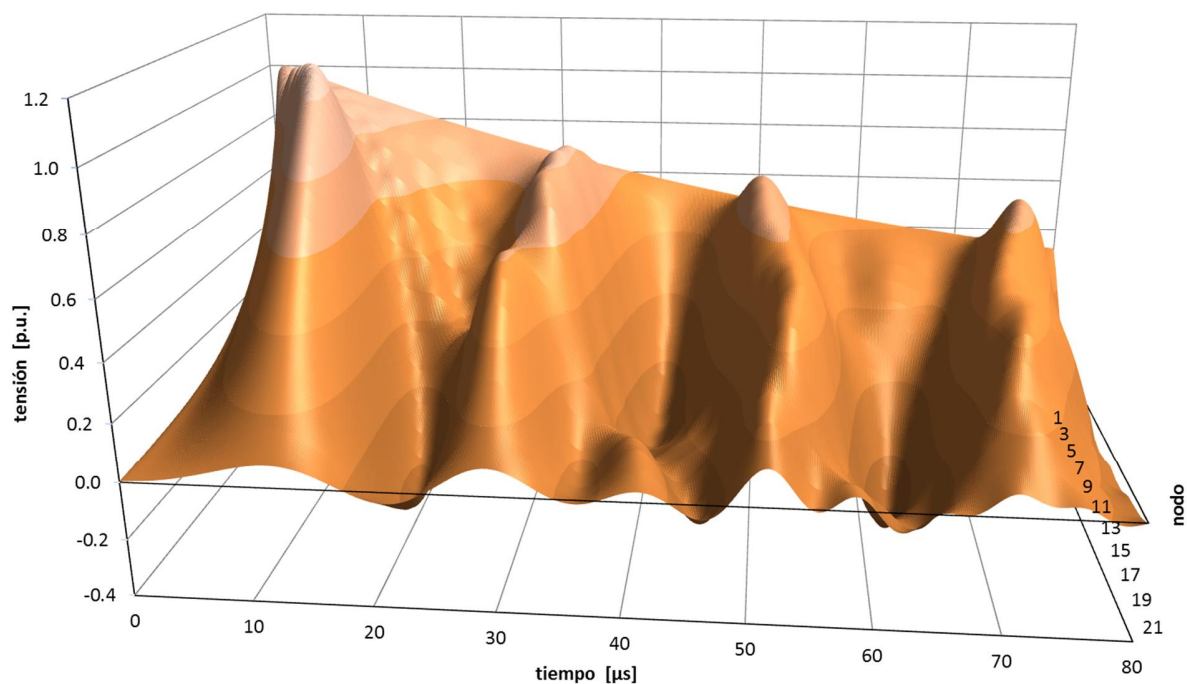


fig. 17 – tensiones a tierra simuladas en el arrollamiento de AT

Se puede ver que, para todo nodo, se obtiene una tensión oscilatoria; y que, para todo tiempo, la distribución de la tensión entre nodos no es lineal. Hay que resaltar que aparecen tensiones superiores al valor de pico del impulso aplicado. Esta sobretensión ocurre en los 8 primeros nodos, con un máximo absoluto del 7%. También aparecen tensiones negativas respecto a tierra, a pesar de que la onda aplicada es positiva para todo tiempo.

## 7. SIMULACION DE LA DISTRIBUCION DE TENSION EN UN ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION

### 7.1. Características y geometría del arrollamiento

El arrollamiento de BT está fabricado con tecnología de banda, de modo que está formado por una única bobina que ocupa toda la altura del devanado. El arrollamiento tiene una tensión nominal de 725 V y un nivel de aislamiento de 3.6 kV. Tenemos 23 espiras, el conductor empleado es aluminio de sección 1150x1.3 mm y el aislamiento entre espiras es poliéster de 340  $\mu\text{m}$  de espesor.

Se ha conectado una pequeña cinta de aluminio a cada espira para poder realizar las medidas. En el proceso de fabricación se dejó de colocar por error una de estas cintas, aunque afortunadamente fue en la penúltima espira y se pudo acceder a ese punto eliminando parte del aislamiento exterior. Por otro lado, el arrollamiento tiene dos canales de refrigeración de 14 mm realizados con perfiles de fibra de vidrio, de forma que queda dividido, desde el interior al exterior, en una sección de 7 espiras y dos de 8.

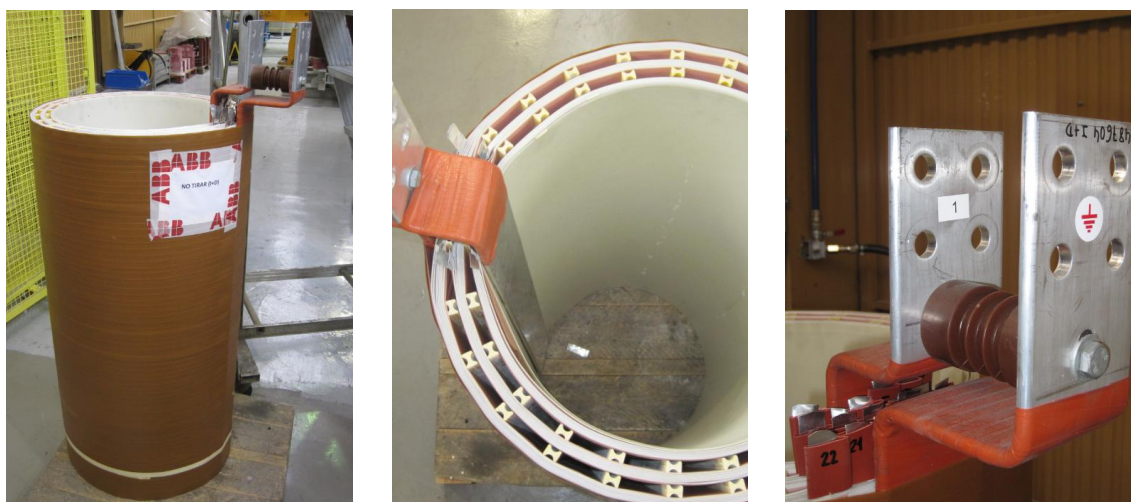


fig. 18 – arrollamiento de BT (izda.), canales de refrigeración (centro), puntos de medida (dcha.)

### 7.2. Cálculo del circuito equivalente

Se ha elegido una espira como el nivel de discretización para calcular el circuito equivalente porque, como el número de espiras no es elevado, no hay inconveniente en llegar a este nivel de detalle. Así sólo tenemos cuatro clases de elementos de circuito: capacidad e inductancia entre dos espiras y autoinductancia y resistencia de una espira. A continuación se explica muy brevemente cómo se han obtenido, ya que el proceso es el mismo que se ha visto en el AT. Su cálculo detallado se encuentra en los anexos 3 y 4.

El cálculo de los elementos de circuito se ha realizado también manualmente mediante expresiones aproximadas para poder cotejar la simulación FEM y evitar errores.

Para la simulación con ElecNet se ha definido la geometría en AutoCAD y posteriormente se importa, mientras que en MagNet se define con un algoritmo en VBA. Se ha hecho así porque en el cálculo eléctrico hay menos elementos que en el magnético, donde es necesario tener en cuenta todas las espiras, incluidas las del arrollamiento de AT. Se han tomado los datos de la constante dieléctrica en función de la frecuencia de [7]. El mallado se ha generado automáticamente, aunque se ha elegido el

tamaño máximo de cada elemento por zonas, en función de su dimensión menor. Finalmente se asignan las condiciones de contorno y se resuelve.

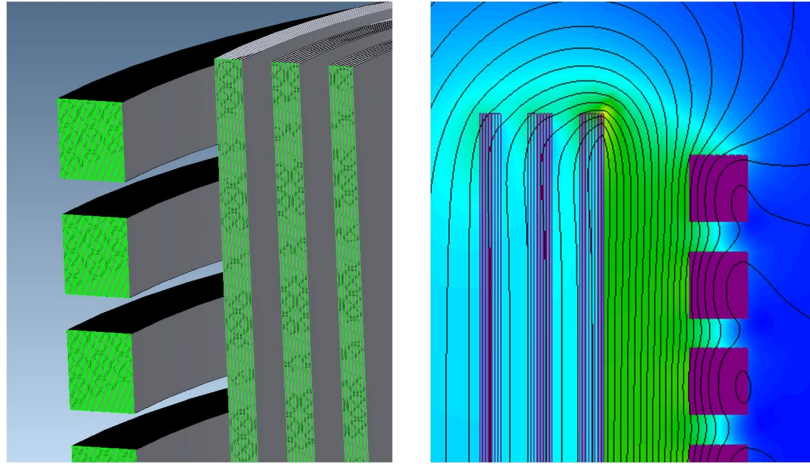


fig. 19 – modelo en MagNet (izada.) y su solución para calcular  $M_{23,j}$  (dcha.)

Una vez obtenidos los valores de las capacidades, inductancias y resistencias ya se pueden conectar entre sí en función de la conexión que existe en el arrollamiento para ensamblar el circuito equivalente:

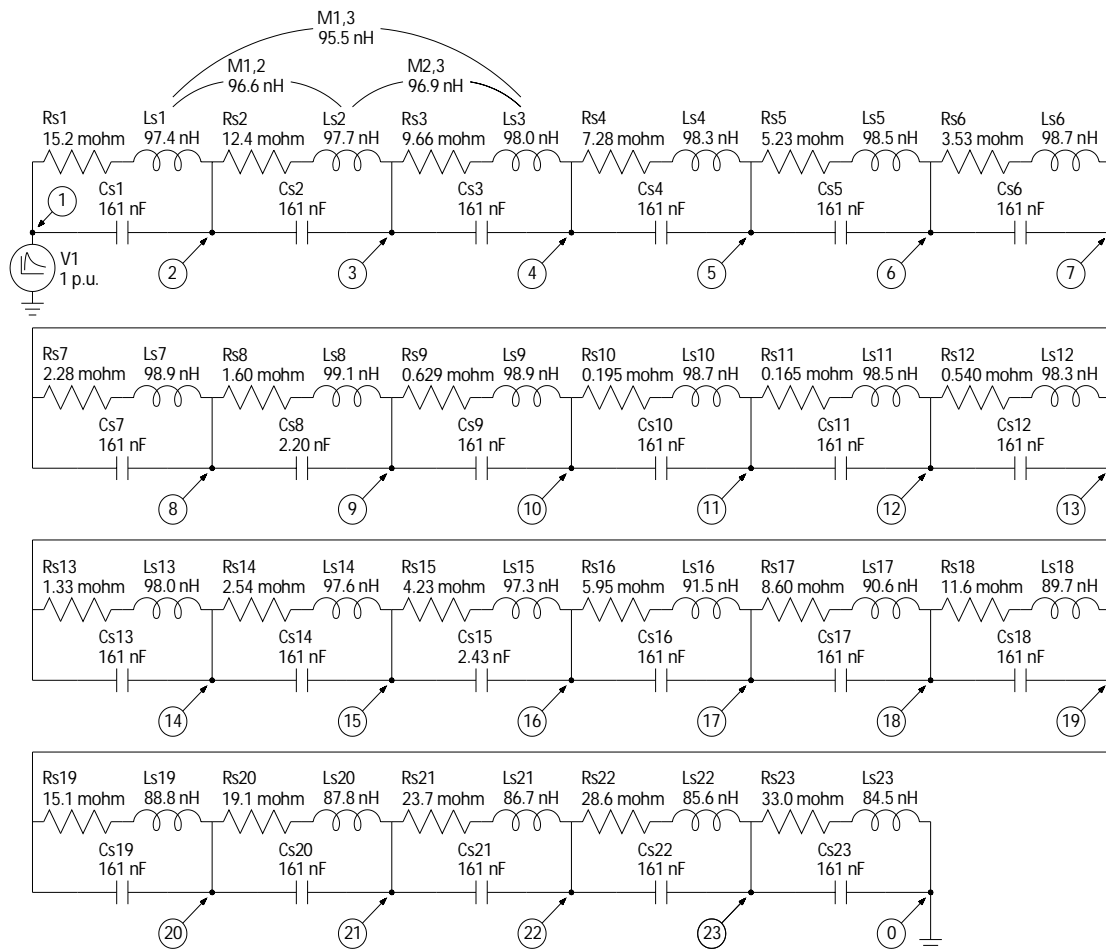


fig. 20 – circuito equivalente de BT (para simplificar sólo se han incluido las tres primeras inductancias mutuas)

### 7.3. Resultado de la simulación

La respuesta obtenida al simular el circuito equivalente con PSPICE frente a un impulso tipo rayo se muestra a continuación. El análisis que se hace es la respuesta transitoria en los primeros 80  $\mu\text{s}$ . Al igual que se ha hecho en el arrollamiento de AT, se ha normalizado a 1 p.u. la tensión de impulso, que en este caso tiene un valor de pico de 20 kV. En el anexo 7 se han añadido estos mismos datos, así como las tensiones que aparecen entre espiras, con la tensión en función del tiempo y las espiras como parámetro.

El impulso que se ha empleado como excitación en la simulación no se corresponde exactamente con la forma de onda de 1.2/50  $\mu\text{s}$ . La explicación es que, aunque inicialmente se hizo la simulación con ella, al realizar los ensayos en el laboratorio no fue posible reproducirla con el generador de impulso repetitivo.

La razón por la que no se pudo lograr un impulso tipo rayo mejor hay que buscarla en un mal acoplamiento de impedancias entre el arrollamiento y el generador. A diferencia del AT, que tiene una impedancia elevada, la BT presenta una impedancia muy pequeña, lo que complica el acoplamiento. De modo que se repitió la simulación PSPICE con la forma de onda que se consiguió en los ensayos. En todo caso, el impulso está dentro de las tolerancias que se establecen en la norma<sup>5</sup>.

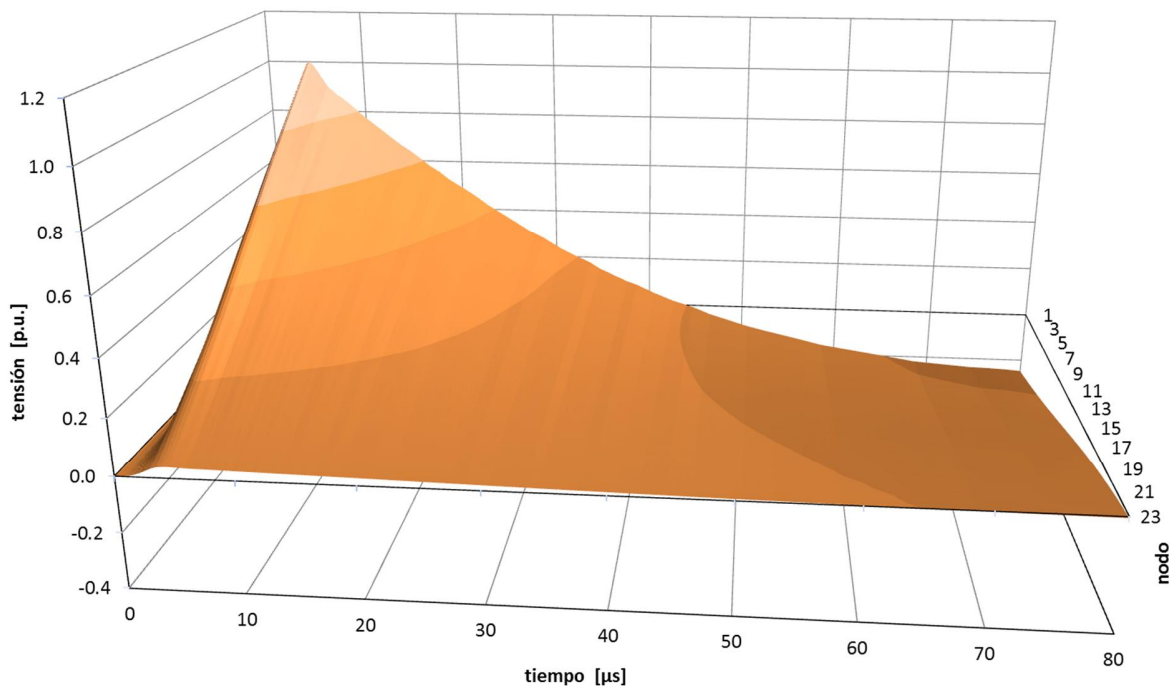


fig. 21 – tensiones a tierra simuladas en el arrollamiento de BT

Se puede ver que la distribución del impulso es lineal, es decir, la tensión a tierra es proporcional al número de espiras. Tampoco hay sobretensión ni oscilaciones, y si existen valores negativos es porque incluso la tensión aplicada llega a ser negativa.

<sup>5</sup> Según la norma IEC 60076-3, el tiempo de frente/cola es 1.2  $\mu\text{s}$   $\pm 30\%$  / 50  $\mu\text{s}$   $\pm 20\%$ . Aunque si no es posible conseguir el tiempo de cola se acepta uno menor aumentando la tensión de impulso un 1% por cada 2  $\mu\text{s}$  que éste es menor de 40  $\mu\text{s}$ . El mínimo tiempo de cola aceptable es 20  $\mu\text{s}$ .



## 8. MEDIDA DE LA DISTRIBUCION DE TENSION MEDIANTE GENERADOR DE IMPULSO RECURRENTE

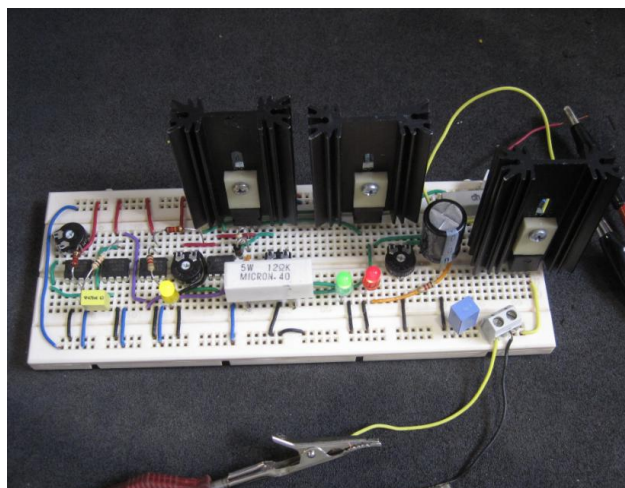
Para validar el método de cálculo seguido se ha medido la distribución de tensión a tierra en ambos arrollamientos. El ensayo consiste en aplicar una onda de impulso y medir la tensión en los mismos puntos en los que se ha simulado previamente. El impulso empleado tiene una tensión reducida, de algunas decenas de voltios, aunque esto no es ningún inconveniente porque la respuesta no depende de la tensión aplicada.

### 8.1. Montaje experimental

Para que el acoplamiento eléctrico y magnético entre ambos sea el mismo que se ha simulado se introduce el arrollamiento de BT dentro del de AT. La conexión es la que establece la norma y es la misma que se ha empleado en las simulaciones: el impulso se aplica a un terminal, el otro terminal no impulsado se conecta a tierra y el arrollamiento que no se ensaya está cortocircuitado y conectado a tierra.

La tensión de excitación se obtiene mediante un generador de impulso recurrente modelo RSG-482 de la marca Haefely (fig. 22 izda.). Este aparato aplica una onda de impulso decenas de veces por segundo, de modo que el reparto de tensión puede medirse con un osciloscopio convencional. El generador se empleó sin problema para la medida en el arrollamiento de AT, aunque, como se explicará más adelante, intentando conseguir la forma de onda en la BT se averió.

Para no retrasar las medidas por esta avería, que todavía no ha sido reparada, se decidió construir otro generador que además tuviera suficiente capacidad como para emplearse en el arrollamiento de BT. El generador es un diseño original, y un tiempo considerable del total empleado en el proyecto se ha empleado en su construcción (fig. 22 dcha.). En el anexo 5 se explica su diseño en detalle.



*fig. 22 – medida con el generador Haefely en el AT (izda.) y generador empleado en la BT (dcha.)*

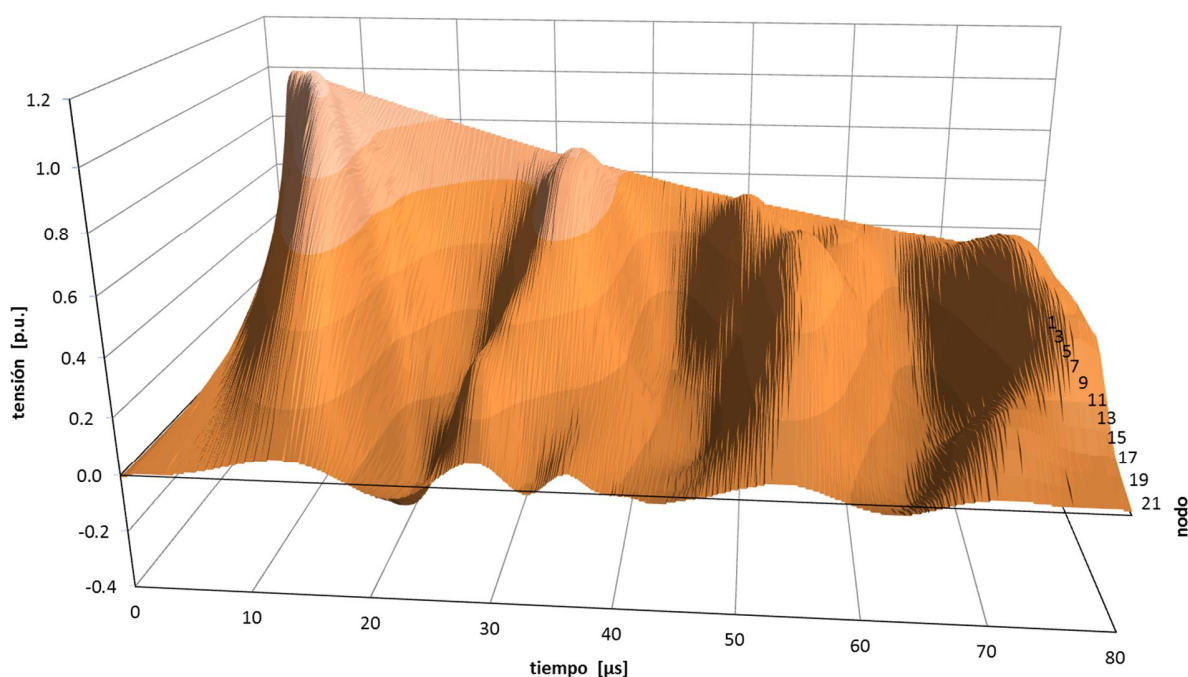
Para la medida de la tensión se ha empleado un osciloscopio modelo WJ332A de la marca LeCroy. Uno de sus canales se conecta al terminal de línea donde se aplica el impulso, mientras que el otro se emplea para medir la tensión en todos los nodos. Al sincronizar el disparo del osciloscopio con la tensión de impulso, es posible hallar diferencias de tensión entre dos nodos sin más que restar sus tensiones a tierra.

Al realizar las medidas se comprobó que el ambiente era electromagnéticamente ruidoso, ya que el laboratorio está en una nave de fabricación donde hay varias máquinas funcionando. Las características del ensayo tampoco ayudan, ya que el arrollamiento actúa como una antena. Para reducir este efecto se ha empleado el osciloscopio en el modo de adquisición de datos promedio, donde se toma la media de las últimas 32 medidas.

## 8.2. Resultado de las medidas en el arrollamiento de alta tensión

Como ya se ha comentado, en el AT se ha empleado el generador de impulso Haefely. Antes de realizar las medidas es necesario ajustarlo para obtener una forma de onda adecuada y este proceso hay que realizarlo con el arrollamiento ya conectado, porque su capacidad a tierra juega un papel fundamental en la forma de onda que se obtiene. El ajuste se realiza seleccionando los valores de dos resistencias, dos condensadores y una bobina que forman parte de la etapa de potencia del generador.

Las medidas del osciloscopio se han exportado a una hoja de cálculo, donde se han normalizado a 1 p.u. y se han representado en función del tiempo y de la distancia al terminal del arrollamiento donde se ha aplicado el impulso, como se ve a continuación. Si se comparan estos resultados con los de la simulación (fig. 17 en pag. 21) se puede ver su similitud: los máximos y mínimos se dan en el mismo tiempo, y son de magnitud similar. La diferencia de textura entre ambas superficies, más lisa en la simulación que en la medida, hay que atribuirlo a la resolución vertical del osciloscopio y en menor medida al ruido.



*fig. 23 – tensiones a tierra medidas en el arrollamiento de AT*

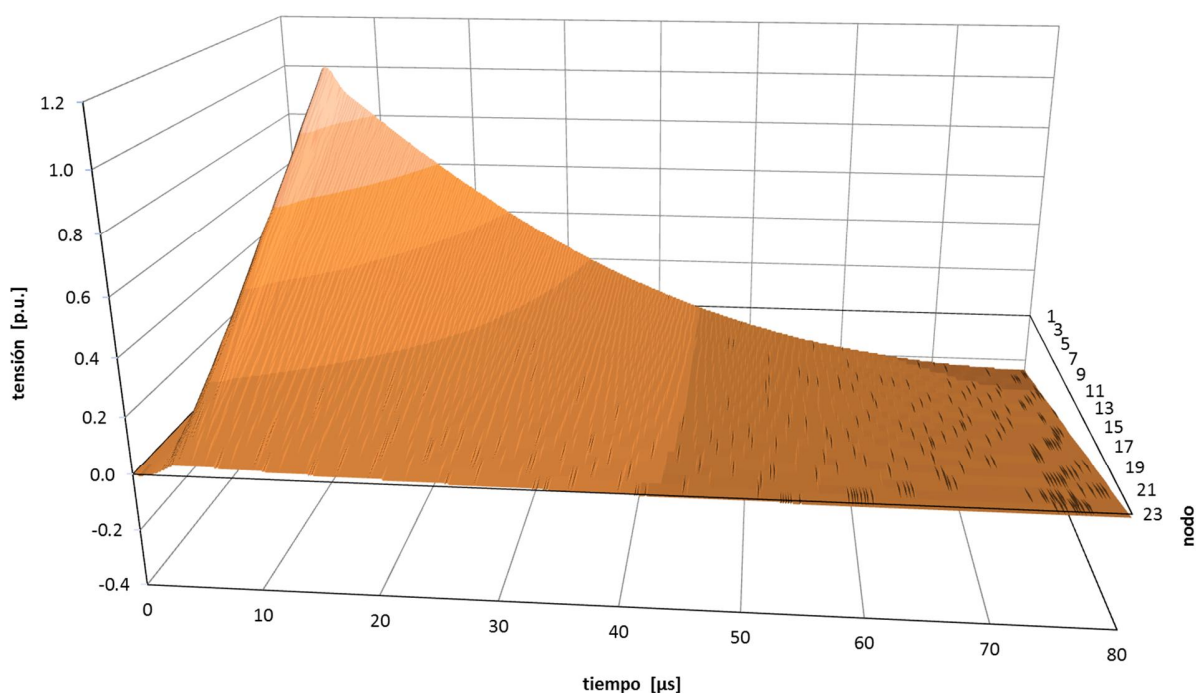
Estos mismos datos, con los nodos como parámetro para hacer más fácil la comparación, se han incluido en el anexo 6. Se puede ver para cada nodo: la tensión simulada, la medida y el error cometido en función del tiempo; y lo mismo se ha hecho con las tensiones entre discos consecutivos.

### 8.3. Resultado de las medidas en el arrollamiento de baja tensión

Al intentar ajustar el generador Haefely para la BT, se comprobó que con el rango de los componentes que se pueden seleccionar no era posible lograr una onda de impulso que cumpliera la especificación. El tiempo de frente se conseguía a expensas de que el de cola fuera demasiado pequeño, y cuando se intentaban lograr ambos se obtenía una onda con oscilaciones. Esto se debe a la baja impedancia del arrollamiento al tener pocas espiras.

Como el generador permite la conexión de componentes externos, se emplearon condensadores de mayor capacidad para intentar conseguir una onda adecuada. La tensión de impulso aún estaba lejos de cumplir la especificación cuando el aparato se averió, probablemente por sobrecarga al emplear condensadores con un tiempo de carga demasiado grande.

Para que la avería no supusiera un retraso y además viendo que no era seguro que se pudiera lograr con el Haefely, se construyó un generador optimizado para el arrollamiento de BT, que es con el que finalmente se han hecho las medidas. Aunque la forma de onda que se logró está lejos de ser perfecta (la tensión se reduce demasiado rápido e incluso alcanza valores negativos) cumple las tolerancias que establece la norma. La distribución de tensión entre espiras es la siguiente:



*fig. 24 – tensiones a tierra medidas en el arrollamiento de BT*

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en la simulación (fig. 21 en pag. 24) se puede ver que son idénticos, en ambos casos tenemos un reparto lineal de la tensión. Al igual que se ha visto con el AT, la textura de la superficie es más rugosa en la medida que en la simulación. En este caso el ruido electromagnético ha sido un orden de magnitud mayor porque, para simplificar el generador de impulso, se ha empleado una tensión de ensayo de 10 voltios cuando en el AT se utilizaron 100 voltios.



## 9. COMPARACION SIMULACIONES vs MEDIDAS

Para cotejar la simulación con el ensayo se han representado sólo en dos ejes y con los nodos como parámetro las tensiones a tierra en función del tiempo ya vistas en los apartados anteriores en tres ejes. Este tipo de gráfico es menos descriptivo, pero facilita la comparación.

En el caso del AT (fig. 25) el grado de aproximación es bueno. Para comparar ambas gráficas se pueden usar puntos característicos como los máximos y mínimos y su retraso. Se ve así la gran similitud obtenida en todos los nodos hasta su primer máximo, entre 3 y 13  $\mu\text{s}$ , que es el periodo crítico porque es entonces cuando se da la máxima tensión a tierra y entre discos. También se logra un buen resultado en el primer mínimo en torno a los 20  $\mu\text{s}$ , aunque a partir de ahí aumenta la diferencia. Una posible explicación a que las diferencias entre cálculo y medida aumenten con el tiempo es el efecto aditivo de pequeños errores para un tiempo suficientemente grande.

Para el arrollamiento de BT (fig. 26) la aproximación es excelente, no siendo posible ver a simple vista diferencias entre la tensión calculada y la medida.

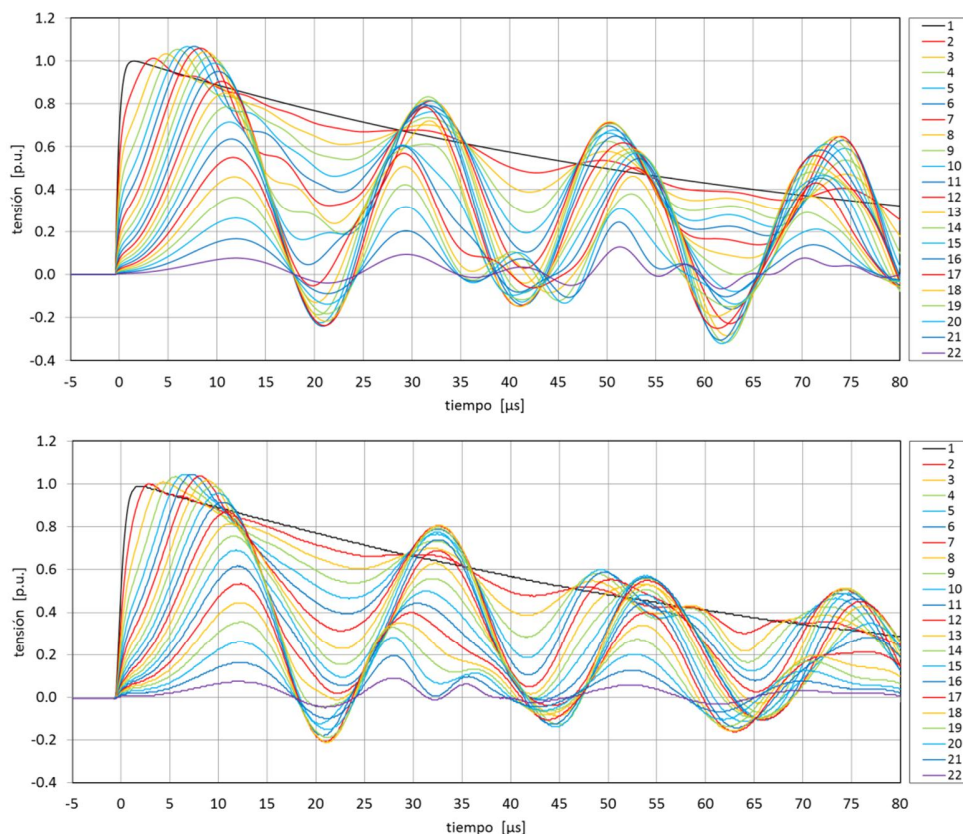


fig. 25 – tensiones a tierra simuladas (arriba) y medidas (abajo) en el arrollamiento de AT

Como comparación adicional se han representado, tanto para la simulación como para la medida, la máxima tensión a tierra alcanzada en cualquier instante para cada nodo así como el error relativo cometido.

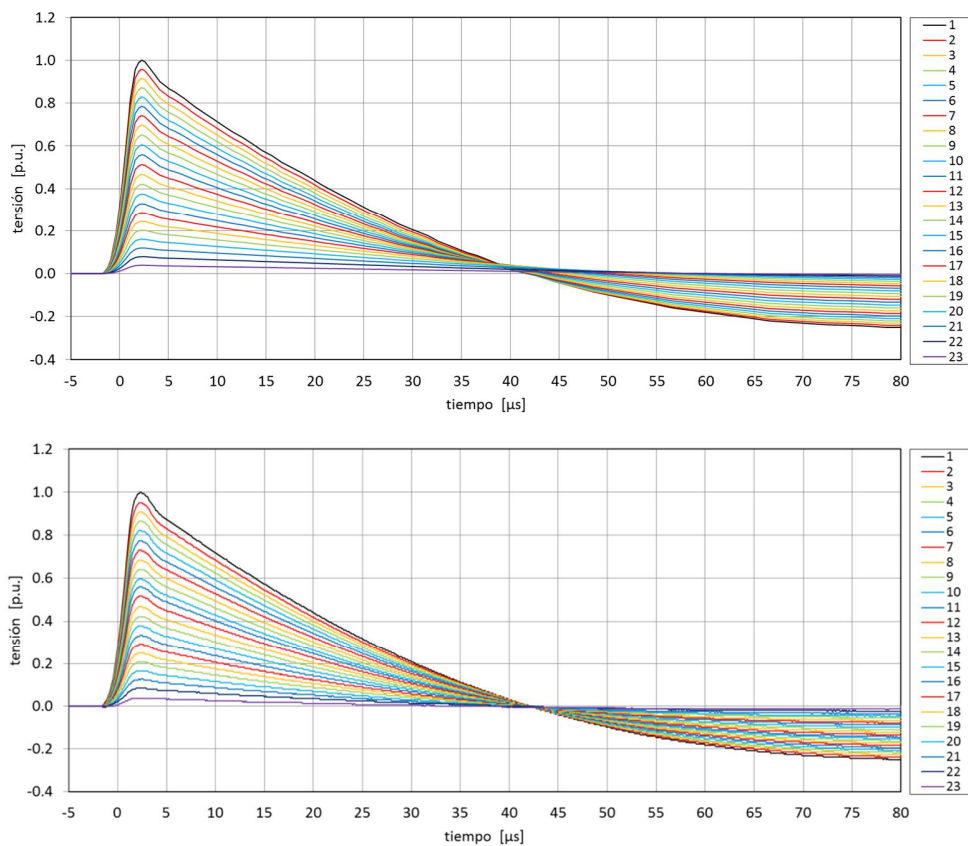


fig. 26 – tensiones a tierra simuladas (arriba) y medidas (abajo) en el arrollamiento de BT

Para el arrollamiento de AT (fig. 27 izda.) se comprueba que los valores simulados siguen a los medidos, que resultan ser algo menores en todo el rango. El error cometido es pequeño, menor del 4% en la mayor parte de los nodos, aunque aumenta en los últimos hasta alcanzar el 30% en el peor caso.

En el caso del arrollamiento de BT (fig. 27 dcha.) la aproximación es mucho mejor, siendo el error menor del 4% excepto en los tres últimos nodos, donde no llega a alcanzar el 10% de diferencia.

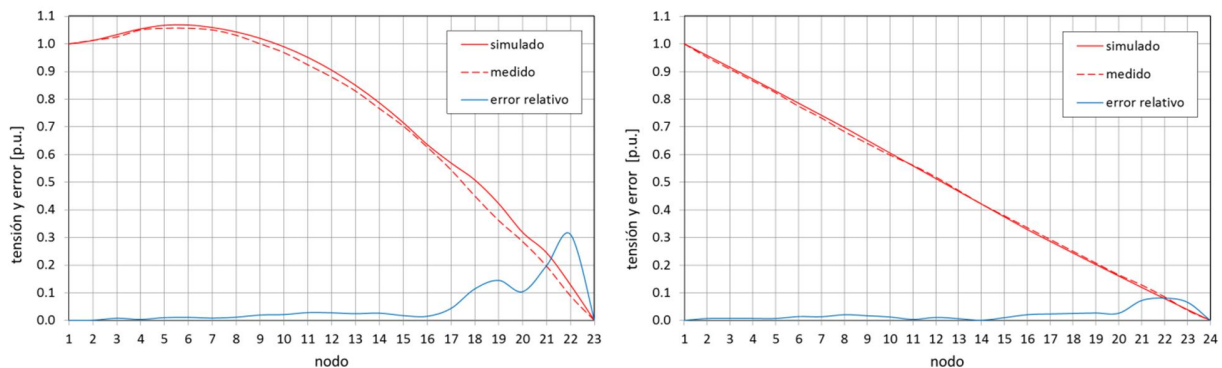


fig. 27 – tensiones máximas a tierra simuladas y medidas en el arrollamiento de AT (izda.) y de BT (dcha.)

Aunque la diferencia entre la simulación y la medida puede parecer elevada en algún caso, un error menor del 10% es una buena aproximación, más que suficiente para determinar el aislamiento necesario en función de la tensión que aparece, que en definitiva es el objetivo final.

## 10. CONCLUSIONES

El proyecto que se ha presentado tiene dos partes claramente diferenciadas, según el tipo de trabajo que se ha realizado. La primera es una síntesis de la bibliografía donde se ha introducido el problema de los transitorios de tensión en transformadores, su origen y el estado del arte en arrollamientos para mejorar su respuesta. La segunda parte, que es la principal, es un trabajo original donde se ha simulado un arrollamiento de AT de discos y otro de BT de banda mediante FEM. La validez del modelo se ha comprobado fabricando los arrollamientos y midiendo su respuesta ante un impulso tipo rayo con la ayuda de un generador recurrente de baja tensión.

Los objetivos que se habían propuesto en el proyecto se han cumplido, no sólo en el sentido de que se ha realizado el trabajo planeado inicialmente, también porque los valores obtenidos en la simulación son sensiblemente similares a las medidas que se han realizado posteriormente. En concreto, la exactitud de la simulación para el arrollamiento de BT ha sido excelente, mientras que para el de AT la diferencia ha sido algo mayor.

El proyecto se ha realizado en seis meses, precedidos de otros tres que se dedicaron a definir el trabajo, los medios a emplear y a la búsqueda bibliográfica. Respecto a las incidencias en el desarrollo del trabajo, el principal problema fue la avería del generador de impulso cuando aún no se habían hecho las medidas en el arrollamiento de BT. Para no retrasar la entrega del proyecto (sigue sin estar reparado), se decidió construir otro generador de impulso y su diseño ha supuesto un trabajo considerable.

En cuanto a los conocimientos adquiridos con este trabajo, ya tenía experiencia en el problema del reparto de las sobretensiones en transformadores pero siempre había sido a nivel de usuario de programas para su cálculo. Al enfrentarme al problema teniendo que definir y calcular yo mismo el circuito equivalente he aumentado mi grado de conocimiento sobre la materia. Por otro lado, nunca antes había empleado simulación FEM para el cálculo eléctrico y magnético, de modo que otra cosa que he aprendido es el manejo de ElecNet y MagNet.

La aplicación del proyecto es evidente, ya que el reparto de las sobretensiones en transformadores es un tema de permanente actualidad para los fabricantes. El cálculo de la distribución de la tensión es una parte habitual del proceso de diseño de un transformador cuando no es posible hacerlo por comparación con otro transformador similar ya fabricado del que se conoce su respuesta.

Una posible línea de continuación del trabajo es repetir todo el proceso montando los arrollamientos en un núcleo magnético. De este modo se podría comprobar tanto el efecto del circuito magnético como el de las capacidades que aparecerán entre las culatas del núcleo y los extremos de los arrollamientos. Aunque hay que tener en cuenta que al incluir el núcleo se pierde la simetría axial, por lo que la simulación FEM deberá ser 3D.

Otra posibilidad de ampliar el trabajo desarrollado es repetir la simulación y la medida con arrollamientos fabricados con una tecnología que no sea discos o banda. Así se podría comprobar la exactitud de los diferentes modelos simulados y también cómo es la distribución de tensión para cada tecnología.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- [1] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde. "Transformer engineering, design and practice" Ed. Marcel Dekker Inc., 2004
- [2] J.H. Harlow (editor). "Electric power transformer engineering" CRC Press LCC, 2004
- [3] L.F. Blume et. al. "Transformer engineering: a treatise on the theory, operation and application of transformers" John Wiley & sons Inc., 2<sup>nd</sup> edition, 1967
- [4] M.J. Heathcote. "The J&P transformer book, a practical technology of the power transformer" Ed. Newnes, 20<sup>th</sup> edition, 1998
- [5] J. Corrales. "Teoría, cálculo y construcción de transformadores" 5<sup>a</sup> edición, 1969
- [6] P.I. Fergestad. "Transient oscillations in transformer windings" PhD thesis. Technical University of Norway, 1972
- [7] D. Cervero y J.J. Melero. "Caracterización dieléctrica de aislantes para uso en transformadores secos" Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), diciembre 2008
- [8] D. Cervero y J.J. Melero. "Caracterización dieléctrica de aislantes para uso en transformadores secos II" Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), agosto 2009
- [9] C. Snow. "Formulas for computing capacitance and inductance" National Bureau of Standards, circular 544, septiembre 1954
- [10] P. Dowell. "Effect of eddy currents in transformer windings" Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 113 pp. 1387-1394, 1966
- [11] L. Cohen, E.B. Rosa "An exact formula for the mutual inductance of coaxial solenoids" National Bureau of Standards, vol. 3 pp. 295-303, mayo 1907
- [12] IEC 60060-1 "High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements" Edition 3.0, 2010-09
- [13] IEC 60071-1 "Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules" Eight edition, 2006-01
- [14] Aguilar, J.D. et. al. "Simulación electrónica con PSPICE" Ed. ra-ma, 1995
- [15] Infolytica Corporation. "ElecNet version 7.4.1, 2D and 3D tutorials", noviembre 2012
- [16] Infolytica Corporation. "MagNet version 7.4, 2D and 3D tutorials", septiembre 2012

## ANEXO 1. CALCULO APROXIMADO DE LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO EN EL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION

### A1.1. Capacidad entre espiras

Para el cálculo de la capacidad entre espiras se parte de la expresión para un condensador plano:

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Donde:

$C$ : capacidad [F]

$\epsilon_0$ : permitividad del espacio libre [F/m]

$\epsilon_r$ : permitividad relativa del dieléctrico [ ]

$A$ : área de una placa [m<sup>2</sup>]

$d$ : separación entre placas [m]

La aproximación es correcta para una separación entre placas mucho menor que cada una de las dos dimensiones que definen su área. En el caso particular de un arrollamiento de cinta, con conductores de varios centímetros y aislamientos de fracciones de milímetro, la aproximación es muy precisa. Adaptando la expresión anterior a nuestro caso:

$$C_{ee} \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi a d_m}{d_{ee}}$$

Donde:

$C_{ee}$ : capacidad entre dos espiras consecutivas [F]

$a$ : dimensión axial del conductor [m]

$d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

$d_{ee}$ : espesor del aislamiento entre espiras [m]

Sustituyendo se obtiene:

$$C_{ee} \approx 8.85 \times 10^{-12} \cdot 3.2 \frac{\pi \cdot 0.035 \cdot 0.719}{1.11 \times 10^{-4}} = 20.2 \text{ nF}$$

### A1.2. Capacidad entre discos

Para el cálculo de la capacidad entre discos también se parte de la expresión del apartado anterior para un condensador plano. Sin embargo ahora no se cumple la condición de que la separación entre placas sea mucho menor que cada una de las dos dimensiones que definen su área; en concreto, la dimensión radial del arrollamiento es 30.5 mm y la separación entre discos es 16 mm. El fenómeno físico que provoca el error de esta aproximación es la dispersión de las líneas de flujo en los bordes de las placas. El resultado es equivalente a un aumento en la superficie efectiva de las placas, como puede verse en la siguiente figura.

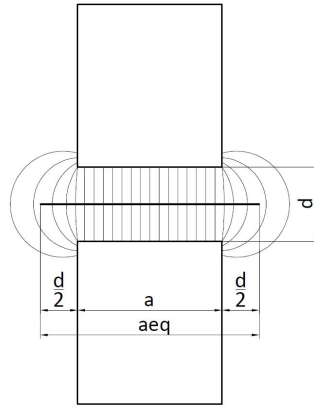


fig. 28 – dispersión del flujo en el condensador formado por dos discos

A pesar de este inconveniente, es posible calcular la capacidad con un error aceptable empleando una dimensión de placa equivalente que recoja el fenómeno de la dispersión del flujo [6]. Se emplea una dimensión equivalente igual a la dimensión real más la separación entre placas, de modo que:

$$C_{dd} \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{a_{req} \pi d_m}{d_{dd}} \quad a_{req} = a_r + d_{dd}$$

Donde:

- $a_{req}$ : dimensión radial equivalente [m]
- $a_r$ : dimensión radial del arrollamiento [m]
- $d_{dd}$ : separación entre discos [m]
- $C_{dd}$ : capacidad entre dos discos consecutivos [F]
- $d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

Sustituyendo se obtiene:

$$C_{dd} \approx 8.85 \times 10^{-12} \cdot 3.7 \frac{(0.0305 + 0.016) \cdot \pi \cdot 0.719}{0.016} = 215 \text{ pF}$$

### A1.3. Capacidad a tierra

La capacidad a tierra se debe principalmente a la capacidad entre los arrollamientos de AT y BT. Aunque también hay una capacidad parásita entre el arrollamiento de AT y tierra, esta siempre es mucho menor que la capacidad anterior debido a que los arrollamientos están muy próximos entre sí. Solo si el transformador está dentro de una envolvente metálica esta capacidad tiene cierta importancia.

Para el cálculo de la capacidad entre el arrollamiento de AT y el de BT hay que tener en cuenta que en este caso el aislamiento está formado por diferentes materiales. La mayor parte del aislamiento es aire, pero también hay aislamiento sólido en la superficie exterior del arrollamiento de BT y en la interior del de AT. Se parte de la expresión para un condensador cilíndrico formado por n capas con diferentes constantes dieléctricas y se reduce el error debido a la dispersión del flujo en los extremos del cilindro como en el apartado anterior:

$$C \approx \frac{2 \pi \epsilon_0 h_{eq}}{\frac{1}{\epsilon_{r1}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right) + \dots + \frac{1}{\epsilon_{rn}} \ln\left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)} \quad h_{eq} = h + \frac{d_n - d_1}{2}$$

Donde:

$h_{eq}$ : altura del cilindro equivalente [m]

$h$ : altura del cilindro [m]

$d_i$ : diámetro del dieléctrico i [m]

$\epsilon_{ri}$ : permitividad relativa del dieléctrico i [ ]

Sustituyendo se obtiene:

$$C_{aa} \approx \frac{2 \pi \cdot 8.85 \times 10^{-12} \cdot \left(1.106 + \frac{0.688 - 0.6}{2}\right)}{\frac{1}{2.8} \ln\left(\frac{0.601}{0.6}\right) + \ln\left(\frac{0.68}{0.601}\right) + \frac{1}{3.7} \ln\left(\frac{0.688}{0.68}\right)} = 503 \text{ pF}$$

La capacidad entre arrollamientos ( $C_{aa}$ ) es la asociación en paralelo de las capacidades entre cada uno de los 22 discos y el arrollamiento de BT. Si estas capacidades fueran iguales tendríamos una capacidad a tierra ( $C_g$ ):

$$C_g = \frac{C_{aa}}{n} \quad C_g = \frac{503 \text{ pF}}{22} = 22.9 \text{ pF}$$

Pero hay que tener en cuenta que el efecto de la dispersión de flujo sólo afecta a los discos de los extremos del arrollamiento, de modo que tendremos una capacidad a tierra diferente esté o no el disco en el extremo. La capacidad debida a la dispersión son unos 20 pF, de modo que obtenemos una capacidad  $C_g$  de 31.9 pF para los dos discos de los extremos y de 21.9 pF para los 20 discos restantes.

#### A1.4. Autoinductancia de un disco

En [9] se propone la siguiente aproximación para el cálculo de la autoinductancia de una bobina cilíndrica se sección rectangular con diámetro mucho mayor que su dimensión radial y axial, que son condiciones que cumple un arrollamiento de discos:

$$L \approx \frac{\mu_0 N_d^2 d_m}{2} \left[ \ln \frac{4d_m}{a_r} - 0.5 + \left( \ln \frac{4d_m}{a_r} + 3.583 \right) \left( \frac{a_r}{2d_m} \right)^2 \right]$$

Donde:

$L$ : autoinductancia [H]

$\mu_0$ : permeabilidad del espacio libre [H/m]

$N_d$ : número de espiras de un disco [ ]

$d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

$a_r$ : dimensión radial del arrollamiento [m]

Sustituyendo se obtiene:

$$L_s \approx \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 50^2 \cdot 0.719}{2} \left[ \ln \frac{4 \cdot 0.719}{0.0305} - 0.5 + \left( \ln \frac{4 \cdot 0.719}{0.0305} + 3.583 \right) \left( \frac{0.0305}{2 \cdot 0.719} \right)^2 \right] = 4.42 \text{ mH}$$

La aproximación es válida para una bobina con núcleo de aire, que es el caso que se quiere simular. Aunque entonces se podría criticar que si el arrollamiento tuviera un núcleo magnético, que al fin y al cabo es la situación que tenemos en un transformador, estaremos cometiendo cierto error. Sin embargo, a las frecuencias del orden de kHz que se tienen en el ensayo de impulso el núcleo magnético trabaja con una inducción mínima, lo que es equivalente a no tener núcleo.

#### A1.5. Inductancia mutua entre discos

Se aplica la fórmula de Neumann para calcular el valor de la inductancia mutua entre cada par de discos. Se emplea la aproximación de que la corriente que circula por cada disco está concentrada en su centro geométrico:

$$M_{i,j} \approx \frac{\mu_o N_i N_j d_m}{2} f(\xi)$$

$f(\xi)$  es una función dependiente de la geometría del arrollamiento, que se define de la siguiente forma:

$$\xi = \frac{2(a + d_{dd})}{d_m} \quad f(\xi) = \begin{cases} \ln \frac{8}{\xi} - 2 + 0.35\xi^{1.64}, & \xi \leq 0.6 \\ \frac{1}{\frac{2}{\pi} \xi^3 + 1.73 \xi^{1.04} + 0.2}, & \xi > 0.6 \end{cases}$$

Donde:

$M_{i,j}$ : inductancia mutua entre el disco i y el j [H]

$N_i$ : número de espiras del disco i [ ]

$d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

$a$ : dimensión axial del conductor [m]

$d_{dd}$ : separación entre discos [m]

Sustituyendo para los discos 1 y 2 se obtiene:

$$\xi = \frac{2(0.035 + 0.016)}{0.719} = 0.1419$$

$$M_{1,2} \approx \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 50 \cdot 50 \cdot 0.719}{2} \left( \ln \frac{8}{0.1419} - 2 + 0.35 \cdot 0.1419^{1.64} \right) = 2.31 \text{ mH}$$

De forma análoga se calculan las inductancias mutuas entre el disco 1 y los demás discos. Los resultados se muestran en la siguiente matriz, donde se ha añadido también en la diagonal principal el valor de la autoinductancia calculada en el apartado anterior:



	disco 1	disco 2	disco 3	disco 4	disco 5	disco 6	disco 7	disco 8	disco 9	disco 10	disco 11	disco 12	disco 13	disco 14	disco 15	disco 16	disco 17	disco 18	disco 19	disco 20	disco 21	disco 22
disco 1	4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05	8.40E-05	7.30E-05	6.40E-05	5.70E-05	5.00E-05
disco 2		4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05	8.40E-05	7.30E-05	6.40E-05	5.70E-05
disco 3			4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05	8.40E-05	7.30E-05	6.40E-05
disco 4				4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05	8.40E-05	7.30E-05
disco 5					4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05	8.40E-05
disco 6						4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04	9.70E-05
disco 7							4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04	1.12E-04
disco 8								4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04	1.30E-04
disco 9									4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04	1.51E-04
disco 10										4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04	1.78E-04
disco 11											4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04	2.10E-04
disco 12												4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04	2.51E-04
disco 13													4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04	3.01E-04
disco 14														4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04	3.64E-04
disco 15															4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04	4.44E-04
disco 16																4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04	5.49E-04
disco 17																	4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04	6.90E-04
disco 18																		4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03	8.86E-04
disco 19																			4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03	1.15E-03
disco 20																				4.42E-03	2.31E-03	1.56E-03
disco 21																					4.42E-03	2.31E-03
disco 22																						4.42E-03

fig. 29 – matriz de inductancias (valores en H)

Una vez que se ha hecho el cálculo para el disco 1 ya no es necesario repetirlo para los demás. Como todos los discos son iguales y las distancias entre discos también son iguales, se conocen las inductancias mutuas entre cada par de discos. Por ejemplo,  $M_{5,7}$  es igual a  $M_{1,3}$  porque ambos casos tienen la misma geometría. Evidentemente, la matriz es simétrica.

La siguiente imagen es una representación gráfica de la matriz anterior, donde un azul más oscuro significa una inductancia mayor. Se comprueba cómo los elementos que tienen más peso se encuentran en torno a la diagonal principal, lo que se corresponde con discos próximos entre sí.

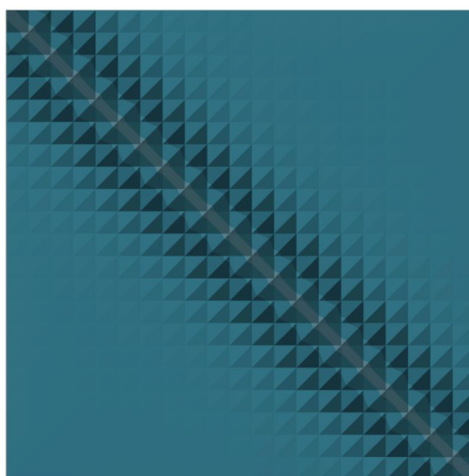


fig. 30 – representación gráfica de la matriz de inductancias

#### A1.6. Resistencia serie

La resistencia en un conductor es el resultado de los siguientes fenómenos:

- Resistencia óhmica o en continua ( $R_{DC}$ ): es la que existe cuando por el arrollamiento circula corriente continua. En este caso la densidad de corriente es homogénea en toda la sección del conductor.

- Resistencia adicional: es la diferencia entre la resistencia en corriente alterna ( $R_{AC}$ ) y la resistencia en continua y se debe a una distribución no homogénea de la densidad de corriente en la sección del conductor. Según el origen del campo magnético que crea este efecto, la resistencia adicional se puede dividir en:
  - o Resistencia por efecto *skin* o pelicular: el origen del campo magnético es la corriente que circula por el propio conductor, de modo que está relacionado con la inducción mutua. Causa una mayor densidad de corriente en la periferia del conductor.
  - o Resistencia por efecto proximidad: el origen es corriente que circula por un conductor próximo. Causa una mayor densidad de corriente en una de las caras del conductor.

De modo que:

$$R_{AC} = R_{DC} + R_{adic.} = R_{DC} + R_{skin} + R_{prox.}$$

#### a) Resistencia serie óhmica

El cálculo de la resistencia serie en continua es evidente, y ya expresando en los parámetros más adecuados para un disco queda:

$$R_{s\ DC} = \rho \frac{N_d \pi d_m}{a d_r}$$

Donde:

$R_{s\ DC}$ : resistencia serie en continua [ $\Omega$ ]  
 $\rho$ : resistividad del conductor [ $\Omega\ m$ ]  
 $N_d$ : número de espiras de un disco [ ]  
 $d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]  
 $a$ : dimensión axial del conductor [m]  
 $d_r$ : dimensión radial del conductor [m]

Teniendo en cuenta que el conductor es aluminio y para una temperatura de 20 °C, se obtiene:

$$R_{s\ DC} = 2.8265 \times 10^{-8} \frac{50 \cdot \pi \cdot 0.719}{0.035 \cdot 5 \times 10^{-4}} = 182.3\ m\Omega$$

#### b) Resistencia serie adicional

La resistencia serie adicional es función de la frecuencia, de modo que antes de realizar el cálculo hay que conocer la frecuencia de la corriente que circula por el arrollamiento. El problema es complicado porque la corriente cambia de forma con el tiempo, de modo que la resistencia no tiene un valor constante. Una solución de compromiso es tomar como única frecuencia de cálculo la frecuencia natural de la onda de corriente, despreciando otras oscilaciones de mayor frecuencia que se superponen a la anterior.

Por otro lado, puede parecer que para simular la onda de corriente a su vez necesitamos conocer la resistencia serie, pero como por ahora sólo necesitamos saber su frecuencia de resonancia no es necesario. En efecto, esta frecuencia sólo depende de los valores de capacidades e inductancias, que son conocidos, mientras que los valores de las resistencias determinan el amortiguamiento de las oscilaciones.

La frecuencia de resonancia se obtiene al simular el circuito equivalente con PSPICE y es de unos 30 kHz. Como ejemplo, en la fig. 31 se puede ver el valor de la corriente a través de R1. Las oscilaciones más rápidas, como las que existen en los primeros 15  $\mu$ s, son las que se desprecian en el cálculo de la resistencia.

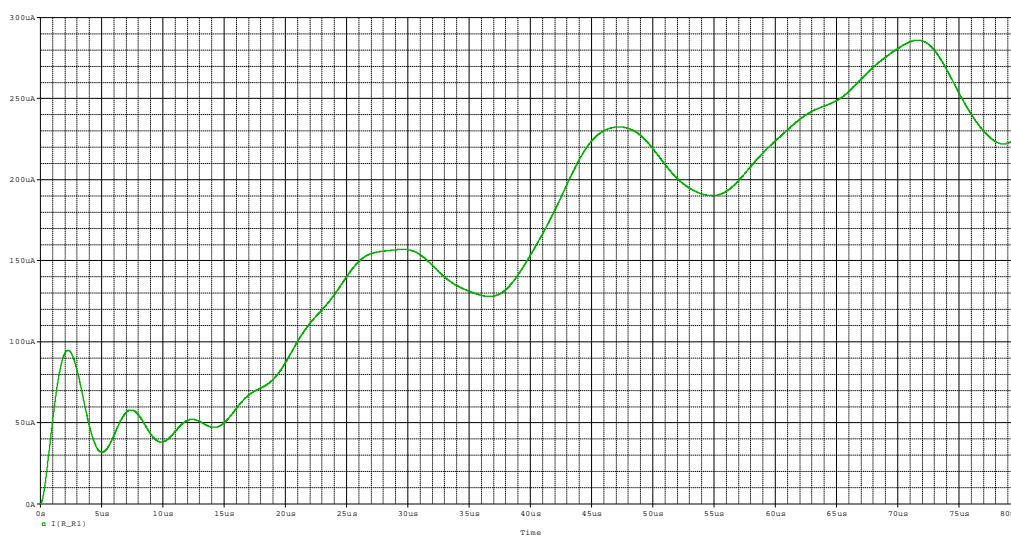


fig. 31 – Corriente a través de Rs1

Por otro lado, antes de realizar el cálculo es interesante definir la profundidad de penetración ( $\delta$ ). Con el efecto *skin*, la densidad de corriente disminuye desde la periferia del conductor hasta su centro siguiendo una ley exponencial. La profundidad de penetración se define como la distancia a la que la densidad de corriente es  $1/e$  de su valor máximo. Esto supone que la densidad de corriente media entre la periferia y  $\delta$  es igual a  $1/\sqrt{2}$ . En la práctica permite saber si el efecto *skin* empieza a ser apreciable, lo que ocurrirá para conductores con un espesor superior a  $2\delta$ . La profundidad de penetración es:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

Donde:

- $\delta$ : profundidad de penetración [m]
- $\Delta$ : relación de penetración [ ]
- $\mu$ : permeabilidad del conductor[H/m]
- $f$ : frecuencia [Hz]

La profundidad de penetración para el aluminio a 30 kHz es 0.49 mm, que prácticamente coincide con el espesor del conductor empleado. De modo que el aumento de resistencia causado por efecto *skin* en el arrollamiento de AT será pequeño.

En [10] se propone la siguiente aproximación para el cálculo de la resistencia adicional. El primer sumando corresponde al efecto *skin*, mientras que el segundo es el efecto proximidad:

$$F_R = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \approx \Delta \left[ \frac{\sinh(2\Delta) + \sin(2\Delta)}{\cosh(2\Delta) - \cos(2\Delta)} + \frac{2}{3}(p^2 - 1) \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)} \right] \quad \Delta = \frac{d_r}{\delta}$$

Donde:

$F_R$ : coeficiente de resistencia adicional [ ]

$p$ : número de capas del arrollamiento [ ]

$\Delta$ : relación de penetración [ ]

Sustituyendo se obtiene:

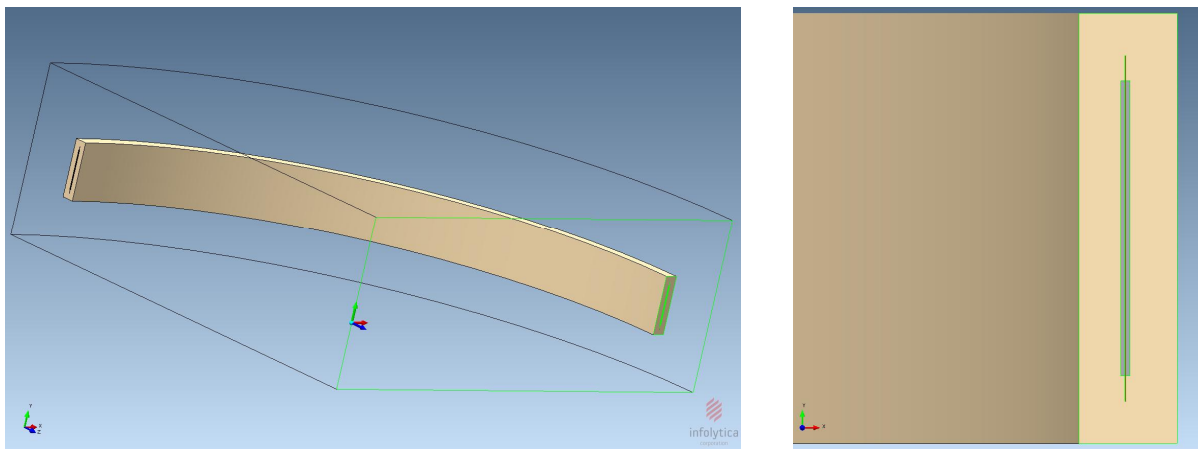
$$F_R \approx 1.02 \left[ \frac{\sinh(2 \cdot 1.02) + \sin(2 \cdot 1.02)}{\cosh(2 \cdot 1.02) - \cos(2 \cdot 1.02)} + \frac{2}{3}(50^2 - 1) \frac{\sinh(1.02) - \sin(1.02)}{\cosh(1.02) + \cos(1.02)} \right] = 292.8$$

Lo que supone una resistencia serie en corriente alterna ( $R_{sAC}$ ) de 53.4  $\Omega$  por disco.

## ANEXO 2. CALCULO FEM DE LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO EN EL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION

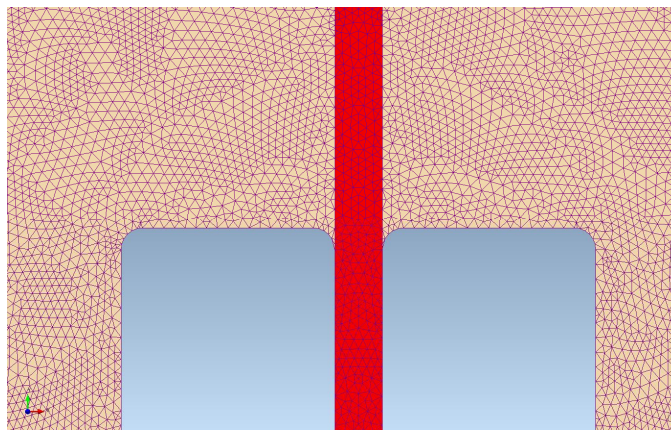
### A2.1. Capacidad entre espiras

Para el cálculo de la capacidad entre espiras se ha construido un modelo formado por dos espiras de 35x0.5 mm aisladas con poliéster de 111  $\mu\text{m}$  de espesor. Las espiras están rodeadas por una capa de resina epoxi de 5 mm, y desde ésta hasta la frontera del modelo hay 50 mm de aire. No hay inconveniente en definir unas dimensiones de resina y aire tan pequeñas porque los fenómenos se circunscriben al espacio entre espiras y a sus extremos. La condición de contorno que se toma es que la densidad de flujo sea tangente a la superficie de la frontera. Como existe simetría axial no se comete error al representar sólo un cuarto del arrollamiento.



*fig. 32 – modelo para calcular la capacidad entre espiras (izda.) y su sección (dcha.)*

El espesor del poliéster entre espiras (en rojo en la fig. 33) es la menor dimensión del modelo y por lo tanto la que determina el tamaño de los elementos de la malla si se quiere obtener una solución adecuada. Se ha elegido un tamaño máximo para cada elemento de 0.02 mm, que es cinco veces menor que el espesor del poliéster. Para el aire exterior a la resina el tamaño máximo se ha fijado en 20 mm, de modo que el tiempo de cálculo no sea muy elevado.



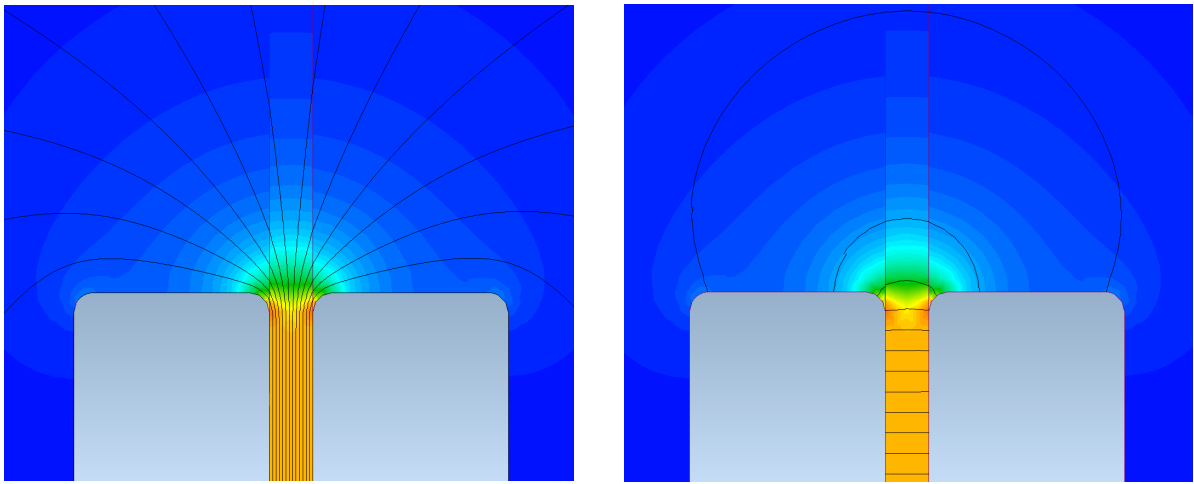
*fig. 33 – mallado en el extremo de las espiras*

Para calcular la capacidad se aplica una diferencia de potencial cualquiera entre ambas espiras, en este caso 100 V, y se halla su valor mediante la expresión:

$$C = \frac{Q}{V}$$

La capacidad así obtenida ( $C_{ee}$ ) es igual a 20.37 nF. Si se compara este valor con el calculado en el apartado A1.1, que era igual a 20.2 nF, se puede ver que el error cometido es menor del 1%. De modo que para el cálculo de la capacidad entre espiras la expresión aproximada es completamente válida.

El resultado de la simulación se muestra en la siguiente figura. Se puede ver la poca importancia que tiene la dispersión del flujo en el exterior de las espiras, esto explica por qué es tan pequeño el error cometido con el método aproximado. También se observa cómo hay una concentración del campo en el extremo de las espiras a pesar de que tienen los cantos redondeados.



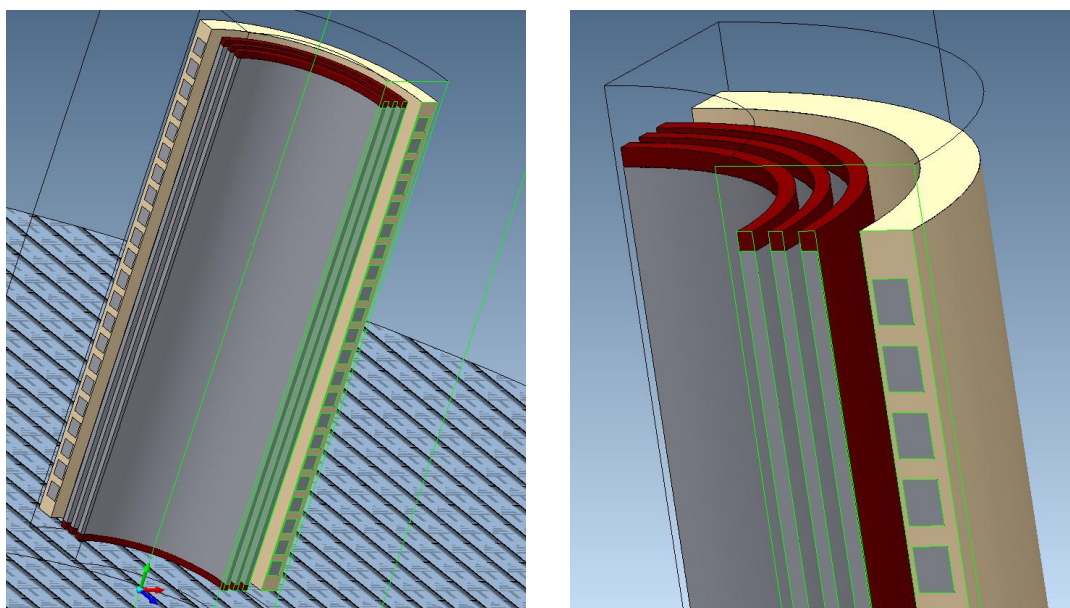
*fig. 34 – campo eléctrico, líneas equipotenciales (izda.) y líneas de flujo (dcha.) en el extremo de las espiras*

## A2.2. Capacidad entre discos y a tierra

El cálculo de las capacidades entre discos y a tierra se hace de forma conjunta, ya que no son capacidades independientes. Esto es debido a que, a diferencia del caso anterior donde sólo teníamos dos electrodos, ahora tenemos más de dos y por lo tanto hay fenómenos de apantallamiento entre ellos.

Se ha construido un modelo formado por los 22 electrodos, uno por cada disco de AT, y un electrodo adicional para el arrollamiento de BT. Este último a su vez está dividido en tres secciones para representar los dos canales de refrigeración.

La condición de contorno que se toma es que la densidad de flujo sea tangente a la superficie de la frontera, excepto en la superficie inferior que representa el suelo y que está a potencial de tierra. Como existe simetría axial se representa sólo un cuarto del arrollamiento para simplificar.



*fig. 35 – modelo para calcular la capacidad entre discos y entre arrollamientos*

Para obtener una solución suficientemente precisa sin que el tiempo de cálculo sea demasiado elevado se ha dividido el modelo en tres cilindros concéntricos, cada uno con un tamaño máximo para los elementos de la malla diferente. De esta forma se facilita que la solución sea más precisa donde es más necesario, esto es, en la zona de los arrollamientos. El primer cilindro tiene un tamaño máximo de elementos de 0.5 mm e incluye los arrollamientos y los 10 primeros milímetros de aire. El segundo cilindro está a 300 mm del anterior y tiene un tamaño de elemento de 5 mm. El mallado de estos dos primeros cilindros puede verse en la figura 35. El tercer cilindro acaba en la frontera del modelo, a 2000 mm del anterior y tiene un tamaño de elemento de 20 mm.



*fig. 36 – mallado en el extremo de los arrollamientos*

Para calcular la capacidad se aplica una tensión a cada disco creciente en escalones de 100 V, de modo que el disco inferior está a 100 V, el siguiente a 200 V y así sucesivamente hasta llegar al superior que está a 2300 V. El arrollamiento de BT está conectado a tierra. El valor de la capacidad no depende de la tensión que se aplique, pero con esta distribución de tensiones en cada disco se puede ver cómo es el campo eléctrico en un caso similar al del ensayo de impulso.



A diferencia del caso anterior, donde se ha obtenido la capacidad partiendo de la carga y la tensión, ahora se emplea una función propia de ElecNet que permite calcular la matriz de capacidades entre todos los electrodos. Esta matriz, donde se han resaltado los valores de interés en nuestro caso, se muestra a continuación:

	disco 1	disco 2	disco 3	disco 4	disco 5	disco 6	disco 7	disco 8	disco 9	disco 10	disco 11	disco 12	disco 13	disco 14	disco 15	disco 16	disco 17	disco 18	disco 19	disco 20	disco 21	disco 22	BT
disco 1	7.74E-12																						
disco 2	2.02E-10	2.40E-12																					
disco 3	3.62E-12	2.00E-10	2.16E-12																				
disco 4	1.62E-12	2.45E-12	2.00E-10	2.04E-12																			
disco 5	1.01E-12	9.02E-13	2.42E-12	2.00E-10	1.98E-12																		
disco 6	7.09E-13	5.03E-13	8.77E-13	2.40E-12	2.00E-10	1.95E-12																	
disco 7	5.34E-13	3.28E-13	4.84E-13	8.66E-13	2.40E-12	2.00E-10	1.94E-12																
disco 8	4.22E-13	2.33E-13	3.12E-13	4.75E-13	8.60E-13	2.39E-12	2.00E-10	1.94E-12															
disco 9	3.43E-13	1.76E-13	2.20E-13	3.04E-13	4.69E-13	8.56E-13	2.39E-12	2.00E-10	1.96E-12														
disco 10	2.86E-13	1.38E-13	1.65E-13	2.14E-13	3.00E-13	4.66E-13	8.52E-13	2.38E-12	2.00E-10	1.98E-12													
disco 11	2.42E-13	1.11E-13	1.28E-13	1.59E-13	2.09E-13	2.96E-13	4.63E-13	8.50E-13	2.38E-12	2.00E-10	2.02E-12												
disco 12	2.07E-13	9.18E-14	1.03E-13	1.23E-13	1.55E-13	2.06E-13	2.94E-13	4.60E-13	8.48E-13	2.38E-12	2.00E-10	2.07E-12											
disco 13	1.79E-13	7.69E-14	8.40E-14	9.79E-14	1.19E-13	1.52E-13	2.04E-13	2.91E-13	4.58E-13	8.46E-13	2.38E-12	2.00E-10	2.13E-12										
disco 14	1.56E-13	6.51E-14	6.98E-14	7.97E-14	9.46E-14	1.17E-13	1.50E-13	2.01E-13	2.89E-13	4.56E-13	8.44E-13	2.38E-12	2.00E-10	2.20E-12									
disco 15	1.36E-13	5.56E-14	5.88E-14	6.59E-14	7.66E-14	9.21E-14	1.14E-13	1.47E-13	1.99E-13	2.87E-13	4.54E-13	8.42E-13	2.37E-12	2.00E-10	2.29E-12								
disco 16	1.19E-13	4.78E-14	4.98E-14	5.51E-14	6.30E-14	7.42E-14	8.98E-14	1.12E-13	1.45E-13	1.97E-13	2.85E-13	4.52E-13	8.40E-13	2.37E-12	2.00E-10	2.41E-12							
disco 17	1.05E-13	4.12E-14	4.25E-14	4.64E-14	5.24E-14	6.07E-14	7.20E-14	8.78E-14	1.10E-13	1.44E-13	1.96E-13	2.83E-13	4.50E-13	8.37E-13	2.37E-12	2.00E-10	2.55E-12						
disco 18	9.16E-14	3.55E-14	3.63E-14	3.93E-14	4.38E-14	5.01E-14	5.85E-14	7.00E-14	8.58E-14	1.08E-13	1.42E-13	1.93E-13	2.81E-13	4.48E-13	8.35E-13	2.37E-12	2.00E-10	2.74E-12					
disco 19	7.99E-14	3.06E-14	3.11E-14	3.33E-14	3.68E-14	4.16E-14	4.80E-14	5.66E-14	6.81E-14	8.39E-14	1.06E-13	1.39E-13	1.91E-13	2.79E-13	4.46E-13	8.33E-13	2.36E-12	2.00E-10	3.00E-12				
disco 20	6.95E-14	2.64E-14	2.66E-14	2.83E-14	3.10E-14	3.48E-14	3.97E-14	4.62E-14	5.47E-14	6.62E-14	8.20E-14	1.04E-13	1.37E-13	1.89E-13	2.77E-13	4.44E-13	8.31E-13	2.36E-12	2.00E-10	3.38E-12			
disco 21	6.07E-14	2.28E-14	2.29E-14	2.42E-14	2.64E-14	2.94E-14	3.32E-14	3.83E-14	4.48E-14	5.34E-14	6.49E-14	8.08E-14	1.03E-13	1.37E-13	1.89E-13	2.77E-13	4.45E-13	8.35E-13	2.37E-12	2.00E-10	4.08E-12		
disco 22	1.00E-13	3.72E-14	3.71E-14	3.90E-14	4.21E-14	4.64E-14	5.20E-14	5.92E-14	6.84E-14	8.02E-14	9.56E-14	1.16E-13	1.44E-13	1.83E-13	2.40E-13	3.27E-13	4.69E-13	7.28E-13	1.29E-12	3.20E-12	2.02E-10	1.61E-11	
BT	4.06E-11	2.33E-11	2.30E-11	2.29E-11	2.28E-11	2.28E-11	2.27E-11	2.27E-11	2.27E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.26E-11	2.27E-11	2.27E-11	2.29E-11	3.83E-11	1.61E-11

fig. 37 – matriz de capacidades (valores en F)

Los elementos de la diagonal principal son las capacidades a tierra, mientras que los elementos fuera de ella son las capacidades entre los electrodos de la fila y columna correspondiente. En la fig. 38 se ha representado la matriz anterior de forma gráfica, teniendo en cuenta que es simétrica. Se puede comprobar cómo los elementos significativos coinciden con los que se han resaltado anteriormente, los demás elementos son al menos un orden de magnitud menor.

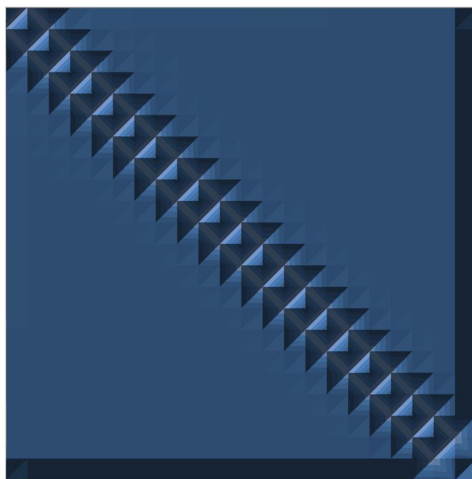


fig. 38 – representación gráfica de la matriz de capacidades imprimir a ver cómo queda

La capacidad entre discos consecutivos ( $C_{dd}$ ), resaltada en rojo, es igual a 200 pF en todos ellos excepto en los discos de los extremos, donde es mínimamente mayor. Si se compara este valor con el calculado en el apartado A1.2, que era igual a 215 pF, se comprueba que el error cometido es del 7.5%.

La capacidad entre cada disco y tierra ( $C_g$ ) es la suma de su capacidad con el arrollamiento de BT, resaltada en verde, y su capacidad parásita a tierra, en azul. Las capacidades así obtenidas son las siguientes:



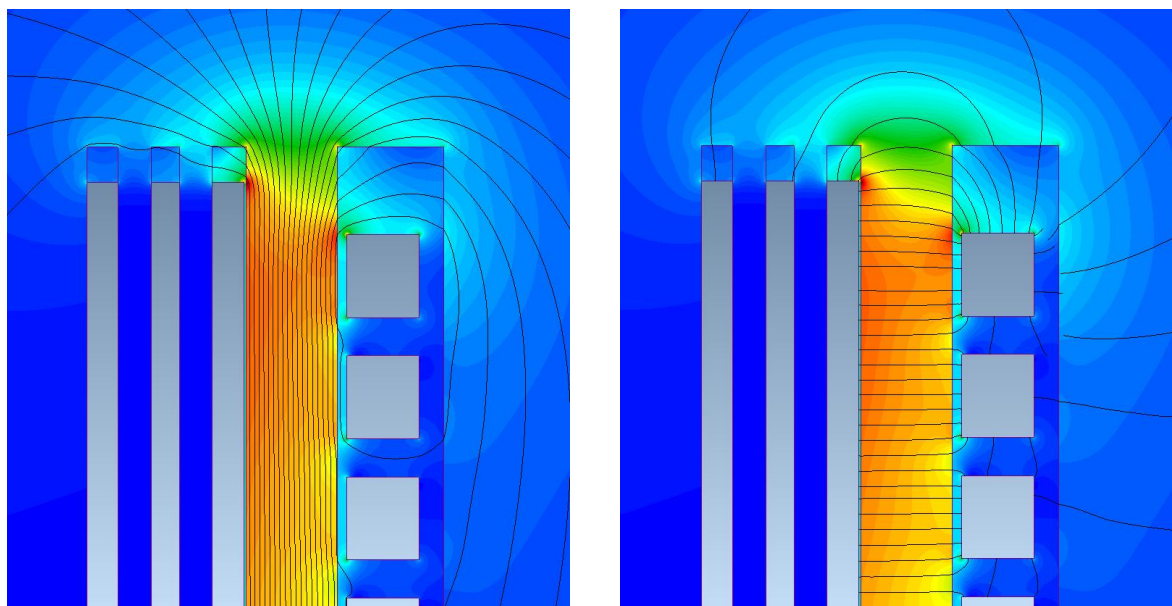
disco 1	disco 2	disco 3	disco 4	disco 5	disco 6	disco 7	disco 8	disco 9	disco 10	disco 11	disco 12	disco 13	disco 14	disco 15	disco 16	disco 17	disco 18	disco 19	disco 20	disco 21	disco 22
48.3	25.7	25.2	24.9	24.8	24.7	24.7	24.6	24.6	24.6	24.7	24.7	24.8	24.8	24.9	25.0	25.2	25.4	25.7	26.1	27.0	54.4

*fig. 39 – capacidad a tierra  $C_g$  para cada disco (valores en pF)*

Se observa que, debido a la cercanía entre arrollamientos, la capacidad parásita es un orden de magnitud menor que la capacidad a BT. Además puede comprobarse cómo los discos de los extremos tienen mayor capacidad con la BT que el resto debido al fenómeno de dispersión del flujo, y mayor capacidad parásita debido a que presentan más superficie expuesta al exterior.

Si se comparan estos valores con los calculados de forma aproximada en el apartado A1.3 se comprueba que el error es grande en los discos de los extremos, mayor del 50%, y bastante más reducido en el resto, en torno al 12%.

El resultado de la simulación en el extremo superior de los arrollamientos se muestra en la fig. 40. Se puede ver cómo el campo se concentra en el aire entre AT y BT, mientras que en los aislamientos es muy reducido. Esto es debido a la diferencia entre la constante dieléctrica de los aislamientos y del aire, que están en una relación aproximada de 3 a 1. También es interesante ver cómo se concentra el campo en las aristas de los conductores e incluso en las de los aislamientos, a pesar de que en todos ellos se ha empleado un redondeo mínimo.



*fig. 40 – campo eléctrico, líneas equipotenciales (izda.) y líneas de flujo (dcha.) en el extremo de los arrollamientos*

### A2.3. Autoinductancia e inductancia mutua entre discos

Para el cálculo de las inductancias se ha construido un modelo formado por los arrollamientos de AT y BT con una discretización al nivel de espira en ambos (fig. 41). Este nivel de detalle tan elevado es necesario porque, en principio, cada espira enlaza un flujo diferente, de modo que se estaría cometiendo un error si se agruparan varios conductores en una sección equivalente. Esto es diferente respecto a lo visto en el cálculo de las capacidades, donde las espiras se agrupaban para formar

electrodos equivalentes. Otra diferencia con el cálculo eléctrico es que, mientras antes la simulación se limitaba a los materiales aislantes, ahora también hay que resolver el problema en los conductores. Estos dos condicionantes aumentarían enormemente el tiempo de cada simulación si no fuera porque se ha elegido un mallado más fino sólo donde es necesario, es decir, en los conductores y zonas adyacentes, mientras que en el aire se ha definido un mallado más basto (fig. 40). Así se obtiene un tiempo de simulación de unas 4 horas. La condición de contorno es que la densidad de flujo sea tangente a la superficie de la frontera.

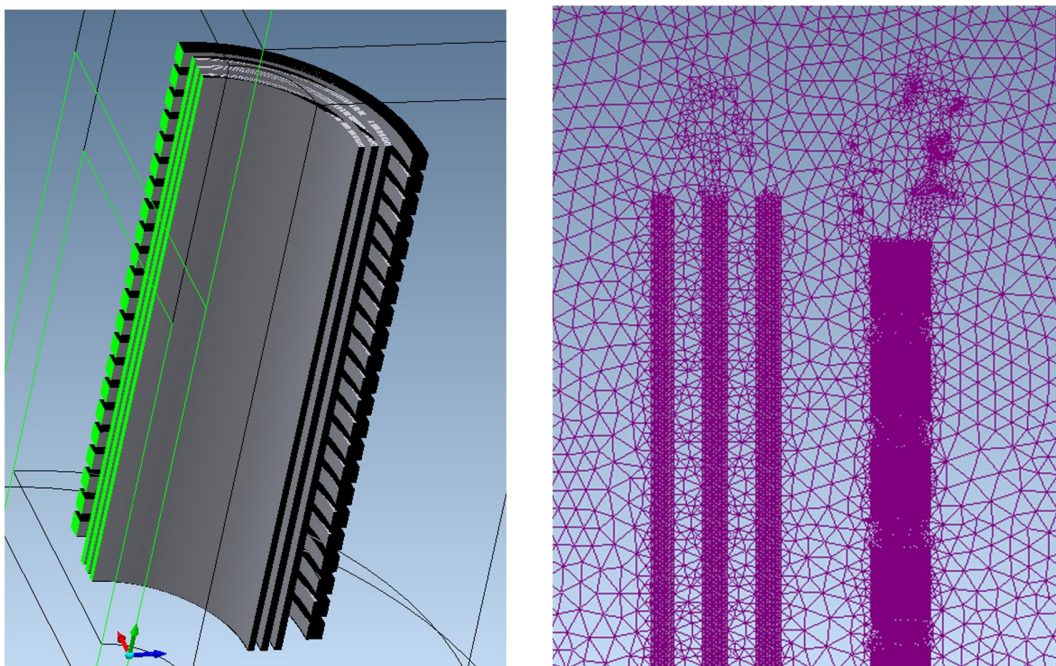


fig. 41 – modelo para calcular las inductancias (izda.) y mallado en un extremo (dcha.)

El valor de la inductancia mutua entre dos discos ( $M_{ij}$ ) se obtiene como la relación entre el flujo concatenado entre ambos y la corriente que circula por uno de ellos. Las inductancias propias ( $L_i$ ) se calculan de forma análoga, ya que son un caso particular de la expresión general:

$$M_{i,j} = M_{j,i} = \frac{\Phi_{i,j}}{I_j}, \forall i \neq j \qquad M_{i,i} = L_i, \forall i = j$$

El primer paso antes de poder lanzar la simulación es definir la conexión entre las espiras y la corriente que las atraviesa. En este sentido, se conectan en serie las 50 espiras que forman cada disco del arrollamiento de AT y se hace lo mismo con las 23 del arrollamiento de BT. Se añade además una fuente de corriente en serie con cada disco para poder inducir un flujo (fig. 42). Por ejemplo, para calcular la primera fila de la matriz de inductancias se inyecta mediante I1 un amperio en el primer disco, mientras que los demás permanecen abiertos. El arrollamiento de BT se cierra mediante una resistencia de 1 mΩ que simula un cortocircuito por ser esta su conexión en el ensayo de impulso tipo rayo. Se obtiene así el flujo concatenado entre el primer disco y cada uno de los demás.

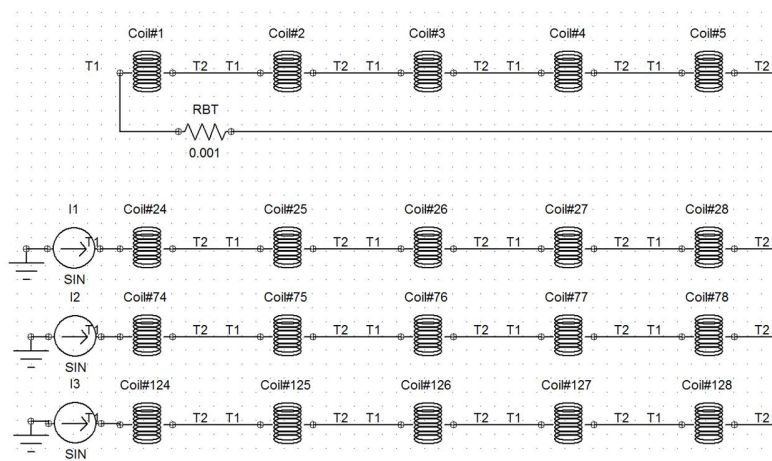


fig. 42 – definición de la conexión de las espiras de BT (arriba) y AT (abajo), fragmento

Para obtener la matriz completa hay que realizar 276 simulaciones, de forma que se emplea un pequeño algoritmo en VBA que establece la conexión correspondiente en cada disco, lanza la simulación y guarda los datos. El resultado así obtenido se muestra en la fig. 43. Los elementos de la diagonal principal son las inductancias propias y es resto son inductancias mutuas entre el disco de la fila y columna correspondiente.

	disco 1	disco 2	disco 3	disco 4	disco 5	disco 6	disco 7	disco 8	disco 9	disco 10	disco 11	disco 12	disco 13	disco 14	disco 15	disco 16	disco 17	disco 18	disco 19	disco 20	disco 21	disco 22
disco 1	2.53E-03	1.20E-03	6.16E-04	3.62E-04	2.37E-04	1.69E-04	1.29E-04	1.04E-04	8.80E-05	7.68E-05	6.87E-05	6.29E-05	5.85E-05	5.51E-05	5.24E-05	5.01E-05	4.82E-05	4.65E-05	4.47E-05	4.27E-05	3.98E-05	3.49E-05
disco 2		2.45E-03	1.17E-03	6.00E-04	3.55E-04	2.34E-04	1.69E-04	1.31E-04	1.07E-04	9.15E-05	8.08E-05	7.32E-05	6.75E-05	6.33E-05	6.00E-05	5.73E-05	5.51E-05	5.30E-05	5.10E-05	4.87E-05	4.54E-05	3.98E-05
disco 3			2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.54E-04	2.35E-04	1.70E-04	1.33E-04	1.09E-04	9.36E-05	8.30E-05	7.55E-05	6.99E-05	6.57E-05	6.24E-05	5.97E-05	5.72E-05	5.49E-05	5.22E-05	4.87E-05	4.27E-05
disco 4				2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.54E-04	2.35E-04	1.71E-04	1.34E-04	1.10E-04	9.48E-05	8.43E-05	7.68E-05	7.12E-05	6.69E-05	6.35E-05	6.06E-05	5.78E-05	5.49E-05	5.10E-05	4.47E-05
disco 5					2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.55E-04	2.36E-04	1.72E-04	1.34E-04	1.11E-04	9.56E-05	8.50E-05	7.75E-05	7.18E-05	6.74E-05	6.38E-05	6.06E-05	5.72E-05	5.31E-05	4.65E-05
disco 6						2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.55E-04	2.37E-04	1.72E-04	1.35E-04	1.11E-04	9.60E-05	8.54E-05	7.78E-05	7.20E-05	6.74E-05	6.35E-05	5.97E-05	5.51E-05	4.82E-05
disco 7							2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.73E-04	1.35E-04	1.12E-04	9.62E-05	8.55E-05	7.78E-05	7.18E-05	6.69E-05	6.24E-05	5.74E-05	5.02E-05
disco 8								2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.73E-04	1.35E-04	1.12E-04	9.62E-05	8.54E-05	7.75E-05	7.12E-05	6.57E-05	6.00E-05	5.24E-05
disco 9									2.43E-03	1.16E-03	5.99E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.73E-04	1.35E-04	1.12E-04	9.60E-05	8.50E-05	7.68E-05	7.00E-05	6.34E-05	5.51E-05
disco 10										2.43E-03	1.16E-03	5.99E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.73E-04	1.35E-04	1.11E-04	9.56E-05	8.43E-05	7.55E-05	6.76E-05	5.85E-05
disco 11											2.43E-03	1.16E-03	5.99E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.73E-04	1.35E-04	1.11E-04	9.49E-05	8.31E-05	7.32E-05	6.30E-05
disco 12												2.43E-03	1.16E-03	5.99E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.72E-04	1.34E-04	1.10E-04	9.36E-05	8.08E-05	6.88E-05
disco 13													2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.56E-04	2.37E-04	1.72E-04	1.34E-04	1.09E-04	9.16E-05	7.68E-05
disco 14														2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.55E-04	2.36E-04	1.71E-04	1.33E-04	1.07E-04	8.81E-05
disco 15															2.43E-03	1.16E-03	5.98E-04	3.55E-04	2.35E-04	1.70E-04	1.31E-04	1.05E-04
disco 16																2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.54E-04	2.35E-04	1.69E-04	1.30E-04
disco 17																	2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.54E-04	2.35E-04	1.69E-04
disco 18																		2.43E-03	1.16E-03	5.97E-04	3.55E-04	2.37E-04
disco 19																			2.43E-03	1.16E-03	6.00E-04	3.63E-04
disco 20																				2.43E-03	1.17E-03	6.17E-04
disco 21																					2.45E-03	1.20E-03
disco 22																						2.53E-03

fig. 43 – matriz de inductancias (valores en H)

Al comparar estos valores con los obtenidos de forma aproximada en los apartados A1.4 y A1.5 se comprueba que son menores y que el error es muy elevado en todo caso. La diferencia en las inductancias propias es del 45%, mientras que en las mutuas va desde un 30% para los discos que se encuentran más alejados hasta un 75% en los discos más próximos. La explicación para este error tan grande hay que buscarlo en que en el cálculo aproximado no se contempla el efecto del arrollamiento de BT en cortocircuito mientras que en la simulación sí se tiene en cuenta.

En la siguiente figura se ha representado la matriz de inductancias de forma gráfica. Se puede observar cómo el acoplamiento es mucho mayor entre los elementos más cercanos a la diagonal principal, lo que se corresponde con las inductancias propias y las mutuas entre discos cercanos, y que disminuye fuertemente entre los elementos más alejados de esta, lo que se corresponde con pares de discos alejados entre sí.

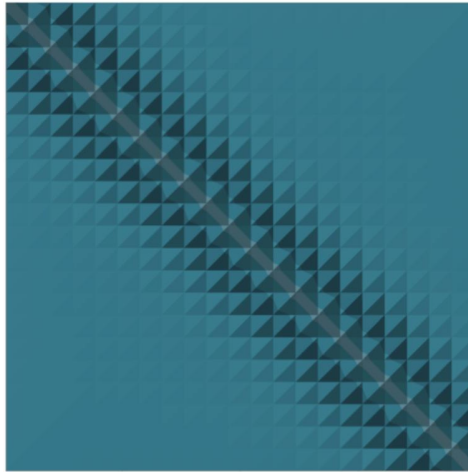


fig. 44 – representación gráfica de la matriz de inductancias

El resultado de la simulación al inyectar corriente en el disco inferior se muestra en la fig. 45. Se puede ver la dispersión del flujo según nos alejamos del disco. También es interesante observar cómo el campo magnético apenas penetra en el arrollamiento de BT. Esto es así porque la BT está en cortocircuito y por lo tanto puede circular en ella una corriente que a su vez crea un flujo que se opone al flujo inicial.

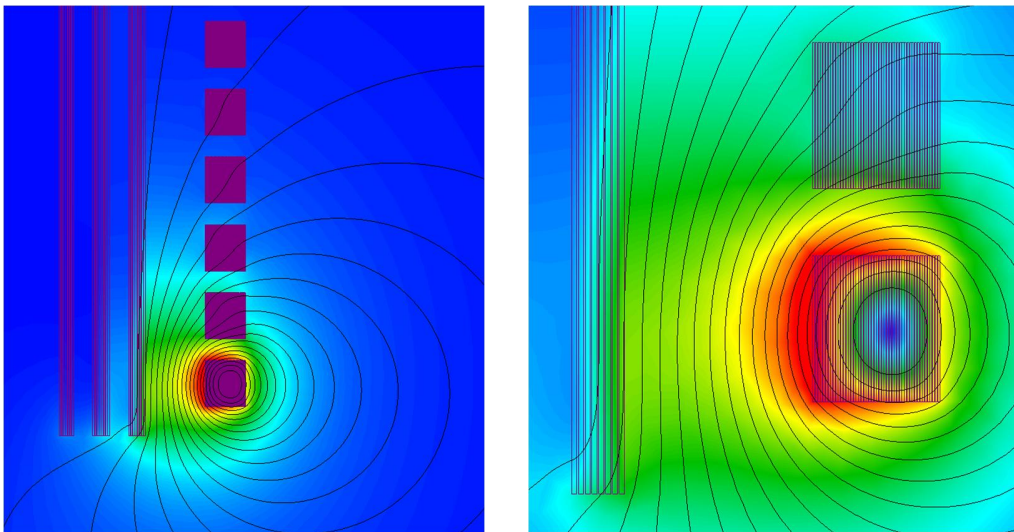


fig. 45 – líneas de flujo e inducción magnética en el cálculo de  $M_{1j}$

#### A2.4. Resistencia serie

En el apartado A1.6 ya se ha explicado cómo la resistencia de un conductor en corriente alterna depende de la frecuencia de la corriente que lo atraviesa y cómo ésta se ha estimado en unos 30 kHz mediante la simulación del circuito equivalente con PSPICE. Para calcular la resistencia de cada disco con FEM tan sólo hay que repetir la simulación magnética con MagNet a esta frecuencia.

El modelo a resolver es el mismo que se acaba de explicar en el apartado A2.3, solo que ahora se resuelve a 30 kHz en lugar de a 50 Hz y obtenemos el valor de la resistencia de una espira como la



relación entre la tensión que se induce en ella y la corriente que la atraviesa. Como ahora todos los discos se pueden conectar en serie sólo es necesario hacer una simulación.

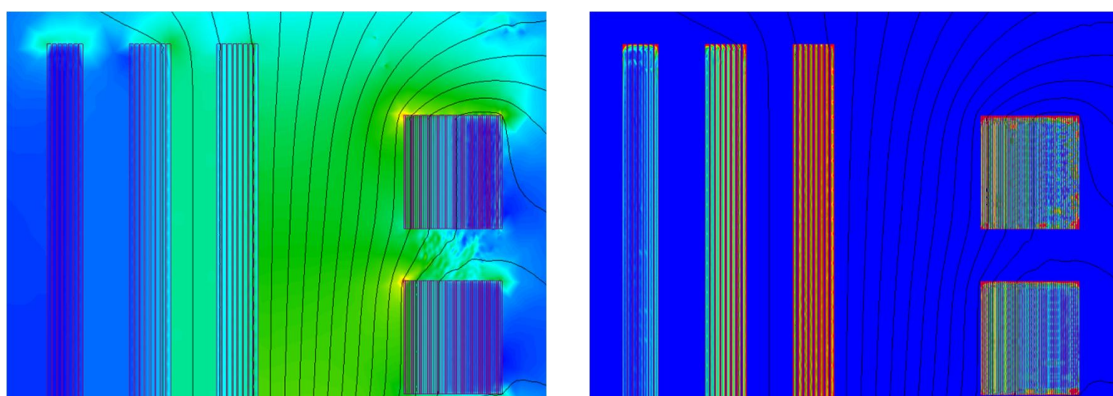
Pero en el circuito equivalente no tenemos la resistencia de una espira, sino la de un disco completo ( $R_s$ ), por lo que es necesario sumar el valor de la resistencia de las 50 espiras que lo forman para obtener este valor. Los datos así obtenidos se muestran en la fig. 46. Hay que hacer notar que cada espira tiene una resistencia distinta porque el flujo que las atraviesa también es diferente, de modo que discos iguales pueden tener una resistencia serie muy distinta.

Rs1	Rs2	Rs3	Rs4	Rs5	Rs6	Rs7	Rs8	Rs9	Rs10	Rs11	Rs12	Rs13	Rs14	Rs15	Rs16	Rs17	Rs18	Rs19	Rs20	Rs21	Rs22
13.8	15.9	17.2	15.1	15.6	15.7	17.1	17.0	18.5	17.6	16.4	15.4	15.9	18.1	17.3	16.9	19.2	20.2	25.8	32.8	19.9	25.9

*fig. 46 – resistencia serie  $R_s$  para cada disco (valores en  $\Omega$ )*

Si se comparan estos valores con los calculados a mano en el apartado A1.6 se comprueba que el error es muy grande. La resistencia obtenida mediante FEM es entre el 25% y el 50% del valor obtenido por el método aproximado, según el caso. Este error se justifica porque se trata de un fenómeno muy local, que en FEM se puede tratar con un mallado suficientemente fino, pero que es muy difícil de resolver de forma aproximada.

El resultado de la simulación en la parte superior de los arrollamientos se muestra a continuación. Se puede ver cómo la corriente se distribuye de forma no homogénea en la sección del conductor, concentrándose en la periferia o en sus extremos, principalmente a causa del efecto proximidad.



*fig. 47 – líneas de flujo e inducción magnética (izda.) y densidad de corriente (dcha.)*

### ANEXO 3. CALCULO APROXIMADO DE LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO EN EL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION

#### A3.1. Capacidad entre espiras

En el cálculo de la capacidad entre espiras hay que diferenciar entre las espiras normales que sólo tienen el aislamiento entre espiras entre ambas y las que además tienen un canal de refrigeración.

Para las espiras normales el cálculo es análogo al que se ha empleado en el cálculo de la capacidad entre espiras en el arrollamiento de AT:

$$C_{ee} \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi a d_m}{d_{ee}}$$

Donde:

$C_{ee}$ : capacidad entre dos espiras consecutivas [F]

$a$ : dimensión axial del conductor [m]

$d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

$d_{ee}$ : espesor del aislamiento entre espiras [m]

Sustituyendo se obtiene:

$$C_{ee} \approx 8.85 \times 10^{-12} \cdot 3.2 \frac{\pi \cdot 1.15 \cdot 0.5335}{3.4 \times 10^{-4}} = 160 \text{ nF}$$

Para las espiras con un canal de refrigeración entre ambas hay que tener en cuenta que el aislamiento entre ellas no es homogéneo porque para formar el canal se añaden unos perfiles de fibra de vidrio.

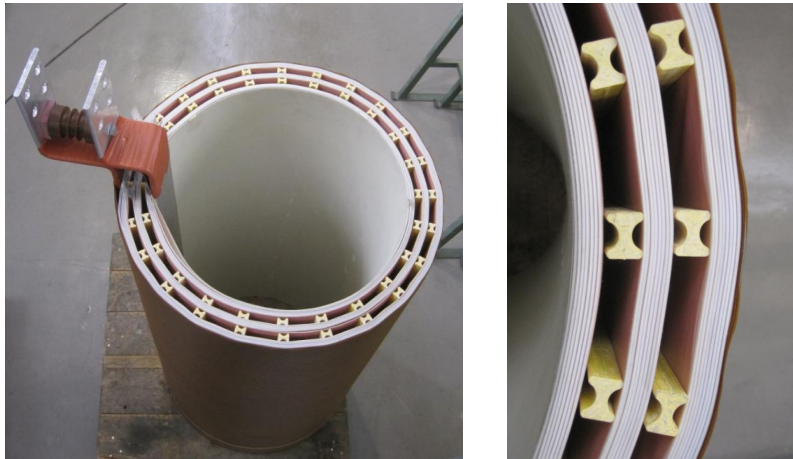


fig. 48 – canales de refrigeración (izda.) y detalle de los perfiles de fibra de vidrio (dcha.)

De modo que para calcular la capacidad se debe emplear una permitividad relativa equivalente que tenga en cuenta esto:

$$\epsilon_{req} = \epsilon_{ro} \cdot r_o + \epsilon_{rfv} \cdot r_{fv}$$

Donde:

$\epsilon_{req}$ : permitividad relativa equivalente [ ]  
 $\epsilon_{ro}$ : permitividad relativa del aire [ ]  
 $\epsilon_{rv}$ : permitividad relativa de la fibra de vidrio [ ]  
 $r_o$ : porcentaje del canal ocupado por aire [p.u.]  
 $r_p$ : porcentaje del canal ocupado por los perfiles [p.u.]

Sustituyendo se obtiene:

$$\epsilon_{req} = 1 \cdot 0.7 + 4 \cdot 0.3 = 1.9$$

Para el cálculo de la capacidad se emplea la expresión para un condensador cilíndrico:

$$C \approx \frac{2 \pi \epsilon_0 h}{\frac{1}{\epsilon_{req}} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)}$$

Donde:

$h$ : altura del cilindro [m]  
 $d_i$ : diámetro del dieléctrico i [m]  
 $\epsilon_{req}$ : permitividad relativa equivalente [ ]

Sustituyendo para las dimensiones del canal interior se obtiene:

$$C_{ee} \approx \frac{2 \pi \cdot 8.85 \times 10^{-12} \cdot 1.15}{\frac{1}{1.9} \ln \left( \frac{0.518}{0.49} \right)} = 2.2 \text{ nF}$$

Para el canal exterior, con diámetros 544 y 572 mm, obtenemos de forma análoga un valor de 2.4 nF.

### A3.2. Autoinductancia e inductancia mutua entre espiras

El cálculo de las inductancias, mutuas y propias, se ha empleado la expresión que aparece en [11] para dos arrollamientos cilíndricos coaxiales de igual altura:

$$M \approx \mu_0 N_1 N_2 \pi \left( \frac{d_1}{a} \right)^2 (a - \xi d_2)$$

Con  $\xi$  una función dependiente de los diámetros de los arrollamientos y que se define como:

$$\xi = \frac{1}{2} + \frac{1}{16} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 - \frac{1}{128} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^4 - \frac{5}{2048} \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^6$$

Donde:

$N_i$ : número de espiras del arrollamiento i [ ]  
 $d_1$ : diámetro del arrollamiento interior [m]  
 $d_2$ : diámetro del arrollamiento exterior [m]  
 $a$ : dimensión axial de los arrollamientos [m]

Al aplicar la expresión anterior hay que tener en cuenta que en lugar de dos arrollamientos tenemos sólo dos espiras acopladas. Sustituyendo para las espiras 1 y 2 se obtiene:

$$\xi_{1,2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{16} \left( \frac{0.4696}{0.4728} \right)^2 - \frac{1}{128} \left( \frac{0.4696}{0.4728} \right)^4 - \frac{5}{2048} \left( \frac{0.4696}{0.4728} \right)^6 = 0.5517$$

$$M_{1,2} \approx 4\pi \times 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1 \cdot \pi \left( \frac{0.4696}{1.15} \right)^2 (1.15 - 0.5517 \cdot 0.4728) = 146 \text{ nH}$$

De forma análoga se calculan las inductancias mutuas y propias entre todos los demás pares de espiras. Los resultados se muestran en la siguiente matriz:

	esp. 1	esp. 2	esp. 3	esp. 4	esp. 5	esp. 6	esp. 7	esp. 8	esp. 9	esp. 10	esp. 11	esp. 12	esp. 13	esp. 14	esp. 15	esp. 16	esp. 17	esp. 18	esp. 19	esp. 20	esp. 21	esp. 22	esp. 23
esp. 1	1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07
esp. 2		1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.37E-07	1.37E-07	1.37E-07
esp. 3			1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.37E-07	1.37E-07
esp. 4				1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.37E-07
esp. 5					1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.38E-07	1.37E-07
esp. 6						1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.38E-07	1.37E-07
esp. 7							1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.39E-07	1.37E-07
esp. 8								1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.39E-07	1.37E-07
esp. 9									1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.41E-07	1.37E-07
esp. 10										1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.37E-07
esp. 11											1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.41E-07	1.37E-07
esp. 12												1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.37E-07
esp. 13													1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.42E-07	1.37E-07
esp. 14														1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.37E-07
esp. 15															1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.42E-07	1.37E-07
esp. 16																1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.43E-07	1.37E-07
esp. 17																	1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.45E-07	1.37E-07
esp. 18																		1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.45E-07	1.37E-07
esp. 19																			1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.37E-07
esp. 20																				1.47E-07	1.46E-07	1.46E-07	1.37E-07
esp. 21																					1.47E-07	1.46E-07	1.37E-07
esp. 22																						1.47E-07	1.37E-07
esp. 23																							1.47E-07

fig. 49 – matriz de inductancias (valores en H)

En la fig. 50 se ha representado la matriz de inductancias de forma gráfica. Se puede observar cómo el acoplamiento es similar entre todos los elementos de la matriz. Esto no era así en el arrollamiento de AT, donde había diferencias de varios órdenes de magnitud entre los elementos de la diagonal principal y los que estaban más alejados de ella. Esta diferencia hay que buscarla en la simetría de un arrollamiento de banda, donde incluso las espiras más alejadas están a unos pocos centímetros de distancia.

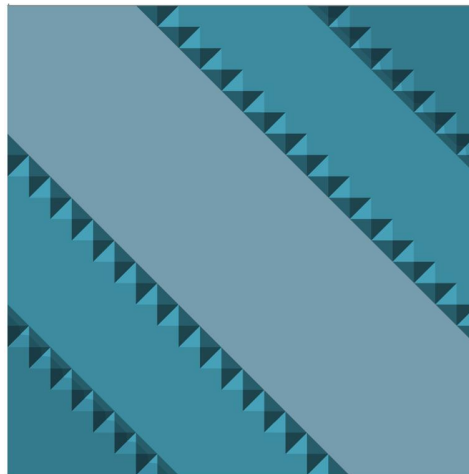


fig. 50 – representación gráfica de la matriz de inductancias



### A3.3. Resistencia serie

#### a) Resistencia serie óhmica

El cálculo de la resistencia serie en continua es similar al realizado en el arrollamiento de AT, sólo que ahora corresponde a la resistencia de una espira en lugar de a la de un disco:

$$R_{sDC} = \rho \frac{\pi d_m}{a d_r}$$

Donde:

$R_{sDC}$ : resistencia serie en continua [ $\Omega$ ]

$\rho$ : resistividad del conductor [ $\Omega \text{ m}$ ]

$d_m$ : diámetro medio del arrollamiento [m]

$a$ : dimensión axial del conductor [m]

$d_r$ : dimensión radial del conductor [m]

Teniendo en cuenta que el conductor es aluminio y para una temperatura de 20 °C, se obtiene:

$$R_{sDC} = 2.8265 \times 10^{-8} \frac{\pi \cdot 0.5335}{1.15 \cdot 1.3 \times 10^{-3}} = 31.7 \mu\Omega$$

#### b) Resistencia serie adicional

Al igual que ocurría en el arrollamiento de AT, se ha realizado una simulación preliminar con PSPICE de la distribución de tensión para obtener la frecuencia fundamental de la onda de corriente ante un impulso tipo rayo. Esta frecuencia es la de resonancia y depende de los valores de capacidades e inductancias, que son conocidos, pero es independiente del valor de la resistencia. El valor de la frecuencia de resonancia así obtenido es de unos 10 kHz.

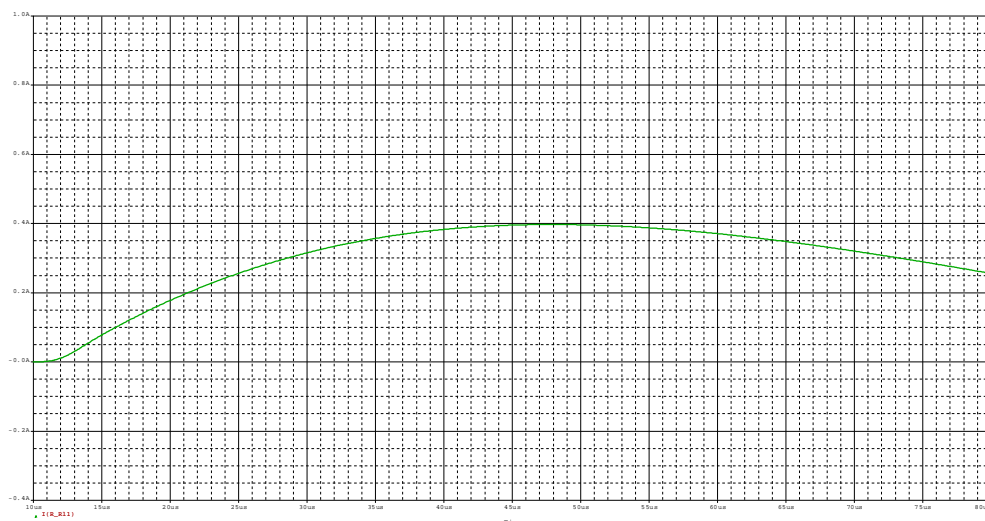


fig. 51 – Corriente a través de Rs1

La profundidad de penetración ( $\delta$ ) ya se ha definido en el apartado A1.6 y su expresión es:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

Para el aluminio a 10 kHz la profundidad de penetración es 0.85 mm, que está cerca del espesor del conductor empleado. De modo que el aumento de resistencia causado por efecto *skin* en el arrollamiento de BT es pequeño y la resistencia en corriente alterna está determinada por el efecto proximidad.

Se emplea la siguiente aproximación para el cálculo de la resistencia adicional, que se propone en [10]. El primer sumando corresponde al efecto skin, mientras que el segundo es el efecto proximidad:

$$F_R = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \approx \Delta \left[ \frac{\sinh(2\Delta) + \sin(2\Delta)}{\cosh(2\Delta) - \cos(2\Delta)} + \frac{2}{3}(p^2 - 1) \frac{\sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{\cosh(\Delta) + \cos(\Delta)} \right] \quad \Delta = \frac{d_r}{\delta}$$

Donde:

$F_R$ : coeficiente de resistencia adicional [ ]

$p$ : número de capas del arrollamiento [ ]

$\Delta$ : relación de penetración [ ]

Sustituyendo se obtiene:

$$F_R \approx 1.54 \left[ \frac{\sinh(2 \cdot 1.54) + \sin(2 \cdot 1.54)}{\cosh(2 \cdot 1.54) - \cos(2 \cdot 1.54)} + \frac{2}{3}(23^2 - 1) \frac{\sinh(1.54) - \sin(1.54)}{\cosh(1.54) + \cos(1.54)} \right] = 263.8$$

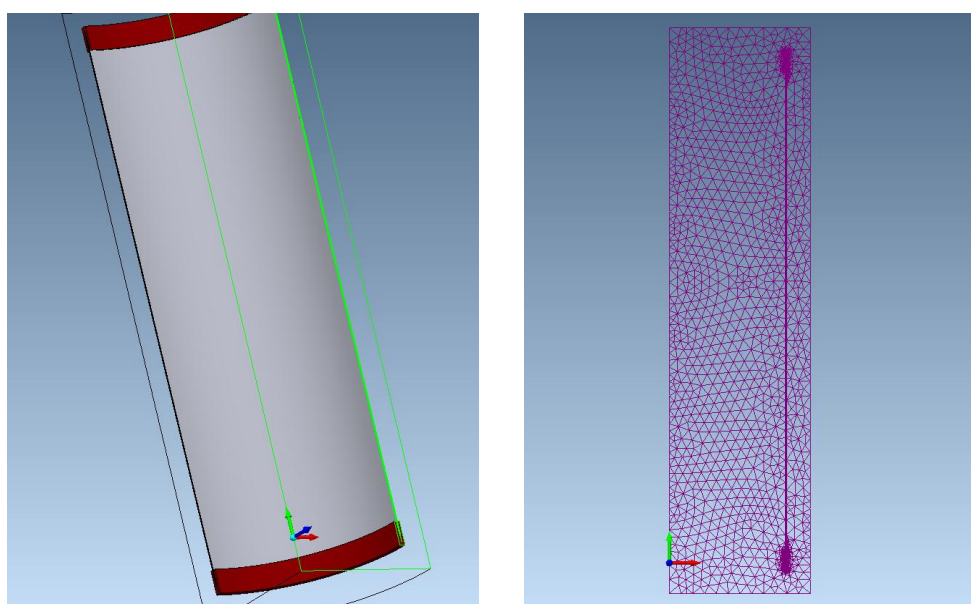
Lo que supone una resistencia serie en corriente alterna ( $R_{sAC}$ ) de 8.36 mΩ por espira.

## ANEXO 4. CALCULO FEM DE LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO EN EL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION

### A4.1. Capacidad entre espiras

Para el cálculo de las capacidades entre espiras se han hecho dos simulaciones, una para las espiras normales y otra para las espiras que están una a cada lado de un canal de refrigeración. En este último caso, como el arrollamiento tiene dos canales, se han simulado las dos capacidades.

Para el caso de las espiras normales se ha construido un modelo formado por dos espiras situadas en el diámetro medio del arrollamiento. La condición de contorno en todas las fronteras es densidad de flujo tangente a la superficie de la frontera y, como en otros casos, sólo se ha representado un cuarto de arrollamiento por tener el problema simetría axial.



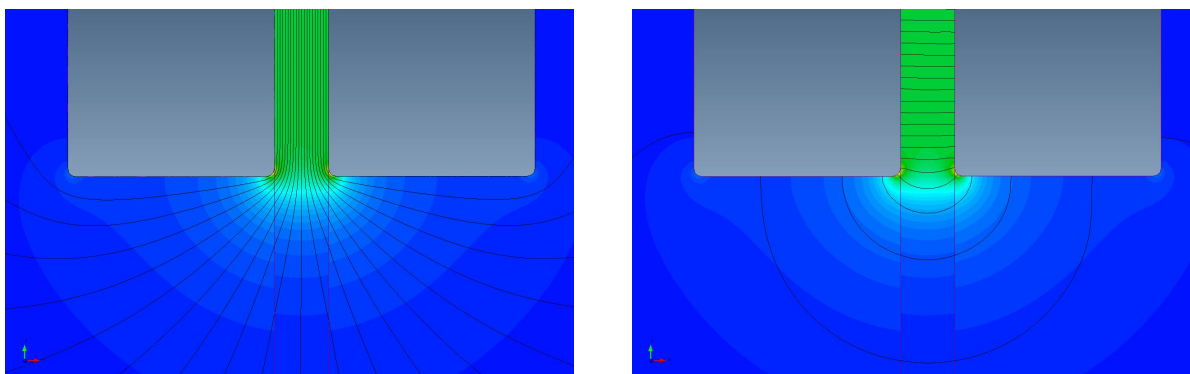
*fig. 52 – modelo para calcular la capacidad entre espiras sin canal (izda.) y mallado (dcha.)*

Como el campo entre espiras es homogéneo excepto en sus bordes es interesante usar un mallado relativamente basto en todo el volumen a condición de que se emplee uno más fino en los extremos de las espiras. Así se evita un tiempo de cálculo muy elevado que sin embargo no significaría una solución más precisa. En este sentido, el tamaño de la malla va desde los 0.04 mm en los extremos de las espiras hasta los 20 mm en las zonas más alejadas, como puede verse en la fig. 52.

El valor de la capacidad se obtiene de la carga, teniendo en cuenta que se ha aplicado una diferencia de potencial de 100 V entre ambas espiras. El resultado es de 161 nF, lo que supone un error menor del 1% comparado con el cálculo aproximado del apartado A3.1, que era de 160 nF. Este error tan pequeño es consecuencia de que la geometría se aproxima mucho a la de un condensador infinitamente largo.

En la fig. 53 se muestra el resultado de la simulación para el borde inferior de las espiras. La solución es similar a la que se obtenía en el cálculo de la capacidad entre espiras en un disco de AT. También se

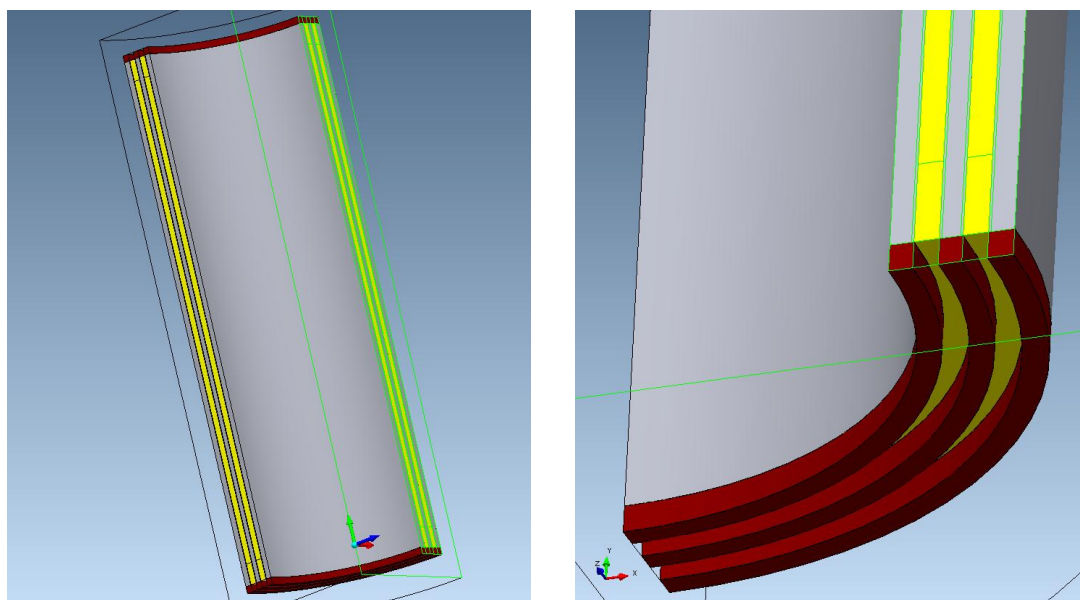
observa el fenómeno de concentración del campo en los cantos, a pesar de que están redondeados para reducir este efecto.



*fig. 53 – campo eléctrico, líneas equipotenciales (izda.) y líneas de flujo (dcha.) en espiras sin canal*

Para el caso de las espiras situadas en las caras de los canales, se ha construido un modelo con siete electrodos: cuatro corresponden a las espiras en las que se quiere calcular la capacidad y otros tres agrupan al resto de espiras. Así los tres bloques en los que los canales dividen radialmente al arrollamiento tienen dos electrodos (bloques exteriores) o tres (bloque central). De esta forma es posible obtener la capacidad entre las espiras de los canales sin que el cálculo se vea falseado por el resto de los electrodos, que al estar a su misma tensión las apantallan por una de sus caras.

En el mallado se ha seguido un criterio similar al caso anterior, empleando un mallado más fino cerca de los extremos del arrollamiento. La diferencia de potencial entre un canal y el siguiente es 100 V y las condiciones de frontera no se han variado. También como en la simulación anterior, las capacidades se han obtenido calculando previamente la carga almacenada en cada par de electrodos.



*fig. 54 – modelo para calcular la capacidad entre espiras con canal (izda.) y detalle inferior (dcha.)*

La capacidad calculada para las espiras del canal interior y exterior es de 2.20 y 2.43 nF, respectivamente. Comparándolo con el cálculo aproximado del apartado A3.1, que era de 2.20 y 2.40 nF, se comprueba que el error está en torno al 1% en ambos casos.

El resultado de la simulación para el extremo inferior de los canales se puede ver en la fig. 55. Se observa que el campo es similar en ambos canales, y si la capacidad es diferente es sólo por la diferencia de diámetros. También se comprueba cómo el campo, por la diferencia en las constantes dieléctricas, es mayor en el aire que en los aislamientos.

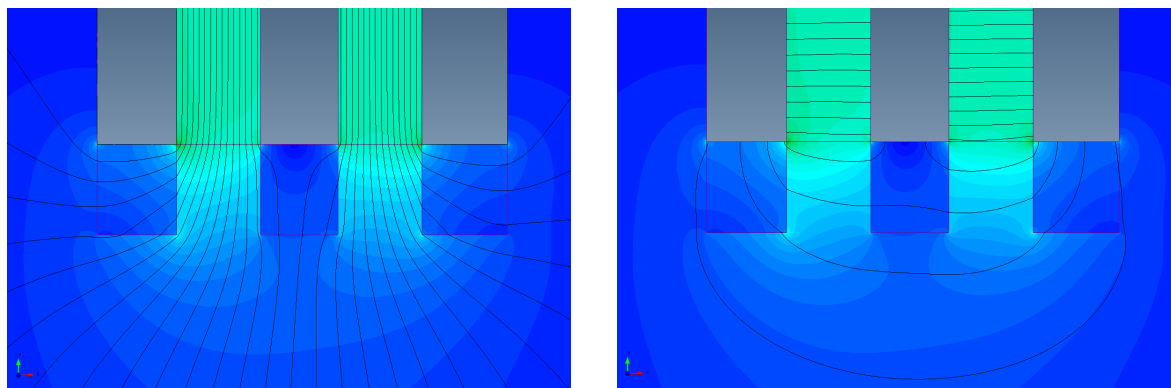


fig. 55 – campo eléctrico, líneas equipotenciales (izda.) y líneas de flujo (dcha.) en el extremo de los arrollamientos

#### A4.2. Autoinductancia e inductancia mutua entre espiras

El cálculo de las inductancias del arrollamiento de BT se ha hecho con el mismo modelo y método que se ha empleado para las del AT en el apartado A2.3, por lo que no se va a explicar de nuevo. Tan sólo es necesario cambiar la conexión entre espiras (fig. 56): las del AT están en serie y el circuito se cierra mediante una resistencia de 1 mΩ que simula la conexión en el ensayo de impulso; las de BT tienen una fuente de corriente y una resistencia, de modo que inyectando 1 A en una espira y dejando las demás abiertas con una resistencia de 1 MΩ se va completando la matriz de inductancias

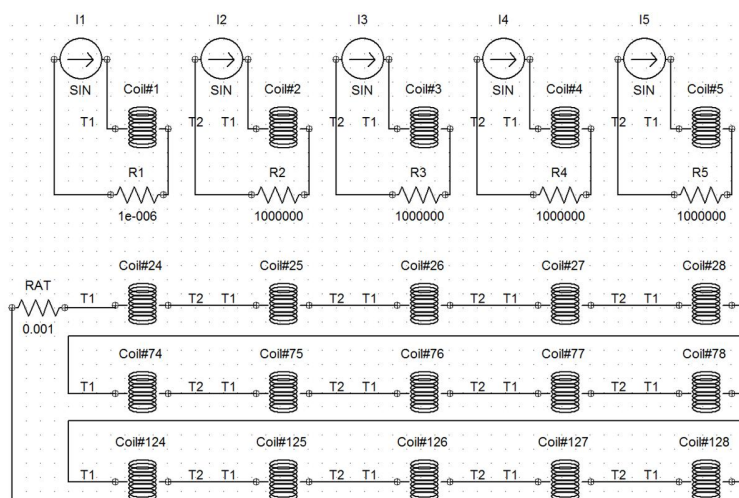


fig. 56 – definición de la conexión de las espiras de BT (arriba) y AT (abajo), fragmento

La matriz de inductancias así obtenida se muestra a continuación. Comparando estos valores con los calculados de forma aproximada en el apartado A3.2 se comprueba que son menores y que el error es muy elevado. La diferencia en las inductancias propias es del 40%, mientras que en las mutuas va desde un 30% para las espiras más alejadas entre sí hasta un 60% en las más próximas. Este error se explica porque en el cálculo aproximado no se contempla que el arrollamiento de AT está en cortocircuito, mientras que en la simulación FEM sí se tiene en cuenta.

	esp. 1	esp. 2	esp. 3	esp. 4	esp. 5	esp. 6	esp. 7	esp. 8	esp. 9	esp. 10	esp. 11	esp. 12	esp. 13	esp. 14	esp. 15	esp. 16	esp. 17	esp. 18	esp. 19	esp. 20	esp. 21	esp. 22	esp. 23
esp. 1	9.74E-08	9.66E-08	9.55E-08	9.43E-08	9.31E-08	9.20E-08	9.08E-08	7.95E-08	7.83E-08	7.71E-08	7.59E-08	7.47E-08	7.35E-08	7.23E-08	7.10E-08	5.91E-08	5.78E-08	5.66E-08	5.53E-08	5.40E-08	5.27E-08	5.14E-08	5.01E-08
esp. 2		9.77E-08	9.69E-08	9.57E-08	9.45E-08	9.34E-08	9.22E-08	8.07E-08	7.95E-08	7.83E-08	7.71E-08	7.58E-08	7.46E-08	7.33E-08	7.21E-08	6.00E-08	5.87E-08	5.74E-08	5.61E-08	5.48E-08	5.35E-08	5.21E-08	5.08E-08
esp. 3			9.80E-08	9.72E-08	9.60E-08	9.48E-08	9.36E-08	8.19E-08	8.07E-08	7.94E-08	7.82E-08	7.69E-08	7.57E-08	7.44E-08	7.32E-08	6.09E-08	5.96E-08	5.82E-08	5.69E-08	5.56E-08	5.42E-08	5.29E-08	5.15E-08
esp. 4				9.83E-08	9.74E-08	9.62E-08	9.50E-08	8.31E-08	8.19E-08	8.06E-08	7.94E-08	7.81E-08	7.68E-08	7.55E-08	7.43E-08	6.18E-08	6.04E-08	5.91E-08	5.77E-08	5.64E-08	5.50E-08	5.37E-08	5.23E-08
esp. 5					9.85E-08	9.76E-08	9.64E-08	8.44E-08	8.31E-08	8.18E-08	8.05E-08	7.92E-08	7.79E-08	7.66E-08	7.53E-08	6.27E-08	6.13E-08	6.00E-08	5.86E-08	5.72E-08	5.58E-08	5.45E-08	5.31E-08
esp. 6						9.87E-08	9.78E-08	8.56E-08	8.43E-08	8.30E-08	8.17E-08	8.04E-08	7.91E-08	7.78E-08	7.64E-08	6.36E-08	6.22E-08	6.08E-08	5.94E-08	5.80E-08	5.66E-08	5.52E-08	5.38E-08
esp. 7							9.89E-08	8.69E-08	8.55E-08	8.42E-08	8.29E-08	8.16E-08	8.02E-08	7.89E-08	7.76E-08	6.45E-08	6.31E-08	6.17E-08	6.03E-08	5.89E-08	5.75E-08	5.60E-08	5.46E-08
esp. 8								9.91E-08	9.79E-08	9.64E-08	9.49E-08	9.33E-08	9.18E-08	9.03E-08	8.87E-08	7.37E-08	7.21E-08	7.05E-08	6.89E-08	6.73E-08	6.56E-08	6.40E-08	6.24E-08
esp. 9									9.89E-08	9.78E-08	9.62E-08	9.46E-08	9.31E-08	9.15E-08	9.00E-08	7.47E-08	7.31E-08	7.15E-08	6.98E-08	6.82E-08	6.66E-08	6.49E-08	6.32E-08
esp. 10										9.87E-08	9.76E-08	9.60E-08	9.44E-08	9.28E-08	9.12E-08	7.58E-08	7.41E-08	7.25E-08	7.08E-08	6.91E-08	6.75E-08	6.58E-08	6.41E-08
esp. 11											9.85E-08	9.73E-08	9.57E-08	9.41E-08	9.25E-08	7.68E-08	7.51E-08	7.35E-08	7.18E-08	7.01E-08	6.84E-08	6.67E-08	6.50E-08
esp. 12												9.83E-08	9.70E-08	9.54E-08	9.37E-08	7.79E-08	7.62E-08	7.45E-08	7.27E-08	7.10E-08	6.93E-08	6.76E-08	6.58E-08
esp. 13													9.80E-08	9.67E-08	9.50E-08	7.89E-08	7.72E-08	7.55E-08	7.37E-08	7.20E-08	7.02E-08	6.85E-08	6.67E-08
esp. 14														9.76E-08	9.63E-08	8.00E-08	7.82E-08	7.65E-08	7.47E-08	7.30E-08	7.12E-08	6.94E-08	6.76E-08
esp. 15															9.73E-08	8.11E-08	7.93E-08	7.75E-08	7.57E-08	7.39E-08	7.21E-08	7.03E-08	6.85E-08
esp. 16																9.15E-08	8.99E-08	8.79E-08	8.58E-08	8.38E-08	8.17E-08	7.97E-08	7.76E-08
esp. 17																	9.06E-08	8.90E-08	8.69E-08	8.49E-08	8.28E-08	8.07E-08	7.86E-08
esp. 18																		8.97E-08	8.81E-08	8.60E-08	8.39E-08	8.18E-08	7.97E-08
esp. 19																			8.88E-08	8.71E-08	8.50E-08	8.28E-08	8.07E-08
esp. 20																				8.78E-08	8.61E-08	8.39E-08	8.17E-08
esp. 21																					8.67E-08	8.50E-08	8.28E-08
esp. 22																						8.56E-08	8.38E-08
esp. 23																							8.45E-08

fig. 57 – matriz de inductancias (valores en H)

En la fig. 58 se ha representado la matriz de inductancias de forma gráfica. Los dos cambios bruscos de color que se observan en la matriz se corresponden con los dos canales de refrigeración. En efecto, cada canal causa una caída brusca en el acoplamiento entre las espiras que quedan a ambos lados, que están a una distancia radial de 15 mm en lugar de los 1.6 mm entre dos espiras consecutivas sin canal.



fig. 58 – representación gráfica de la matriz de inductancias

El resultado de la simulación se muestra en la fig. 59 para dos casos particulares. En el primero (izda.) se ha inyectado la corriente en la espira 1 y en el segundo (dcha.) en la espira 23. Se comprueba cómo las líneas de flujo apenas penetran en el arrollamiento de AT, que está cortocircuitado, aunque en el segundo caso, donde la espira por la que circula corriente está mucho más cerca, la penetración es bastante mayor.

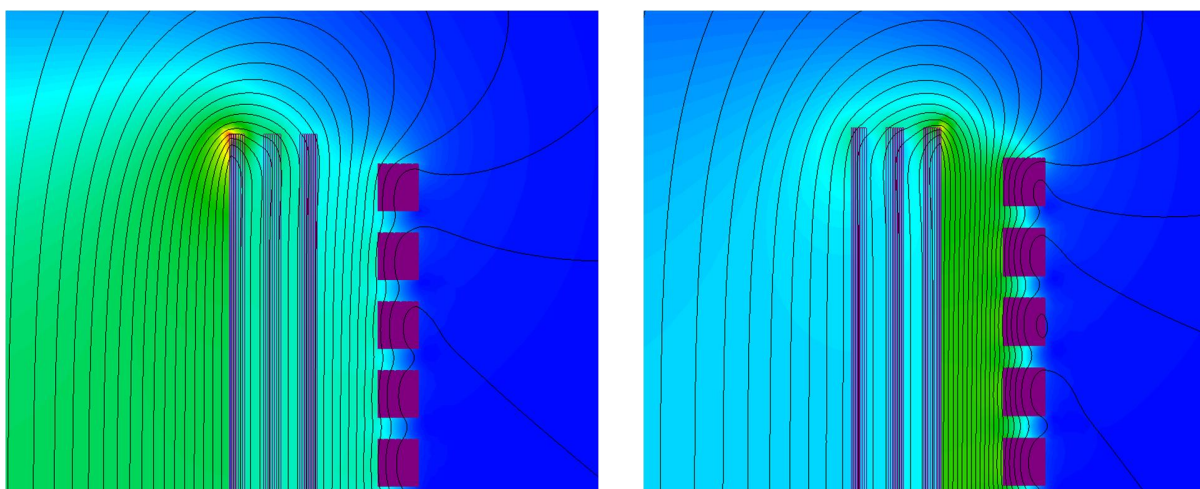


fig. 59 – líneas de flujo e inducción magnética en el cálculo de  $M_{1j}$  (izda.) y  $M_{23j}$  (dcha.)

#### A4.3. Resistencia serie

El modelo a resolver es el mismo que se acaba de explicar en el apartado anterior, solo que ahora se resuelve a 10 kHz en lugar de a 50 Hz. Esta es la frecuencia de la corriente que se ha obtenido en la simulación PSPICE, como se ha visto en el apartado A3.3. El valor de la resistencia de una espira se obtiene como la relación entre la tensión que se induce en ella y la corriente que la atraviesa. Como ahora todas las espiras del arrollamiento de BT se pueden conectar en serie sólo es necesario hacer una simulación. El resultado de la simulación se muestra en la siguiente tabla.

Rs1	Rs2	Rs3	Rs4	Rs5	Rs6	Rs7	Rs8	Rs9	Rs10	Rs11	Rs12	Rs13	Rs14	Rs15	Rs16	Rs17	Rs18	Rs19	Rs20	Rs21	Rs22	Rs23
15.20	12.40	9.66	7.28	5.23	3.53	2.28	1.60	0.629	0.195	0.165	0.540	1.33	2.54	4.23	5.95	8.60	11.60	15.10	19.10	23.70	28.60	33.00

fig. 60 – resistencia serie  $R_s$  para cada espira (valores en  $m\Omega$ )

La diferencia en las resistencias obtenidas es muy grande, del orden de 200 veces. La explicación hay que buscarla en que algunas espiras están separadas sólo por el aislamiento entre espiras, mientras que otras lo están por los canales de refrigeración, de modo que el flujo que las atraviesa es muy diferente. En la fig. 61 se puede ver cómo la corriente se distribuye de diferente forma en cada uno de los tres bloques que forman los canales de refrigeración.

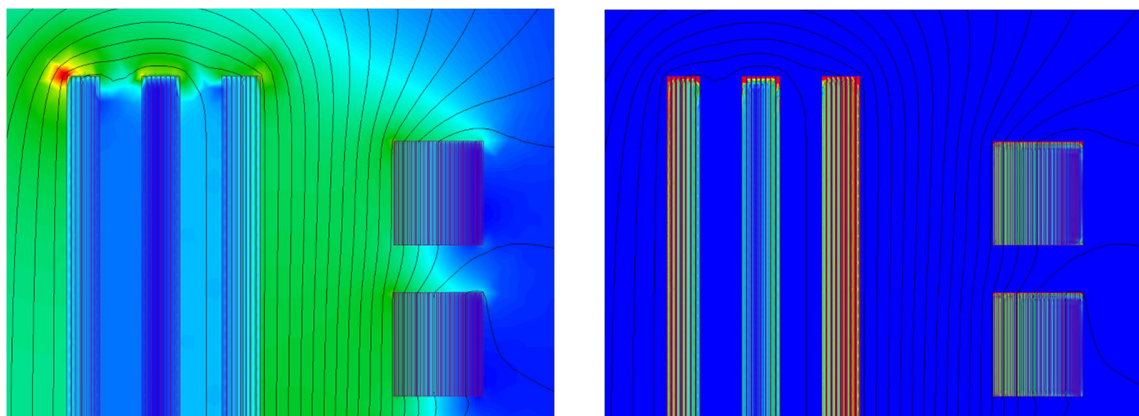


fig. 61 – líneas de flujo e inducción magnética (izda.) y densidad de corriente (dcha.)



## ANEXO 5. GENERADORES DE IMPULSO TIPO RAYO

A continuación se da una breve explicación de los diferentes generadores de impulso que se emplean para ensayar transformadores. Se ven tanto los de AT, con los que se somete al aislamiento a la tensión de impulso real, como los de BT, que se usan para medir la distribución de tensión. También se incluye el diseño del que se ha construido para poder acabar las medidas después de que se rompiera el generador comercial.

### A5.1. Generador de alta tensión

La mayor parte de los generadores de impulso de alta tensión están basados en el circuito de Marx. En la fig. 62 izda. se puede ver el esquema típico de uno de cuatro etapas. La tensión de impulso se obtiene cargando varios condensadores en paralelo para luego conectarlos momentáneamente en serie mediante unos explosores, de forma que la tensión total sea la suma de la de cada condensador. La forma de onda 1.2/50  $\mu$ s se consigue ajustando las impedancias del circuito.

Las tensiones de ensayo tan elevadas que se emplean hacen imposible la medida directa de la tensión, de modo que el generador se emplea junto con un divisor de tensión. En la fig. 62 dcha. se muestra un generador de 800 kV de ocho etapas, en primer plano se puede ver el divisor de tensión capacitivo.

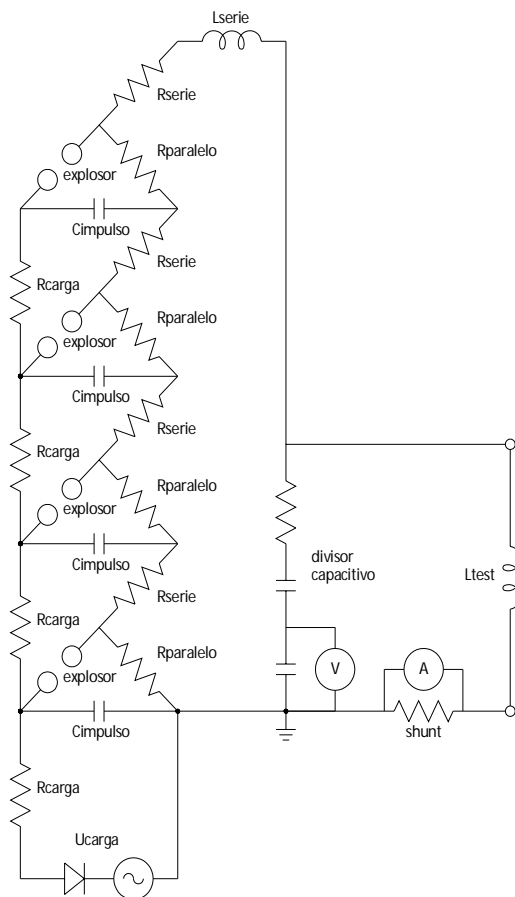


fig. 62 – esquema de un generador de impulso de AT de 4 etapas (izda.) y generador de 800 kV (dcha.)



Para explicar el funcionamiento del generador se puede dividir el proceso en tres etapas:

- Durante el proceso de carga (fig. 63 izda.) los explosores permanecen abiertos, de modo que los condensadores se cargan a través de la red resistiva. Esta etapa dura decenas de segundos y al finalizar todos los condensadores están a la misma tensión de la fuente de alimentación.
- La descarga (fig. 63 centro) se inicia al forzar el disparo del explosor inferior, lo que inicia un disparo en cascada del resto al ser incapaces de soportar el aumento de tensión en sus extremos. Al disparar el último explosor la tensión de todos los condensadores en serie se aplica al transformador. Mientras los explosores están conduciendo los condensadores se descargan a través de las resistencias serie, de modo que ajustando su valor se logra el frente del impulso de  $1.2 \mu s$ .
- Al descargarse los condensadores la corriente se va reduciendo y finalmente se alcanza un punto en el que los explosores se cortan y vuelven a ser circuitos abiertos (fig. 63 dcha.). Ahora es el divisor capacitivo y el propio transformador, que se habían cargado en la etapa anterior, los que se descargan a través de las resistencias serie y paralelo. Eligiendo un valor apropiado para estas últimas se logra la cola del impulso de  $50 \mu s$ .

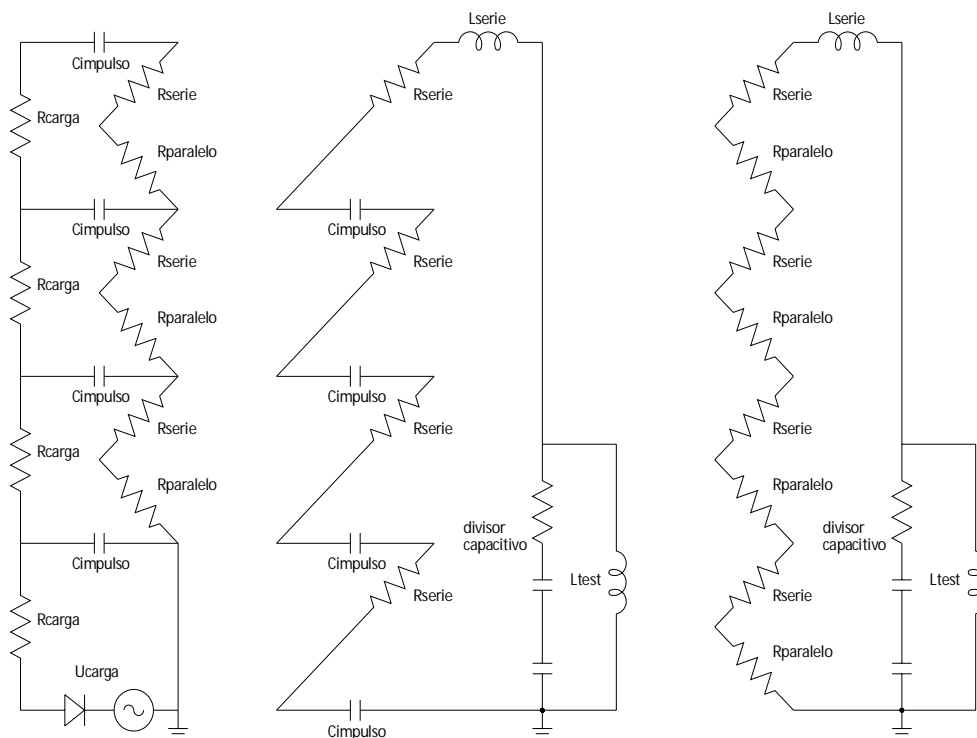


fig. 63 – circuito equivalente durante la carga (izda.), frente del impulso (centro) y cola del impulso (dcha.)

### A5.2. Generador recurrente de baja tensión Haefely RSG-482

Si sólo se quiere conocer la distribución de tensión en un arrollamiento, sin comprobar su aislamiento, no es necesario aplicar la tensión nominal porque el reparto es independiente de la tensión que se aplique. En este caso se puede emplear un generador recurrente de baja tensión, que consiste en un circuito que aplica decenas de veces por segundo una onda de impulso de algunos centenares de voltios. Su esquema se muestra en la fig. 64 y su principio de funcionamiento es similar al visto en el generador de alta tensión, solo que ahora tenemos una única etapa.

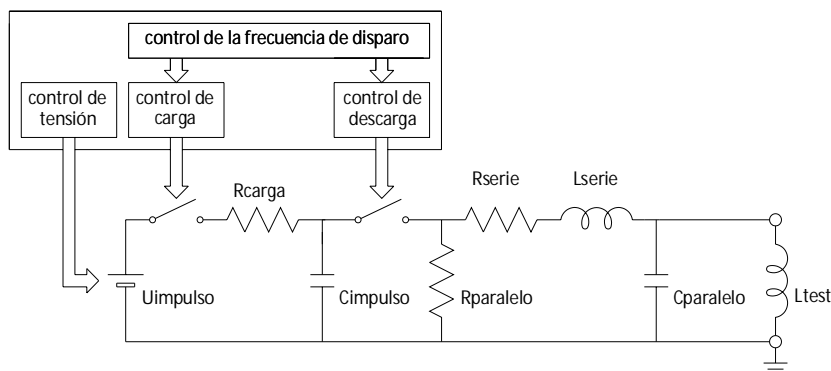


fig. 64 – principio de funcionamiento de un generador recurrente de BT

Durante el proceso de carga se conecta una fuente de tensión mediante un interruptor electrónico a un condensador. Cuando el condensador está cargado, se abre este circuito y se cierra un interruptor de descarga, que es el equivalente al explosor visto anteriormente. El condensador se descarga a través de la resistencia y la bobina serie, que determinan el frente del impulso de 1.2  $\mu\text{s}$ . Un instante después se abre el interruptor, de forma que el transformador se descarga a través de la resistencia serie y paralelo y la bobina serie, que se ajustan para lograr la cola del impulso de 50  $\mu\text{s}$ . A continuación se puede ver el generador empleado en los ensayos, modelo Haefely RSG-482.

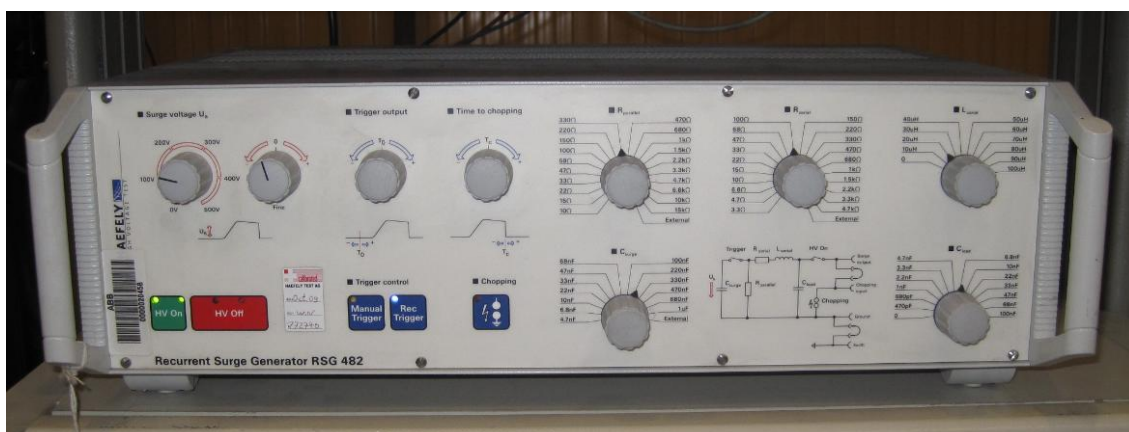


fig. 65 – generador recorrente de BT Haefely RSG-482

### A5.3. Generador recurrente de baja tensión de construcción propia

Como ya se ha explicado, el generador Haefely se averió cuando se estaba ajustando para medir el arrollamiento de BT. El fallo se produjo probablemente por sobrecarga al emplear un condensador externo, ya que con los componentes internos no era posible lograr una onda de impulso adecuada. Para no retrasar el proyecto por esta avería se decidió construir otro generador, que es con el que se han hecho las medidas en la BT. Aunque la forma de onda que se ha logrado está lejos de ser perfecta, cumple las tolerancias que establece la norma. El esquema del generador se muestra a continuación.

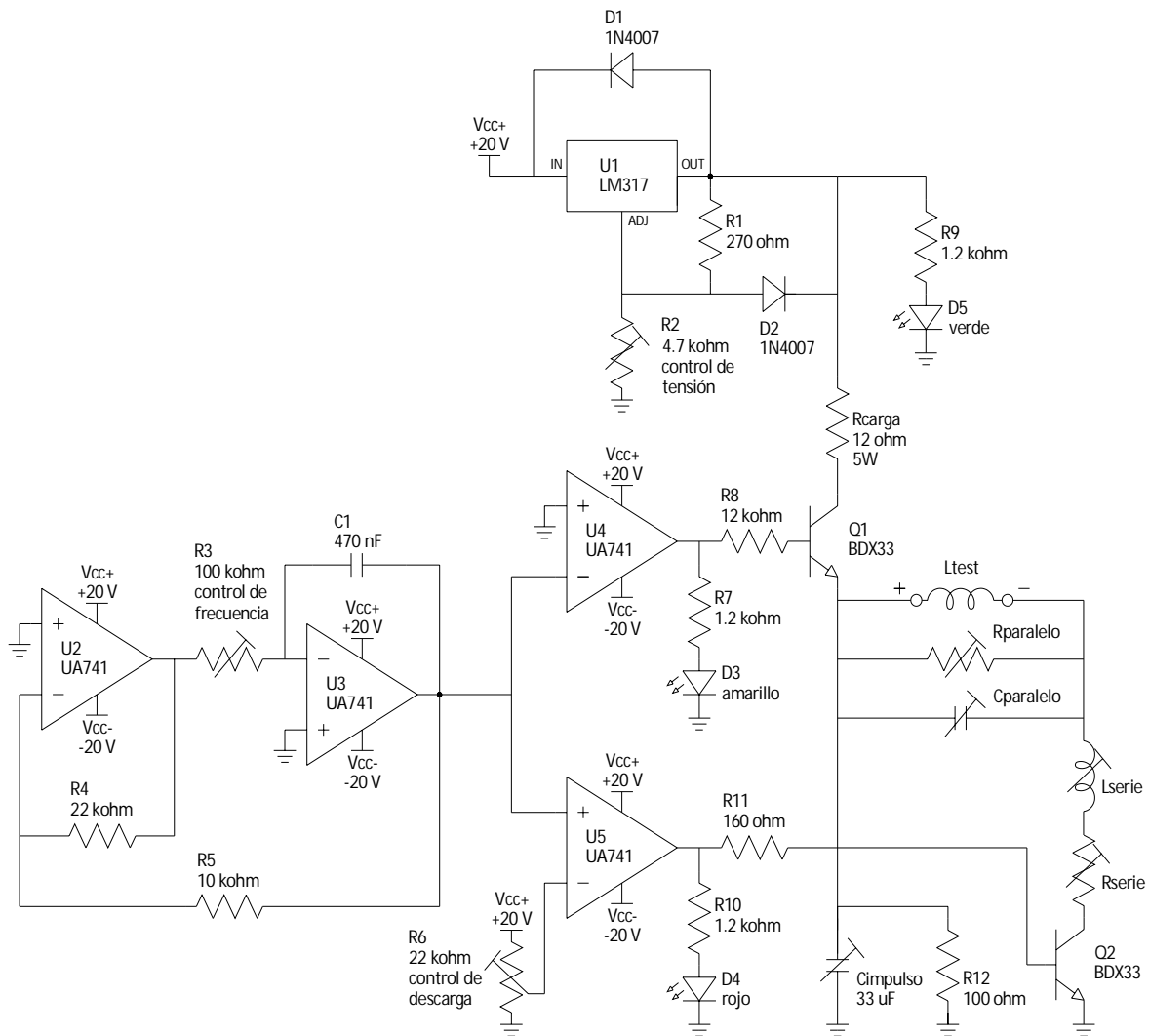


fig. 66 – esquema del generador recurrente de construcción propia

Antes de llegar a la solución definitiva, donde la onda de impulso se genera mediante dos transistores de potencia, se probaron distintas soluciones más simples con relés como interruptores. Pero ninguna llegó a funcionar porque la onda generada no tenía repetibilidad a causa de los rebotes mecánicos. Cada disparo era algo diferente del anterior y, aunque se alimentaba el circuito con tan solo unos 10 V, se medían sobretensiones inversas del orden de 100 V al cortarse la corriente que circulaba por el arrollamiento. Se intentó solucionar este problema empleando un relé con dos circuitos conectados en

paralelo pensando que cuando se cortara la corriente en un circuito el otro seguiría conduciendo, pero el resultado fue similar al caso anterior. También se hicieron pruebas con un interruptor de mercurio con la idea de que un líquido no tendría rebotes, pero el resultado fue igual de malo.

Finalmente se decidió emplear interruptores basados en transistores bipolares, aunque se sabía que su conmutación no iba a ser fácil porque la carga, que es el arrollamiento de BT, tiene una impedancia muy pequeña. Para explicar el funcionamiento del circuito que se ha montado, es útil dividirlo en tres etapas: la de carga, la de descarga y la de control.

- La etapa de carga está formada por la fuente de alimentación U1, que carga a 12 V el condensador Cimpulso cuando el transistor Q1 conduce.
- La de descarga incluye el transistor Q2 que hace que el condensador Cimpulso se descargue a través del arrollamiento que se quiere ensayar. Se han incluido varios elementos RLC para ajustar la forma de onda en función de la impedancia del arrollamiento que se conecte.
- La etapa de control tiene cuatro amplificadores operacionales: U2 y U3 forman un generador de onda en diente de sierra simétrica y U4 y U5 se emplean como comparadores. Durante el semiciclo negativo de la onda en diente de sierra U4 satura Q1 que carga el condensador Cimpulso; y cuando esta onda es positiva y supera la tensión de comparación de U5 es Q2 el que descarga el condensador a través del arrollamiento. Entre el corte de Q1 y el disparo de Q2 hay un tiempo muerto regulable con R6 que evita que ambos conduzcan a la vez.

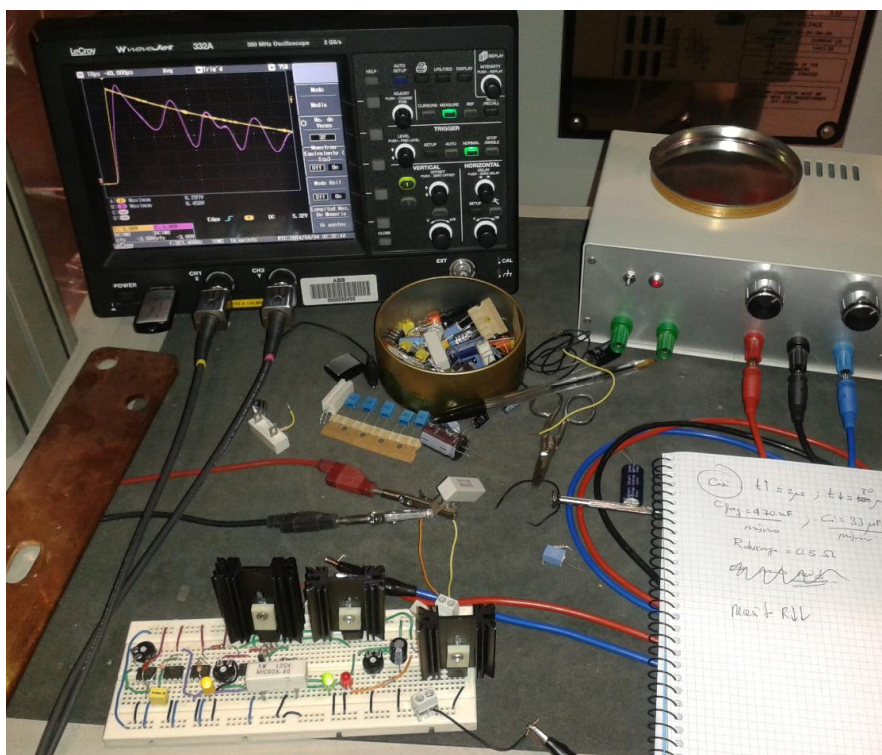


fig. 67 – medida con el generador recurrente de construcción propia

## ANEXO 6. FORMAS DE ONDA SIMULADAS Y MEDIDAS EN EL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION

### A6.1. Tensiones a tierra

A continuación se incluyen las gráficas nodo a nodo, su numeración coincide con la fig. 16 en pag. 20.

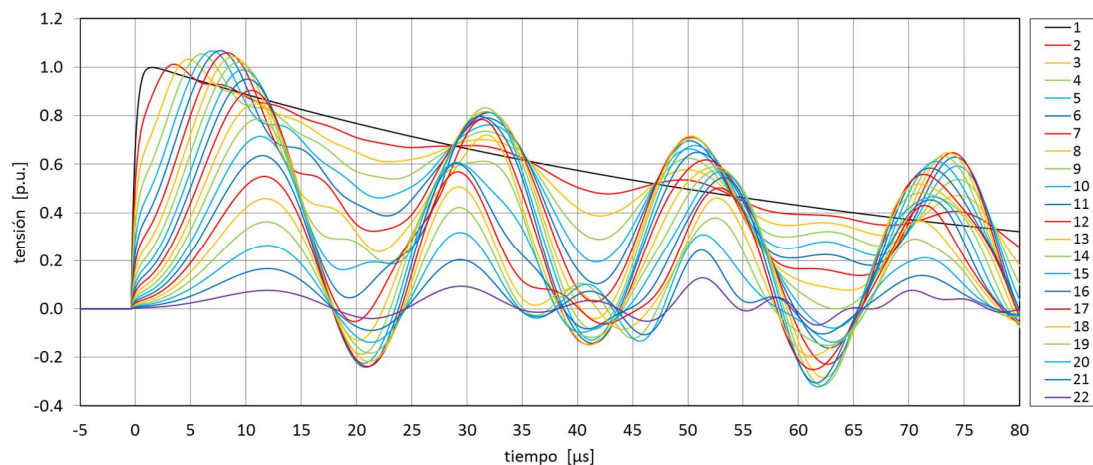


fig. 68 – tensiones a tierra simuladas

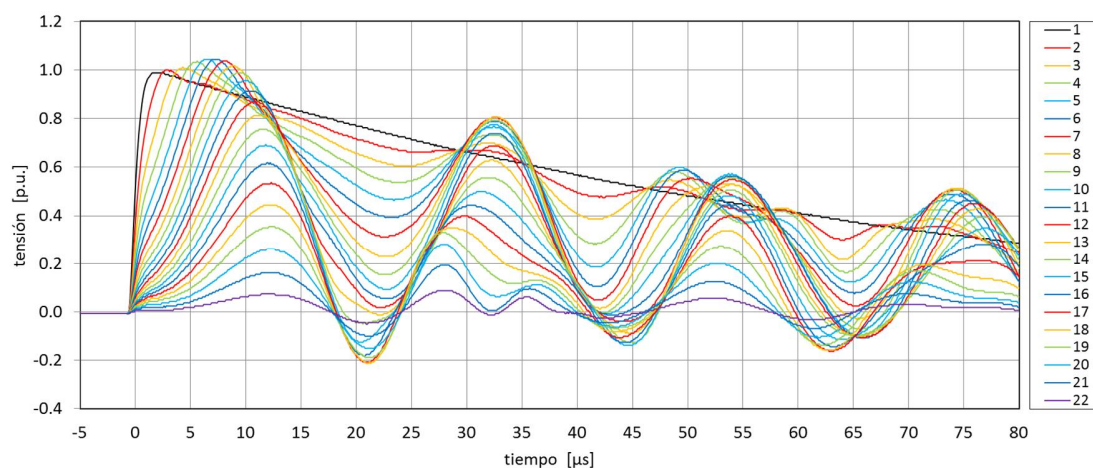


fig. 69 – tensiones a tierra medidas

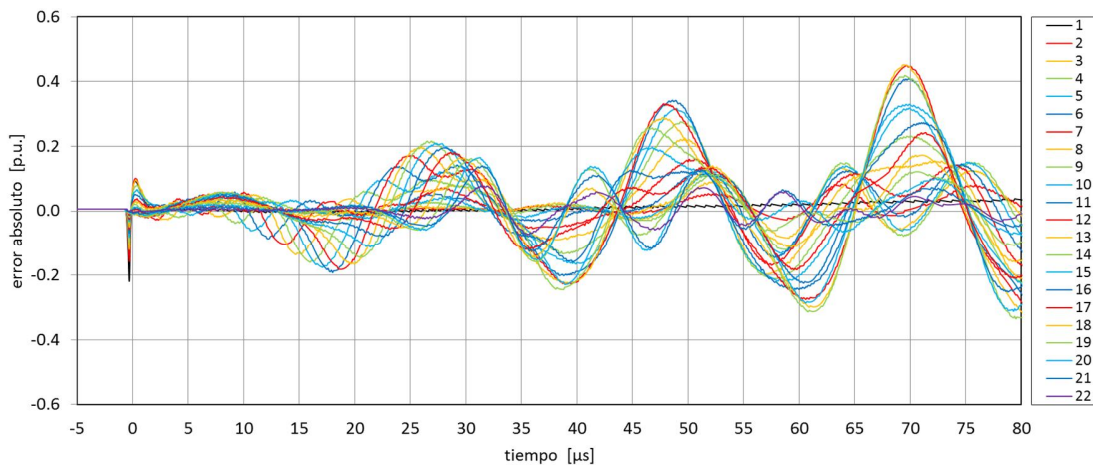


fig. 70 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra

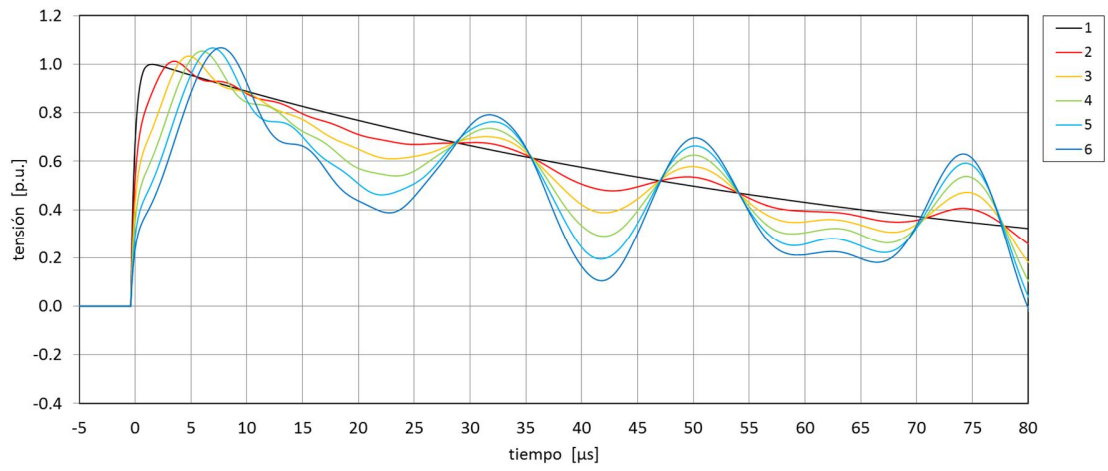


fig. 71 – tensiones a tierra simuladas (discos 1 a 6)

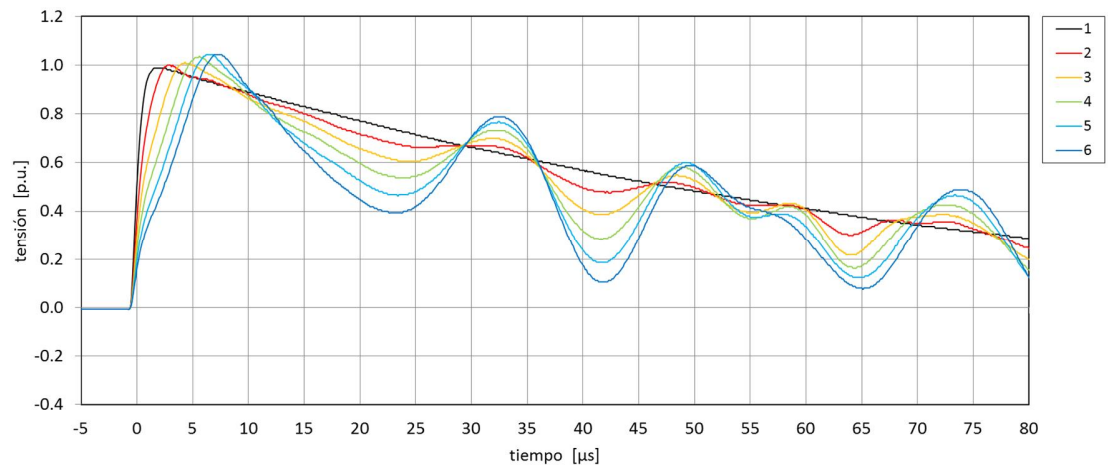


fig. 72 – tensiones a tierra medidas (discos 1 a 6)

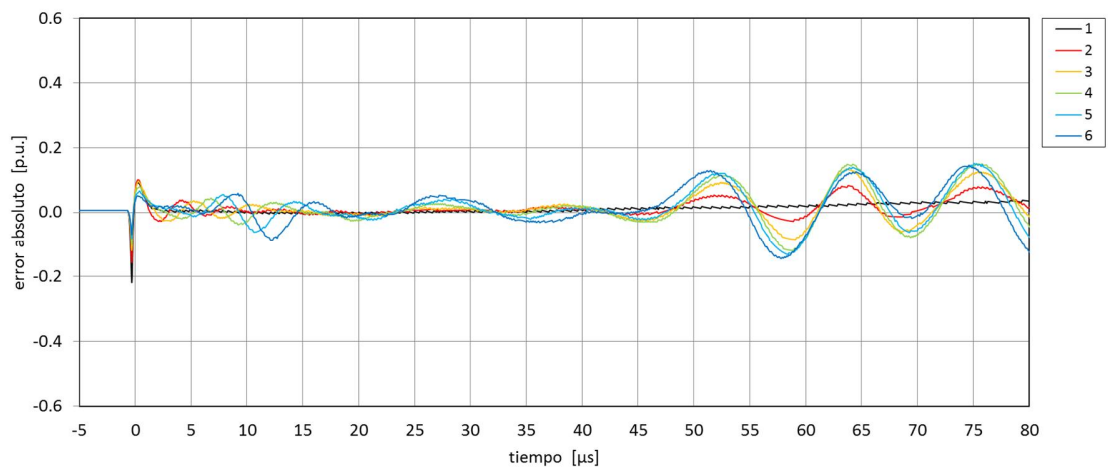


fig. 73 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (discos 1 a 6)



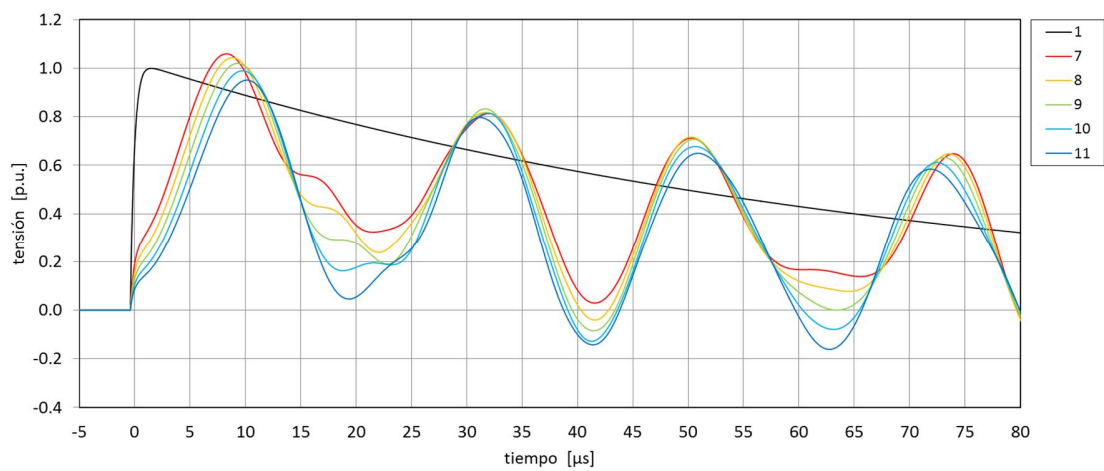


fig. 74 – tensiones a tierra simuladas (discos 7 a 11)

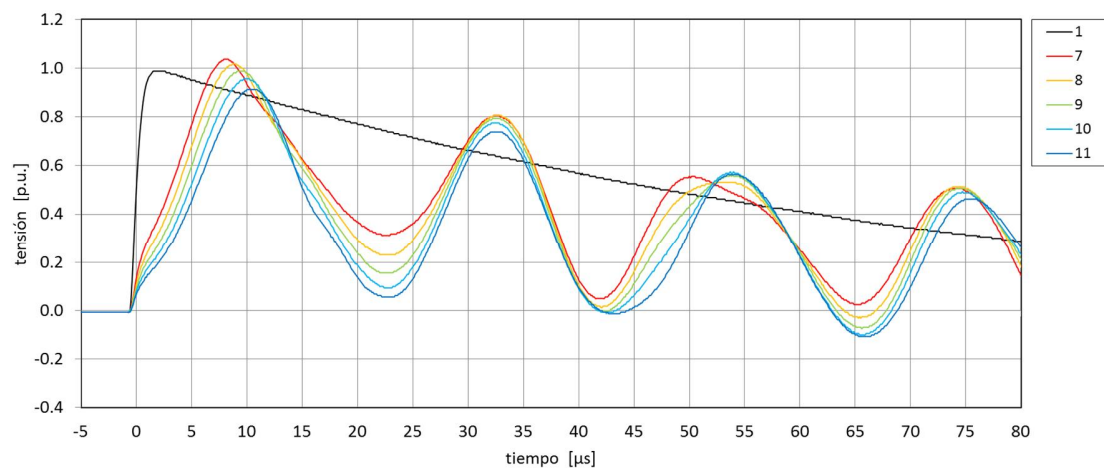


fig. 75 – tensiones a tierra medidas (discos 7 a 11)

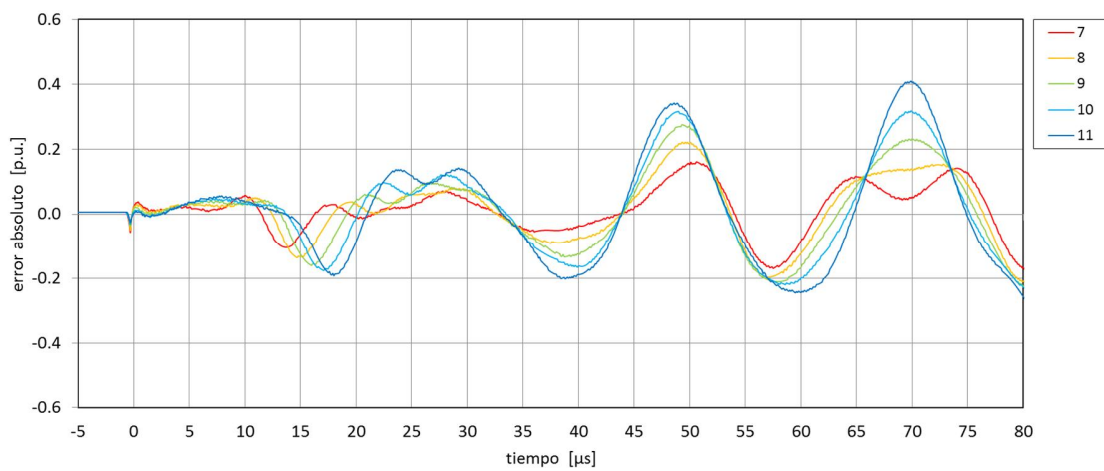


fig. 76 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (discos 7 a 11)

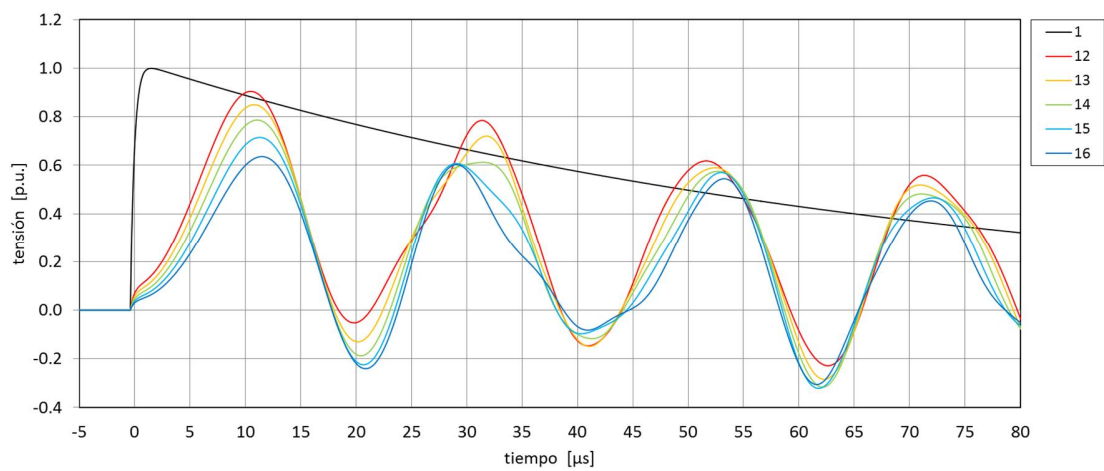


fig. 77 – tensiones a tierra simuladas (discos 12 a 16)

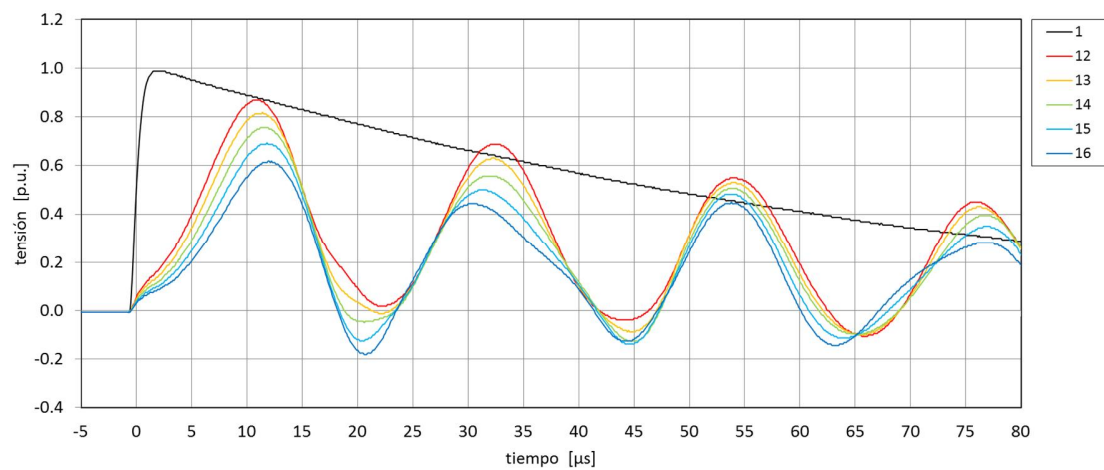


fig. 78 – tensiones a tierra medidas (discos 12 a 16)

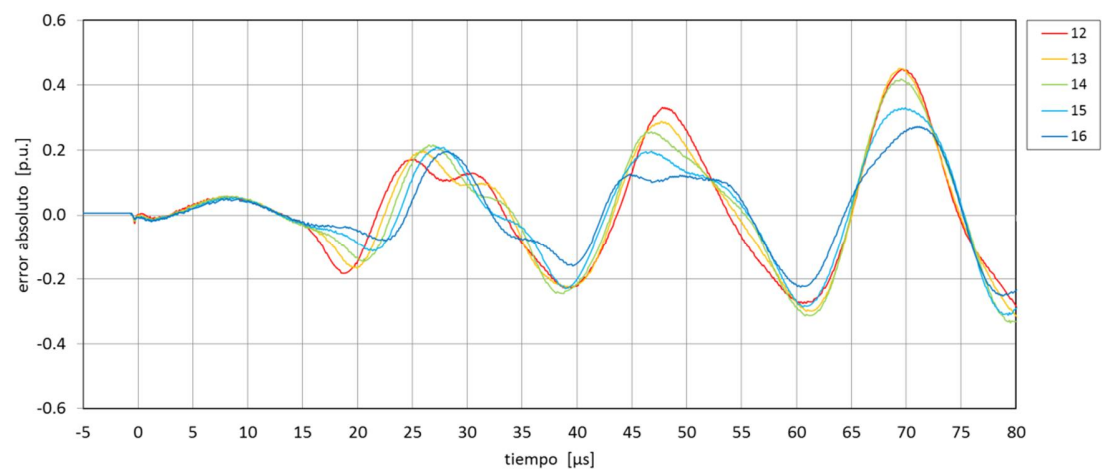


fig. 79 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (discos 7 a 11)



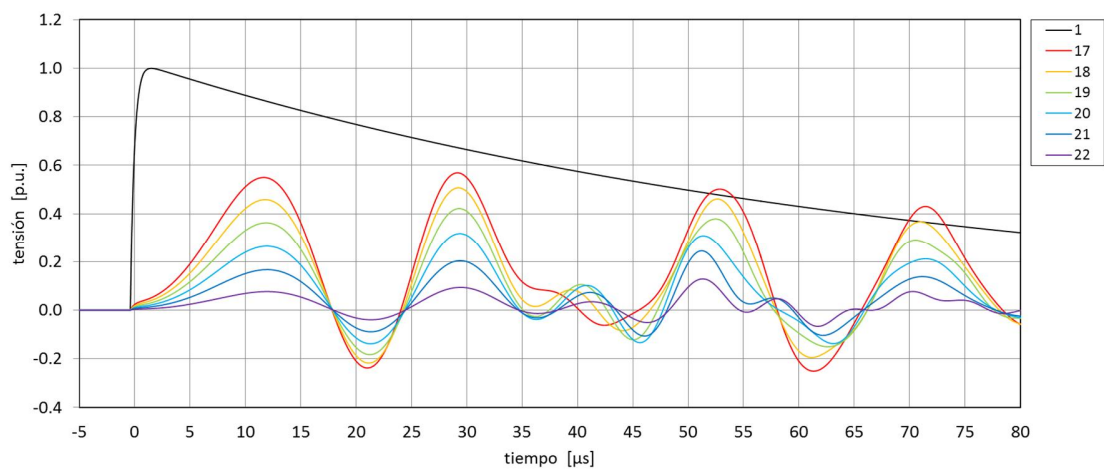


fig. 80 – tensiones a tierra simuladas (discos 17 a 22)

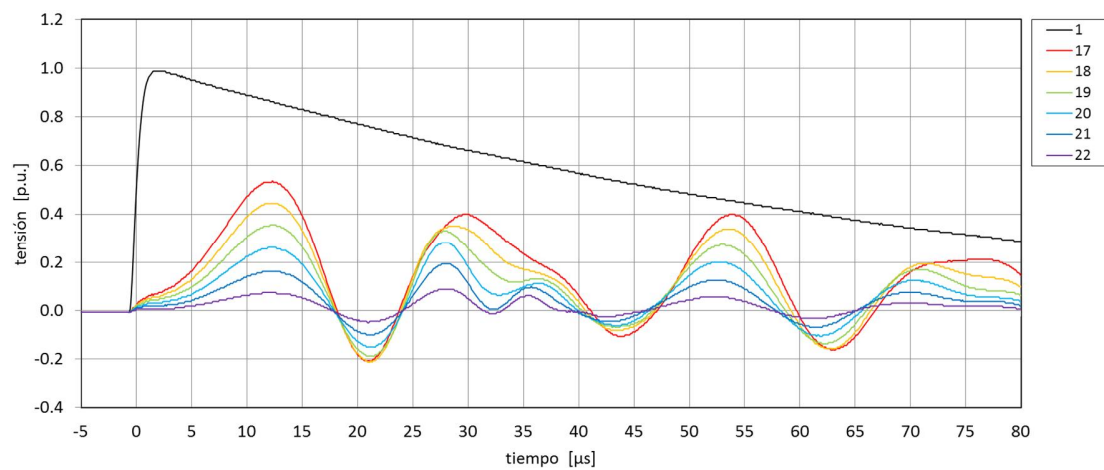


fig. 81 – tensiones a tierra medidas (discos 17 a 22)

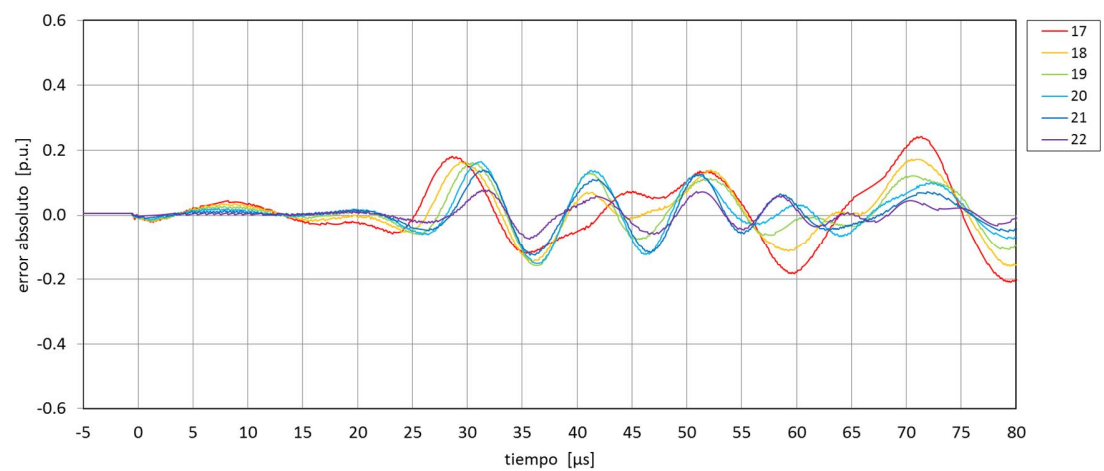


fig. 82 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (discos 17 a 22)

## A6.2. Tensiones entre discos

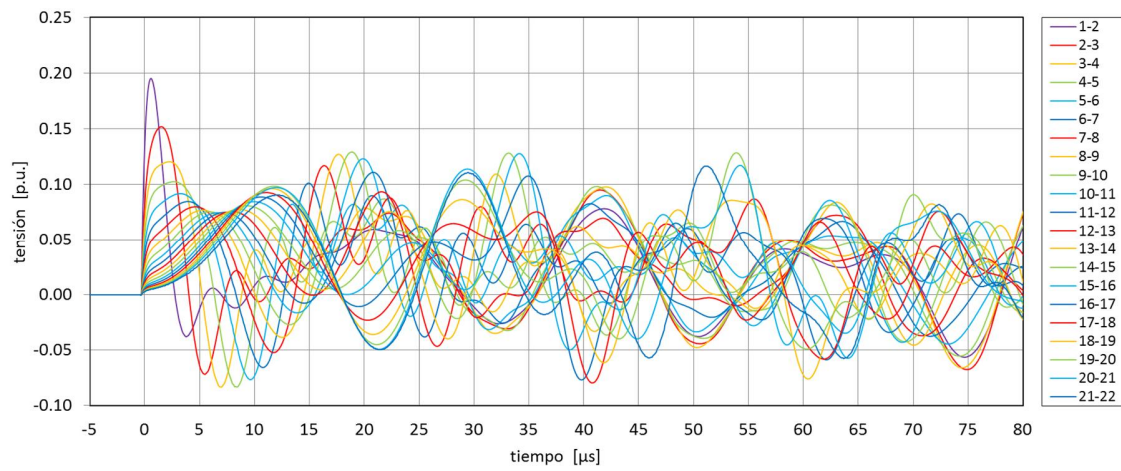


fig. 83 – tensiones entre discos simuladas

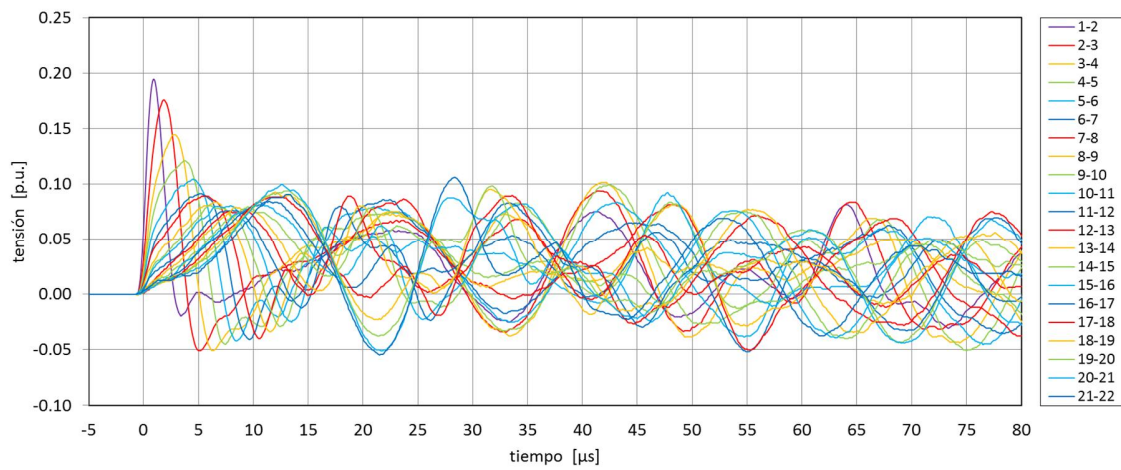


fig. 84 – tensiones entre discos medidas

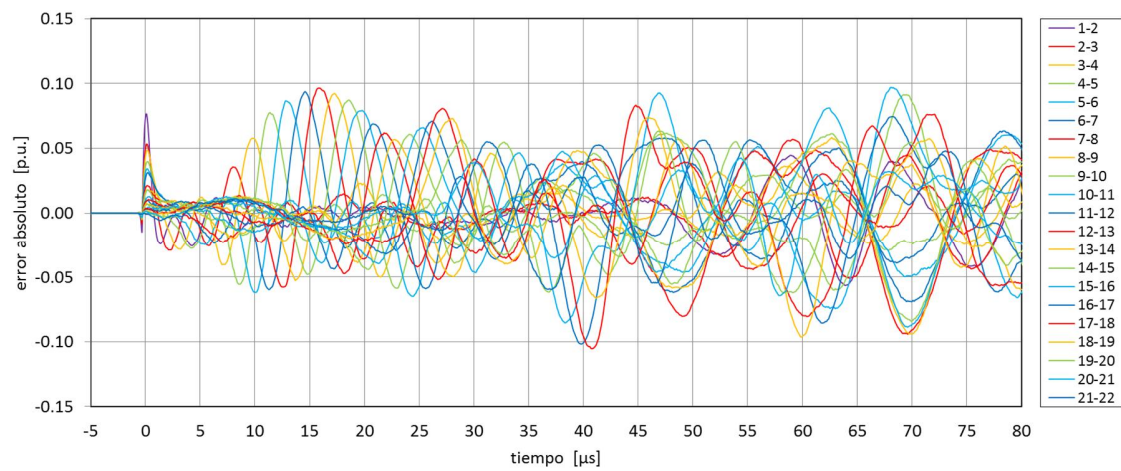


fig. 85 – error absoluto cometido en las tensiones entre discos

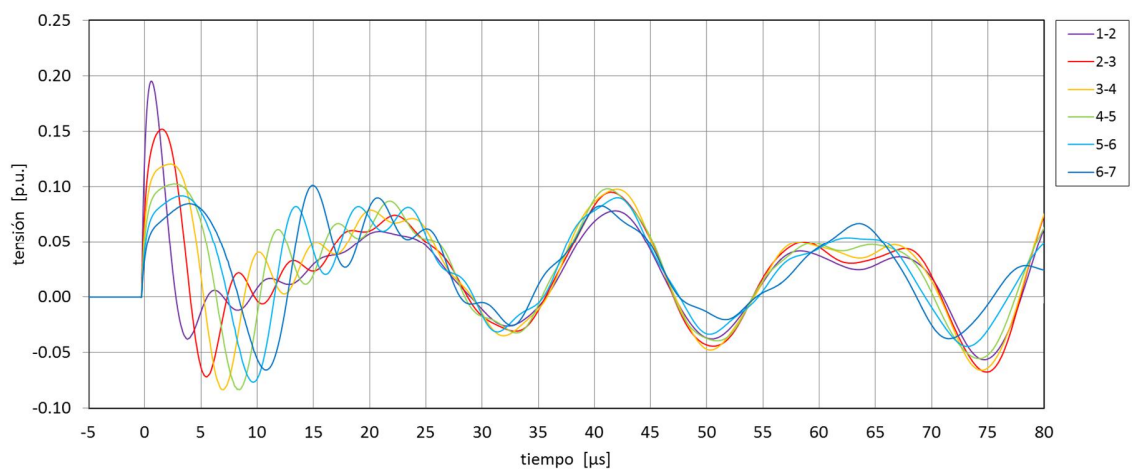


fig. 86 – tensiones entre discos simuladas (discos 1 a 7)

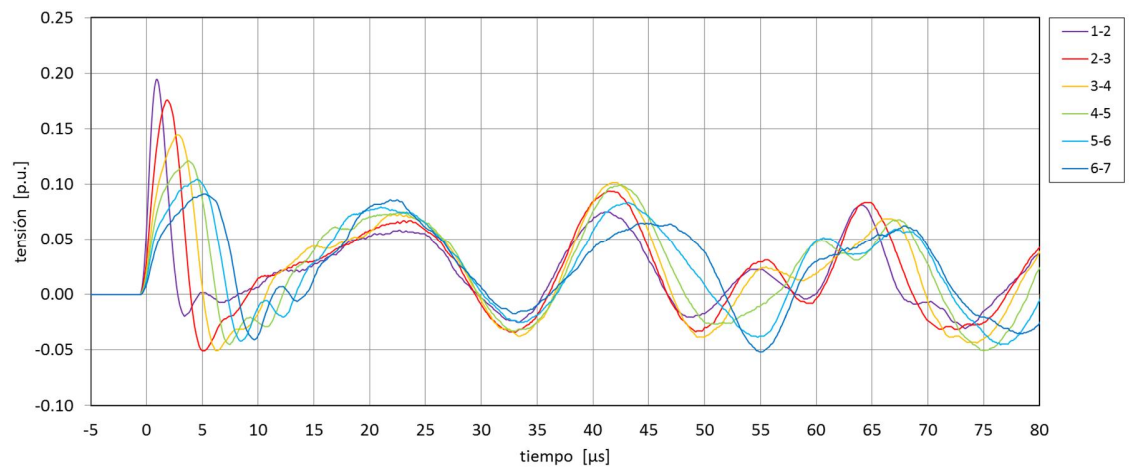


fig. 87 – tensiones entre discos medidas (discos 1 a 7)

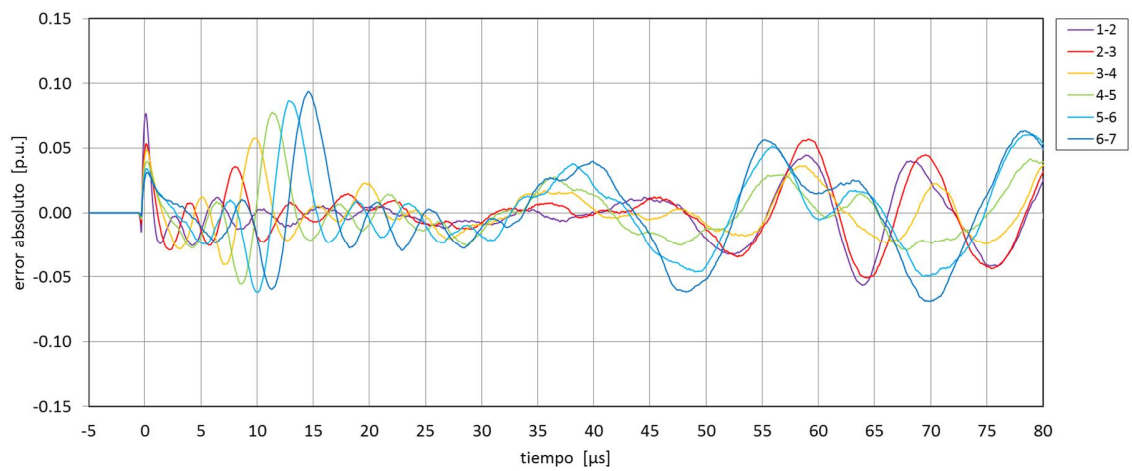


fig. 88 – error absoluto cometido en las tensiones entre discos (discos 1 a 7)

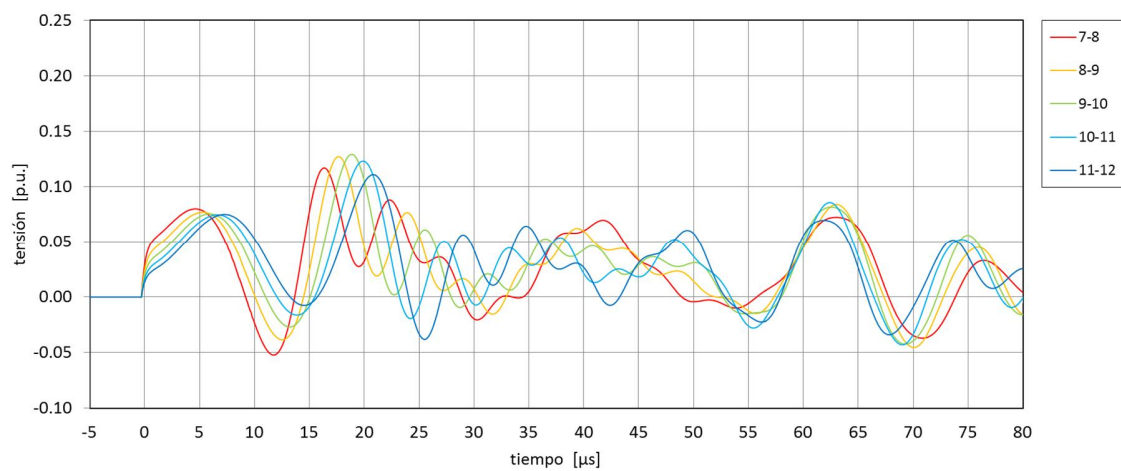


fig. 89 – tensiones entre discos simuladas (discos 7 a 12)

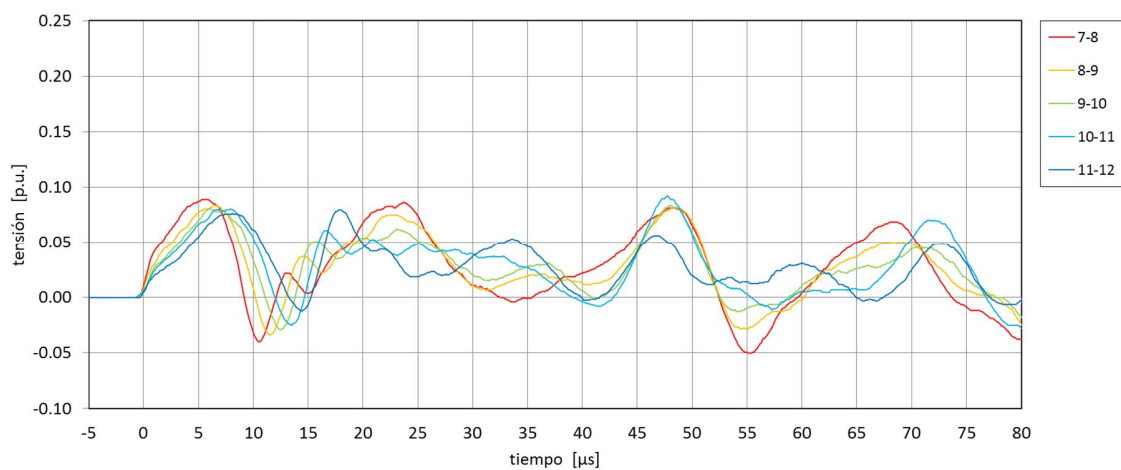


fig. 90 – tensiones entre discos medidas (discos 7 a 12)

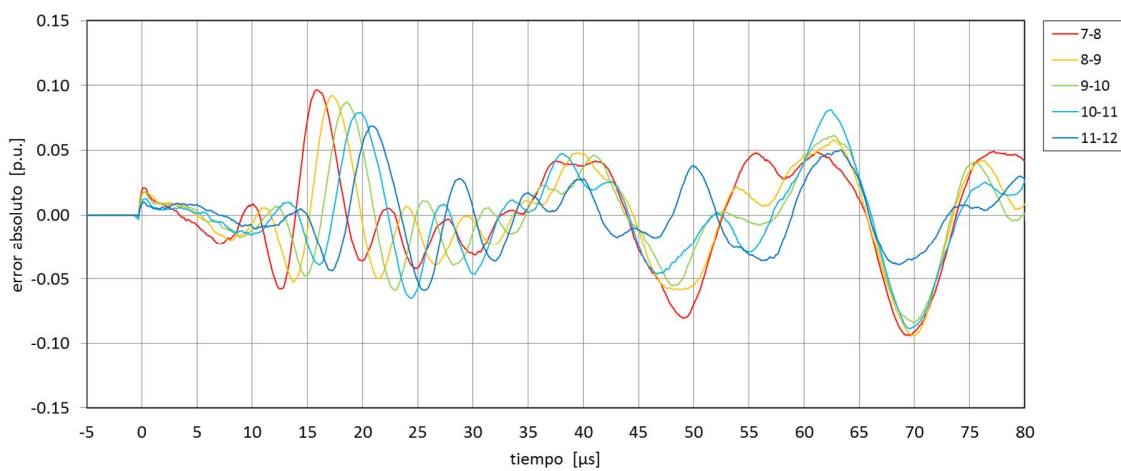


fig. 91 – error absoluto cometido en las tensiones entre discos (discos 7 a 12)

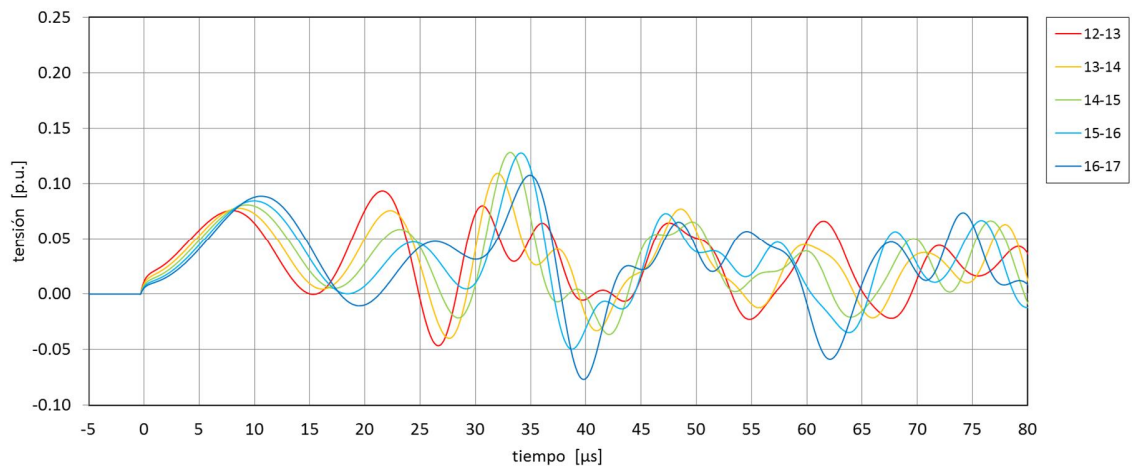


fig. 92 – tensiones entre discos simuladas (discos 12 a 17)

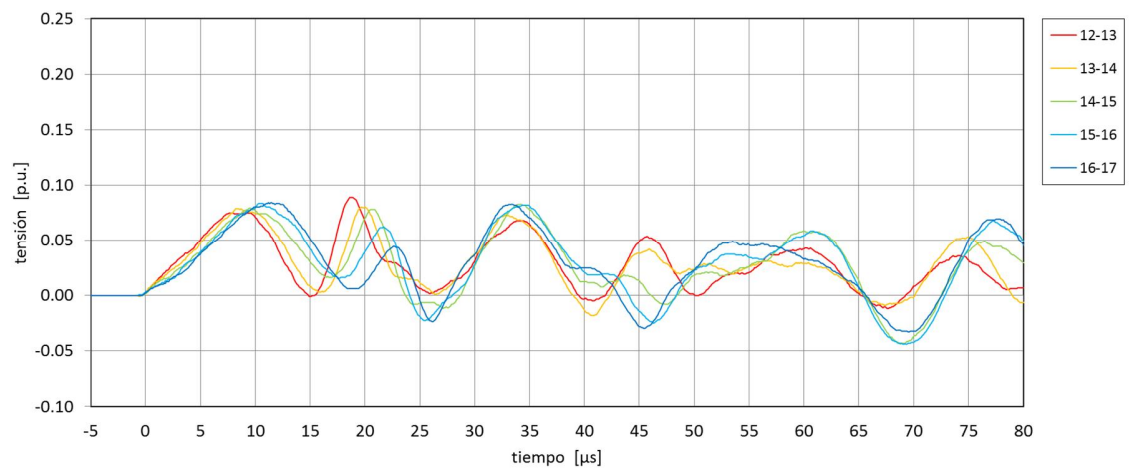


fig. 93 – tensiones entre discos medidas (discos 12 a 17)

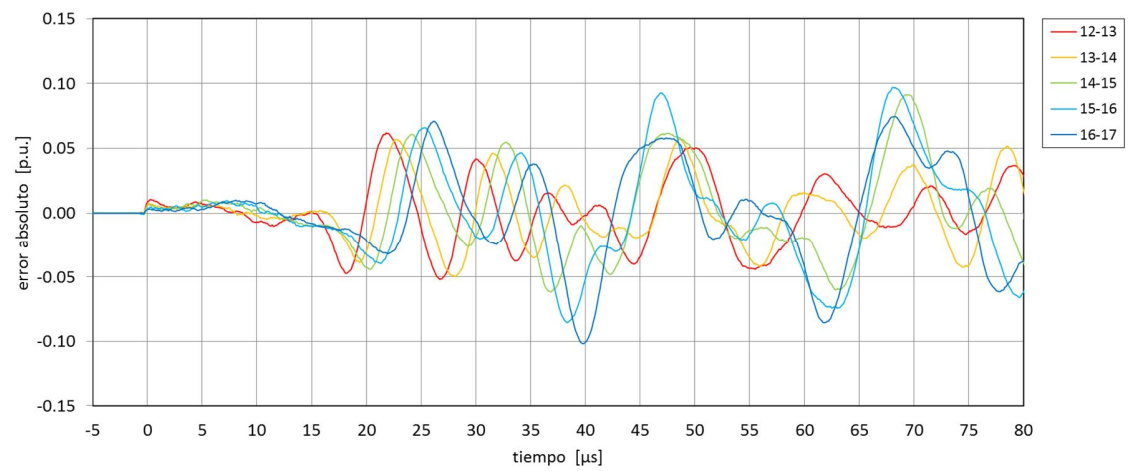


fig. 94 – error absoluto cometido en las tensiones entre discos (discos 12 a 17)



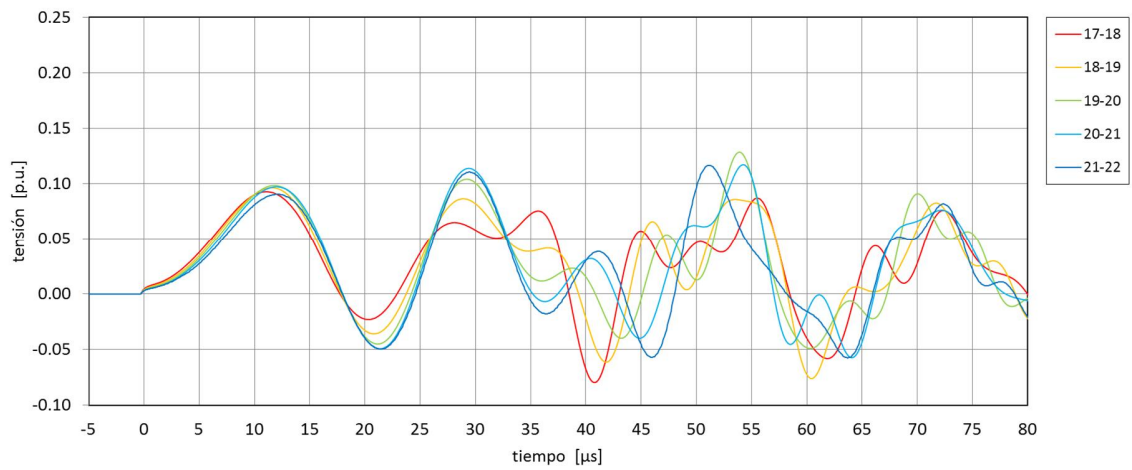


fig. 95 – tensiones entre discos simuladas (discos 17 a 22)

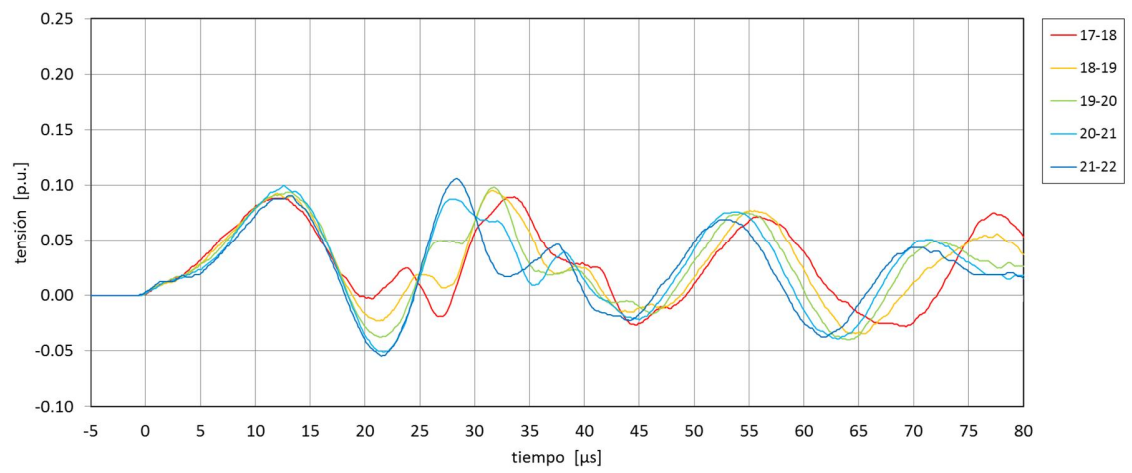


fig. 96 – tensiones entre discos medidas (discos 17 a 22)

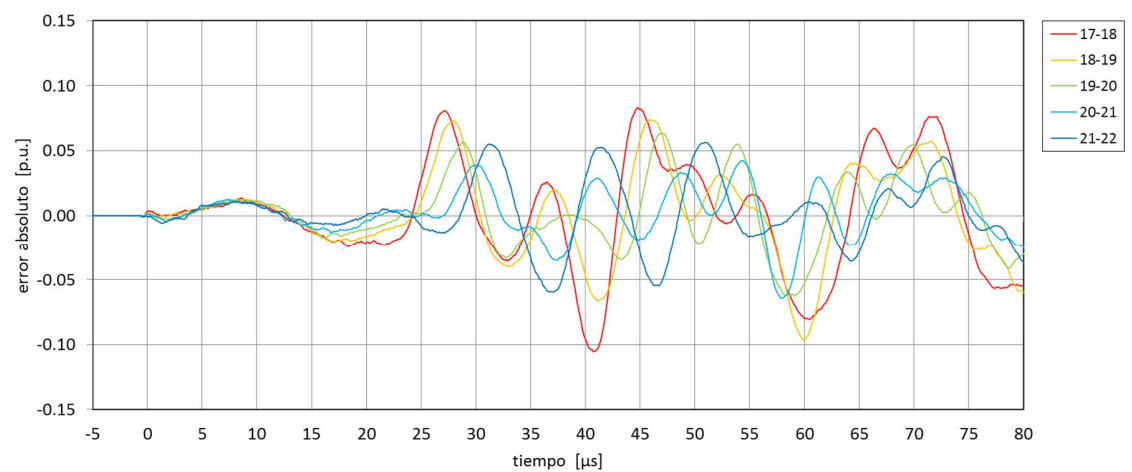


fig. 97 – error absoluto cometido en las tensiones entre discos (discos 17 a 22)

## ANEXO 7. FORMAS DE ONDA SIMULADAS Y MEDIDAS EN EL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION

### A7.1. Tensiones a tierra

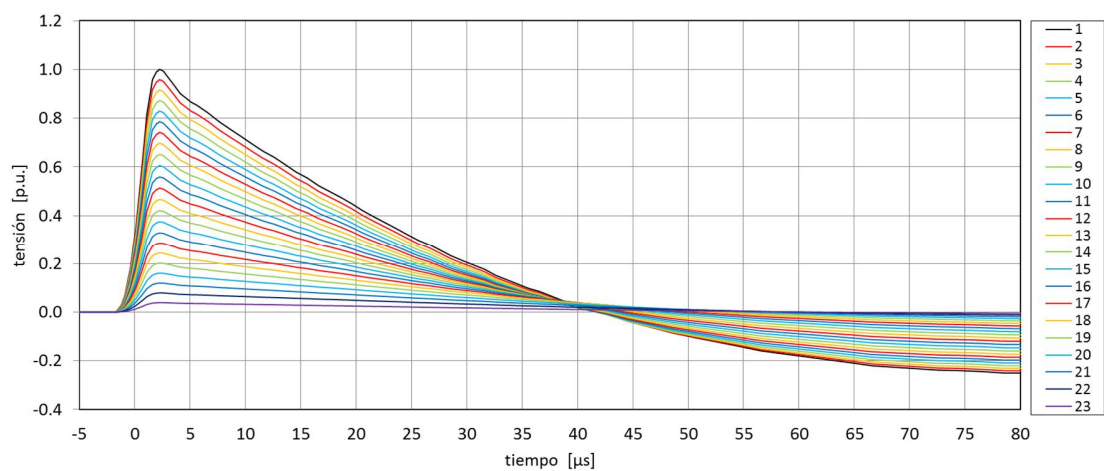


fig. 98 – tensiones a tierra simuladas

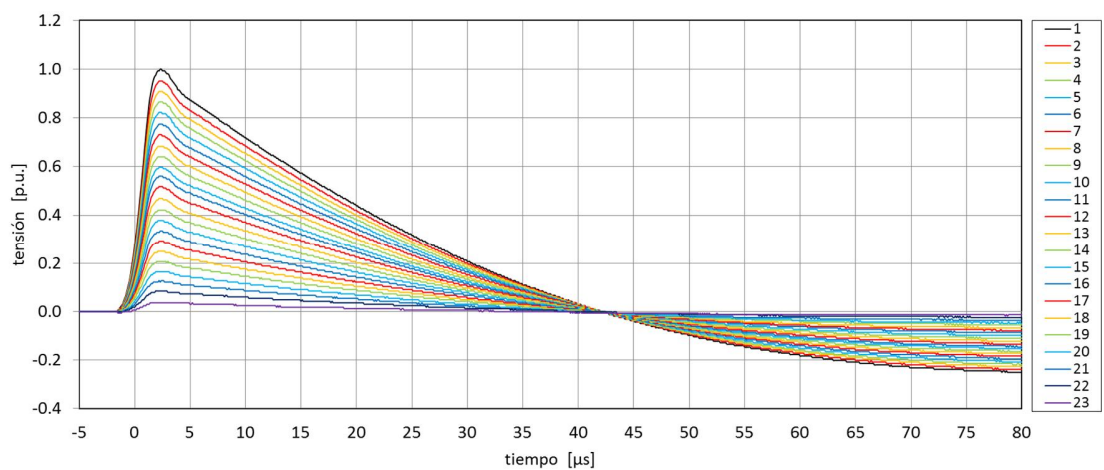


fig. 99 – tensiones a tierra medidas

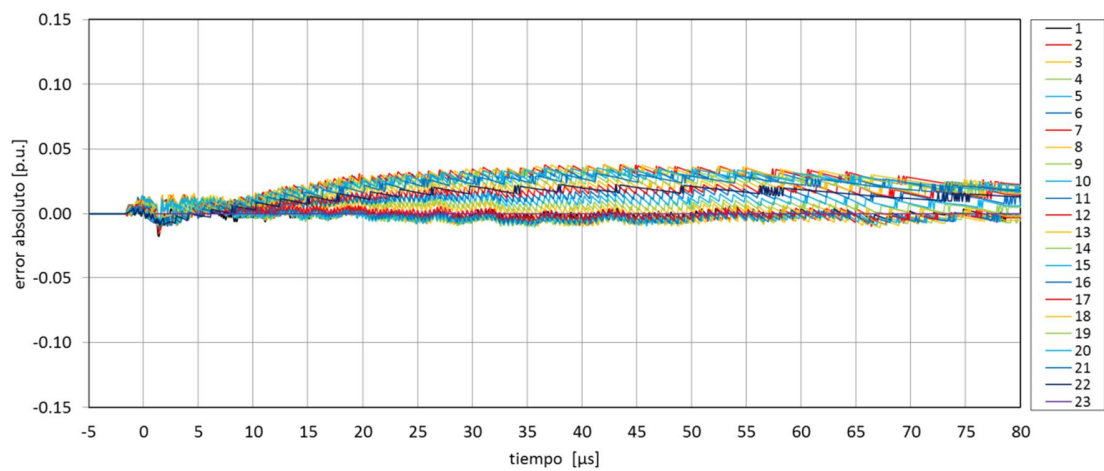


fig. 100 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra

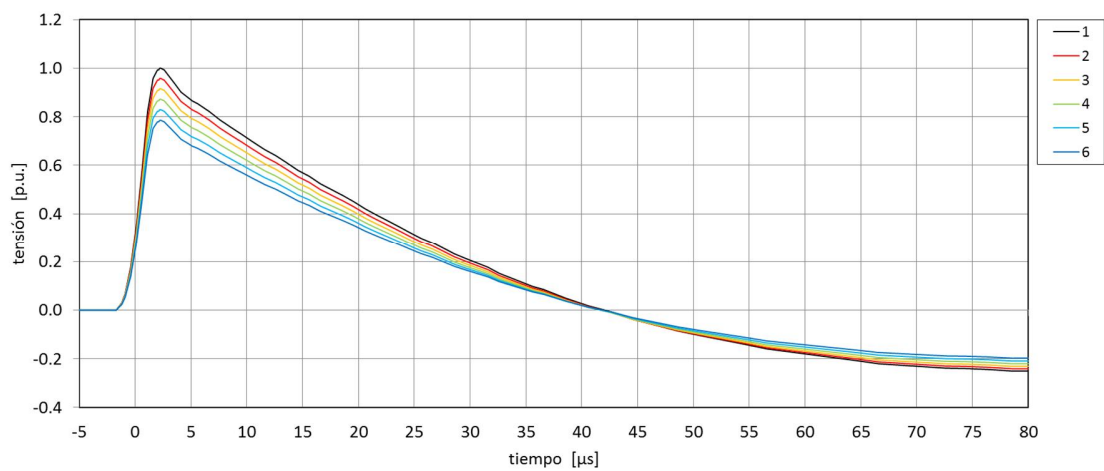


fig. 101 – tensiones a tierra simuladas (espiras 1 a 6)

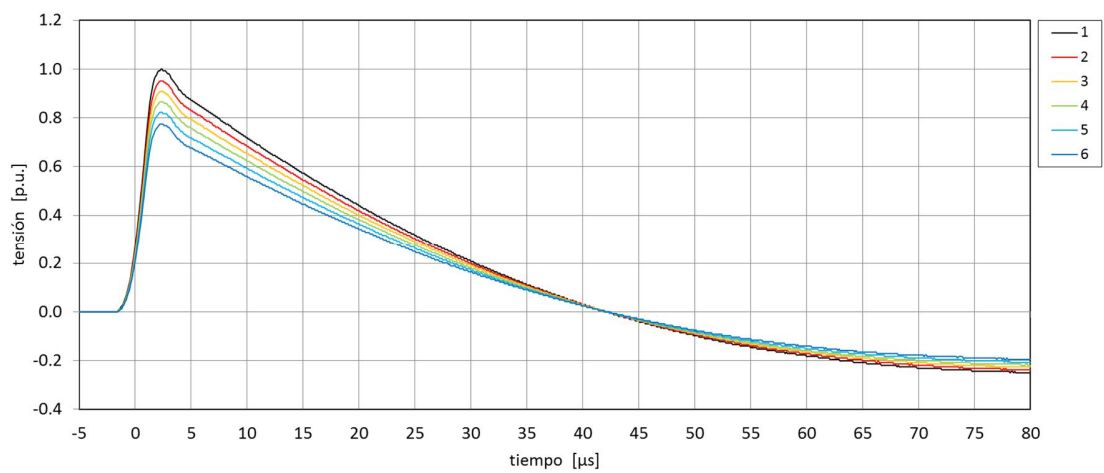


fig. 102 – tensiones a tierra medidas (espiras 1 a 6)

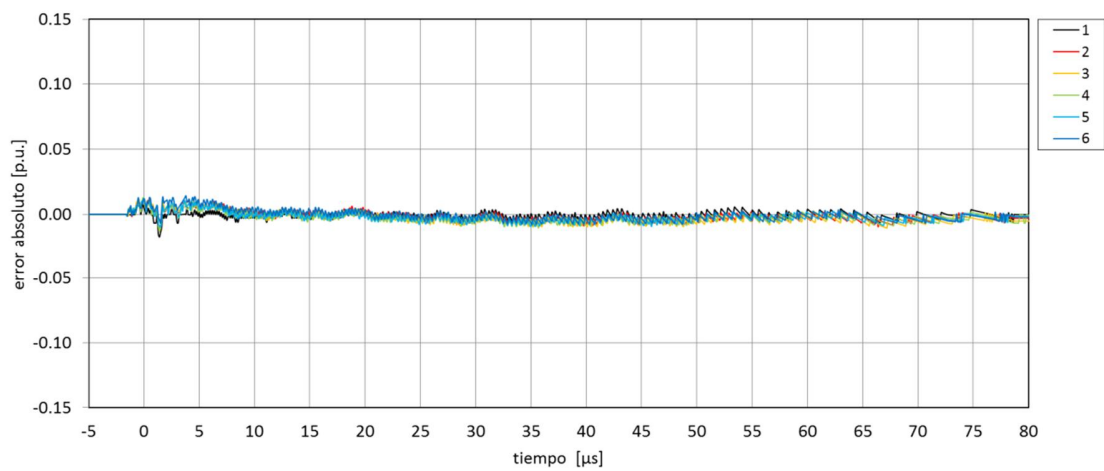


fig. 103 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (espiras 1 a 6)



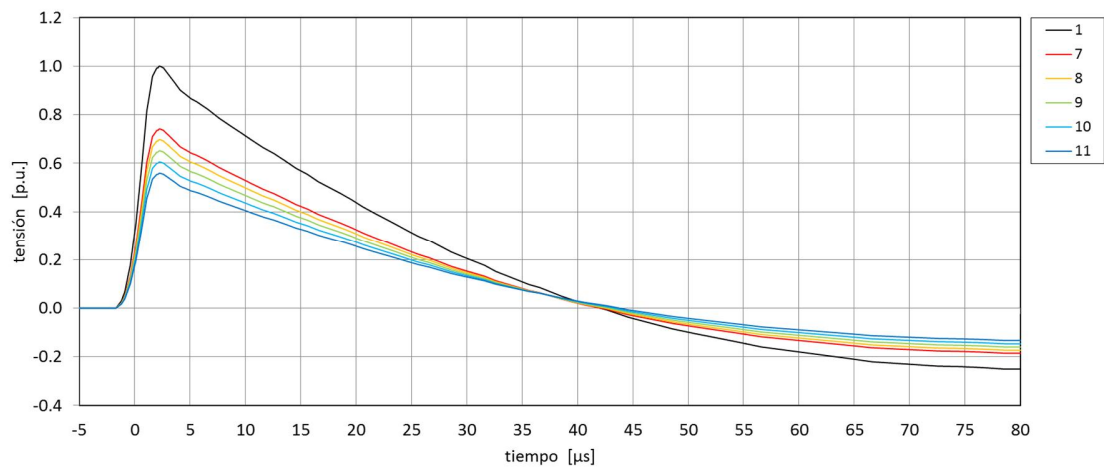


fig. 104 – tensiones a tierra simuladas (espiras 7 a 11)

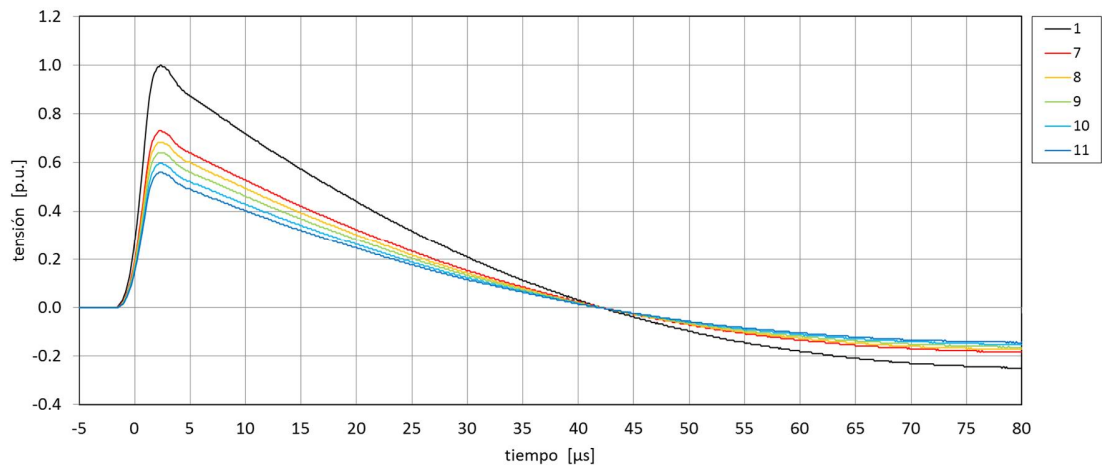


fig. 105 – tensiones a tierra medidas (espiras 7 a 11)

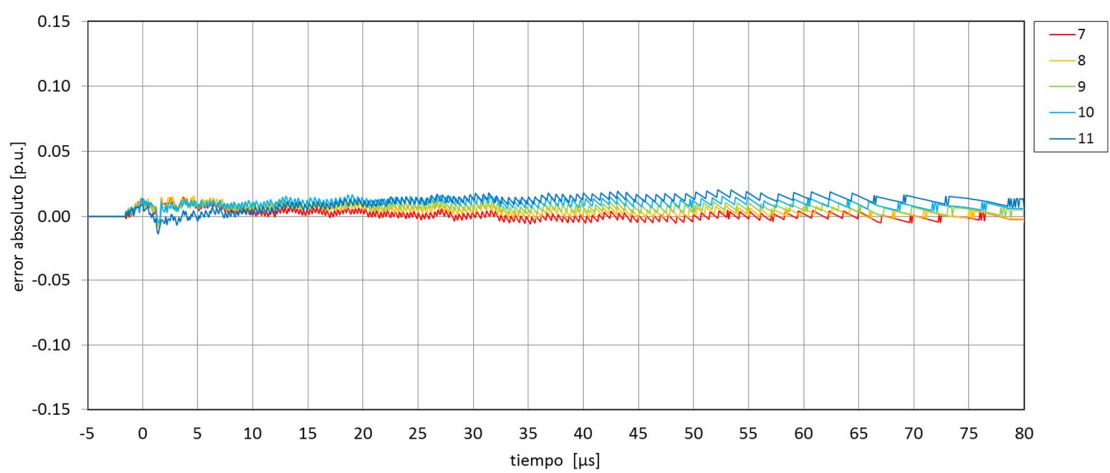


fig. 106 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (espiras 7 a 11)

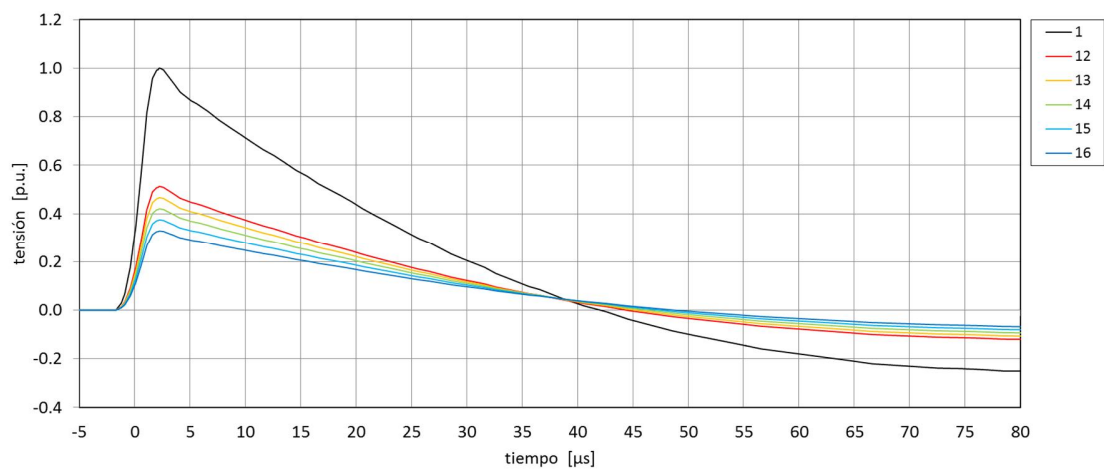


fig. 107 – tensiones a tierra simuladas (espiras 12 a 16)

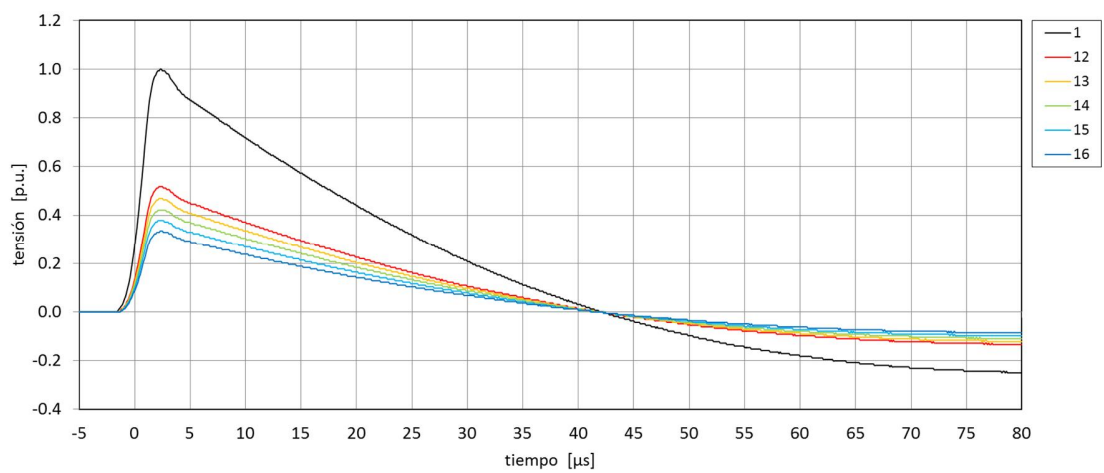


fig. 108 – tensiones a tierra medidas (espiras 12 a 16)

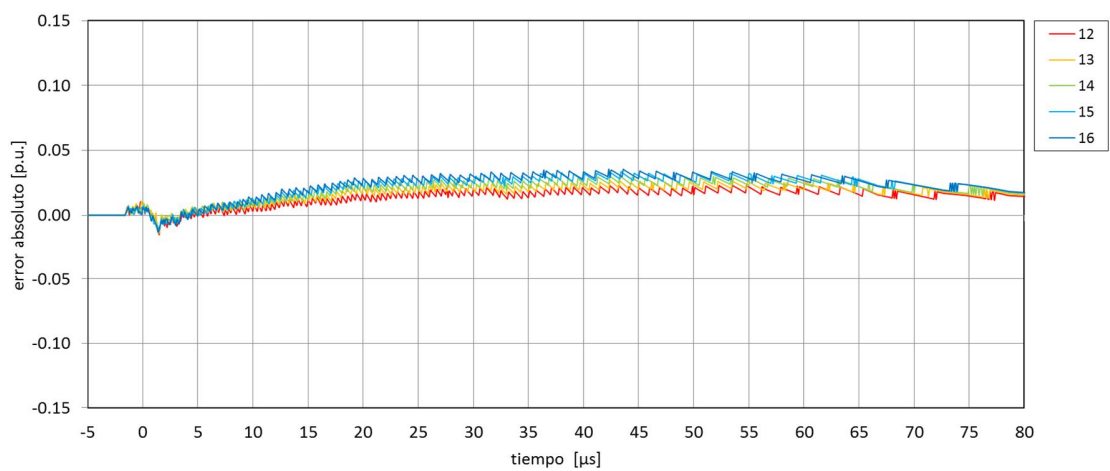


fig. 109 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (espiras 12 a 16)

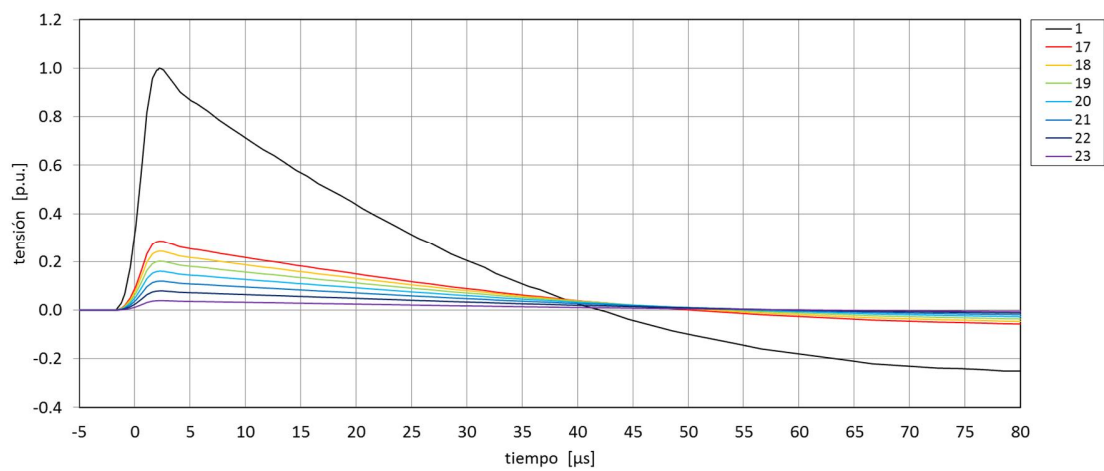


fig. 110 – tensiones a tierra simuladas (espiras 17 a 23)

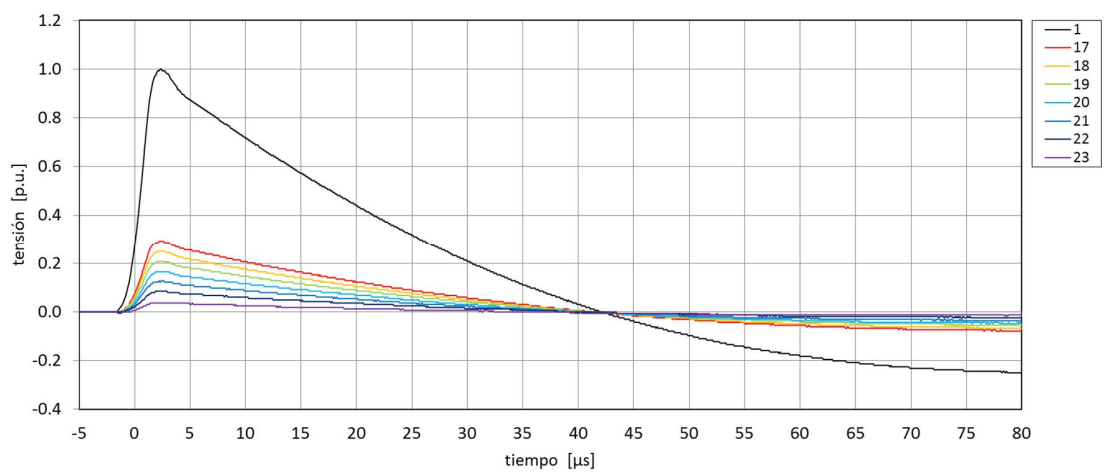


fig. 111 – tensiones a tierra medidas (espiras 17 a 23)

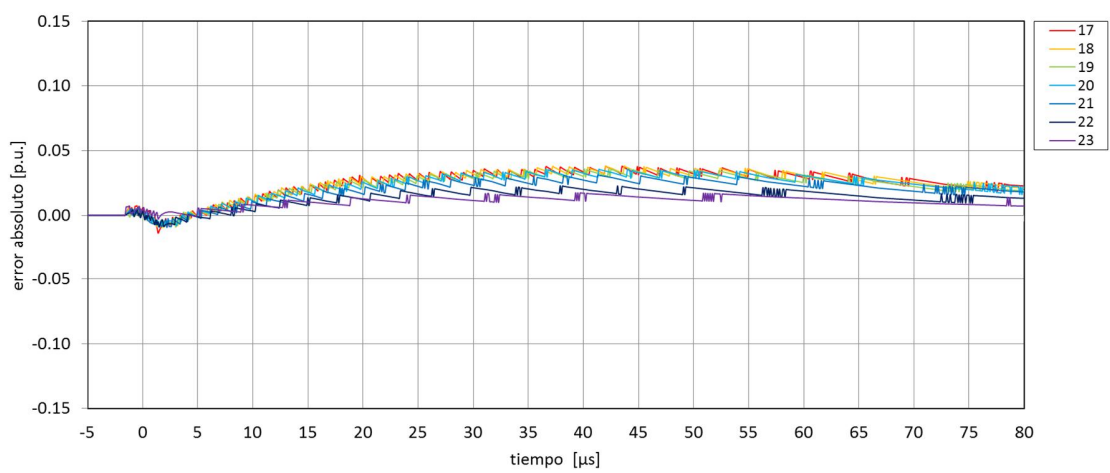


fig. 112 – error absoluto cometido en las tensiones a tierra (espiras 17 a 23)

## A7.2. Tensiones entre espiras

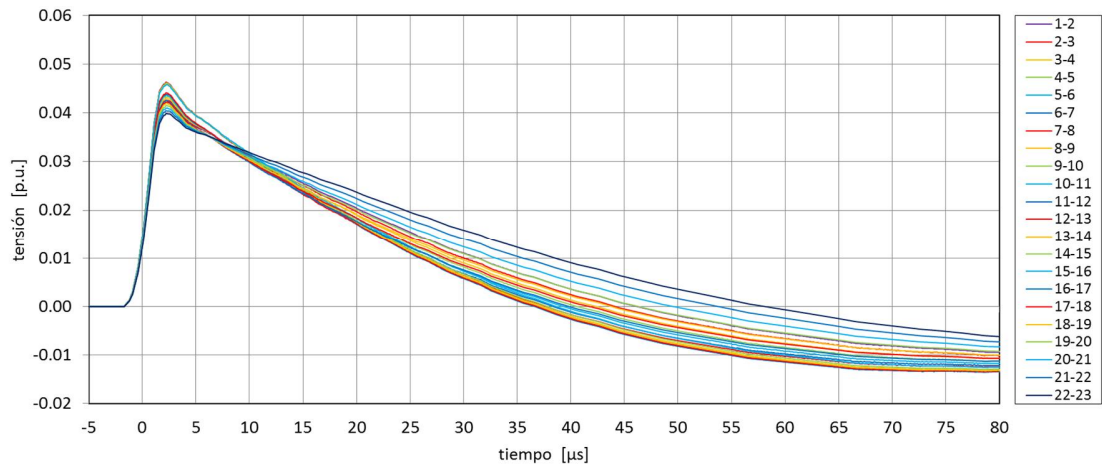


fig. 113 – tensiones entre espiras simuladas

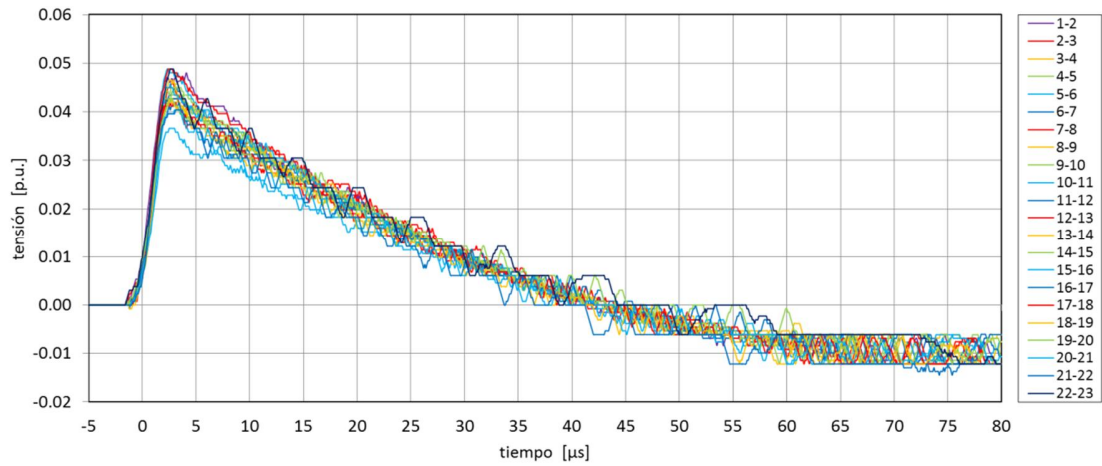


fig. 114 – tensiones entre espiras medidas

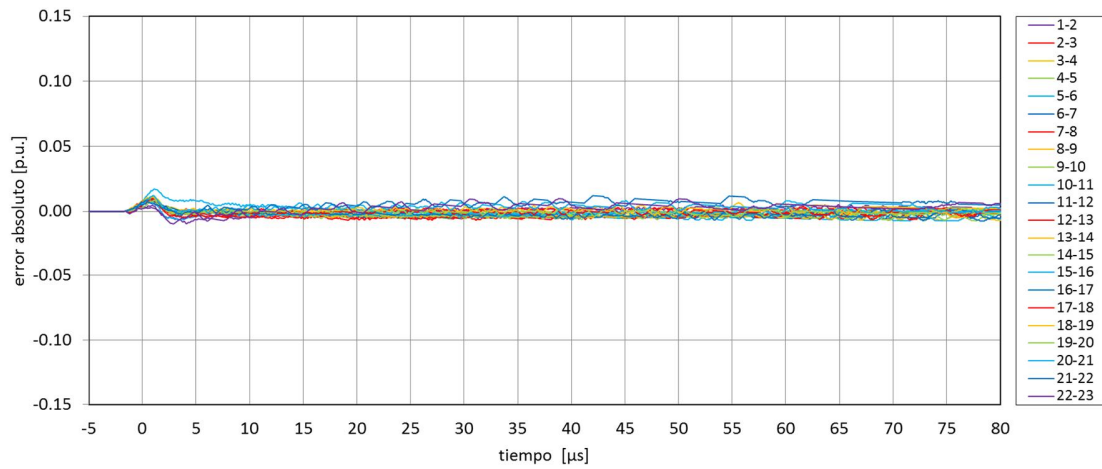


fig. 115 – error absoluto cometido en las tensiones entre espiras

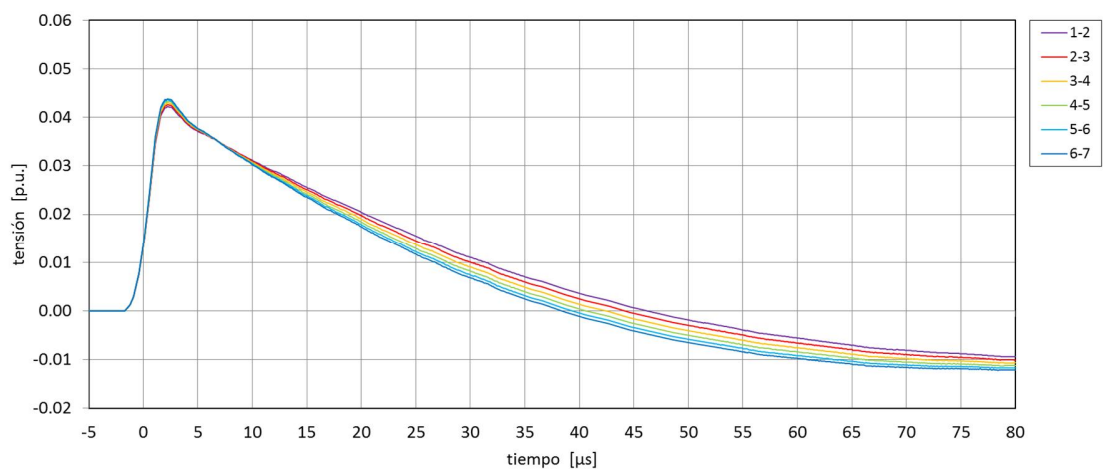


fig. 116 – tensiones entre espiras simuladas (espiras 1 a 7)

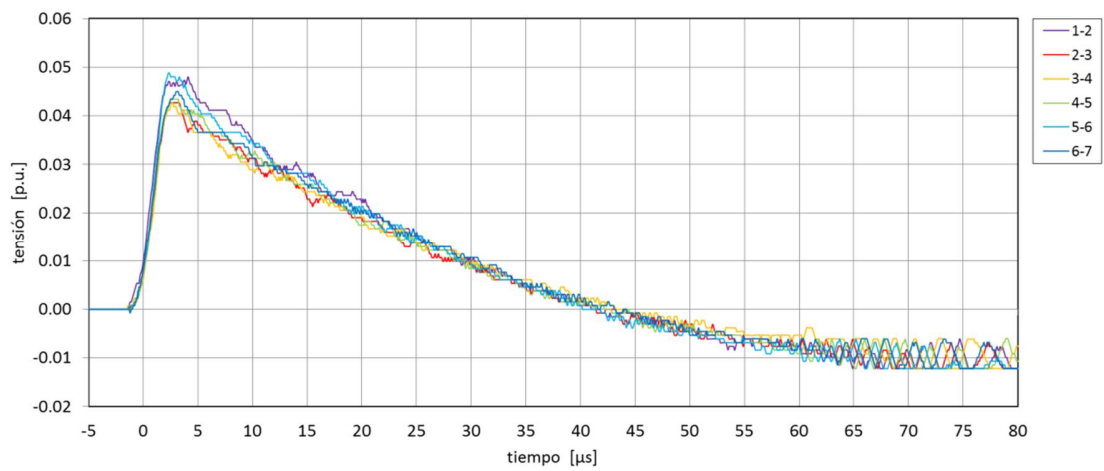


fig. 117 – tensiones entre espiras medidas (espiras 1 a 7)

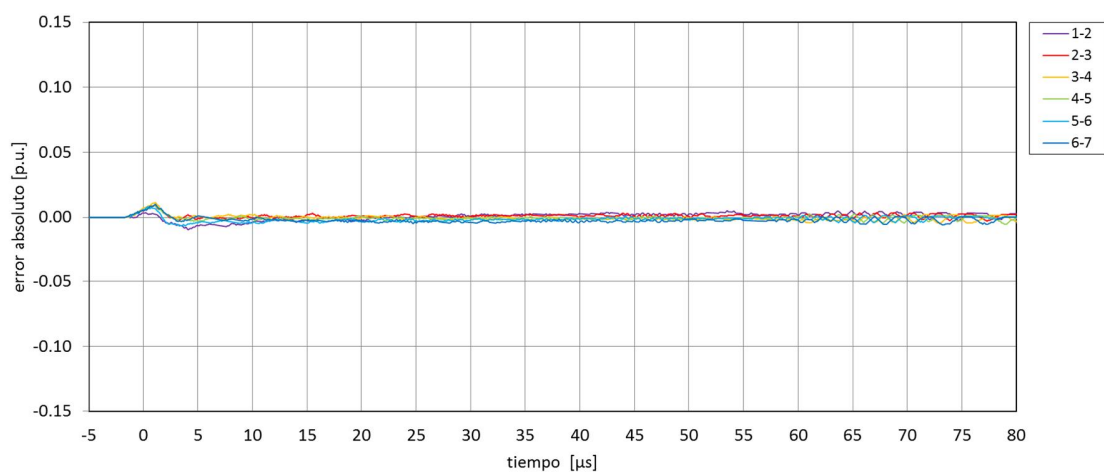


fig. 118 – error absoluto cometido en las tensiones entre espiras (espiras 1 a 7)

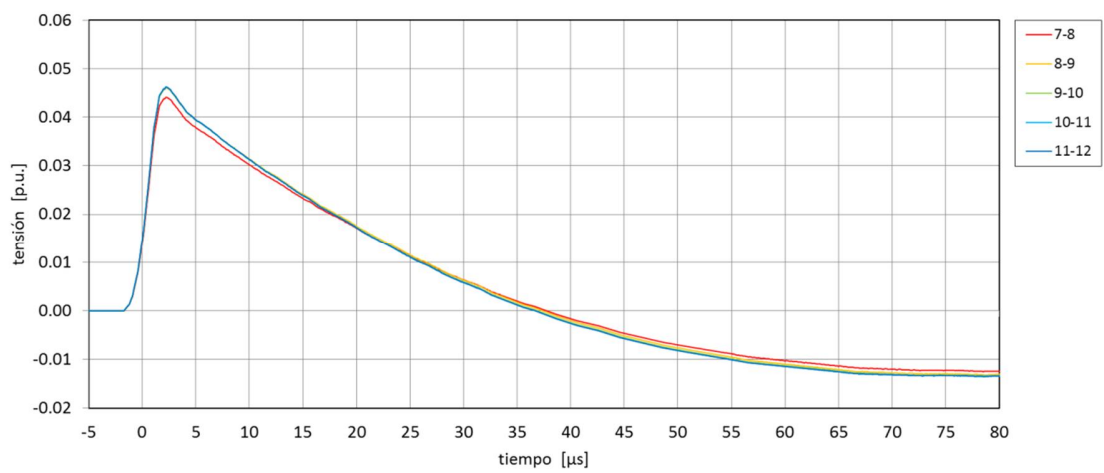


fig. 119 – tensiones entre espiras simuladas (espiras 7 a 12)

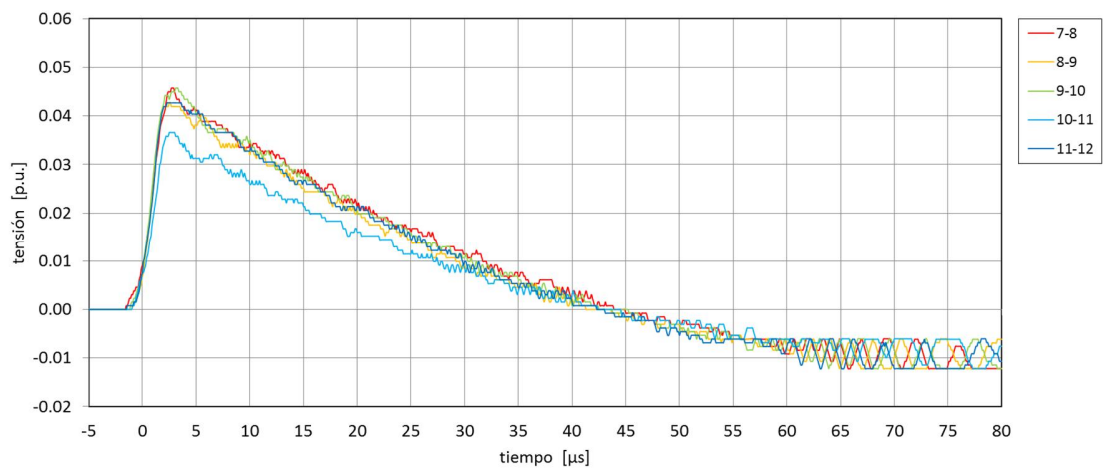


fig. 120 – tensiones entre espiras medidas (espiras 7 a 12)

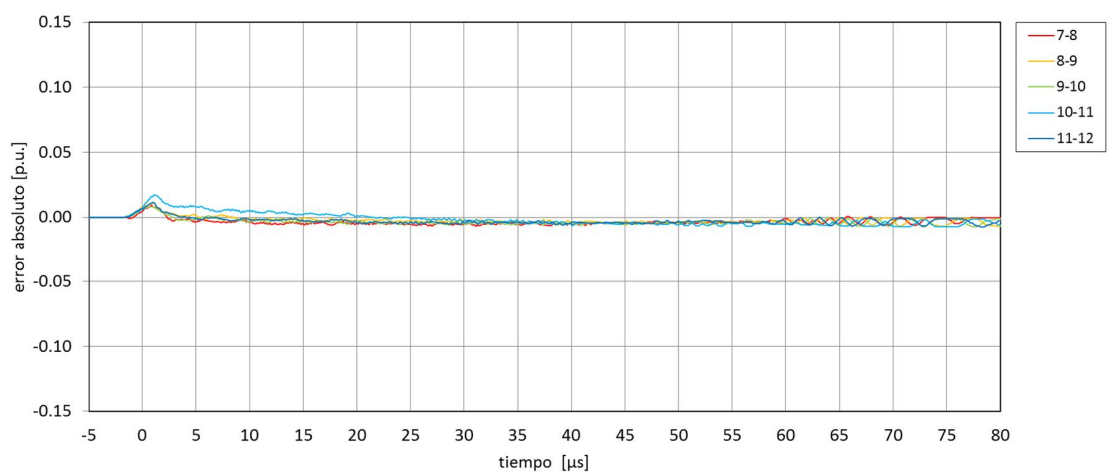


fig. 121 – error absoluto cometido en las tensiones entre espiras (espiras 7 a 12)

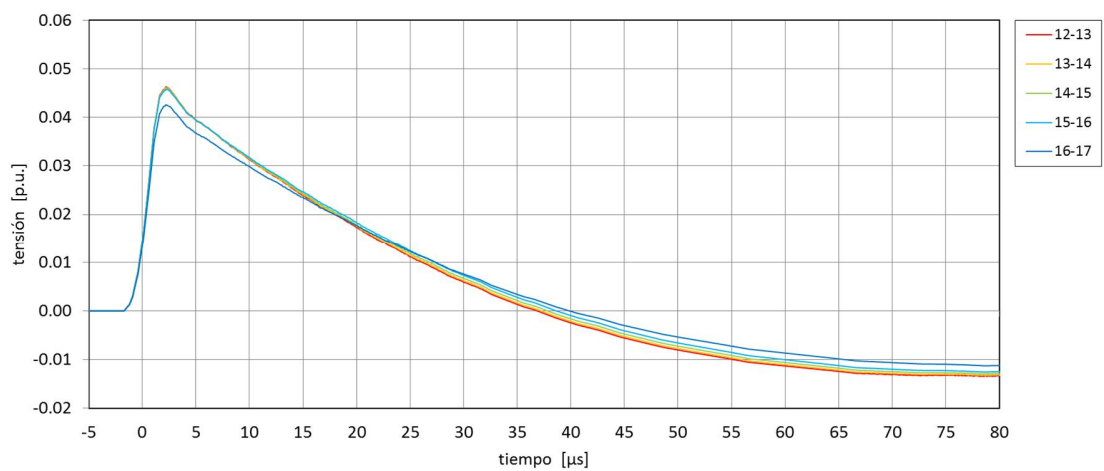


fig. 122 – tensiones entre espiras simuladas (espiras 12 a 17)

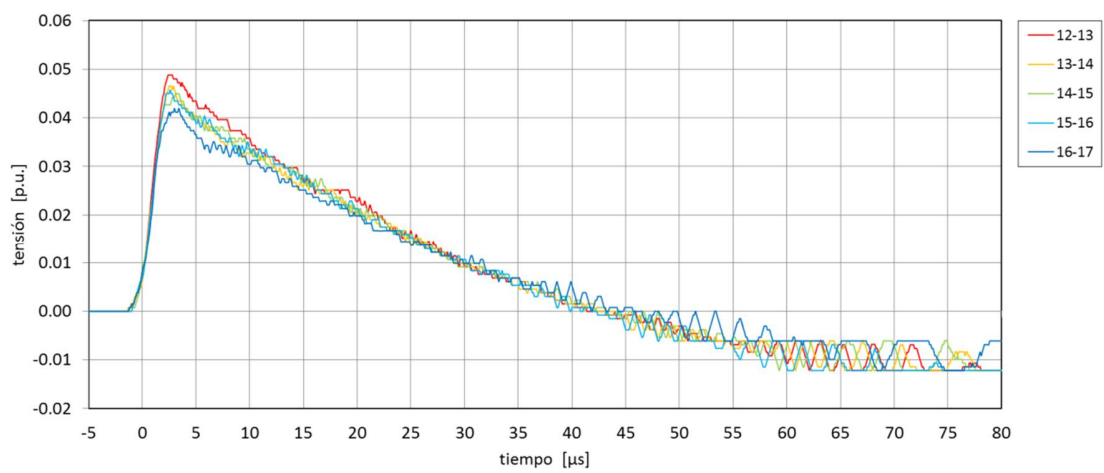


fig. 123 – tensiones entre espiras medidas (espiras 12 a 17)

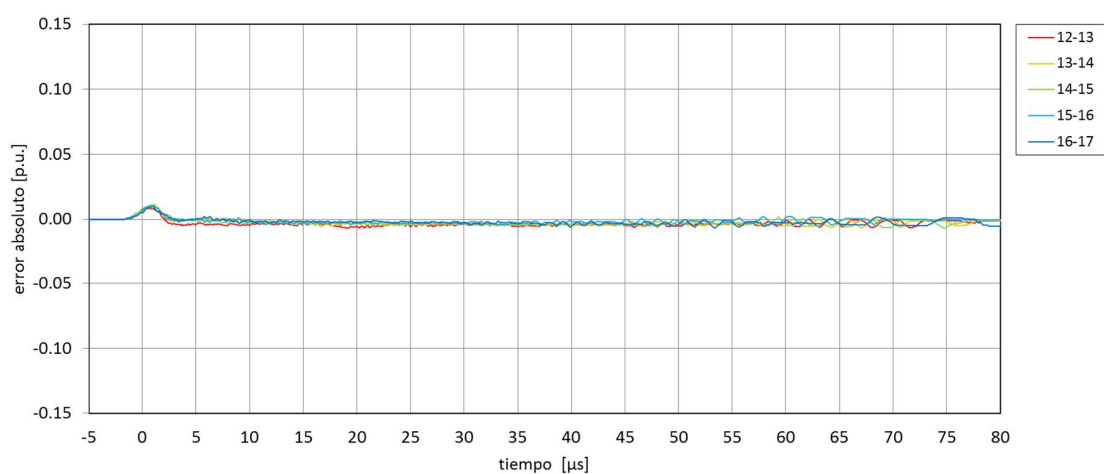


fig. 124 – error absoluto cometido en las tensiones entre espiras (espiras 12 a 17)

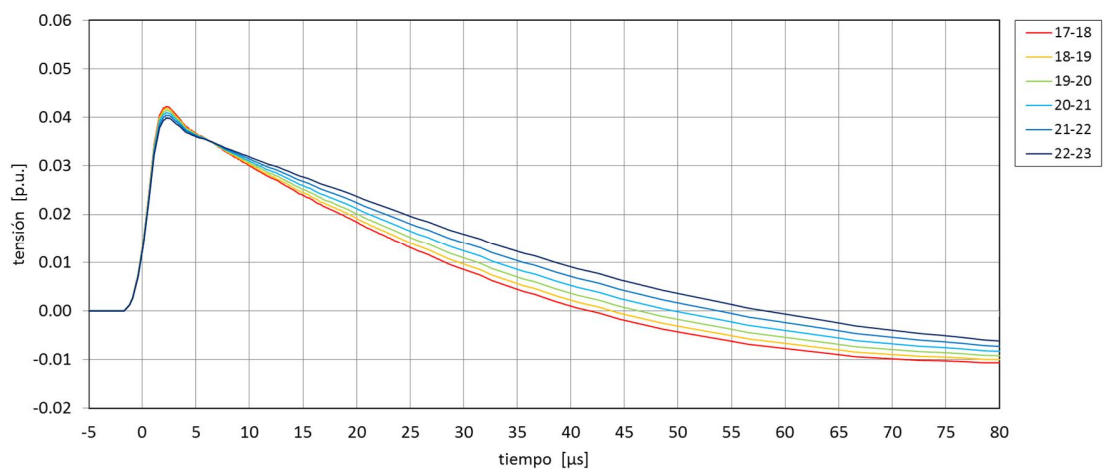


fig. 125 – tensiones entre espiras simuladas (espiras 17 a 23)

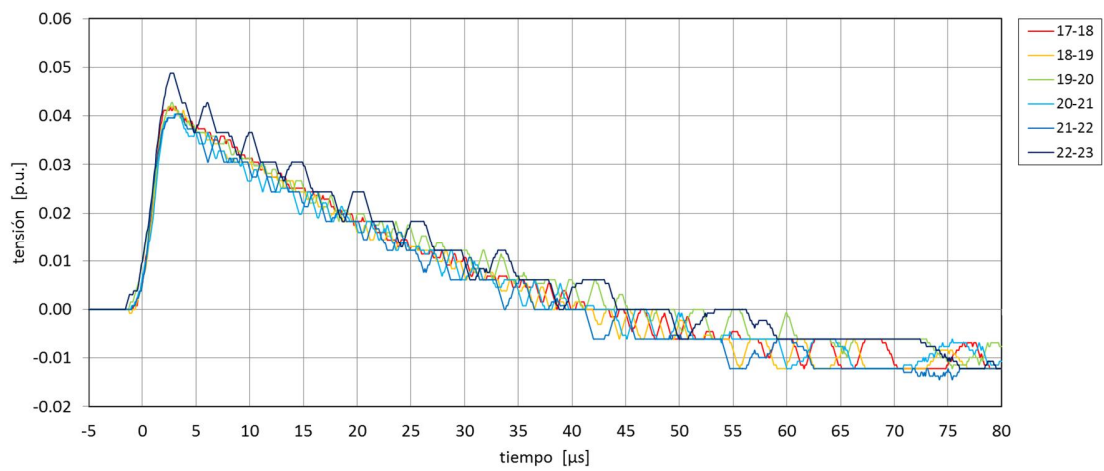


fig. 126 – tensiones entre espiras medidas (espiras 17 a 23)

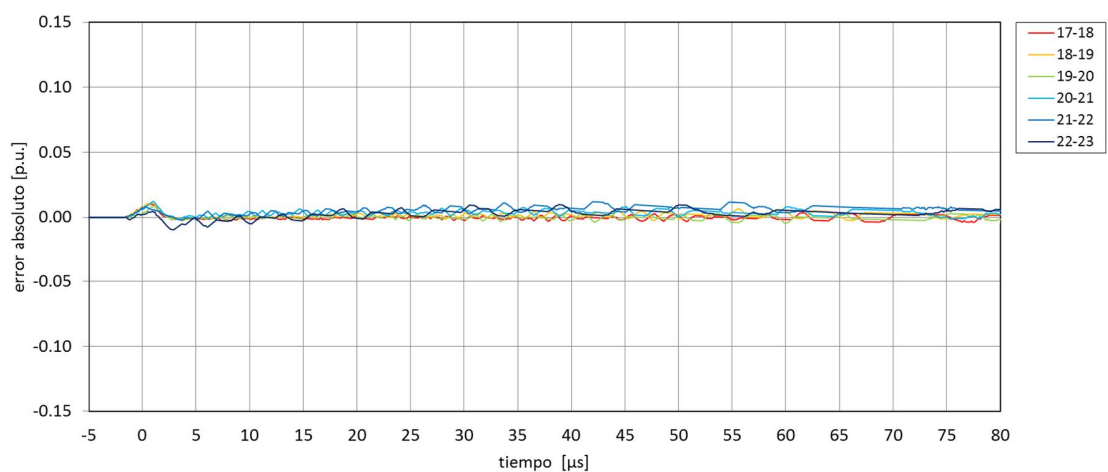


fig. 127 – error absoluto cometido en las tensiones entre espiras (espiras 17 a 23)