



Universidad
Zaragoza



Trabajo Fin de Máster

Desarrollo de un modelo de alta frecuencia de un cable multiservicio del detector de pixeles - Fase 2 del experimento CMS del CERN

High frequency model development of CMS pixel detector upgrade phase 2 Multiservice cable.

Autor

Adilson Alberto Moyses

Director

Francisco Javier Arcega Solsona

Codirector

Fernando José Arteche González

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Instituto Tecnológico de Aragón

Máster en Ingeniería Industrial

2019/ 2020

Resumen

En este trabajo se recoge el proceso de caracterización de un cable multiservicio de la nueva generación de detectores de pixeles previsto para la actualización del experimento Compact Moun Solenoid (CMS) del acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) situado en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). Este cable de estructura compleja es el encargado de llevar la potencia, la tensión de polarización así como las señales de control al corazón del detector a lo largo de varias decenas de metros. Dicha caracterización, que se ha llevado a cabo mediante simulación y con medidas reales, tiene por objeto la obtención de sus parámetros por unidad de longitud (matrices de inductancia, capacidad y resistencia) que permitan estudiar la propagación del ruido de alta frecuencia a lo largo de dicho cable.

En el proceso de caracterización se identificaron todos los elementos principales del cable a partir de secciones del mismo que se han modelado por *Ansys electromagnetics* y a partir de medidas reales que se han realizado en un prototipo real suministrado por el CERN.

En el proceso de medida de los parámetros eléctricos se utilizaron los equipos del Departamento de Ingeniería Eléctrica aplicando los montajes recogidos en documentaciones científicas. Al ser un cable multiconductor complejo compuesto por 36 cables más una pantalla, fueron necesarios 1369 montajes para la obtención de las matrices R, L y C. Cada una de las medidas fueron tomadas a 200 y 300 kHz. Se identificaron posibles fuentes de error humano en las medidas, llegando a cuantificar el orden de magnitud en algunos de los casos. La obtención de todos los parámetros es un proceso laborioso y el tratamiento de los resultados requiere el uso de programación debido a que es inviable el tratamiento de los datos a mano.

En el proceso de modelado se realizaron diferentes modelos 2D tanto con las cotas nominales recogidas en los informes de diseño del prototipo como con las cotas reales medidas en laboratorio, parametrizando todas las variables geométricas. Se desarrollaron modelos 2D donde se consideró el efecto del trenzado en diferentes grupos de conductores, obteniendo un error medio aceptable. Se realizaron modelos 3D considerando también los diferentes trenzados de los conductores.

Para concluir el presente trabajo, a partir de los parámetros obtenidos, se ha analizado el efecto de acoplamiento del ruido de modo común generado por las fuentes conmutadas asociadas al detector de pixeles a lo largo del cable multiservicio. Mediante este estudio se comprobó la validez del uso de modelos 2D para el cálculo de un caso de propagación del ruido, obteniendo un error medio entre 3,38 dB y 10,48 dB en los casos estudiados.

Finalmente cabe mencionar que la caracterización de modelos y el cálculo de propagación de ruido en cables es algo recogido en bibliografía especializada y que ya existe actualmente, sin embargo es la primera vez que se realiza este estudio en un cable multiservicios de 36 conductores destinados a un experimento de física de altas energías mediante simulación numérica y cuantificando el grado de error del modelo simulado respecto a los valores reales

Índice

ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVO.....	4
METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO 1: EXPERIMENTO CMS.....	6
ACTUALIZACIÓN DEL DETECTOR DE PÍXELES DE CMS – FASE II.....	8
DATOS INICIALES DEL PROTOTIPO DE CABLE DE ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS.....	11
CAPÍTULO 2: PARÁMETROS ELÉCTRICOS POR UNIDAD DE LONGITUD.....	12
MATRIZ DE RESISTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.....	13
MATRIZ DE INDUCTANCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.....	13
MATRIZ DE CAPACITANCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.....	14
MATRIZ CONDUCTANCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.....	15
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTOS DE MEDIDA DE LOS PARÁMETROS POR UNIDAD DE LONGITUD DEL CABLE .	16
INDUCTANCIA Y RESISTENCIA.....	16
CAPACITANCIA.....	17
<i>Ejemplo de montaje realizado para la medida de un cable de 3 conductores.....</i>	<i>19</i>
CAPÍTULO 4: MODELOS Y SIMULACIONES PREVIAS.....	21
SIMULACIÓN DE DOS CONDUCTORES Y PLANO DE REFERENCIA INFINITO.....	21
SIMULACIÓN DE UN CABLE DE POTENCIA DE CUATRO CONDUCTORES SIN PANTALLA.....	21
CAPÍTULO 5: MEDIDAS, MODELADO Y SIMULACIÓN DE PROTOTIPO.....	24
MODELO PRELIMINAR A PARTIR DE LAS CARACTERÍSTICAS PREVISTAS DEL PROTOTIPO.....	24
CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO.....	27
MEDIDAS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN LABORATORIO.....	32
MODELOS 2D INICIALES.....	35
<i>Resultados para inductancias.....</i>	<i>37</i>
<i>Resultados para capacitancias.....</i>	<i>38</i>
<i>Resultados de las resistencias.....</i>	<i>38</i>
MODELOS 3D.....	39
MODELOS 2D CON GIROS A 90°.....	40
<i>Resultados del Modelo 1.....</i>	<i>41</i>
<i>Resultados del Modelo 2 con giros a 90°.....</i>	<i>42</i>
CAPÍTULO 6: EJEMPLO DE PROPAGACIÓN DEL RUIDO EN EL PROTOTIPO.....	43
EFECTO DEL RUIDO EN LA FUENTE DC/DC3 CABLES LV 31 Y 32.....	47
EFECTO DEL RUIDO EN LA FUENTE DC/DC4 CABLES LV 33 Y 34.....	48
EFECTO DEL RUIDO EN LAS FUENTES DC/DC1 Y DC/DC2 DESDE CABLES HV 1 A HV 22.....	49
CONCLUSIONES.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXO A: MODELOS PREVIOS.....	54
SIMULACIÓN DE DOS CONDUCTORES Y PLANO DE REFERENCIA INFINITO.....	54
SIMULACIÓN DE UN CABLE DE POTENCIA DE CUATRO CONDUCTORES SIN PANTALLA.....	55
<i>Modelo creado a partir de una estimación inicial.....</i>	<i>55</i>
<i>Modelo realizado con medidas reales de los parámetros geométricos del cable.....</i>	<i>59</i>
<i>Modelo creado considerando disposición asimétrica de los conductores.....</i>	<i>62</i>
<i>Estudio de la influencia de desplazamiento de los conductores en los parámetros eléctricos.....</i>	<i>64</i>
ANEXO B: SCRIPTS REALIZADOS PARA MODELO INICIAL.....	66
SCRIPT PARA CÁLCULO DE LA MATRIZ H.....	66
SCRIPT DE CÁLCULO DE LA MATRIZ D.....	68

SCRIPT DE CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS MIJ EN FUNCIÓN DE LA MATRIZ L DE SIMULACIÓN	69
SCRIPT PARA AJUSTAR LAS UNIDADES DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN	71
SCRIPT PARA PASAR DE LOS COMPONENTES VECTORIALES A LAS MATRICES SIMÉTRICAS L, C Y R	72
ANEXO C: RESULTADOS DE MEDIDAS GEOMÉTRICAS DEL PROTOTIPO	73
ANEXO D: MEDIDAS EN EL LABORATORIO	75
COMENTARIOS SOBRE EL PROCEDIMIENTO DE MEDIDA Y ERRORES DETECTADOS.....	75
CAPACITANCIAS.....	76
INDUCTANCIAS	78
RESISTENCIA	80
ANEXO E: MATRICES DE ERROR DE LOS MODELOS DE SIMULACION 2D	83
MODELO 1: EN 2D CON DISTRIBUCIÓN SIMÉTRICA Y COTAS NOMINALES	83
<i>Matriz de errores de capacitancias:</i>	84
<i>Matriz de error de inductancias:</i>	85
MODELO 2: EN 2D CON DISTRIBUCIÓN SIMÉTRICA Y COTAS REALES.....	86
<i>Matriz de errores de capacitancia</i>	86
<i>Matriz de errores de inductancia</i>	87
MODELO 1: EN 2D CON COTAS NOMINALES Y GIROS A 90°	88
<i>Matriz de error de capacitancias</i>	88
<i>Matriz de error de las inductancias</i>	89
MODELO 2: EN 2D CON COTAS NOMINALES Y GIROS A 90°	90
<i>Matriz de error de las capacitancias:</i>	90
<i>Matriz de errores de inductancias</i>	91
FACTORES DE CORRECCIÓN DEL MODELO 2D ESTUDIADOS.....	91
ANEXO F: MODELOS 3D DEL PROTOTIPO	94
ANEXO G: CASOS DE PROPAGACIÓN DEL RUIDO	98
CASO DE 2 CONDUCTORES.....	98
CASO CABLE DE 30 CONDUCTORES	99
CASO DE PROPAGACIÓN DE RUIDO EN EL PROTOTIPO DE 36 CONDUCTORES	103
<i>Ruido en fuente DC/DC3 cables LV 31 y 32</i>	108
<i>Ruido en fuente DC/DC4 cables LV 33 y 34</i>	109
<i>Ruido en Fuentes DC/DC3 y DC/DC4 todos los cables LV</i>	110
<i>Ruido en fuentes DC/DC1 y DC/DC2 desde cables HV 1 a HV 22</i>	111

Antecedentes

Este documento representa el trabajo final del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza del alumno Adilson Alberto Moyses. El trabajo fue iniciado en agosto de 2018 y realizado bajo la dirección del Catedrático de la Escuela Universitaria Francisco Javier Arcega Solsona, del Departamento de Ingeniería Eléctrica, junto con la codirección del Dr. Fernando Arteche González responsable del Departamento de Sistemas Eléctricos del Instituto Tecnológico de Aragón (ITAINNOVA).

Este trabajo se encuentra dentro del marco del plan nacional de actuaciones de proyectos de la fase 2 de la actualización del experimento Compact Muon Solenoid (CMS) del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). El principal objetivo de las actualizaciones es mejorar el sistema de detección de partículas para cumplir con las especificaciones técnicas previstas. Se espera que las actualizaciones se encuentren terminadas ente 2024 y 2026 [1]. Esta actividad se enmarca dentro de los proyectos “*Participación en el Experimento CMS del LHC: Pixel upgrade para la alta luminosidad (CMSRUN2-B)*” perteneciente al Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, Convocatoria 2017, Modalidad 1: «Proyectos De I+D+I» y con referencia FPA2017-85155-C4-3-R y del proyecto “*Desarrollo y diseño del HDI (High Density Interconnection board) basado en el RD53A readout chip para el nuevo detector de pixeles de CMS – Fase II: (HDI4CMSPIX)*” perteneciente al programa de proyectos de Investigación Multidisciplinar del Gobierno de Aragón.

Objetivo

El objeto de este proyecto es la realización de un modelo de simulación de alta frecuencia de un cable multiservicio del detector de pixeles para la Fase 2 del experimento CMS del CERN, y la obtención de los parámetros eléctricos por unidad de longitud del cable tanto por simulaciones como por medidas realizadas en un laboratorio de un prototipo del cable. Adicionalmente y como aplicación práctica de este trabajo se ha analizado los efectos de propagación del ruido electromagnético a lo largo del cable, comparando los resultados obtenidos a partir de los parámetros calculados por simulación y los obtenidos a partir de medidas reales.

Metodología

El paso inicial consistió en el estudio de la bibliografía relacionada con los parámetros por unidad de longitud del cable y los métodos de medida existentes en la actualidad [2]–[8]. Por otra parte, debido a que el uso previsto del prototipo es la sustitución del actual conductor que alimenta los sensores del detector de partículas CMS, se estudió la bibliografía específica de este centro de investigaciones. Se estudió la información relacionada con sus instalaciones, equipos, sistemas de distribución de energía y sobre la compatibilidad electromagnética del detector de partículas CMS [9]. Posteriormente se estudiaron las fichas técnicas disponibles del sistema de comunicaciones, distribución eléctrica y equipos de uno de los subsistemas del detector llamado subsistema Tracker [10].

El software seleccionado para el trabajo de simulación fue Ansys, concretamente el paquete *Electronics Desktop*. Con objeto de aprendizaje del manejo del software y debido a la complejidad del prototipo a modelar, se propuso la realización de modelos previos de conductores más sencillos junto

con la validación de los modelos. Inicialmente, la validación fue realizada mediante la comparación de los resultados con los artículos científicos disponibles [3], [9], [11]. Posteriormente, se realizó el modelo de un conductor más complejo y se validaron los resultados obtenidos con medidas realizadas por el estudiante en diferentes laboratorios de la Universidad de Zaragoza y en el Laboratorio de Electrónica de Potencia y EMC del Instituto Tecnológico de Aragón.

Cuando se dispuso de un prototipo del cable de alimentación del CMS, se realizó su caracterización geométrica y se realizaron medidas de sus principales parámetros en diferentes laboratorios de la universidad, detectando y acotando fuentes de error. Con las medidas eléctricas realizadas se obtuvieron los parámetros eléctricos por unidad de longitud del prototipo. Con las medidas de los parámetros geométricos, se realizaron modelos en 2D y en 3D del prototipo para la obtención de los parámetros eléctricos mediante simulación. Se realizó la comparación de los resultados entre las mediciones reales y los modelos simulados. Por último se comprobó, la variación los resultados obtenidos en el cálculo de propagación del ruido, mediante un software interno del ITA de cálculo basado en el método en líneas multiconductoras (MTL).

Este documento se encuentra organizado con la siguiente estructura. En el Capítulo 1 se realiza una descripción de las instalaciones del CERN y en especial sobre las instalaciones del CMS. En el Capítulo 2 se describen los parámetros por unidad de longitud de un cable. En el Capítulo 3 se indican los métodos de medida de los parámetros por unidad de longitud utilizados en este trabajo. En el Capítulo 4 se describen todos los modelos previos realizados, su procedimiento y los resultados obtenidos. En el Capítulo 5 se describe el modelo final del prototipo junto con los resultados obtenidos. En el Capítulo 6 se recoge un estudio de un caso de propagación del ruido del cable con los resultados obtenidos en el Capítulo 5. Por último se recogen las conclusiones de este trabajo y la bibliografía utilizada.

En los diferentes subniveles del CMS se encuentran distintos tipos de sensores de partículas y dispositivos ópticos. En él se realiza un tratamiento de la señal mediante FEE (Front-End Electronics) que a su vez se comunica con un sistema de adquisición de datos mediante fibra óptica. El sistema de adquisición de datos se encuentra a unos 120 metros de distancia de los equipos electrónicos mientras que las fuentes de alimentación se encontrarían a unos 85 o 90 metros de distancia.

A continuación se describen los diferentes subsistemas del CMS desde el punto de interacción hasta la periferia descritos más detalladamente en [16]:

- Punto de interacción: es el punto en el centro del detector donde ocurre el choque entre protones de forma frontal. Para ello, los haces de protones son previamente acelerados en dirección contraria en el LHC.
- Capa 1 Tracker: está diseñado para detectar con mucha precisión el momento y la carga de las partículas. Esto se logra gracias a los detectores *Pixel* y *Silicon* distribuidos en capas muy segmentadas. En total son más de 200 m² de sensores formando más de 76 millones de canales.
- Capa 2 Electromagnetic Calorimeter (ECAL): capa diseñada para detectar de forma muy precisa la energía de los electrones y fotones. Es capaz de detener casi todos los fotones y electrones que se originan del choque entre haces de fotones.
- Capa 3 Hadron Calorimeter (HCAL): capa diseñada para medir específicamente la energía de los hadrones, que son partículas hechas de neutrones, protones, kaones y piones. De esta forma, casi todos los hadrones creados en la interacción entre los haces de protones son detenidos en esta capa.
- Capa 4 Solenoide Superconductor: consiste en un imán hecho de superconductores capaz de generar cuatro Teslas de campo magnético en dirección axial al haz de electrones, de esta forma se pueden direccionar de forma precisa los haces posibilitando la medición del momento de las partículas de altas energías.
- Capa 5 Detector de Muones: únicamente los neutrinos y los muones son las partículas capaces de llegar a esta capa. Los muones son detectados en este sensor. Utilizando la ley de la conservación de la energía se puede deducir la cantidad de neutrinos.

A continuación se presenta una sección del CMS [17] en la Figura 2

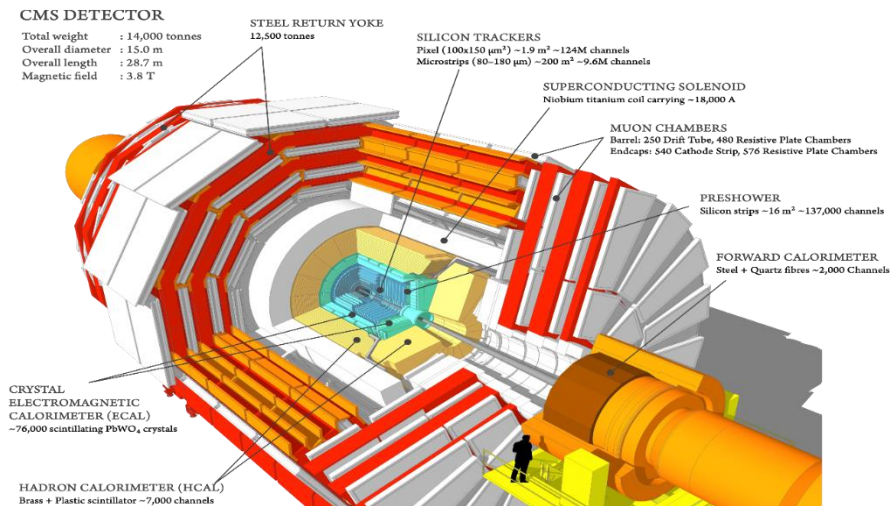


Figura 2: Sección del CMS

Fuente: T. Sakuma and T. McCauley, "Detector and Event Visualization with SketchUp at the CMS Experiment"

Actualización del detector de Píxeles de CMS – Fase II

A pesar de estar en operación en la actualidad, el desarrollo tecnológico para CMS no se ha parado. Desde hace varios años el CERN ha definido un programa destinado a la actualización del acelerador de partículas LHC. Este programa denominado LHC de alta luminosidad (HL-LHC), pretende prolongar la vida útil del acelerador y aumentar entre cinco y siete veces su luminosidad, es decir, la frecuencia de las colisiones entre protones, que hasta ahora era de aproximadamente 1.000 millones cada segundo. Con la mejora, se podrán observar fenómenos físicos muy infrecuentes y afinar la precisión de los resultados conocidos. Este programa del CERN está forzando a realizar una completa actualización de todos los detectores de los experimentos del LHC. Uno de los mayores retos será el desarrollar sistemas electrónicos capaces de sobrevivir y operar con niveles de radiación ionizante nunca alcanzados hasta ahora superiores a varios cientos de MRad y fluencias superiores a 2×10^{16} n_{eq}/cm², y que puedan procesar la enorme cantidad de datos resultados de las colisiones. Estos retos han forzado a los experimentos a desarrollar un programa específico de I+D para la mejora tecnológica de los sub-detectores con el fin de que puedan operar en el nuevo marco de trabajo.

Estos proyectos aprobados por el consejo del CERN en 2013 [18] se encuentran apoyados por la agenda europea de investigación y la española en particular [19]. En el caso concreto de CMS, cada uno de los detectores ha desarrollado un programa específico de I+D para el desarrollo tecnológico de la actualización de cada uno de los sub-detectores. Estos programas están recogidos en documentos técnicos (TDR) [20] en los que se definen las diferentes líneas tecnológicas prioritarias de cada sub-detector.

Durante los últimos 5 años investigadores de la universidad de Zaragoza y del Instituto Tecnológico de Aragón en colaborado para la actualización del detector de píxeles de CMS fase II. Este sub-detector de CMS es el situado en su parte más central y tiene una longitud de 5m y 0.5m diámetro. El futuro detector de píxeles consta de varios cilindros concéntricos (TBPX) y discos (TFPX y TEPX) distribuidos a lo largo del punto de interacción de las partículas en CMS sobre los que se disponen sensores con píxeles (más de 70.000 píxeles por sensor) de dimensiones de 50μm x 50μm y

50 μm x100 μm . Figura 3 muestra un cuarto del sub-detector de pixeles y el esquema de dos de sus módulos.

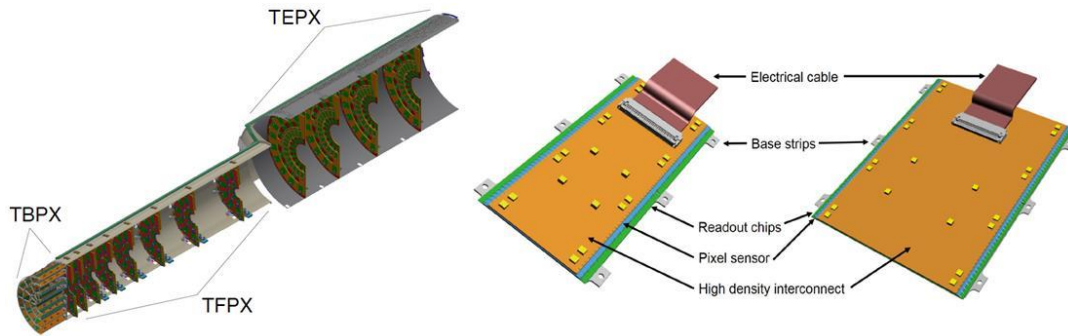


Figura 3: Esquema de un cuarto del detector de pixeles fase II y detalle de sus módulos (2x1) izquierda y (2x2) derecha. Dimensiones aproximadas 1.8 x 4.4 cm² y 3.7 x 4.4 cm² para los módulos 1x2 y 2x2.

En cada uno de los cilindros y discos se instalan las unidades básicas denominadas módulos o Front End Electronics (FEE). Los módulos de píxeles constan de varias partes. Dos o más chips de lectura (Pixel Readout Chips-PROCs), sensores de píxeles soldados a los chips, un PCB flexible muy delgado denominado “High density interconexión” (HDI) al que se pega el sensor y se sueldan los pads de los chips. Este módulo acondiciona los datos de salida, suministra la señal de reloj, trigger, señales de control, así como la distribución de potencia para los PROCs y elementos pasivos del circuito flexible.

La gran cantidad de datos a procesar, la elevada radiación ionizante y el alto campo magnético presentes en el área del detector de píxeles de CMS en el HL-LHC, están forzando a desarrollar nuevas tecnologías para cada uno de los elementos de los que consta el detector de píxeles (PROCs, HDI, sensores y el sistema de potencia). Los desarrollos de cada una de estas partes están muy relacionados entre sí.

En el caso del PROC y ante los complicados retos a los que se enfrenta su diseño, CMS se ha aliado con otro de los experimentos presentes en el CERN, ATLAS, y han formado una colaboración llamada RD53 [21] dedicada al desarrollo de ASICs tolerantes a la radiación basados en tecnología CMOS de 65nm y preparados para HL-LHC. Recientemente, la colaboración ha alcanzado un importante hito que ha sido la fabricación del primer chip de lectura para píxeles (RD53A chip) capaz de soportar los nuevos niveles de radiación y cumpliendo con las especificaciones necesarias para el HL-LHC, recogido en la Figura 4. Este chip se encuentra en la actualidad en fase de evaluación y será usado para la fabricación de los primeros módulos. Una vez alcanzado este hito, la colaboración ha decidido continuar el desarrollo de este chip a través de una segunda versión, RD53B, cuyo diseño se está depurando en la actualidad. Con posterioridad, está planificado que cada uno de los experimentos desarrolle sus propios chips basados en esta tecnología, y adaptados a sus necesidades particulares.

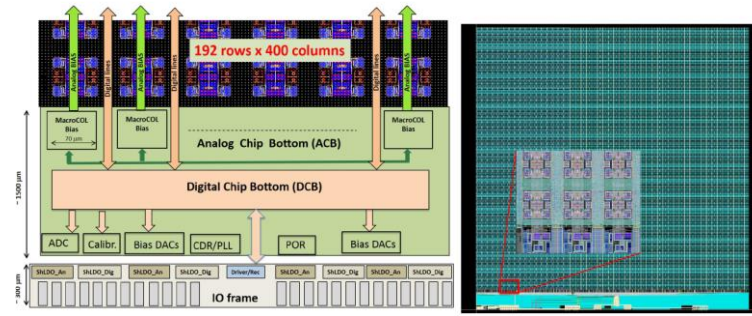


Figura 4: Diagrama funcional (izquierda) y de detalle (derecha) del chip demostrador RD53A.

La tecnología usada por estos chips requiere el uso de un sistema de alimentación a muy baja tensión (1.2V), pero con un elevado consumo de corriente por cada chip (2A), debido al elevado tamaño e integración de estos. Debido al número de chips y electrónica asociada instalada en el sub-detector, se estima que el consumo de potencia será cercano a 40 kW, con lo que, teniendo en cuenta la tensión en la que opera el sistema, se estima que el futuro detector de pixeles consumirá aproximadamente más de 30.000 Amperios. Durante varios años se han estado realizando diferentes estudios [20], [22] para diseñar un sistema convencional de potencia basado en convertidores DC-DC, pero la alta radiación, elevado campo magnético, necesidad de reducir la cantidad de material, y sobre todo, la elevada intensidad de corriente necesaria, hacen muy poco viable esta topología. Por lo tanto, desde mediados de 2016 CMS ha optado por desarrollar un sistema de potencia serie [10], [23] para alimentar a la electrónica del futuro detector de pixeles, tal y como se muestra en la Figura 5. La idea básica de este sistema de distribución es que los módulos del sistema de pixeles se conecten en serie para poder aumentar la tensión de trabajo y reducir la corriente. Esta reducción de corriente será proporcional al número de módulos que se puedan conectar en serie, lo cual estará condicionado por distintas limitaciones tanto desde el punto de vista de tecnología electrónica como mecánico o estructural. Para que este tipo de sistemas de distribución funcione, la corriente que circula por cada uno de los módulos debe ser siempre la misma. Para conseguir esto, localmente en cada chip, dos reguladores lineales (Shunt-LDO) se encargan de mantener el consumo de corriente constante con independencia del consumo de potencia de cada chip.

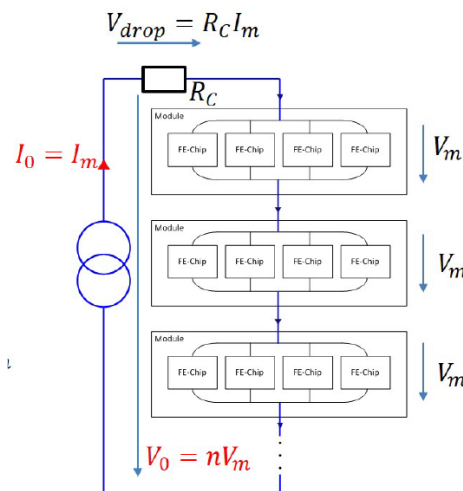


Figura 5: Sistema de distribución serie.

Por lo tanto, el diseño del sistema de alimentación se enfrenta a tres retos muy complejos. Por un lado, ser capaz de manejar la alta corriente por cada una de las ramas (aproximadamente 8A y 4A), controlar los transitorios presentes en el sistema (arranques y paradas, variaciones de carga, fallos, etc.) y los fenómenos de compatibilidad electromagnética (ruido electromagnético) que puedan llegar de otras partes del detector a través del cable multiservicio.

Datos iniciales del prototipo de cable de alimentación de los equipos electrónicos

Se obtuvieron los datos iniciales del prototipo del cable desde los informes de las actualizaciones de los servicios IT del CMS Tracker [10].

Un cable multiservicio alimentará a dos cadenas en serie de módulos de sensores. El esquema de alimentación se encuentra representado en la Figura 6, donde se parte de una fuente de alimentación (PS) ubicada en el centro de contadores (USC) y se suministra la energía hasta a 10 módulos de una cadena de sensores. Cada cable multiservicio consiste en:

- 2 x 2 conductores de baja tensión (LV) gruesos dimensionados para transportar 4A / 8A para alimentar a dos cadenas en serie de potencia.
- 2 x (10 + 1) circuitos de “alta tensión” (HV) de hasta 1000 V para alimentar hasta 10 módulos con un retorno común.
- 2 conductores en baja tensión más finos destinados a precalentar las líneas de refrigeración, denominados Preheaters
- 8 conductores para la monitorización de la temperatura, denominados T-Sensor.
- Una pantalla y armadura de cobre trenzado y una cubierta para seguridad.

Según el dimensionamiento previsto se necesitarán 292 cables multiservicio para alimentar todo el sistema IT desde el PS hasta el Patch Panel 1 (PP1) que se encuentra ubicado dentro de la capa Solenoide. Las longitudes de estos cables dependerán de la ubicación final del PS, si se encuentran en el cuarto de contadores la distancia estimada es de 85 metros, si se encuentra en los balcones más cercados al solenoide esta distancia se reduciría a 30 metros.

En la Figura 7 se recoge una foto donde se destaca el PP1 y el canal de servicios en azul junto con un esquema en 3D del PP1 de la capa Tracker.

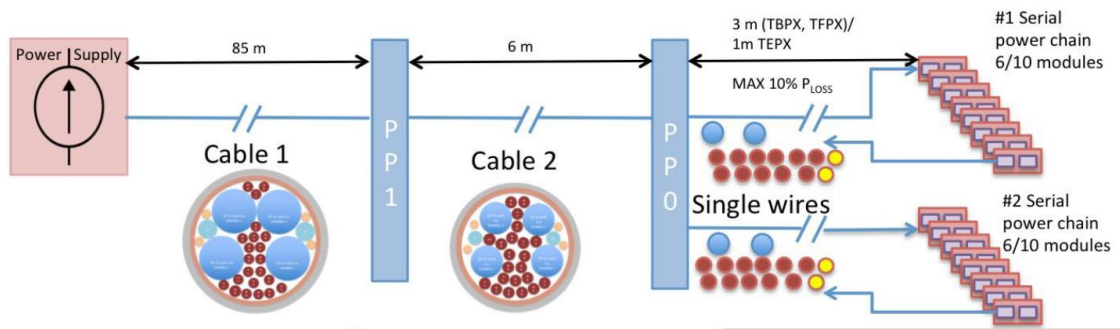


Figura 6: Esquema de alimentación de los módulos en serie de sensores.
 Fuente: CMS tracker phase 2 upgrade IT services

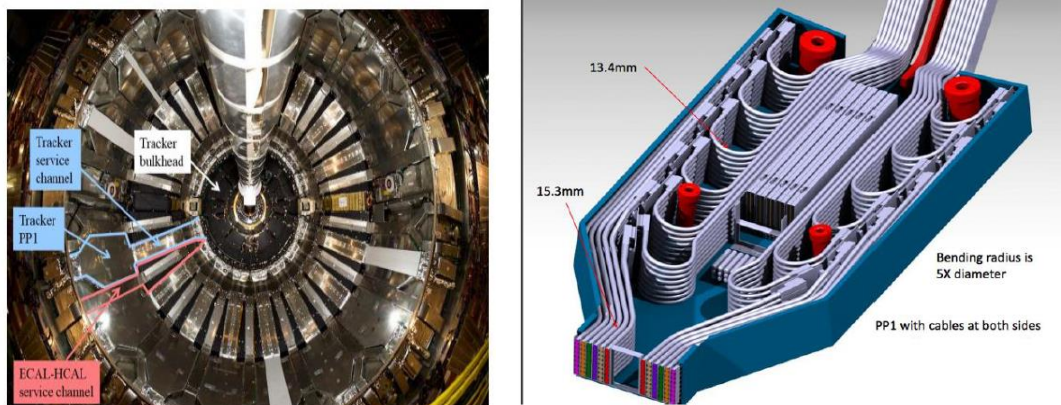


Figura 7: a la izquierda se destaca en azul el PPI y el canal de servicios del Tracker, a la derecha se recoge un esquema 3D del PPI del Tracker.
 Fuente: CMS tracker phase 2 upgrade IT services

Capítulo 2: Parámetros eléctricos por unidad de longitud

El desempeño de una línea de transmisión es afectado directamente por los parámetros eléctricos de sus conductores, siendo cuatro los parámetros principales: Resistencia, Inductancia, Capacitancia y Conductancia. Según estos cuatro parámetros las ondas de tensión y corriente a lo largo de la línea se distribuyen y se propagan de forma diferente, afectando directamente a la eficiencia de la línea [24].

Adicionalmente, cabe destacar entre las características afectadas el factor de potencia, los parámetros de regulación de la línea, sus pérdidas, límite de potencia a transportar, su comportamiento ante transitorios, propiedades para transmisión de señal y propagación de ruido.

Los parámetros eléctricos son calculados normalmente por unidad de longitud debido a que se encuentran distribuidos a lo largo de la línea. En el cálculo teórico son obtenidos según la disposición geométrica en la sección transversal de los conductores, suponiendo que todos los cables son perfectamente rectos [25], [26]. De esta forma los parámetros por unidad de longitud son obtenidos tras calcular los campos electroestáticos de los conductores. Siempre es necesario definir una referencia para el cálculo, que normalmente suele ser la pantalla o la tierra.

Según las características de las líneas se utilizan diferentes algoritmos para el cálculo de su desempeño, variando el método de cálculo según la frecuencia de la señal y la longitud de la línea. Por ejemplo, los modelos en PI o en T son utilizados en líneas de transmisión de potencia de 50 Hz de hasta 400 km. El modelo de los parámetros distribuidos son utilizados en líneas de más de 400 km de longitud [27]. Y los modelos MTL son utilizados, por ejemplo para distribución de señales a alta frecuencia cuando existen varios conductores pudiendo obtener la respuesta de la línea en función del tiempo, computando los campos incidentes y el efecto pelicular en función de la frecuencia [28].

A continuación se resume cada una de las matrices los parámetros eléctricos por unidad de longitud de los conductores, descrito más profundamente en [9].

Matriz de resistencia por unidad de longitud

La resistencia de un cable viene determinada por la resistividad del material y sus factores geométricos. Relaciona la corriente que circula en los conductores con la caída de tensión. La diagonal corresponde a la resistencia por unidad de longitud del conductor i más la resistencia del conductor de referencia. Los demás elementos corresponden solo con el valor de la resistencia por unidad de longitud del conductor de referencia.

A continuación en la Ecuación 1 se representa la matriz de resistencia por unidad de longitud:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 + R_0 & R_0 & \cdots & R_0 \\ R_0 & R_2 + R_0 & \cdots & R_0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_0 & \cdots & \cdots & R_n + R_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Siendo R_i la resistencia del cable i y R_0 la resistencia del cable de referencia en Ω / m .

Matriz de inductancia por unidad de longitud

La matriz de inductancia por unidad de longitud relaciona la corriente que circula en cada conductor con el campo magnético del circuito formado por los demás conductores. Los elementos de la diagonal de la matriz representan la inductancia propia del cable, que es definida como la ratio entre el flujo magnético entre el conductor i y la referencia y la corriente que circula por ese mismo conductor, con los demás conductores en circuito abierto.

$$l_{ii} = \frac{\phi_i}{I_i} \Big|_{I_1=I_2=\cdots=I_{i-1}=I_{i+1}=\cdots=I_n=0} \quad (2)$$

Siendo:

$$\phi = L \times I \quad (3)$$

Donde:

ϕ es el flujo magnético en Wb .

L es la inductancia por unidad de longitud en H / m .

I es la corriente que circula por el cable en A .

Los elementos de fuera de la diagonal representan las inductancias mutuas, que son definidas como la ratio entre el flujo magnético entre el conductor i y la referencia y la corriente que circula por el conductor j .

$$l_{ij} = \frac{\phi_i}{I_j} \Big|_{I_1=I_2=\dots=I_{i-1}=I_{i+1}=\dots=I_n=0} \quad (4)$$

De esta forma la matriz de inductancia por unidad de longitud del circuito es la siguiente:

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Matriz de capacitancia por unidad de longitud

La matriz de capacitancia relaciona la tensión de la línea con la carga total en cada conductor representada de la siguiente forma:

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n C_{1k} & -C_{12} & \dots & -C_{1n} \\ -C_{21} & \sum_{k=1}^n C_{2k} & \dots & -C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \dots & \sum_{k=1}^n C_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Siendo:

$$Q = C \times V \quad (7)$$

Donde:

Q es la carga eléctrica almacenada en C .

C es la capacidad eléctrica medida en F / m .

V es la tensión eléctrica en V .

$\sum_{k=1}^n C_{ik} = B_{ii}$ es el coeficiente de inducción electroestática propia en faradios.

$-C_{ij} = B_{ij}$ es el coeficiente de inducción electroestática mutua en faradios.

Como se puede observar, la matriz C se refiere al coeficiente de electroestático de inducción (también representado como B) y no a la capacitancia de los cables, lo que suele generar confusión. En otras palabras, la matriz de capacitancia realmente se refiere al coeficiente electroestático de inducción.

De esta forma los elementos de la diagonal representan los coeficientes propios de inducción electroestática. Estos representan la carga almacenada en un conductor cuando se aplica una unidad de tensión a ese mismo conductor, encontrándose todos los demás conductores conectados en cortocircuito con la referencia:

$$Q_i = V_i \times B_{ii} = V_i \times \sum_{k=1}^n C_{ik} \quad (8)$$

$$\text{Donde } V_j = 0 \quad \forall j \neq i$$

De esta forma cada uno de los coeficientes de inducción propios sería igual a la suma de las capacitancias propias y mutuas definidas por el conductor.

Los elementos de fuera de la diagonal son los coeficientes de inducción electroestáticos mutuos, representando la carga almacenada en el conductor i cuando una unidad de tensión es aplicada al conductor j mientras todos los demás conductores se encuentran conectados en cortocircuito a la referencia.

$$Q_i = V_i \times B_{ij} = V_i \times (-C_{ij}) \quad (9)$$

$$\text{Donde } V_i = 0 \quad \forall j \neq i$$

Matriz conductancia por unidad de longitud

El término conductancia por unidad de longitud relaciona todas las tensiones del circuito con la corriente transversa total que pasa entre los conductores, siendo representada de la siguiente forma:

$$G = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n g_{1k} & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & \sum_{k=1}^n g_{2k} & \cdots & g \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & \sum_{k=1}^n g_{nk} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Siendo:

$$I_t = G \times V \quad (11)$$

Donde:

I_t es la intensidad transversa en A.

G es la conductancia en S/m.

V es la tensión de las líneas en V.

Los elementos de la diagonal de la matriz representan la suma de la conductancia propia y mutua del conductor i , mientras que los demás elementos al valor negativo del coeficiente de conductancia mutua entre el conductor i y el conductor j .

Normalmente los valores de la matriz G son muy pequeños en los rangos de frecuencia estudiados, por lo que se suele considerar como una matriz nula. Por esta razón normalmente no se suele medir este parámetro en el laboratorio optimizando la gestión de los recursos y el tiempo. Sin embargo, se ha comprobado en las simulaciones realizadas en este trabajo, que efectivamente este parámetro puede ser despreciado, teniendo un valor máximo de 0,1 pS hasta una frecuencia de 10 MHz, y alcanzando un valor máximo de 0.75 mS a una frecuencia de 1 GHz.

Capítulo 3: Procedimientos de medida de los parámetros por unidad de longitud del cable

Aunque existen diferentes técnicas y métodos para el cálculo teórico de los parámetros por unidad de longitud de un circuito basados en las características de los materiales y parámetros geométricos, estos normalmente están basados en aproximaciones y en hipótesis que acarrearán un error en el resultado obtenido [4].

Con objeto de evitar aproximaciones, se considera más exacta la realización de medidas de los cables reales. Con la medida directa el error pasa a estar relacionado con la precisión y la incertidumbre de la medida realizada en lugar de depender de los errores debido a simplificaciones del modelo. Existen diferentes métodos para realizar mediciones de los parámetros eléctricos de un circuito en función de los equipos utilizados y el número de circuitos a medir [3], [9]. A continuación se indican los métodos de medida utilizados en este trabajo basados en el uso de un equipo de medida de LRC.

Inductancia y Resistencia

Debido a la dependencia de la inductancia con la frecuencia, se aconseja que la medida de este parámetro a altas frecuencias sea realizada en cables cortos, de un metro de longitud aproximadamente, con objeto de evitar efectos de resonancia. Uno de los principales objetivos de la medida de la inductancia es la obtención del comportamiento del cable frente a la emisión o recepción de señales electromagnéticas.

Para la medida de la inductancia propia, elementos de la diagonal de la matriz de inductancia, se cortocircuita el conductor i con la referencia mientras que los demás conductores se encuentran en circuito abierto. Se conecta el medidor LRC entre el conductor i y la referencia obteniéndose de forma directa el valor de L_{ii} . A continuación en la Figura 8 se representa el esquema de montaje utilizado en este trabajo, usando como ejemplo un cable de tres fases y un neutro.

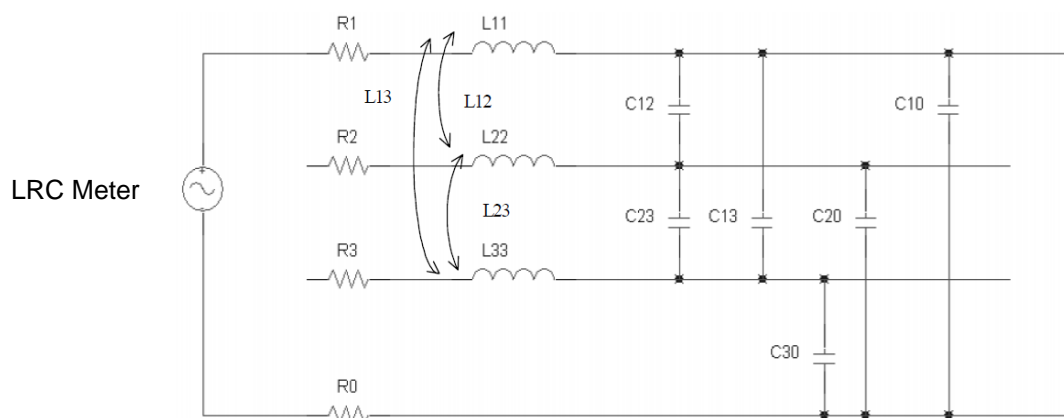


Figura 8: Esquema de montaje utilizado para la medida de la inductancia propia L_{ii}

Los componentes de fuera de la diagonal de la matriz de inductancia L_{ij} no pueden ser medidos de forma directa, es necesario medir la inductancia mutua M_{ij} de forma previa. Para la medida de la inductancia mutua M_{ij} es necesario conectar el conductor i con el conductor j , mientras que todos los

demás conductores y la referencia se mantienen en circuito abierto. El esquema de montaje utilizado en este trabajo se representa en la Figura 9.

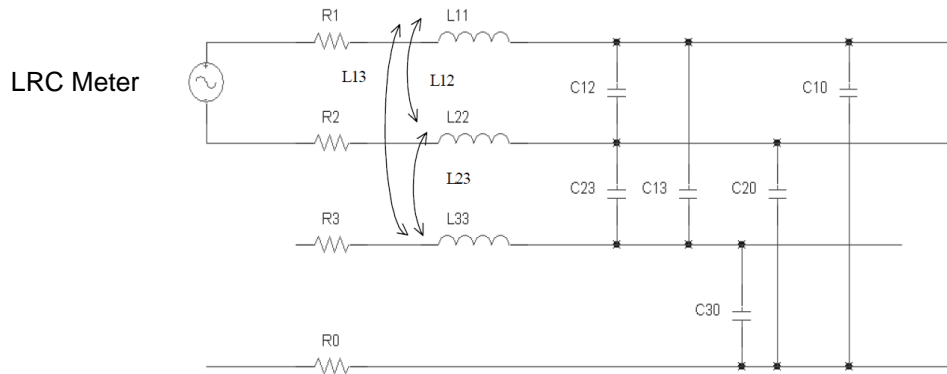


Figura 9: Esquema de montaje utilizado para la medida de la inductancia mutua M_{ij}

El cálculo de cada componente de fuera de la diagonal de la matriz de inductancia L_{ij} se realiza siguiendo la siguiente ecuación:

$$L_{ij} = \frac{L_{ii} + L_{jj} - M_{ij}}{2} \quad (12)$$

El proceso de medida de la resistencia de cada uno de los conductores puede ser realizada de forma directa con el LRC meter. En el caso de la diagonal ($R_{ii} + R_0$) se obtiene directamente del montaje descrito en la Figura 8 mientras que la medida de los elementos de fuera de la diagonal (R_0) se obtiene midiendo la resistencia de la referencia, en este proyecto mediante el método de cuatro hilos. Cabe mencionar que para el cálculo de la propagación del ruido, la matriz de resistencia se obtiene en corriente continua y se tiene en cuenta el efecto de la frecuencia utilizando algoritmos específicos.

Capacitancia

El proceso de medida de las capacitancias es más complejo que los anteriores presentados. En este trabajo se han seguido los procesos descritos en [8], [24] y [25]. El paso inicial consiste en definir las capacitancias propias y mutuas (denominadas en este trabajo como $C_{p_{ij}}$) entre los diferentes conductores tal como se describe en la Figura 10.

Se denomina $C_{m_{ij}}$ al valor medio de la capacitancia con respecto a la referencia cuando se cortocircuitan todos los conductores comprendidos entre i y j . En el caso de $C_{m_{ii}}$ la medida se hace entre el conductor i y la referencia tras cortocircuitar todos los demás conductores a la referencia. Debido al esquema de montaje definido las matrices de $C_{p_{ij}}$ y $C_{m_{ij}}$ son simétricas por lo que:

$$C_{p_{ij}} = C_{p_{ji}} \quad (13)$$

$$C_{m_{ij}} = C_{m_{ji}} \quad (14)$$

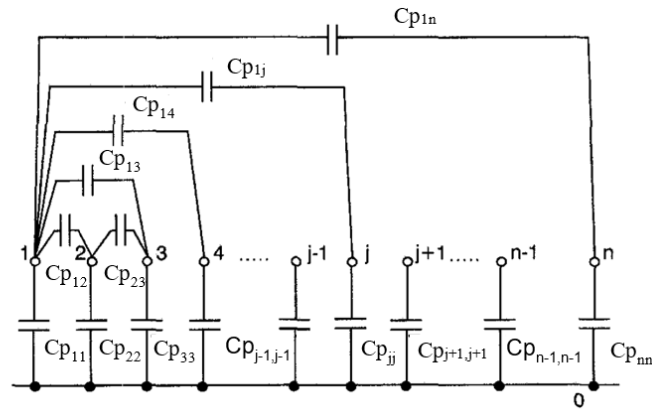


Figura 10: Capacitancias propias y mutuas de un cable multiconductor

La simetría implica la relación entre $C_{p_{ij}}$ y $C_{m_{ij}}$ en lugar de ser de n^2 es de $n * (n + 1)/2$ ecuaciones.

En Figura 11 se recoge el esquema de montaje para n conductores.

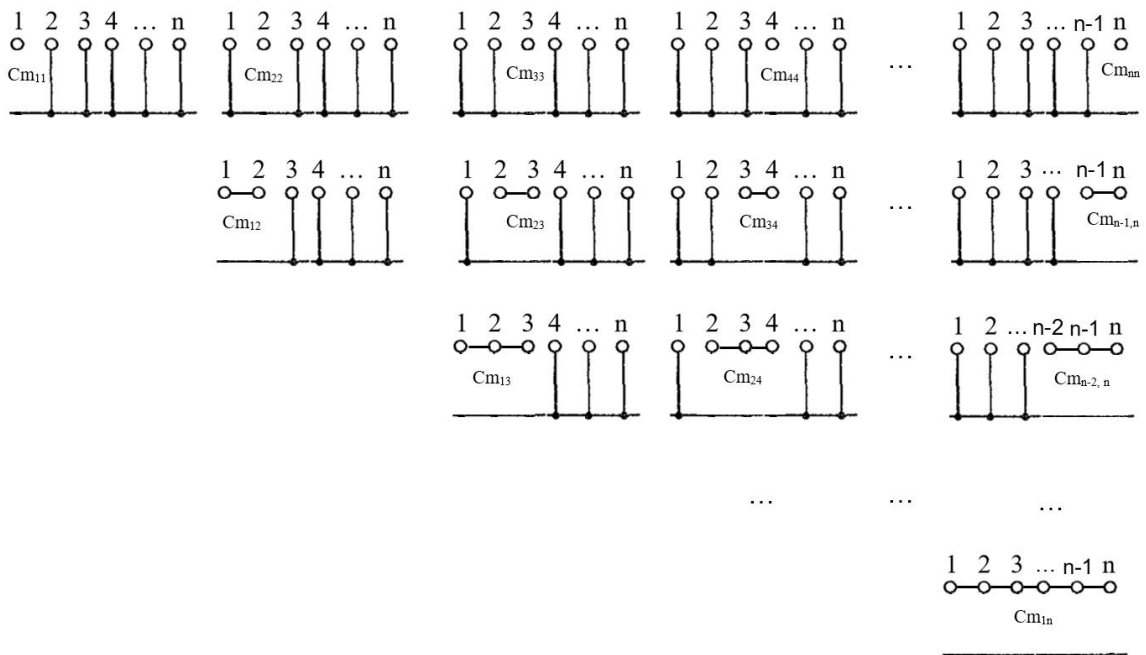


Figura 11: Esquemas de montaje para medida de $C_{m_{ij}}$

Se observa que la notación $C_{m_{ij}}$ y $C_{p_{ij}}$ en el montaje solo se usa cuando se cumple $i \leq j$. Dado que todos los nodos entre i y j están conectados se puede escribir la relación entre $C_{m_{ij}}$ y $C_{p_{ij}}$ de la siguiente forma:

$$C_{m_{ii}} = \sum_{k=1}^n C_{p_{ik}} \quad (15)$$

$$C_{m_{ij}} = \sum_{k=i}^j \sum_{s=1}^n [1 - \delta_s(1 - \delta_{ks})A_{ks}] \quad (16)$$

Para $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$ y con $i \leq j$ y donde:

$$\delta_s = \begin{cases} 1 & \text{para todo } s \text{ que cumpla la condición: } i \leq s \leq j \\ 0 & \text{para todos los demás casos} \end{cases}$$

$$A_{ks} = \begin{cases} C_{p_{ks}} & \text{cuando } k \leq s \\ C_{p_{sk}} & \text{cuando } k > s \end{cases}$$

$$\delta_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{cuando } k = s \\ 0 & \text{cuando } k \neq s \end{cases}$$

De esta forma se pueden definir los vectores $Cm^T = [C_{m11}, C_{m12}, \dots, C_{m1n}, C_{m22}, C_{m23}, \dots, C_{m2n}, \dots, C_{mnn}]$ y $Cp^T = [C_{p11}, C_{p12}, \dots, C_{p1n}, C_{p22}, C_{p23}, \dots, C_{p2n}, \dots, C_{pnn}]$ donde la T indica que es la transpuesta del vector para simplificar la notación, y escribir la relación de forma matricial:

$$Cm = H \times Cp \quad (17)$$

Donde la matriz cuadrada H indica la relación entre los vectores Cp y Cm descrita en las ecuaciones 15 y 16.

Por otra parte, debido a la simetría de la matriz de capacitancias se pueden describir los valores de la matriz de capacitancia de forma vectorial como $C^T = [C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1n}, C_{22}, C_{23}, \dots, C_{2n}, \dots, C_{nn}]$. De esta forma, tal como se indicó en el tema anterior la relación entre C_{ij} y C_{ji} sería:

$$C_{ii} = \sum_{k=1}^n C_{p_{ik}} \quad (18)$$

$$C_{ij} = -C_{p_{ik}} \quad (19)$$

Se puede escribir la relación entre los vectores C y Cp de la siguiente forma:

$$C = D \times Cp \quad (20)$$

Donde D es una matriz cuadrada que recoge las relaciones descritas en las ecuaciones 18 y 19. Finalmente, se puede obtener la relación entre la matriz de capacitancias C y los valores medidos Cm como:

$$C = D^{-1} \times H^{-1} \times Cm \quad (21)$$

Con los algoritmos mencionados se puede programar el tratamiento de datos de las medidas realizadas dado que con el aumento del número de conductores es inviable realizar el cálculo de las matrices H y D manualmente.

Ejemplo de montaje realizado para la medida de un cable de 3 conductores

Se ilustra a continuación el ejemplo de medida de las capacitancias para 3 conductores que fue empleado en este proyecto, como paso previo a la medida del prototipo de 36 conductores. Para obtener los parámetros de la matriz de capacitancia es necesario realizar una serie de medidas previas, en el caso concreto de tres conductores con una referencia son necesarias seis medidas de la capacitancia en diferentes configuraciones obteniendo lo que se ha denominado C_{mii} y C_{mij} . Los esquemas de montaje utilizados en este trabajo para las medias se recogen en la Figura 12.

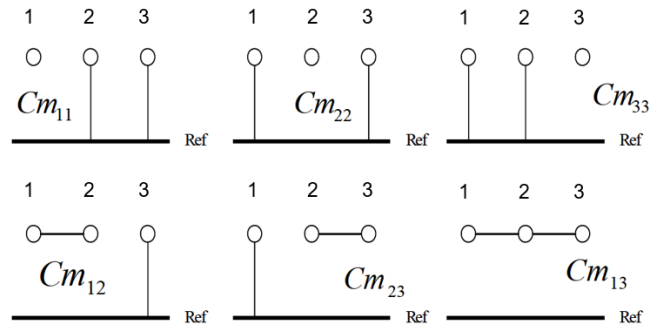


Figura 12: Esquemas de montajes utilizados para la medida de los Cm_{ii} y Cm_{ij}

Para este caso concreto, debido a que la matriz de Capacitancia es simétrica son necesarias solo seis ecuaciones con seis incógnitas, en lugar de las nueve ecuaciones con nueve incógnitas que se necesitan para una matriz de 3x3. Si analizamos los resultados obtenidos para cada valor de Cm según los montajes indicados es posible observar que:

$$Cm_{11} = C_{10} + C_{12} + C_{13} \quad (22)$$

$$Cm_{22} = C_{22} + C_{12} + C_{23} \quad (23)$$

$$Cm_{33} = C_{33} + C_{13} + C_{23} \quad (24)$$

$$Cm_{12} = C_{10} + C_{13} + C_{22} + C_{23} \quad (25)$$

$$Cm_{13} = C_{10} + C_{20} + C_{30} \quad (26)$$

$$Cm_{23} = C_{12} + C_{22} + C_{33} + C_{13} \quad (27)$$

De esta forma es posible obtener la matriz de capacitancia C , en función de los coeficientes de inducción electrostáticos B , según el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C = D^{-1} \times H^{-1} \times Cm \quad (28)$$

$$Cm = \begin{pmatrix} Cm_{11} \\ Cm_{12} \\ Cm_{13} \\ Cm_{22} \\ Cm_{23} \\ Cm_{33} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{33} \end{pmatrix} \quad (29); (30)$$

$$H^{-1} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0 \\ 0,5 & -0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,5 & 0 \\ -0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,5 & 0,5 \\ 0 & -0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$D^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Capítulo 4: Modelos y simulaciones previas

Debido a la complejidad del prototipo del cable para el experimento de física de partículas, se consideró necesaria la realización de modelos y simulaciones previas de cables más sencillos [28] y [29]. El objeto no era solo la validación de los resultados obtenidos con el software sino el aseguramiento y fundamento de los resultados que se obtenidos posteriormente con el modelo del prototipo complejo de 36 conductores. Este proceso serviría de aprendizaje del manejo del software Ansys mientras que además serviría para comprobar la precisión de los cálculos de simulación utilizando elementos finitos, contrastando los resultados obtenidos con resultados recogidos en la bibliografía y resultados medidos en el laboratorio físicamente.

A continuación se presenta un resumen de los modelos previos. En el Anexo A se recoge la información de forma detallada.

Simulación de dos conductores y plano de referencia infinito

El primer modelo realizado consistió en dos conductores paralelos con un plano de referencia infinito. Este modelo estaba basado en los resultados y esquemas descritos en [3]. Se logró realizar un modelo cuyo error de los parámetros obtenidos era inferior al 5% con respecto a la mencionada publicación.

En la Figura 13 se recogen los datos del artículo junto con el modelo realizado mientras que en la Tabla 1 se recogen los resultados obtenidos.

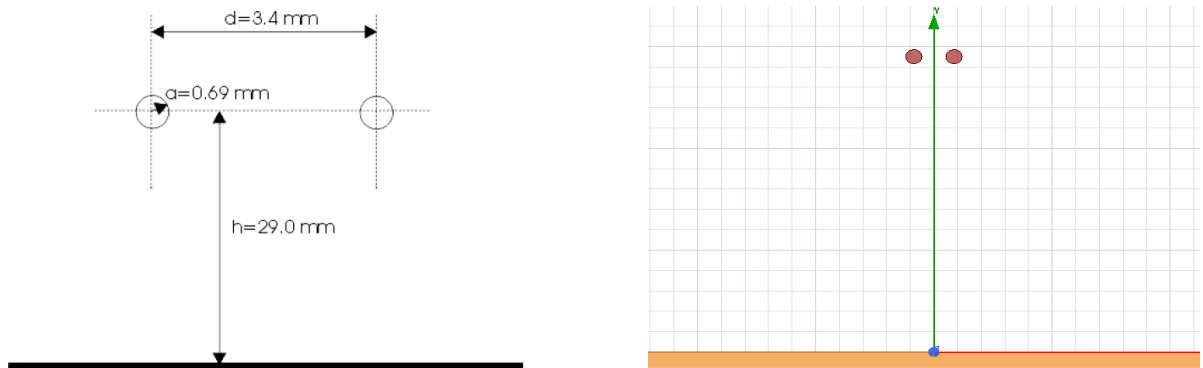


Figura 13: En la parte izquierda se representa el modelo de partida y en la parte derecha el modelo.

Tabla 1 Resultados del segundo modelo de simulación. Errores inferiores al 5% por lo que se considera válida la simulación.

<i>Error on L Matrix 100 kHz Simulation vs Calculated</i>			<i>Error on C Matrix 100 kHz Simulation vs Paper_Calc</i>		
	L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]		C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]
L(Cable_1) [nH]	3,00%	0,14%	C(Cable_1) [pF]	2,00%	3,24%
L(Cable_2) [nH]	0,14%	3,00%	C(Cable_2) [pF]	3,24%	2,00%

Simulación de un cable de potencia de cuatro conductores sin pantalla

El siguiente modelo realizado estuvo basado en el cable Powerflex RV-K 4G-2,5 del fabricante Top Cable. Consiste en un cable de cuatro conductores de 2,5 mm² de sección cada uno en una misma manguera, con un aislante externo de PVC además de los aislantes propios de cada conductor.

Los parámetros eléctricos fueron medidos con el Precision Component Analyzer Wayne Kerr 6425 del laboratorio del departamento de Ingeniería Eléctrica. En este equipo el procedimiento de medida es manual y no existe posibilidad de exportación automática de los resultados de medida, por lo que el rango de frecuencia se quedó restringido a frecuencias comprendidas entre 500 Hz y 150 kHz. El método de medida aplicado es el indicado en el capítulo previo. Para asegurar que el cable estuviera debidamente recto, se preparó un soporte con ayuda de los técnicos del laboratorio de Ingeniería Eléctrica.

Adicionalmente se realizaron medidas en el laboratorio eléctrico del ITA con el equipo Precision LCR meter Instek LCR-8101G. Debido a la automatización de la medida y a la facilidad de exportación de los datos a Excel, la banda de frecuencia medida estaba comprendida entre 1 kHz y 1 MHz. Los tratamientos de datos para la obtención de las matrices de los parámetros eléctricos fueron realizados inicialmente con el software EES (Engineering Equation Solver), aunque finalmente se prefirió la redacción de *scripts* en VBA (Visual Basic) en Excel.

Los resultados obtenidos con los dos equipos de medida fueron coherentes y con un error inferior al 5% en el rango de medidas que coincidían. Se creó un modelo inicial basado en las características geométricas del cable estimados de norma IEC 60228:2004 en la cual está certificado el fabricante [33]. Los resultados de este modelo tenían un error de hasta un 27% con respecto a las medidas reales.

Para mejorar el modelo se realizaron medidas geométricas en el laboratorio de metrología del departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. El equipo utilizado fue el proyector de perfiles Mitutoyo PJ-250C, equipo que permite medir longitudes por comparación óptica con una resolución de 5 μm . Con las medidas geométricas reales se realizó un modelo del cable más preciso. Posteriormente, en el modelo se ajustaron la disposición de los cables con desviaciones de hasta 150 μm para compensar los efectos del proceso de fabricación, creando así una disposición asimétrica de los conductores. De esta forma se logró un modelo final con menos de un 6% de error en los parámetros eléctricos por unidad de longitud.

En la Tabla 2 se recoge el resumen de los resultados para 950 kHz y en la Figura 14 se recoge el cable real, el equipo de medida Wayne Kerr, las muestras del cable, un ejemplo de los puntos medidos en el proyector de perfiles y el modelo final del cable considerando la disposición asimétrica de los conductores.

Tabla 2 Resumen de los resultados del modelo final para 950 kHz

	L11 (nH)	L12 (nH)	L13 (nH)	L22 (nH)	L23 (nH)	L33 (nH)	C11 (pF)	C12 (pF)	C13 (pF)	C22 (pF)	C23 (pF)	C33 (pF)
Medida	690,2	416,4	351,4	569,9	225,6	502,2	80,1	-37,2	-37,7	81,0	-5,4	78,3
Simulación	702,3	396,9	331,5	584,2	219,4	508,7	81,0	-38,7	-36,7	78,5	-5,5	80,7
Error	1,74%	4,69%	5,66%	2,50%	2,77%	1,28%	0,96%	3,92%	2,83%	3,15%	1,12%	2,91%

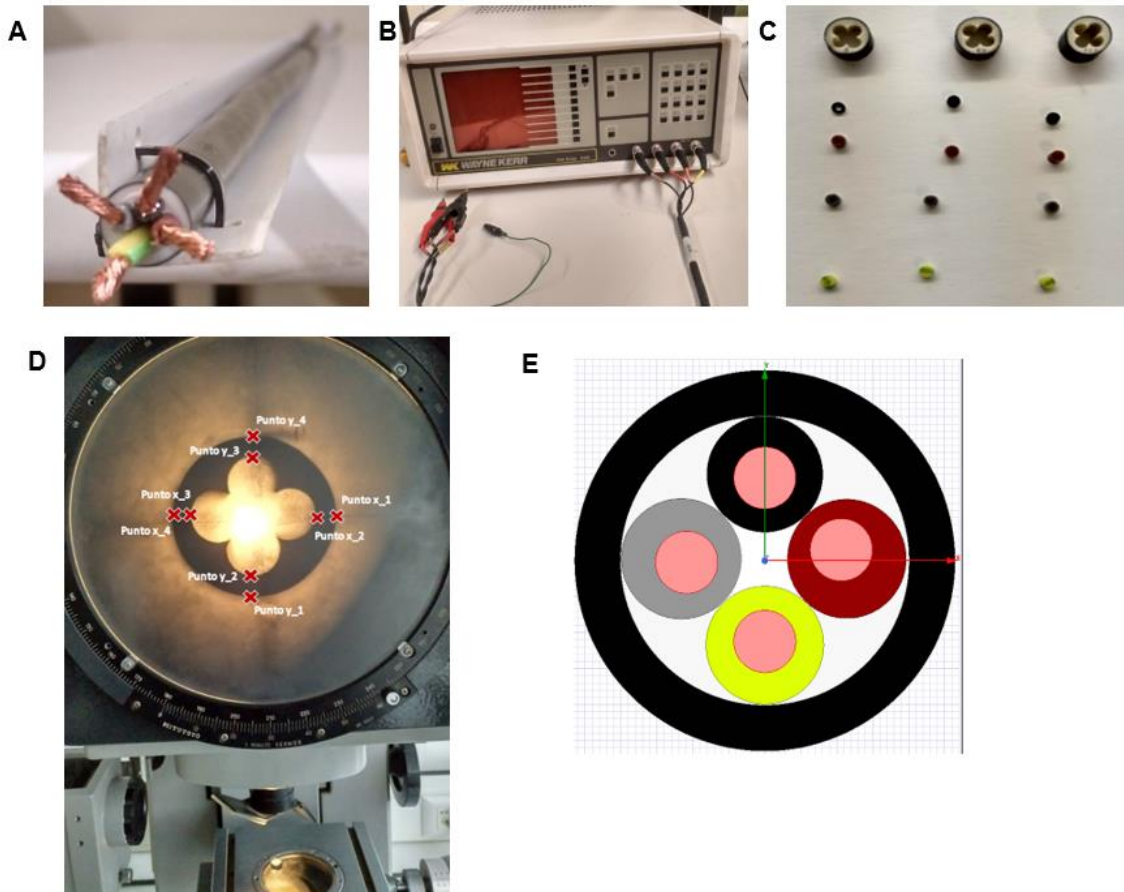


Figura 14: A) Cable real con el soporte; B) Analizador Wayne Krier 6425; C) Muestras para las medidas geométricas; D) Ejemplo de puntos medidos en el proyector de perfiles; E) Modelo final del cable

Tras disponer del modelo validado se realizó un estudio del efecto de las variaciones del proceso de fabricación del cable en los parámetros eléctricos. Se analizaron variaciones entre 50 μm - 150 μm en la disposición de los conductores. En este caso se observó variaciones de hasta un 7,0% para la capacitancia y de 8,8% para la inductancia. Se observa que la inductancia es más sensible a los cambios provocados debido a la variación de la disposición de los conductores. En la Tabla 3 se resumen los resultados de las variaciones máximas obtenidas de las variaciones en los conductores en comparación con el modelo validado.

Tabla 3 Resumen de variaciones máximas obtenidas para desviaciones en la disposición de cada uno de los conductores y en la referencia

Desplazamiento	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3		Referencia		Máximo	
	C	L	C	L	C	L	C	L	C	L
Max 50 μm	2,30%	3,32%	2,20%	4,89%	2,16%	4,58%	1,63%	5,04%	2,30%	5,04%
Max 100 μm	4,61%	4,24%	4,49%	6,59%	4,40%	6,02%	3,37%	6,97%	4,61%	6,97%
Max 150 μm	7,02%	5,40%	6,91%	8,69%	6,73%	7,44%	5,15%	8,89%	7,02%	8,89%

Con objeto de comprobar la propia variabilidad del cable estudiado se volvieron a realizar medidas de los parámetros eléctricos de otro metro del mismo tipo de cable y repitiendo el mismo proceso con los mismos equipos. Se observa que entre las medidas realizadas en las dos muestras de cable, la variación de la capacitancia era inferior a un 2,4% mientras que la variación en la

inductancia era de hasta un 40%. Por lo tanto se observa que la incertidumbre de la inductancia relacionada con el propio cable es demasiado elevada para realizar un modelo del cable con un error muy reducido, debido a la propia variabilidad del proceso de fabricación del cable. Sin embargo, se observa que la incertidumbre de la capacitancia del propio cable es muy reducida. Con esta información es posible prever el orden de magnitud del error esperado tanto para las inductancias como para las capacitancias en los modelos del prototipo complejo de 36 conductores derivadas del propio proceso de fabricación del cable.

Con las conclusiones obtenidas en este modelo se redactó una publicación científica que fue aceptada como póster en el Congreso Europeo de Compatibilidad Electromagnética (EMC Europe) organizada por la asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) [34].

Capítulo 5: Medidas, modelado y simulación de prototipo

Modelo preliminar a partir de las características previstas del prototipo

Mientras que el prototipo se encontraba en proceso de fabricación y envío, se decidió realizar un modelo 2D inicial del cable con los datos del informe de características previstas. El cable del tramo más largo fue seleccionado para este modelo inicial, desde el Power Supply hasta el PP1, suponiendo que se fabricaría este tramo dado que es el de más relevancia. En la Figura 15 se recoge el tramo seleccionado para el primer modelo, compuesto por 32 conductores.

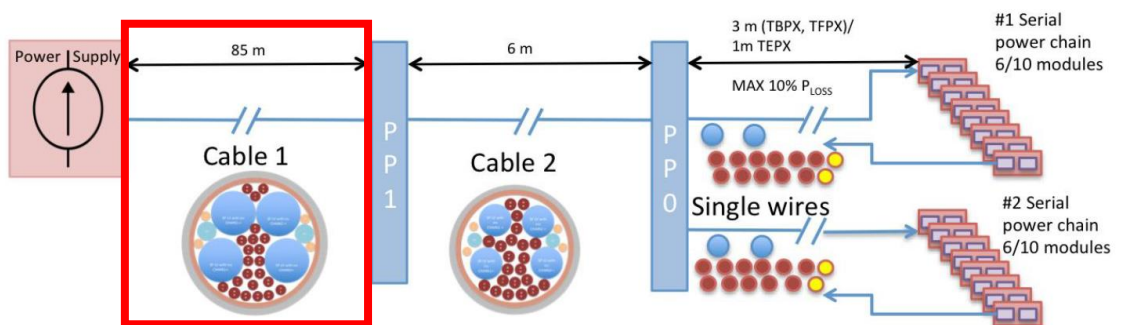


Figura 15: Tramo seleccionado para el modelo inicial.
 Fuente: adaptación del CMS tracker phase 2 upgrade IT services [10]

En el modelo 2D todas las variables geométricas recogidas en el informe de características fueron parametrizadas, formando más de 110 variables que recogen las posiciones en los ejes x , y , z junto con los radios de cada elemento. La parametrización del modelo permite cambios futuros o la creación de otros modelos de forma ágil y la contemplación del eje z permite una exportación más sencilla del modelo 2D a un modelo 3D del cable.

Una de las mayores dificultades en la realización del modelo consistió en considerar correctamente los materiales de cada uno de los elementos, tal como se observa en los modelos previos descritos en el Anexo A. Las siguientes características fueron modeladas:

- Todos los elementos eran circunferencias sin deformaciones.
- Todos los conductores, tanto de señal como de potencia, eran de cobre con una sección maciza, dispuestos de forma simétrica.

- Todos los elementos aislantes eran de polietileno. El interior del cable fue modelado también como aislante.
- La pantalla era como un cilindro de cobre.
- Las propiedades de los materiales eran las recogidas en la librería de predeterminada del software considerando una temperatura de 20° C.

En la Figura 16 se recoge el esquema del cable del informe de características, el modelo creado y un resumen de las variables utilizadas. En el esquema del cable los siguientes elementos están resaltados: 1) Cable LV para alimentar la cadena de módulos; 2) Cable LV para precalentar circuito de refrigeración denominado Preheater; 3) Sensor temperatura; 4) Cables HV; 5) Pantalla; 6) Cubierta

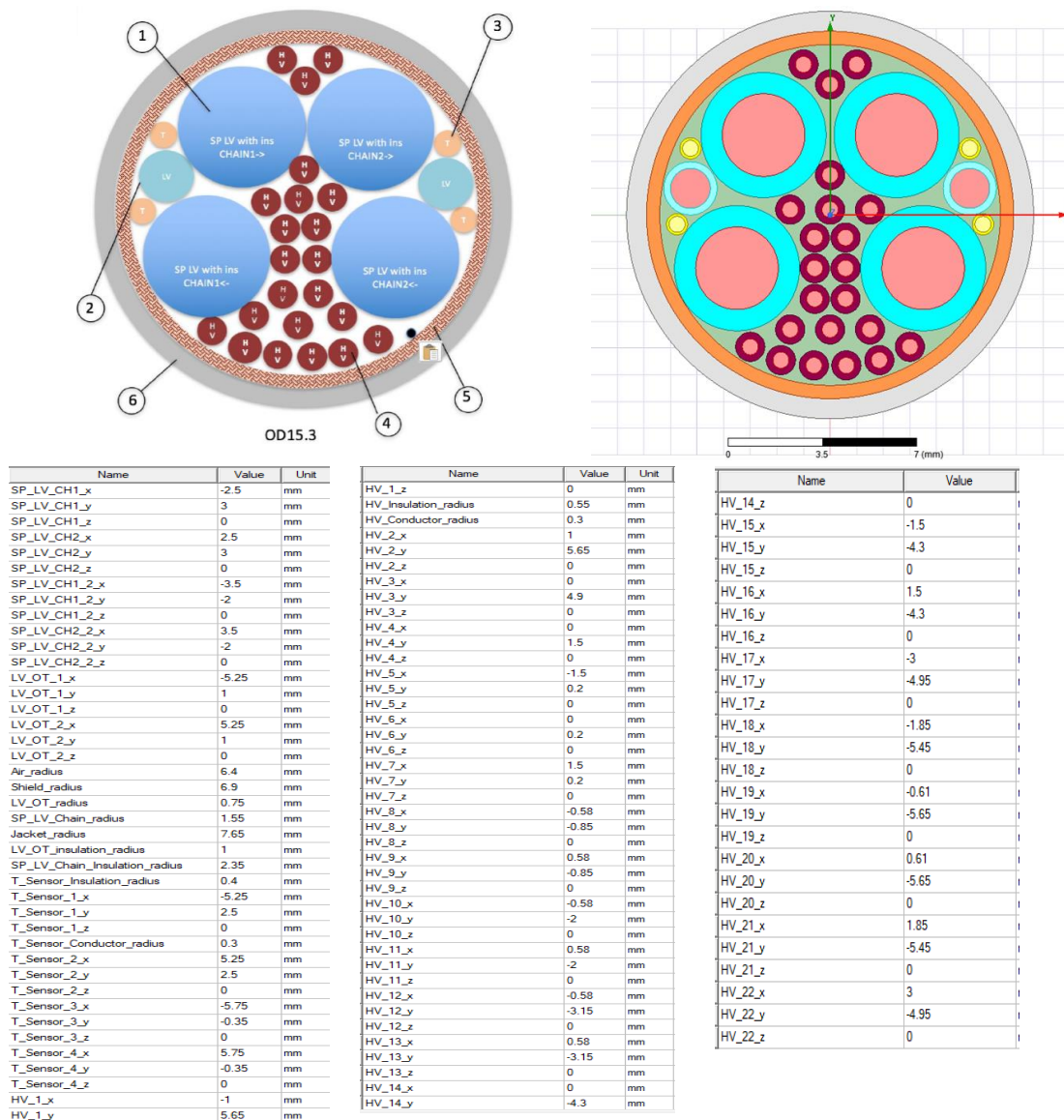


Figura 16: En la parte superior se recoge el esquema previsto del cable junto con el modelo 2D inicial.

En la parte inferior se recoge un resumen de las variables utilizadas.

Fuente del esquema previsto: CMS tracker phase 2 upgrade IT services [10]

Para la simulación de los parámetros eléctricos del cable, se definieron todos los conductores como señal y la pantalla como referencia. En este paso es muy importante cómo se nombra cada una de las señales para que la comparación de los resultados con las medidas experimentales sea correcta, teniendo cada cable el mismo nombre. Gracias a la simetría de las matrices de los parámetros eléctricos se requieren $n*(n + 1) / 2$ en lugar de n^2 elementos para definir las matrices L y C. Es decir, para este cable de 32 conductores se requieren 528 componentes para definir cada una de las matrices L y C. Para la matriz R solo son necesarios 33 valores, los 32 de la diagonal y el valor de la resistencia de la referencia.

Con objeto de optimizar recursos computacionales se decidió simular los parámetros por unidad de longitud del cable multiservicios para las frecuencias de 1kHz, 10 kHz, 100 kHz, 150 kHz, 200 kHz y 300 kHz que son las frecuencias de medidas disponibles en el medidor Wayne Kerr del departamento de Ingeniería Eléctrica.

Con objeto de acelerar el proceso para cuando se dispusiera del prototipo para realizar las medidas en el laboratorio, se decidió tratar los resultados de las simulaciones para obtener los valores que se medirían directamente con los equipos del laboratorio. Para ello se escribieron scripts en lenguaje VBA recogidos en el Anexo B para:

- Trasladar todos los elementos a las mismas unidades: pF para las capacitancias, nH para las inductancias y mΩ para las resistencias.
- Calcular los elementos auxiliares: matrices D y H para las capacitancias de 528x528 elementos cada una siguiendo los algoritmos descritos en el Capítulo 3.
- Obtener los elementos que son medidos directamente con los equipos de laboratorio: Lij, Mij y Cmij.

En la Figura 17 se recoge un ejemplo de la hoja de cálculo realizada en Excel creado para el cálculo de la matriz H, en la Tabla 4 se recoge un ejemplo de los valores trasladados a los equipos de medida mientras que en la Figura 18 se muestra un ejemplo de los resultados de los parámetros simulados para la inductancia y capacitancia.

Cálculo de la matriz H en función del número de cables Adilson Alberto Moyes 04/02/2020		EJECUTAR CALCULO DE H														NOTA: HAY QUE VACIAR TODAS LAS CELDAS ANTES DE EJECUTAR PARA EVITAR ERROR
Nº de cables	32															
Tamaño del vector v	528															
Matriz H [v x v]	Cmi_j / Cpi_j	Cp1_1	Cp1_2	Cp1_3	Cp1_4	Cp1_5	Cp1_6	Cp1_7	Cp1_8	Cp1_9	Cp1_10	Cp1_11	Cp1_12	Cp1_13	Cp1_14	
Cmi_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_3	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_4	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_5	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_6	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_7	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
Cmi_9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
Cmi_10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
Cmi_11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
Cmi_12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
Cmi_13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Cmi_14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Cmi_15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cmi_23	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 17: Fragmento de la hoja Excel para de tratamiento de datos: cálculo de la matriz H para las capacitancias

Tabla 4: Ejemplo de los valores de simulación trasladados a valores que se medirían en el laboratorio

Freq [kHz]	10	100	150	200	300
Cm(Cable_1,Cable_1) [pF]	215,2385	214,9321	214,8303	214,7555	214,648
Cm(Cable_1,Cable_2) [pF]	406,1891	405,6045	405,41	405,267	405,0617
Cm(Cable_1,Cable_3) [pF]	611,1803	610,322	610,0375	609,8283	609,528
Cm(Cable_1,Cable_4) [pF]	816,166	815,0341	814,6594	814,384	813,9888
Cm(Cable_1,Cable_5) [pF]	957,9746	956,5118	956,022	955,6615	955,1438

Freq [kHz]	10	100	150	200	300
Mij(Cable_1,Cable_1) [nH]	228,11	180,7061	174,813	171,2114	167,0224
Mij(Cable_1,Cable_2) [nH]	373,9321	296,6968	287,7577	282,2926	275,9101
Mij(Cable_1,Cable_3) [nH]	375,1785	298,0937	288,8566	283,1915	276,588
Mij(Cable_1,Cable_4) [nH]	420,9147	332,7558	321,7187	314,9533	307,1132
Mij(Cable_1,Cable_5) [nH]	392,5696	306,7192	293,9747	286,1593	276,9

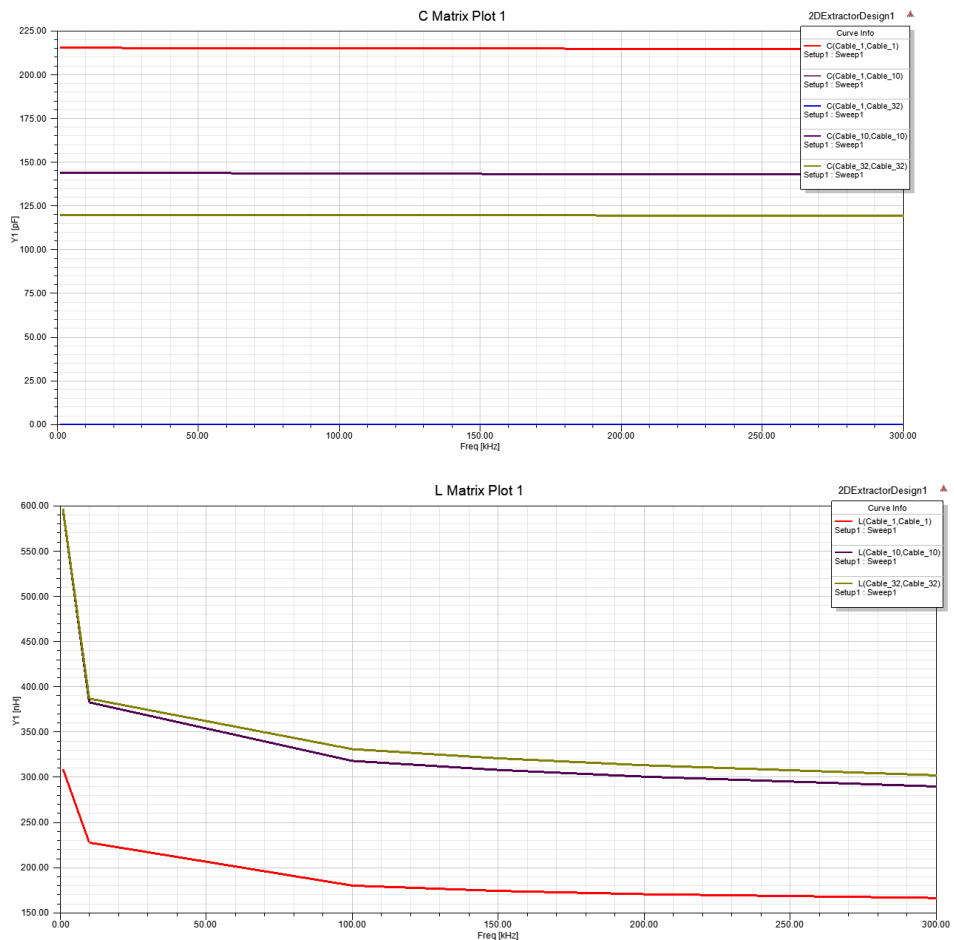


Figura 18: Ejemplo de los resultados obtenidos para las capacitancias e inductancias simulados.

Caracterización del prototipo

Al recibir el prototipo del cable se observaron varias discrepancias con lo indicado en las características previstas. En el diseño y fabricación final decidieron usar un único cable para los dos tramos de alimentación, con las secciones del tramo PP1 – PP0, una disposición de los conductores

diferente y el uso de 8 cables T-Sensor en lugar de 4. En el aislamiento externo del cable se indicaba que estaba compuesto por:

- 4x2,5 mm² para los cables LV, aislamientos de colores marrón, negro, azul y gris cada uno.
- 2x0,5 mm² para los Preheaters, aislamientos de colores rojo y verde cada uno
- 8x0,08 mm² para los T-Sensor, aislamiento de color naranja todos.
- 22x0,22 mm² correspondientes con los 2 x (10+1) cables HV, aislamiento de color blanco todos.

Dado que los datos no coincidían con lo previsto y la complejidad del cable para la realización del modelo, se decidió obtener sus características más relevantes en el laboratorio. Se separaron todos los elementos observando que:

- La cubierta externa verde era de polietileno.
- La pantalla estaba hecha de aluminio mallado con una hoja de aluminio en su interior.
- Los cables estaban compactados por un plástico transparente.
- Los cables HV estaban dispuestos en la periferia, agrupados de 11 en 11 con dos estabilizadores negros entre los grupos. Todos los cables HV estaban numerados del 1 al 22 en el aislante. El cable 9 tenía un color más oscuro que los demás en todos los tramos, probablemente por exceso de temperatura en el aislante. Estos cables estaban trenzados con una vuelta a cada 20 cm a izquierdas.
- Los demás cables (LV, Preheaters y T-Sensor) estaban agrupados con diferentes estabilizadores formando el bloque interno del cable. Estaban trenzados a derechas con un paso de una vuelta a cada 10 cm. Los cables T-Sensor estaban numerados del 1 al 8.
- Los conductores estaban compuestos por hilos de cobre estañados y con otras aleaciones metálicas propias del proceso de fabricación.

En la Figura 19 se recoge una comparación del cable real con lo descrito en el informe de características mientras que en la Figura 20 se recogen los principales elementos que lo componen.

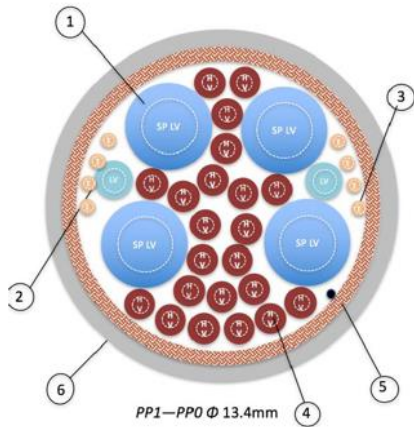


Figura 19: A la izquierda el cable previsto para el tramo PP1 -PP0 a la derecha el prototipo final fabricado.

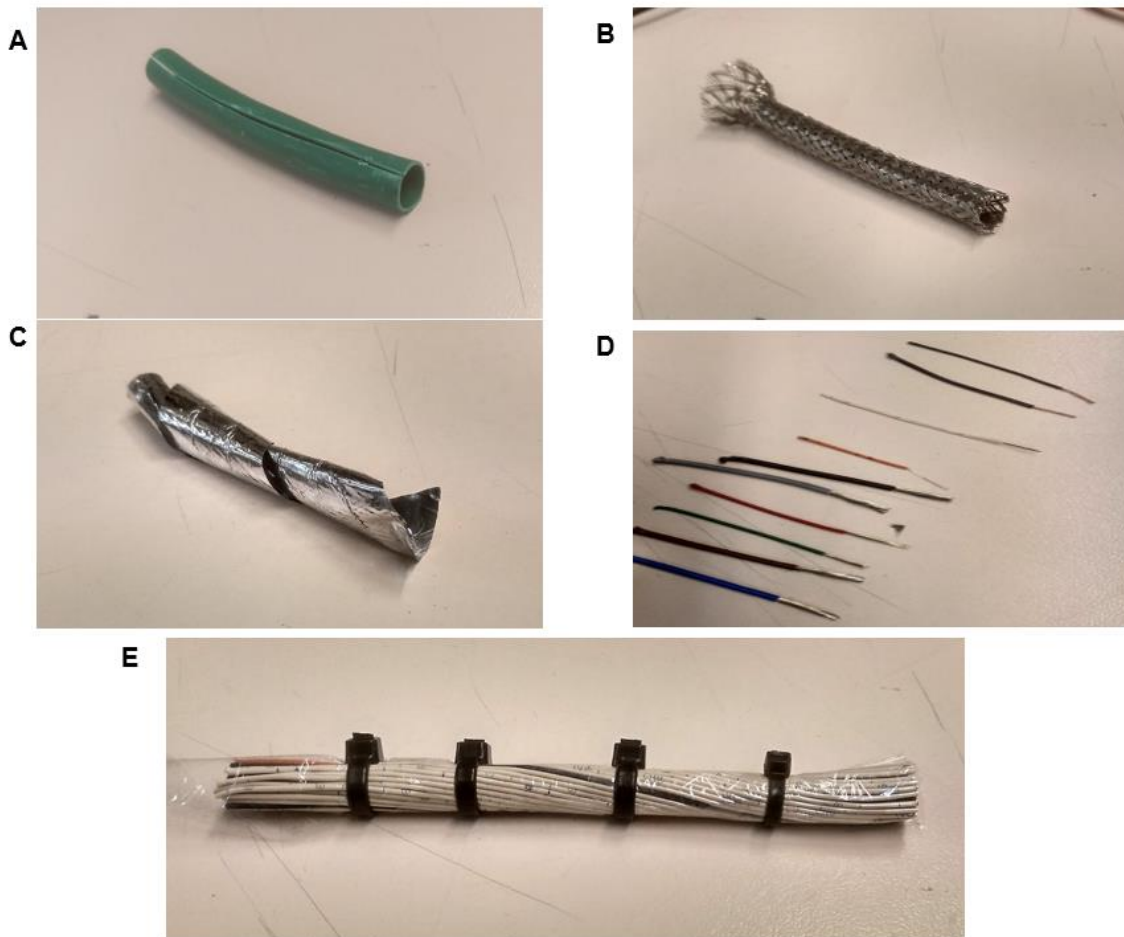


Figura 20: A) Cubierta externa; B) Malla de aluminio de la pantalla; C) Cinta de aluminio de la pantalla; D) Conductores; E) Cables agrupados debajo de la pantalla con plástico transparente, se ha sujetado con bridas para conservar el trenzado

Con objeto de crear un modelo más fiable se decidió medir las características geométricas del cable. Para evitar las deformaciones producidas por el corte de las muestras, con la colaboración del

Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos se utilizó una sierra de cobre con filo de diamante con objeto de tener un corte lo más limpio posible. A una de las muestras se le realizó un tratamiento superficial con diferentes lijas de diferentes tamaños de gránulos.

Para las medidas geométricas se descartó el uso del proyector de perfiles, utilizado en los modelos de los cables sencillos recogido en el anexo A, debido a que el proceso de caracterización de los 36 conductores consumiría muchos recursos y demandaría mucho tiempo de trabajo. Finalmente se optó por realizar una foto en perpendicular de las muestras con una regla patrón apoyada en una mesa de planitud con la ayuda del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Posteriormente, en el ordenador se ampliarían las fotos hasta obtener una escala de 10:1 para realizar directamente tanto las medidas geométricas como la disposición de los elementos. Para las cotas se midió el diámetro de cada uno de los elementos en el eje horizontal, vertical y en ambas diagonales.

Durante el proceso de medidas se observó que a pesar del corte realizado, existían deformaciones notables en los conductores que provocaban que las cotas medidas fueran superiores a lo real. Esto dificultaba la realización del modelo dado que no cabían los conductores asumiendo circunferencias perfectas dentro del cable, habiendo muchas superposiciones que generaban error. Sin embargo, al sacar las medidas con la muestra que tenía un tratamiento superficial se observó que las deformaciones eran despreciables, las cotas eran muy parecidas a las reales y el uso de circunferencias encajaba perfectamente en el modelo.

Adicionalmente, se observa que en el interior del conductor no estaba relleno de aislante sino de aire. Los aislantes de los cables T-Sensor son mucho mayores que lo especificado en las características iniciales, relleno así los huecos y mejorando la compactación. También se han añadido estabilizadores, cables hecho de cuerda cubierta por aislante, para mejorar la compactación y rellenar los huecos. Por último, se observa que los conductores tienen un diámetro mayor de lo previsto debido a que el cobre está mezclado con otras aleaciones de menor resistividad, como era necesario asegurar que la resistencia estuviera por debajo de las especificaciones fabricaron las secciones un poco más grandes. Los resultados de las medidas geométricas se encuentran recogidos en el anexo C.

En la Figura 21 se recoge el proceso de corte, el proceso de tratamiento superficial, una muestra del cable con la regla patrón y una comparación utilizando un microscopio entre las muestras sin y con tratamiento superficial.

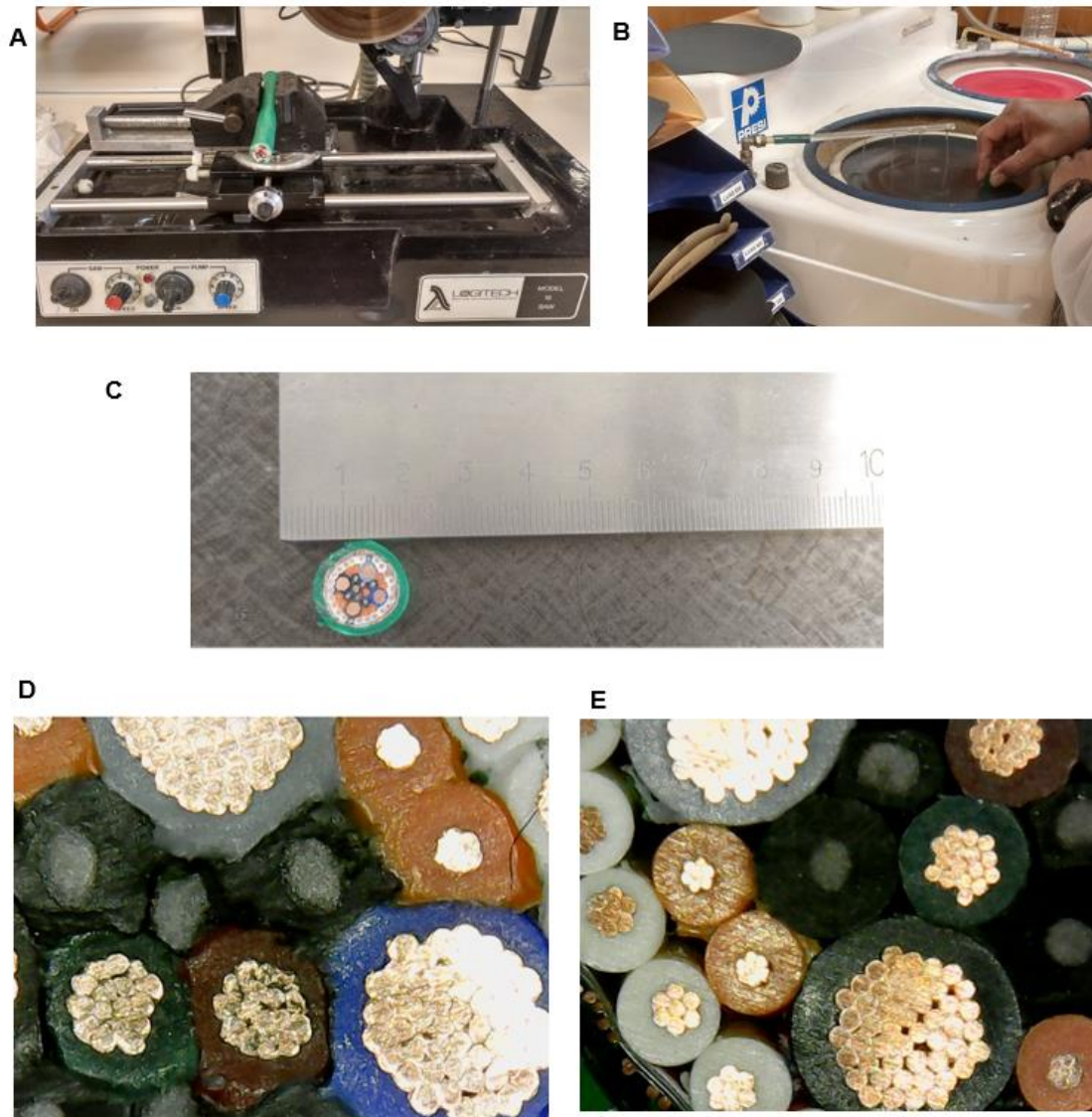


Figura 21: A) Corte de muestras con disco de cobre y filo de diamante; B) Tratamiento superficial; C) Foto para medida de cotas y disposiciones con regla patrón; D) Muestra sin tratamiento superficial; E) Muestra con tratamiento superficial

El siguiente paso consistió en definir un sistema de referencia para la disposición de los cables, este paso es fundamental para garantizar la correcta medida en el laboratorio de los parámetros eléctricos, realizar un modelo correcto y poder comparar ambos resultados. Se decidió iniciar la numeración por los conductores blancos dado que ya se encontraban numerados por el proceso de fabricación del 1 al 22, posteriormente por los naranjas que también tenían numeración propia y el resto de los cables se les distinguía por los colores. Debido a que el cable blanco número 9 era más oscuro que los demás, se ha podido reconocer a cada uno de los 36 cables en todas las fotos respetando el sistema de referencia trazado. En la Tabla 5 se recoge el sistema de leyenda utilizado y en la Figura 22 se recoge el sistema de referencia establecido.

Tabla 5: leyenda del sistema de referencia de la numeración de los conductores

Numeración real	Numeración de tratamiento de datos
Cable Blanco 1	Cable 1
Cable Blanco 2	Cable 2
Cable Blanco 3	Cable 3
Cable Blanco 4	Cable 4
Cable Blanco 5	Cable 5
Cable Blanco 6	Cable 6
Cable Blanco 7	Cable 7
Cable Blanco 8	Cable 8
Cable Blanco 9	Cable 9
Cable Blanco 10	Cable 10
Cable Blanco 11	Cable 11
Cable Blanco 12	Cable 12
Cable Blanco 13	Cable 13
Cable Blanco 14	Cable 14
Cable Blanco 15	Cable 15
Cable Blanco 16	Cable 16
Cable Blanco 17	Cable 17
Cable Blanco 18	Cable 18
Cable Blanco 19	Cable 19
Cable Blanco 20	Cable 20
Cable Blanco 21	Cable 21
Cable Blanco 22	Cable 22
Cable Naranja 1	Cable 23
Cable Naranja 2	Cable 24
Cable Naranja 3	Cable 25
Cable Naranja 4	Cable 26
Cable Naranja 5	Cable 27
Cable Naranja 6	Cable 28
Cable Naranja 7	Cable 29
Cable Naranja 8	Cable 30
Cable Marrón	Cable 31
Cable Azul	Cable 32
Cable Gris	Cable 33
Cable Negro	Cable 34
Cable Rojo	Cable 35
Cable Verde	Cable 36



Figura 22: A la izquierda sistema de referencia definido para las medidas y para la generación del modelo, a la derecha el uso del cable 9 para la identificación de todos los demás conductores en una foto de medida de dimensiones geométricas

Medidas de los parámetros eléctricos en laboratorio

Para las medidas en el laboratorio se preparó 1,25 metros de cable sujetado en un soporte plano. Debido a que no se encontraba disponible el equipo Precision LCR meter Instek LCR-8101G, se utilizó únicamente el Wayne Kerr del laboratorio de Ingeniería Eléctrica. Dado que no se disponía de un medio

de exportación automático, se realizaron medidas solo a 200 y 300 kHz, frecuencias donde se preveía que las inductancias se podrían considerar como constantes y que ya no estarían afectadas por el efecto pelicular.

Al estar el cable formado por 36 conductores, fue necesario realizar en total 1332 montajes para obtener los componentes de las matrices M_{ij} y C_{mij} (666 para las inductancias y 666 para las capacitancias), necesarias para el cálculo de las matrices de inductancia y capacitancia respectivamente. Se realizaron las medidas de estos componentes a 200 y 300 kHz siguiendo el proceso descrito en el Capítulo 3. Se utilizó el método de medida lento del equipo que garantiza mayor precisión. Se realizaron tres medidas por montaje y frecuencia para comprobar la estabilidad de las medidas. Las capacitancias se midieron fijando 1 V para el circuito abierto y las inductancias se midieron fijando 100 mA para el circuito cerrado.

Para las conexiones se planteó el uso de fichas grandes de unión de conductores, sin embargo dado el elevado número de montajes a realizar se decidió finalmente conectar los cables utilizando cocodrilos.

Tras realizar las medidas de las inductancias y capacitancias se observa una variación máxima de las inductancias medidas entre 300 y 200 kHz de un -7%, lo que indica que se puede considerar este rango de frecuencias como una zona constante de la curva de inductancias. Para la capacitancia la desviación máxima es aún menor llegando al 2%, confirmando lo esperado que se mantuviera invariable en función de la frecuencia. En la Tabla 6 se recoge un fragmento de las medidas de la capacitancia e inductancia.

Tabla 6: Fragmento de las medidas realizadas de las matrices C_{mij} y M_{ij} en el laboratorio para el cálculo de las matrices de capacitancia e inductancia

Núm Medida	Freq [kHz]	200					300					Variacion (300-200)/200
		Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	
1	Cm1_1 [pF]	122	122	122	122	0	123	123	123	123	0	1%
2	Cm1_2 [pF]	202	202	202	202	0	202	202	202	202	0	0%
3	Cm1_3 [pF]	282	282	282	282	0	284	284	284	284	0	1%
4	Cm1_4 [pF]	364	364	364	364	0	366	366	366	366	0	1%
5	Cm1_5 [pF]	443	443	443	443	0	445	445	445	445	0	0%
6	Cm1_6 [pF]	518	518	518	518	0	519	519	519	519	0	0%
7	Cm1_7 [pF]	597	597	597	597	0	598	598	598	598	0	0%
8	Cm1_8 [pF]	675	675	675	675	0	676	677	676	676	1	0%
9	Cm1_9 [pF]	754	755	754	754	1	755	756	755	755	1	0%

Núm Medida	Freq [kHz]	200					300					Variacion (300/200)/200
		Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	
1	M1_1 [nH]	684	684	682	683	2	653	652	652	652	1	-5%
2	M1_2 [nH]	815	815	816	815	1	790	790	790	790	0	-3%
3	M1_3 [nH]	1116	1117	1116	1116	1	1072	1072	1072	1072	0	-4%
4	M1_4 [nH]	1156	1155	1156	1156	1	1102	1104	1102	1103	2	-5%
5	M1_5 [nH]	1177	1178	1177	1177	1	1124	1124	1124	1124	0	-5%
6	M1_6 [nH]	1161	1161	1161	1161	0	1114	1112	1112	1113	2	-4%
7	M1_7 [nH]	1208	1208	1209	1208	1	1164	1164	1164	1164	0	-4%
8	M1_8 [nH]	1207	1208	1208	1208	1	1164	1164	1164	1164	0	-4%
9	M1_9 [nH]	1157	1157	1156	1157	1	1112	1112	1112	1112	0	-4%
10	M1_10 [nH]	1225	1225	1224	1225	1	1180	1180	1182	1181	2	-4%

Al realizar las medidas de la inductancia se observa que cualquier variación o movimiento en los conductores a medir o en las pinzas alteraban considerablemente los resultados, llegando a ser la variación de hasta un 26% en los elementos M_{11} y M_{12} . Esto es debido a que los conductores dentro del cable están compactados y el área entre ellos es relativamente pequeña. En los extremos del cable que están al aire, cualquier variación (concretamente separación entre los conductores) aumenta considerablemente el área entre ellos. Esto lleva a errores de medida elevados pudiendo llegar a ser

del mismo orden de magnitud que la propia medida en sí. Por ello se deben realizar las medidas con las pinzas lo más cercanas posibles. Por otra parte, se verificó que no existe alteración en las medidas al variar el valor de la corriente de medida en el circuito cerrado, tras haber probado con 100, 90, 80, 70, 60 y 50 mA respectivamente. En la Figura 23 se recoge dos ejemplos de montaje variando la ubicación las pinzas.

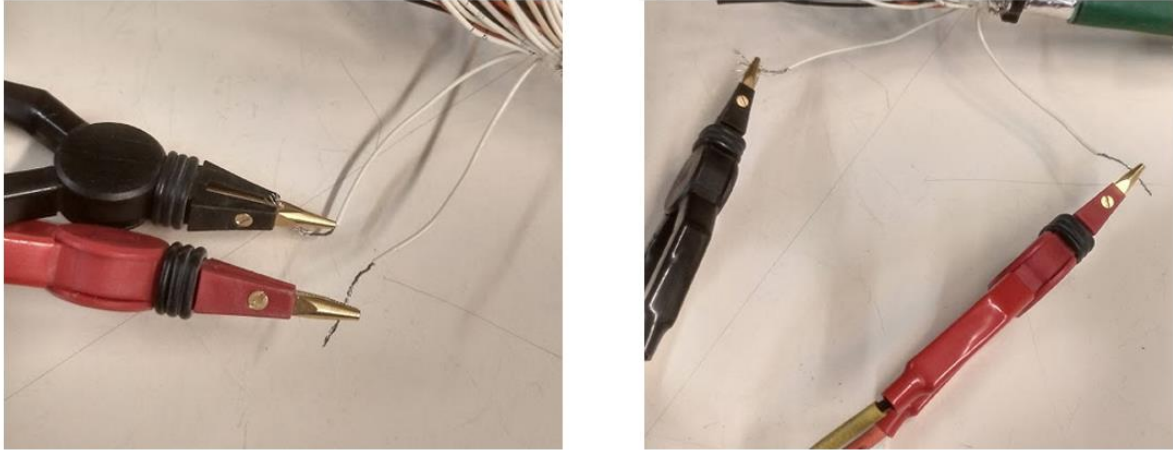


Figura 23: El posicionamiento y la apertura de las pinzas afectan considerablemente a las medidas de la inductancia. A la izquierda se recoge la forma aconsejada que produce menor error de medida. A la derecha se recoge la forma que produce errores de medida elevados.

Las medidas de la capacitancia eran invariables ante cualquier movimiento de los conductores o de las pinzas. También era invariable ante el voltaje especificado tras haber comprobado con valores entre 0,5 V y 1,3 V. Se observa que el cocodrilo aportaba alrededor de 4 pF en las medidas lo que es despreciable dado que el orden de magnitud de las medidas era de cientos de picofaradios.

Para la medida de la matriz R se optó por medir cada uno de los tipos de conductores (HV, LV, T-Sensor, Preheaters y Pantalla) utilizando el método de cuatro hilos. La fuente de alimentación empleada fue el equipo de calibrador multifunción Fluke que es capaz de proporcionar un valor de corriente continua estable con 6 dígitos de precisión. Como multímetro se utilizó el equipo Yokogawa 7552 del laboratorio de Metrología Eléctrica. Para una correcta medida es necesario que los conectores de la medida de tensión estén lo más pegado posible a la parte a la zona con aislante mientras que los conectores de la fuente de intensidad deben estar en las extremidades más lejanas del cable a medir. Tras disponer de los valores de todas las resistencias, se calcularon los elementos de la matriz R. En la Figura 24 se recoge un ejemplo de montaje realizado junto con los equipos empleados.

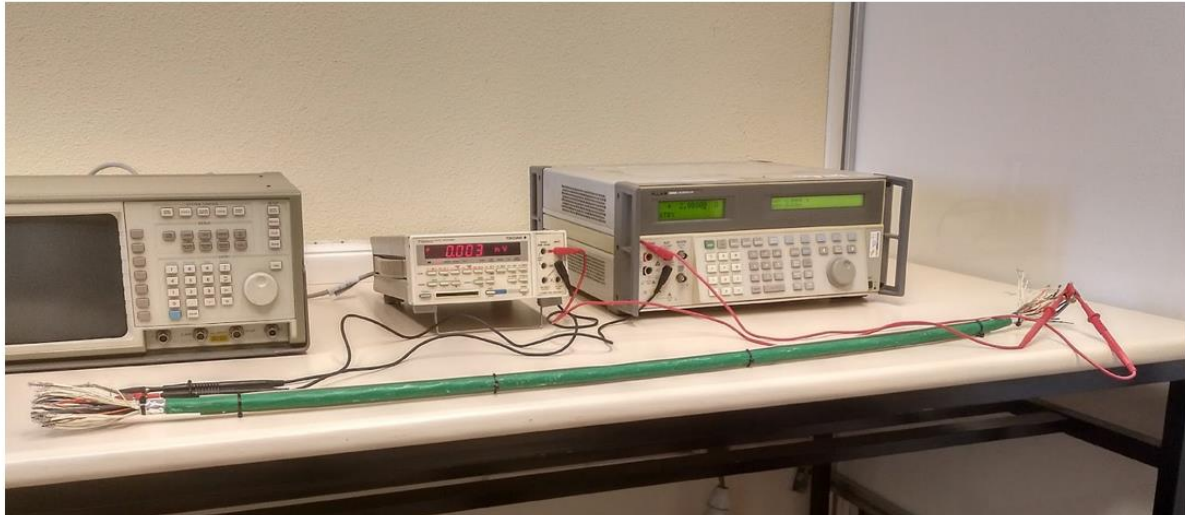


Figura 24: Ejemplo de montaje y equipos de medida utilizados para obtener la resistencia usando el método de cuatro hilos.

De forma adicional, se volvieron a medir los elementos de la matriz R de forma directa con el Wayne Kerr a la frecuencia de 20 Hz, la mínima disponible en el equipo. A esta frecuencia el valor de la resistencia se puede considerar equivalente a la medida en corriente continua debido a que no es apreciable el efecto pelicular. Con este equipo fueron necesarios 37 montajes para el cálculo de la matriz R. La variación de los resultados obtenidos con este equipo en comparación con los resultados obtenidos con el método de cuatro hilos era menor del 6%.

Posteriormente se normalizaron todas las medidas a 1 metro y se realizó el tratamiento de datos utilizando VBA, recogidos en el Anexo B, para obtener las matrices L, R y C definitivas utilizadas para comparar los resultados de las simulaciones realizadas. Un resumen de los datos y resultados de las medidas realizadas en el laboratorio se encuentran recogidos en el Anexo D.

Modelos 2D iniciales

El siguiente paso consistió en la realización de dos modelos 2D, denominados Modelo 1 y Modelo 2, con los datos geométricos medidos del prototipo. Se utilizó como partida el modelo previo descrito al principio de este capítulo, dado que ya se encontraban la mayoría de las variables necesarias parametrizadas.

En ambos modelos se consideraron conductores de cobre distribuidos simétricamente, aislamiento de polietileno incluido los estabilizadores, pantalla como un cilindro macizo de cobre y aire en los huecos entre los cables. Todas las propiedades se obtuvieron de la librería del software considerando los valores a una temperatura de 20°C. Se consideró la distribución simétrica para el modelo dado que se ubicaron los 36 conductores manualmente ajustando la distancia entre los elementos para evitar superposiciones, principalmente de los aislantes. Cada superposición entre alguno de los elementos generaría un error que impediría la creación de la malla de cálculo y por lo tanto la simulación.

El Modelo 1 fue realizado con las cotas nominales descritas en el informe de características del conductor, ubicando los elementos de forma tangencial entre ellos. Las dimensiones de los

estabilizadores utilizadas son las medidas en el laboratorio dado que ellos no estaban contemplados en el informe inicial. Se observa que este sería un modelo teórico donde en el interior del cable existiría muchas zonas con aire y la compactación no sería elevada.

El Modelo 2 fue realizado con los datos reales medidos del prototipo. Se observa que todas las secciones de los conductores son mayores a las descritas en el informe de características, principalmente la de los cables LV que están destinados a transportar mayor corriente. Esto es debido a que no utilizan conductores de cobre puro, sino que se ha añadido diferentes aleaciones metálicas con mayor resistividad. Como es necesario asegurar las características de resistividad solicitadas, fue necesario aumentar la sección de los conductores. Además, se observa que se aumentó el aislamiento de los cables T-Sensor para aumentar la compactación dentro del cable. En este modelo se ha considerado el efecto del aplastamiento en los estabilizadores. A continuación en la Figura 25 se recoge los dos modelos.

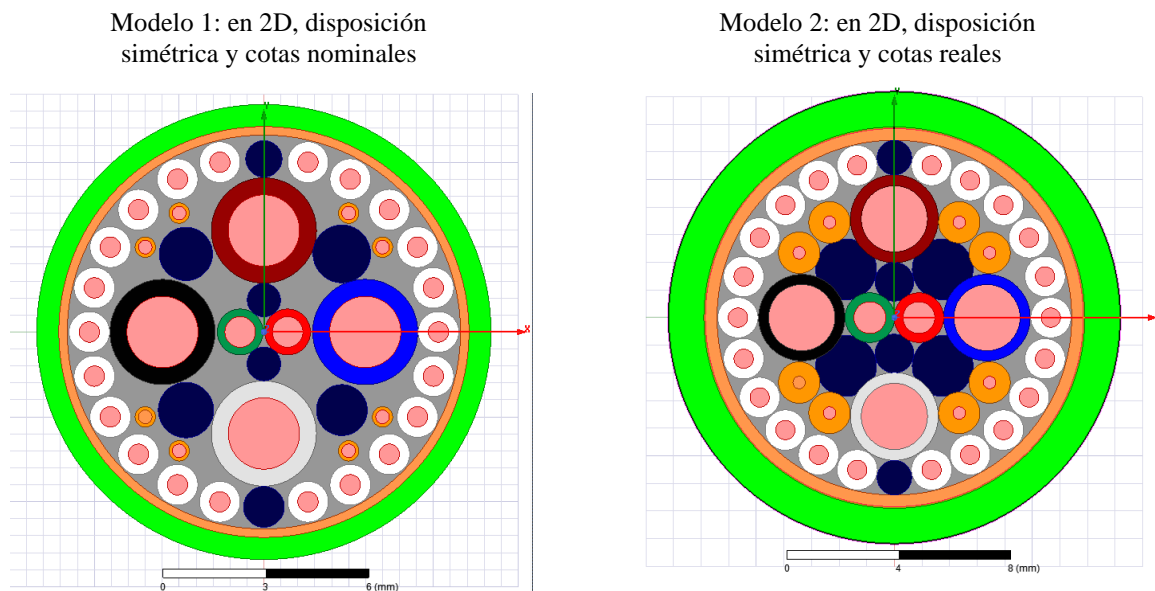


Figura 25: Modelos iniciales del prototipo

Tras comprobar que no hubiera ningún error geométrico los modelos, se definieron los cables del 1 al 36 siguiendo el criterio de referencia establecido y la pantalla fue considerada como referencia. Se definieron dos setups de simulación, una a 200 kHz y otra a 300 kHz, ambas con un criterio de parada de 30 simulaciones con refinamiento de la malla de cálculo o menos de un 1% de la variación de los resultados entre simulaciones como criterio de convergencia. El tiempo de simulación para cada setup era de aproximadamente 2,5 – 3 horas utilizando un equipo con procesador Intel i7-7700HQ CPU 2,8 GHz y 12 GB de memoria RAM.

Tras finalizar las simulaciones se exportaron los resultados de las matrices L, R y C en formato vectorial a Excel y se comprobaron que todas las unidades estuvieran en pF, nH y mΩ para las capacitancias, inductancias y resistencias respectivamente para poder compararlos con las medidas realizadas en laboratorio. El error fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$Error = \frac{|Resultado_{Simulacion} - Resultado_{Medidas}|}{Resultado_{medias}} * 100 \quad (33)$$

Tras calcular todas las variaciones entre los resultados medidos y simulados, se representaron los errores de las capacitancias e inductancias de forma matricial para que de forma visual se identificara el error con el tipo de cable (HV, LV, T-Sensor y Preheaters). Estas matrices se encuentran recogidas en el Anexo E. A continuación se resumen los resultados obtenidos para los dos modelos.

Resultados para inductancias

En el Modelo 1 a 200 kHz se observa que el rango de error está entre el 1 y un 531% en toda la matriz, con una media de error del 80%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 20 y 49% con una media de 37%. Se observa que el error es mayor en los elementos cuyo valor de inductancia es menor. A 300 kHz se observa que el rango de error está entre el 0 y un 665% en toda la matriz, con una media de error del 80%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 21 y 55% con una media de 37%. Se observa que el error es mayor en los elementos cuyo valor de inductancia es menor.

En el Modelo 2 a 200 kHz se observa que el rango de error está entre el 0 y un 356% en toda la matriz, con una media de error del 77%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 17 y 50% con una media de 38%. Se observa que el error es mayor en los elementos cuyo valor de inductancia es menor. A 300 kHz se observa que el rango de error está entre el 2 y un 451% en toda la matriz, con una media de error del 78%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 17 y 56% con una media de 38%. Se observa que el error es mayor en los elementos cuyo valor de inductancia es menor. Cable indicar que los valores del error medio en ambos modelos son lógicos tal como se comprobó en estudio previo de 3 conductores dado que son valores del orden de la resolución del equipo de medida.

Se observa que en las inductancias el error máximo es muy elevado debido a que no se contempla ningún efecto del trenzado en el modelo 2D, considerando los conductores como si estuvieran rectos. Sin embargo los errores en los elementos de la diagonal de la matriz se podrían considerar como aceptables para el cálculo de la propagación del ruido dado que el propio método tiene un rango de error del orden 6 dB equivalentes a aproximadamente un 100% de error. En la Tabla 7 se recoge el resumen de los errores obtenidos.

Tabla 7: Resumen de los errores obtenidos para las inductancias.

Modelo 1		Modelo 2	
Errores en toda la matriz		Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	1%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	2%
Máximo error 200 kHz	531%	Máximo error 200 kHz	356%
Máximo error 300 kHz	665%	Máximo error 300 kHz	451%
Media de errores 200 kHz	80%	Media de errores 200 kHz	77%
Media de errores 300 kHz	80%	Media de errores 300 kHz	78%
Errores en las diagonales		Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	20%	Mínimo error 200 kHz	17%
Mínimo error 300 kHz	21%	Mínimo error 300 kHz	17%
Máximo error 200 kHz	49%	Máximo error 200 kHz	50%
Máximo error 300 kHz	55%	Máximo error 300 kHz	56%
Media error 200 kHz	37%	Media error 200 kHz	38%
Media error 300 kHz	37%	Media error 300 kHz	38%

Resultados para capacitancias

Dado que muchos de los valores de la capacitancia eran muy pequeños, del orden de 0 pF, el error salía desproporcionado. Por ello, se consideró la capacitancia como cero si estaba comprendida entre -10 y 10 pF.

En el Modelo 1 tanto a 200 kHz como a 300 kHz se observa que el rango de error está entre el 0 y un 100% en toda la matriz, con una media de error del 7%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 0 y 25% con una media de 4%.

En el Modelo 2 tanto a 200 kHz como a 300 kHz se observa que el rango de error está entre el 0 y un 100% en toda la matriz, con una media de error del 5%. En los elementos de la diagonal el error se comprende entre un 0 y 32% con una media de 4%. Se observa que el error medio en las capacitancias coincide con el orden de magnitud esperado tras los resultados del estudio previo con un cable de 3 conductores y considerando el efecto del proceso de fabricación.

El este caso los errores del 100% son debido a que tampoco se contempla el trenzado en el modelo 2D, el trenzado acerca a los conductores que están siempre lejos en el modelo 2D, donde se considera los conductores como rectos. En la Tabla 8 se recoge el resumen de los errores obtenidos.

Tabla 8: Resumen de los errores obtenidos para las capacitancias. * Indica que los valores entre -10 y 10 pF fueron considerados como nulos para este cálculo.

Modelo 1		Modelo 2	
Errores en toda la matriz*		Errores en toda la matriz*	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	100%	Máximo error 200 kHz	100%
Máximo error 300 kHz	100%	Máximo error 300 kHz	100%
Media de error a 200 kHz	7%	Media de error a 200 kHz	5%
Media de error a 300 kHz	7%	Media de error a 300 kHz	5%
Errores en la diagonal		Errores en la diagonal	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	25%	Máximo error 200 kHz	32%
Máximo error 300 kHz	25%	Máximo error 300 kHz	32%
Media de error a 200 kHz	4%	Media de error a 200 kHz	4%
Media de error a 300 kHz	4%	Media de error a 300 kHz	4%

Resultados de las resistencias

Los valores de resistencia fueron obtenidos a 20 Hz y las variaciones fueron calculadas en comparación con los resultados de la medida a cuatro hilos con los equipos del laboratorio de Metrología Eléctrica. En este caso no se calculó el valor absoluto del error. En el Modelo 1 se observan errores entre -26 y -46%, mientras que en el Modelo 2 el error es mayor, variando entre -49 y -73%.

Las principales causas del error son las aproximaciones realizadas. El máximo error se ha obtenido en los dos casos para la referencia que fue modelada como un cilindro de cobre y en realidad es una malla trenzada de aluminio junto con otras aleaciones. En cuanto a los conductores, fueron considerados como conductores macizos de cobre mientras que en la realidad los conductores eran

varios hilos trenzados de cobre junto con diferentes aleaciones metálicas cuya resistencia es mayor para la misma sección de conductor. También se observa que el error relativo es mayor para los elementos cuya resistencia es más baja. A continuación en la Tabla 9 se presenta los resultados obtenidos para las resistencias.

Tabla 9: Resumen de los errores obtenidos para las resistencias.

Valores reales		Modelo 1		Modelo 2	
Matriz R con media 4 hilos para 1 m		Matriz R Simulada		Matriz R Simulada	
Cable	Valor	Freq [Hz]	20	Freq [Hz]	20
R0 [mOhm/m]	3,457	R(Cable 1,Cable 2) = R0 [mOhm]	1,870	R(Cable 1,Cable 2) = R0 [mOhm]	0,927
R1 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 1,Cable 1) [mOhm]	63,6	R(Cable 1,Cable 1) [mOhm]	46,2
R2 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 2,Cable 2) [mOhm]	63,6	R(Cable 2,Cable 2) [mOhm]	46,2
R3 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 3,Cable 3) [mOhm]	63,6	R(Cable 3,Cable 3) [mOhm]	46,2
R4 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 4,Cable 4) [mOhm]	63,6	R(Cable 4,Cable 4) [mOhm]	46,2
R5 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 5,Cable 5) [mOhm]	63,6	R(Cable 5,Cable 5) [mOhm]	46,2
R6 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 6,Cable 6) [mOhm]	63,6	R(Cable 6,Cable 6) [mOhm]	46,2
R7 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 7,Cable 7) [mOhm]	63,6	R(Cable 7,Cable 7) [mOhm]	46,2
R8 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 8,Cable 8) [mOhm]	63,6	R(Cable 8,Cable 8) [mOhm]	46,2
R9 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 9,Cable 9) [mOhm]	63,6	R(Cable 9,Cable 9) [mOhm]	46,2
R10 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 10,Cable 10) [mOhm]	63,6	R(Cable 10,Cable 10) [mOhm]	46,2
R11 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 11,Cable 11) [mOhm]	63,6	R(Cable 11,Cable 11) [mOhm]	46,2
R12 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 12,Cable 12) [mOhm]	63,6	R(Cable 12,Cable 12) [mOhm]	46,2
R13 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 13,Cable 13) [mOhm]	63,6	R(Cable 13,Cable 13) [mOhm]	46,2
R14 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 14,Cable 14) [mOhm]	63,6	R(Cable 14,Cable 14) [mOhm]	46,2
R15 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 15,Cable 15) [mOhm]	63,6	R(Cable 15,Cable 15) [mOhm]	46,2
R16 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 16,Cable 16) [mOhm]	63,6	R(Cable 16,Cable 16) [mOhm]	46,2
R17 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 17,Cable 17) [mOhm]	63,6	R(Cable 17,Cable 17) [mOhm]	46,2
R18 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 18,Cable 18) [mOhm]	63,6	R(Cable 18,Cable 18) [mOhm]	46,2
R19 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 19,Cable 19) [mOhm]	63,6	R(Cable 19,Cable 19) [mOhm]	46,2
R20 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 20,Cable 20) [mOhm]	63,6	R(Cable 20,Cable 20) [mOhm]	46,2
R21 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 21,Cable 21) [mOhm]	63,6	R(Cable 21,Cable 21) [mOhm]	46,2
R22 + R0 [mOhm/m]	85,417	R(Cable 22,Cable 22) [mOhm]	63,6	R(Cable 22,Cable 22) [mOhm]	46,2
R23 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 23,Cable 23) [mOhm]	140,7	R(Cable 23,Cable 23) [mOhm]	110,6
R24 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 24,Cable 24) [mOhm]	140,7	R(Cable 24,Cable 24) [mOhm]	110,6
R25 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 25,Cable 25) [mOhm]	140,7	R(Cable 25,Cable 25) [mOhm]	110,6
R26 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 26,Cable 26) [mOhm]	140,7	R(Cable 26,Cable 26) [mOhm]	110,6
R27 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 27,Cable 27) [mOhm]	140,7	R(Cable 27,Cable 27) [mOhm]	110,6
R28 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 28,Cable 28) [mOhm]	140,7	R(Cable 28,Cable 28) [mOhm]	110,6
R29 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 29,Cable 29) [mOhm]	140,7	R(Cable 29,Cable 29) [mOhm]	110,6
R30 + R0 [mOhm/m]	206,131	R(Cable 30,Cable 30) [mOhm]	140,7	R(Cable 30,Cable 30) [mOhm]	110,6
R31 + R0 [mOhm/m]	11,355	R(Cable 31,Cable 31) [mOhm]	6,9	R(Cable 31,Cable 31) [mOhm]	4,8
R32 + R0 [mOhm/m]	11,355	R(Cable 32,Cable 32) [mOhm]	6,9	R(Cable 32,Cable 32) [mOhm]	4,8
R33 + R0 [mOhm/m]	11,355	R(Cable 33,Cable 33) [mOhm]	6,9	R(Cable 33,Cable 33) [mOhm]	4,8
R34 + R0 [mOhm/m]	11,355	R(Cable 34,Cable 34) [mOhm]	6,9	R(Cable 34,Cable 34) [mOhm]	4,8
R35 + R0 [mOhm/m]	41,782	R(Cable 35,Cable 35) [mOhm]	29,3	R(Cable 35,Cable 35) [mOhm]	17,7
R36 + R0 [mOhm/m]	41,782	R(Cable 36,Cable 36) [mOhm]	29,3	R(Cable 36,Cable 36) [mOhm]	17,7

Modelos 3D

Con el objetivo de mejorar la precisión de las simulaciones se realizó un modelo 3D del cable teniendo en cuenta el trenzado de todos los elementos. Para ello se modeló un prototipo de 20 cm, lo suficiente para que hubiera una vuelta completa de los conductores externos HV y dos vueltas del bloque de conductores internos LV, T-Sensor y Preheaters. Lo ideal hubiese sido un modelo de 1 metro de cable pero ya se preveía que el software de simulación consumiría demasiados recursos, por lo que se decidió probar con un modelo más corto primero.

Se partió del modelo 2D con medidas reales, añadiendo las variables relacionadas con el trenzado (vector de dirección, paso por vuelta y número de vueltas) y con la extrusión de los elementos sin trenzar (vector de dirección y longitud de la extrusión para generar un elemento 3D a partir de un elemento 2D). En la Figura 26 se recoge el modelo realizado.

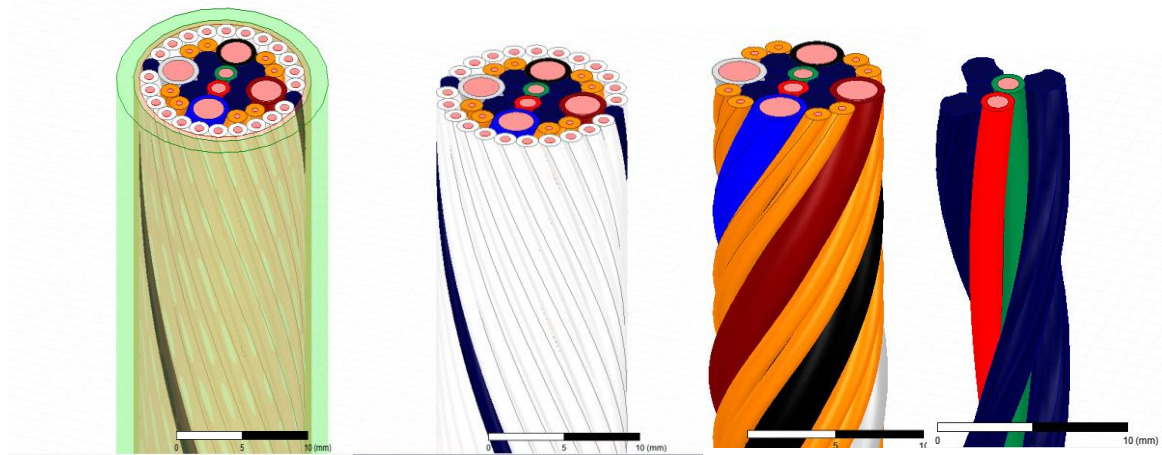


Figura 26: Modelo 3D de 20 cm del prototipo. Visualización de izquierda a derecha de todos los elementos del modelo.

Se definieron los conductores como señal indicando los puntos de entrada y salida de corriente (necesarios en el modelo 3D), la pantalla fue indicada como referencia y se comprobó que no hubiera errores en la geometría (colisiones y superposiciones entre elementos). Posteriormente, se definió un setup de simulación en corriente continua para la simulación de la matriz R y un setup a 200 kHz para la simulación de las matrices L y C con un criterio de parada de 10 simulaciones con refinamiento de malla o menos de un 1% de variación en la convergencia de los resultados. Sin embargo, no se pudo finalizar la simulación debido a que el modelo consumía varios recursos tanto de disco duro como de memoria RAM, tras varias horas con la CPU al 100% generaba un error que suspendía la simulación para proteger el equipo.

Se realizaron diferentes simplificaciones del modelo tales como: reducir la longitud a 10 cm, simplificación en las geometrías de los aislantes hasta simplificaciones en el número de conductores. Con los recursos disponibles lo máximo que se podía simular en 3D eran 20 cm con 8 cables o 40 cm con un modelo de 4 cables. Se decidió guardar el modelo 3D para cuando se disponga de otro equipo informático con más recursos para las simulaciones. En el Anexo F se recoge el modelo 3D completo junto con las simplificaciones realizadas.

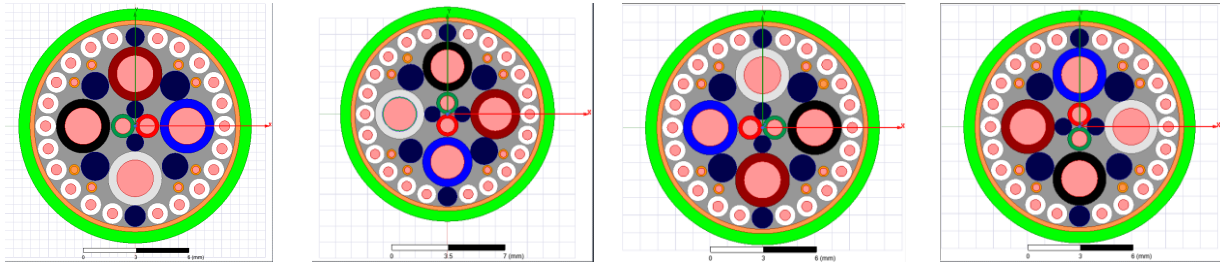
Modelos 2D con giros a 90°

Con objeto de reducir el error cometido en las simulaciones 2D, principalmente para los valores de las inductancias, se decidió compensar el efecto del trenzado entre los conductores del bloque externo (HV) y el bloque interno del cable (LV, T-Sensor y Preheaters). Como se observó en las pruebas realizadas con los modelos 3D con 8 y 4 conductores descritas en el Anexo F, el efecto del trenzado en dirección contraria entre los dos bloques provoca una homogeneización de los valores de las inductancias mutuas entre los cables.

Para simular este efecto se decidió crear otros tres modelos 2D del prototipo girando los conductores del bloque interno 90 grados en cada uno, de esta forma el modelo inicial 2D tendría un ángulo de 0°, el primer giro un ángulo de 90°, el segundo giro un ángulo de 180° y el tercer giro un ángulo de 270°. Posteriormente, la inductancia final fue calculada como el promedio del resultado de

las cuatro simulaciones. Se aplicó este método tanto al Modelo 1 con cotas nominales como al Modelo 2 con cotas reales. En la Figura 27 se recogen los modelos 2D con giros a 90°.

Modelo 1: en 2D con secciones nominales y con giros a 90°



Modelo 2: en 2D con secciones reales y con giros a 90°

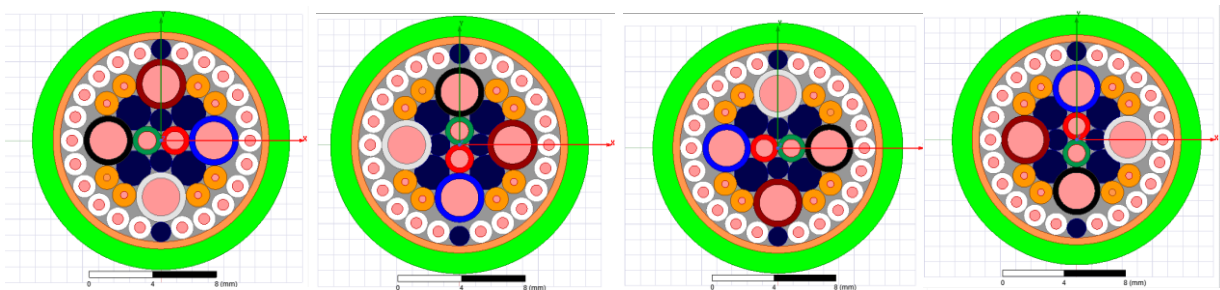


Figura 27: Modelos 1 y 2 con compensación del trenzado entre el bloque externo y interno de conductores

Resultados del Modelo 1

En la matriz de inductancia se observa una gran reducción en los errores en la simulación. Para 200 kHz el error máximo se reduce del 531% al 99% mientras que a 300 kHz el error máximo se reduce del 665% al 119%. La media del error en la matriz entera se reduce ligeramente a 77 y 78% para 200 y 300 kHz respectivamente. Como era de esperar, no se observa ninguna variación en los elementos de la diagonal dado que se corresponden a la inductancia propia del conductor. A continuación en la Tabla 10 se recoge un resumen de las variaciones del error en la inductancia en este modelo.

Tabla 10: Comparación de los resultados para la matriz de inductancias en el Modelo 1 con y sin giros a 90°

Sin giros		Con giros	
Errores en toda la matriz		Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	1%	Mínimo error 200 kHz	2%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	531%	Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	665%	Máximo error 300 kHz	119%
Media de errores 200 kHz	80%	Media de errores 200 kHz	77%
Media de errores 300 kHz	80%	Media de errores 300 kHz	78%
Errores en las diagonales		Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	20%	Mínimo error 200 kHz	21%
Mínimo error 300 kHz	21%	Mínimo error 300 kHz	21%
Máximo error 200 kHz	49%	Máximo error 200 kHz	49%
Máximo error 300 kHz	55%	Máximo error 300 kHz	55%
Media error 200 kHz	37%	Media error 200 kHz	37%
Media error 300 kHz	37%	Media error 300 kHz	37%

Se observa que las capacitancias no se han visto afectadas al simular el trenzado entre ambos bloques de conductores. Esto es debido a la disposición simétrica de los conductores en el interior del cable, las distancias entre los tipos de conductores se mantienen constantes para el cálculo de las capacitancias. A continuación en la Tabla 11 se recoge un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 11: Comparación de los resultados para la matriz de Capacitancia del Modelo 1 con y sin giros a 90°.

Sin giros		Con giros	
Errores en toda la matriz*		Errores en toda la matriz*	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	100%	Máximo error 200 kHz	100%
Máximo error 300 kHz	100%	Máximo error 300 kHz	100%
Media de error a 200 kHz	7%	Media de error a 200 kHz	7%
Media de error a 300 kHz	7%	Media de error a 300 kHz	7%
Errores en la diagonal		Errores en la diagonal	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	25%	Máximo error 200 kHz	25%
Máximo error 300 kHz	25%	Máximo error 300 kHz	25%
Media de error a 200 kHz	4%	Media de error a 200 kHz	4%
Media de error a 300 kHz	4%	Media de error a 300 kHz	4%

Como era previsto, las resistencias tampoco se vieron modificadas en la simulación al hacer el promedio de los tres modelos con giros a 90°.

Resultados del Modelo 2 con giros a 90°

En la matriz de inductancia también se observa una gran reducción en los errores en la simulación. Para 200 kHz el error máximo se reduce del 356% al 99% mientras que a 300 kHz el error máximo se reduce del 451% al 99%. La media del error en la matriz entera se reduce ligeramente a 75 y 76% para 200 y 300 kHz respectivamente. En este caso al hacer los giros a 90° se tuvo que corregir manualmente algunas de las posiciones de los conductores debido a errores geométricos de superposición. Por ello, se observa una ligera variación, que puede considerarse despreciable, en los errores de los elementos de la diagonal que deberían haberse mantenido constantes. A continuación en la Tabla 12 se recoge un resumen de las variaciones del error en la inductancia en este modelo.

Tabla 12: Comparación de los resultados para la matriz de inductancias en el Modelo 2 con y sin giros a 90°.

Sin giros		Con giros	
Errores en toda la matriz		Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	3%
Mínimo error 300 kHz	2%	Mínimo error 300 kHz	3%
Máximo error 200 kHz	356%	Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	451%	Máximo error 300 kHz	99%
Media de errores 200 kHz	77%	Media de errores 200 kHz	75%
Media de errores 300 kHz	78%	Media de errores 300 kHz	76%
Errores en las diagonales		Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	17%	Mínimo error 200 kHz	19%
Mínimo error 300 kHz	17%	Mínimo error 300 kHz	19%
Máximo error 200 kHz	50%	Máximo error 200 kHz	50%
Máximo error 300 kHz	56%	Máximo error 300 kHz	56%
Media error 200 kHz	38%	Media error 200 kHz	38%
Media error 300 kHz	38%	Media error 300 kHz	38%

Debido a la ligera adaptación de los conductores se registró una mínima modificación en los errores de las capacitancias que también puede ser considerada como despreciables, considerando así que los valores se han mantenido constantes. Las variaciones están recogidas en la Tabla 13.

Tabla 13: Comparación de los resultados para la matriz de capacitancias del Modelo 2 con y sin giros a 90°.

Sin giros		Con giros	
Errores en toda la matriz*		Errores en toda la matriz*	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	0%
Máximo error 200 kHz	100%	Máximo error 200 kHz	100%
Máximo error 300 kHz	100%	Máximo error 300 kHz	100%
Media de error a 200 kHz	5%	Media de error a 200 kHz	6%
Media de error a 300 kHz	5%	Media de error a 300 kHz	6%
Errores en la diagonal		Errores en la diagonal	
Mínimo error 200 kHz	0%	Mínimo error 200 kHz	0%
Mínimo error 300 kHz	0%	Mínimo error 300 kHz	1%
Máximo error 200 kHz	32%	Máximo error 200 kHz	25%
Máximo error 300 kHz	32%	Máximo error 300 kHz	25%
Media de error a 200 kHz	4%	Media de error a 200 kHz	4%
Media de error a 300 kHz	4%	Media de error a 300 kHz	4%

En ambos modelos con giros a 90° también se representaron las matrices de errores en función del tipo de cable, que se encuentran recogidas en el Anexo E.

Con objeto de mejorar el error de las simulaciones se decidió aplicar factores de corrección que consideraran la longitud real del cable debido al efecto del trenzado, dado que el modelo 2D considera los cables rectos y en realidad debido al trenzado la longitud del cable es mayor. Sin embargo, debido al diámetro de giro del orden de milímetros y al número de vueltas por metro este factor reduce el error en menos de un 1%. De la misma forma se consideró el efecto de la inductancia propia del cable por el hecho de estar trenzado (como si fuera una bobina cuyo núcleo fuera de cobre), cuyo resultado mejoraba el error también en menos de un 1%. Ambos estudios de compensación del error se encuentran recogidos en el Anexo E.

Finalmente, se consideraron como definitivos los resultados obtenidos de los modelos con giros a 90° sin la aplicación de estos dos últimos factores de corrección dado que la aportación de la longitud real y la inductancia propia debido al trenzado eran despreciables.

Capítulo 6: Ejemplo de propagación del ruido en el prototipo

Con objeto de comprobar la validez de los resultados obtenidos de las simulaciones 2D de los parámetros eléctricos del prototipo se decidió simular un caso de propagación del ruido en el cable con un software de cálculo de MTL desarrollado en el Instituto Tecnológico de Aragón y usado en numerosas ocasiones en estudios de EMC para detectores de física.

Debido a la complejidad del cable, se decidió realizar de forma previa un estudio de un caso más sencillo de propagación de ruido en dos conductores, cuyos esquemas eléctricos se podrían hacer a mano y los resultados podrían ser contrastados en [9]. Posteriormente, se repitió el mismo proceso con un cable multiconductor de compuesto por 30 cables, considerando un caso concreto de

propagación de ruido cuyos resultados podrían ser contratados en [11]. Ambos estudios previos de simulación de propagación del ruido se encuentran recogidos en el Anexo G. De esta forma se ha escalonado los niveles de dificultad del problema antes de pasar al caso del prototipo de 36 conductores, asegurando así que tanto el proceso como los resultados obtenidos sean correctos.

Una vez validados los estudios previos se decidió calcular la transferencia del ruido en el prototipo. Cabe mencionar que el cálculo de propagación de ruido en cables se utiliza comúnmente en diferentes áreas como la automoción o la aviación, sin embargo es la primera vez que se realiza en un cable multiconductor de 36 conductores destinado a un experimento de física de altas energías. El objeto era comprobar cómo afectaría la inyección de ruido en modo común (CM) en una pareja de cables LV, en especial la transferencia del ruido en los cables LV y HV. Para ello se consideró que en una situación normal de alimentación existiría una fuente de tensión independiente para cada par de cables LV y una fuente de tensión independiente para cada conjunto de 10+1 cables HV. Se definió un posible sistema de alimentación y de cargas para el cable basado en [11] y [10].

Para el cálculo además de los datos de los parámetros eléctricos del cable es necesario definir unas condiciones de contorno en el lado fuente y el lado de carga. En el lado fuente se consideró:

- Resistencias de puesta a tierra en los cables de potencia de 150Ω (valor estándar para el estudio de propagación de ruido) y en los cables de señal de $1 M\Omega$ que representa la alta impedancia asociada a estos cables.
- Fuentes de alimentación DC/DC consideradas como un condensador de $1 \mu F$.
- Fuente de tensión ideal que introduce el ruido en una pareja de cables LV.
- Pantalla puesta a tierra.

En el lado carga se consideró:

- Resistencia de puesta a tierra de $200 m\Omega$.
- Carga de los cables HV como una resistencia de $1 M\Omega$ con un condensador de $1 \mu F$.
- Carga de los cables LV como un condensador de $1 \mu F$.
- Carga de los cables de sensores como una resistencia de $1 M\Omega$.
- Pantalla puesta a tierra.

En la Figura 28 se recoge el esquema de alimentación propuesto junto con la definición de los datos de contorno del lado fuente para un ruido de modo común inyectado a la pareja de cables LV 31 y 32, mientras que en la Figura 29 se recoge la definición de contorno del lado carga. Se observa que no se conecta los cables de sensores a los cables de potencia en el lado carga, debido a que el estudio pretende comparar únicamente la propagación del ruido en los cables LV y HV para un ruido inyectado en una pareja de cables LV.

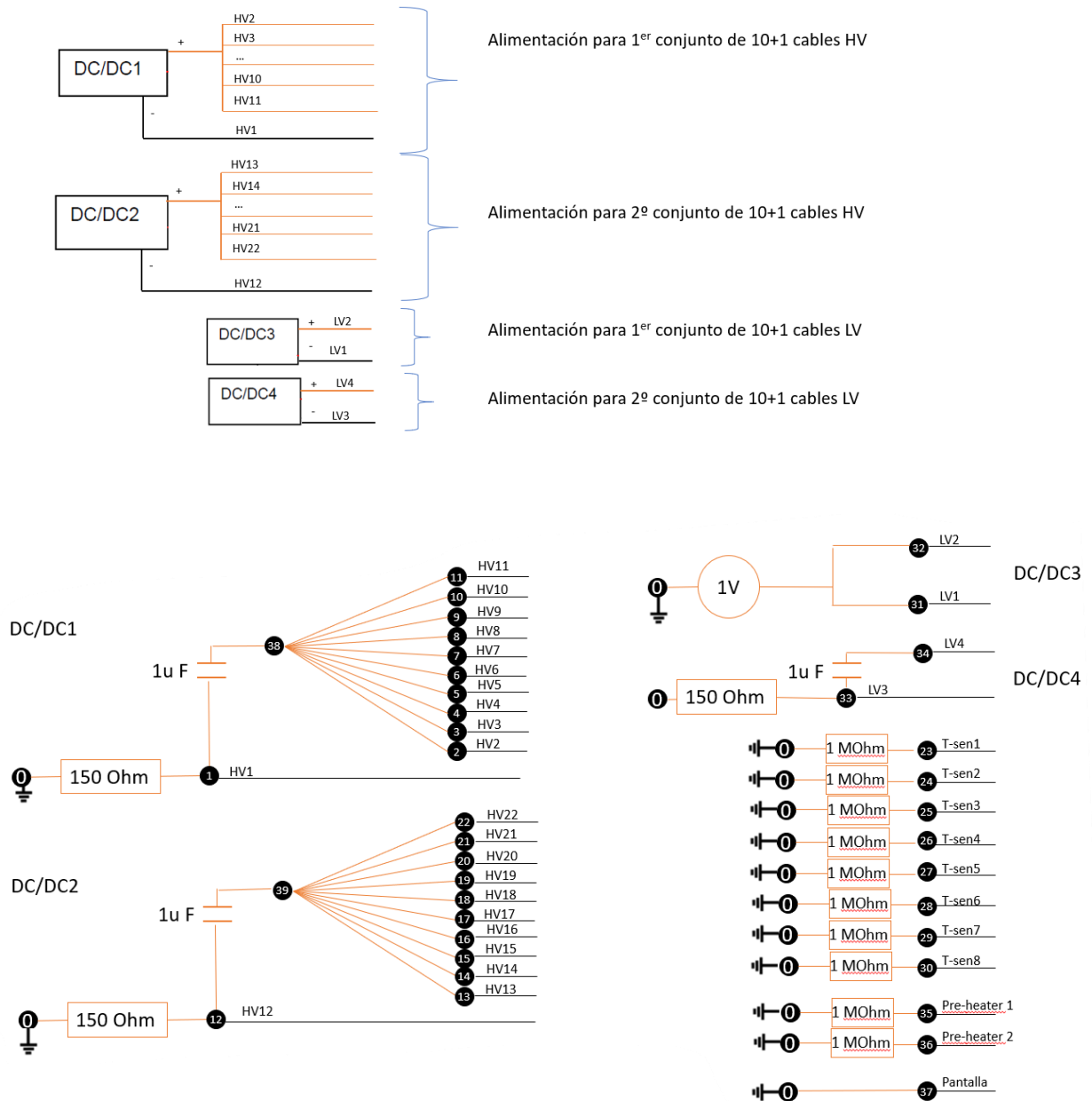


Figura 28: En la parte superior se recoge el sistema de alimentación de fuentes planteada. En la parte inferior se recoge las condiciones de contorno de lado fuente para el cálculo de la propagación de ruido en modo común.

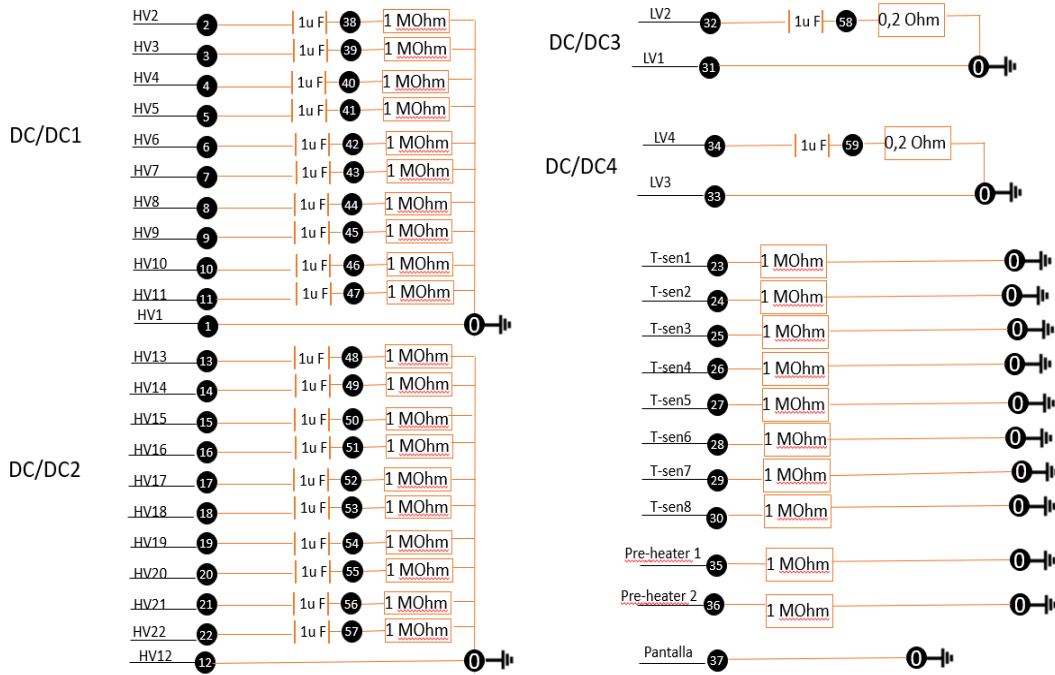


Figura 29: Condiciones de contorno de lado carga para el cálculo de la propagación de ruido en modo común.

Con las condiciones de contorno y los parámetros eléctricos del cable se puede calcular la función de transferencia que relaciona el voltaje y la intensidad en el final de la línea ($z=L$ siendo L la longitud de la línea) con el voltaje y corriente inyectados ($z=0$), cuantificando así el efecto de la propagación del ruido en el prototipo.

$$FT_{V_{cm}} = \frac{V_{cm}(L)}{V_{cm}(0)} \quad (34)$$

$$FT_{I_{cm}} = \frac{I_{cm}(L)}{I_{cm}(0)} \quad (35)$$

Siendo V_{cm} e I_{cm} el voltaje y corriente en CM (modo común) sobre el conjunto de n conductores:

$$V_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (36)$$

$$I_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (37)$$

A continuación se recoge un resumen los resultados obtenidos de la transferencia del ruido en los cables LV y HV, donde el error fue calculado como el valor absoluto de la resta de los resultados obtenidos con los parámetros de los cables simulados menos los resultados obtenidos con los parámetros medidos. En el Anexo G se recoge el proceso de estudio del caso de este caso más detalladamente.

A continuación se recogen los resultados de la función de transferencias y el efecto de la inyección del ruido en modo común en los diferentes conductores LV y HV tras realizar las simulaciones con el software de cálculo MTL del ITAINNOVA.

Efecto del ruido en la fuente DC/DC3 cables LV 31 y 32

En estos conductores se observa para la tensión que el ruido se atenúa aproximadamente 20 dB por década debido a los filtros capacitivos del lado de la carga hasta 4 MHz, posteriormente se observa el efecto de las resonancias en alta frecuencia. En las intensidades se observa que el efecto es nulo hasta aproximadamente 1 MHz, entre 1 y 5 MHz se observa una amplificación de la señal hasta 10 dB, posteriormente se observa una atenuación del ruido entrando en zona de resonancias a más altas frecuencias. Se observa que el error medio entre los resultados obtenidos con los modelos 2D y los resultados obtenidos con las medidas por el laboratorio es inferior a 5 dB. En la Figura 30 se recogen las funciones de transferencia del ruido en tensión e intensidad para la fuente DC/DC3.

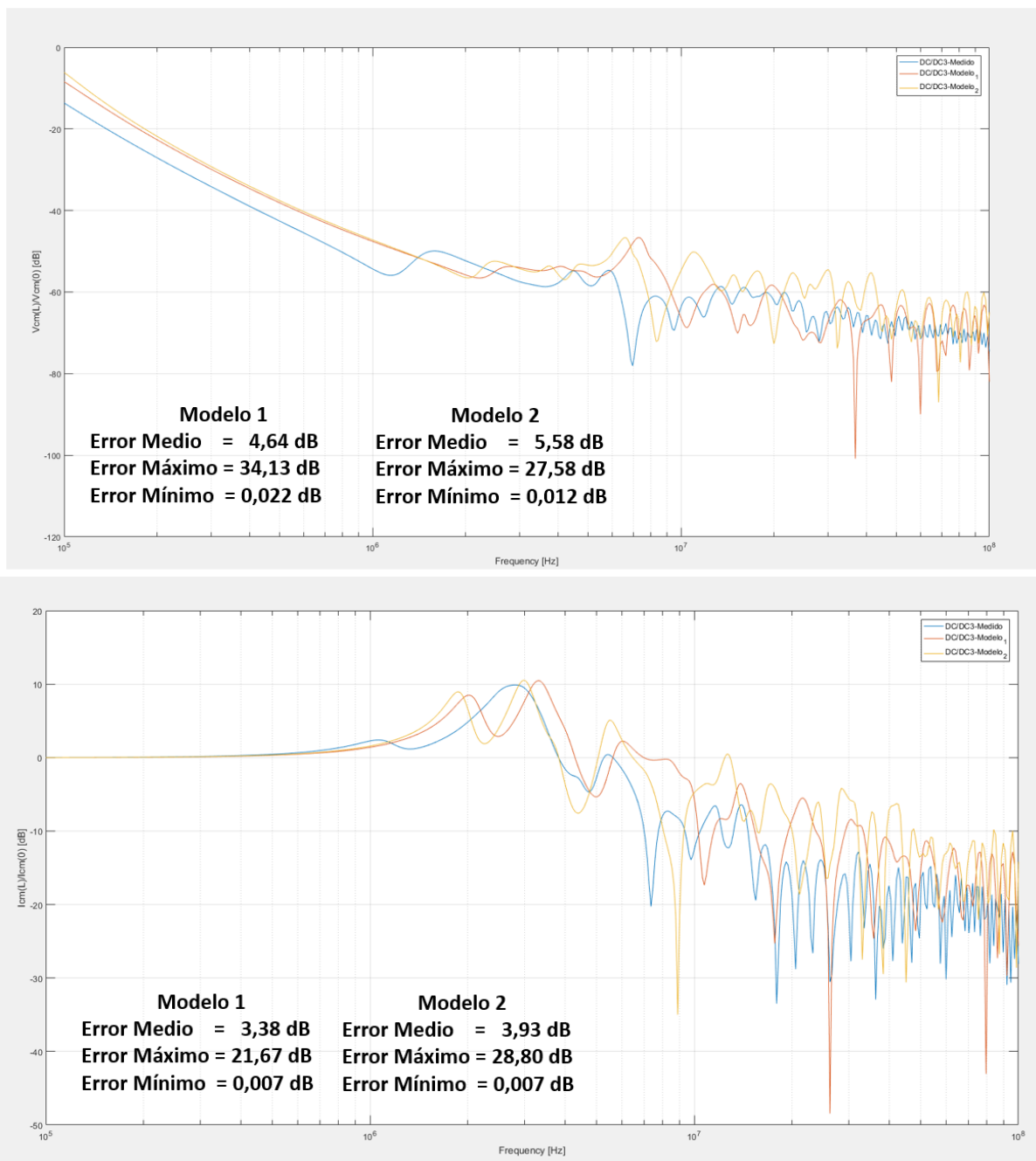


Figura 30: Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV31 y 32 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se recogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Efecto del ruido en la fuente DC/DC4 cables LV 33 y 34

Se observa tanto en tensiones como en intensidades que no existe una transferencia del ruido inyectado en la fuente DC/DC3 en la fuente DC/DC4. La atenuación en ambos casos es del orden de - 50 dB para las tensiones y del orden de -80 dB para las intensidades, lo que implica un factor de reducción del orden del 800% y 1300% respectivamente. En este caso se observa que el error medio es del orden de 6 dB para la función de transferencia de las tensiones y del orden de 10 dB para la función de transferencia de las intensidades. Esto es debido a que el efecto de las grandes resonancias en alta frecuencia. En la Figura 31 se recoge la función de transferencia para la fuente DC/DC4.

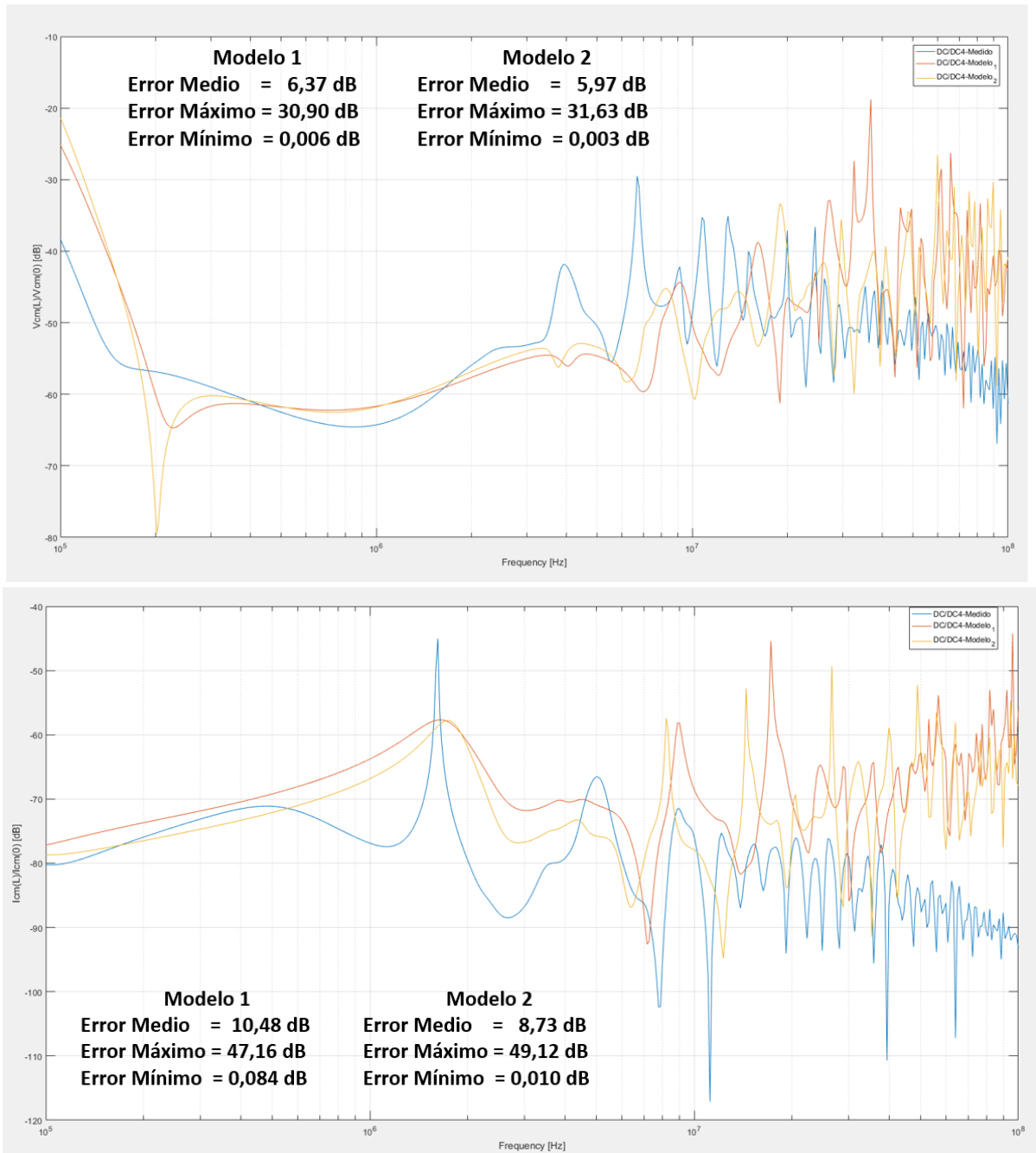


Figura 31: Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV33 y 34 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Efecto del ruido en las fuentes DC/DC1 y DC/DC2 desde cables HV 1 a HV 22

Con objeto de averiguar cómo afecta el ruido inyectado en la fuente DC/DC3 en los cables HV, se ha calculado la función de transferencia en los 22 conductores HV. En las tensiones se observa una atenuación del ruido hasta 300 kHz, entre 300 kHz y 20 MHz se observa un acoplamiento del ruido por debajo de 10 dB, a partir de 20 MHz se vuelve a atenuar el ruido llegando hasta -10 dB. En las intensidades se observa que hasta 2 MHz existe un acoplamiento por debajo de 10 dB que se atenúa a mayores frecuencias hasta -10 dB. En las tensiones se observa que el error medio de los resultados obtenidos con los parámetros de los modelos 2D es aproximadamente 7 dB mientras que para las intensidades es de aproximadamente 7,5 dB. En la Figura 32 se recogen los resultados obtenidos.

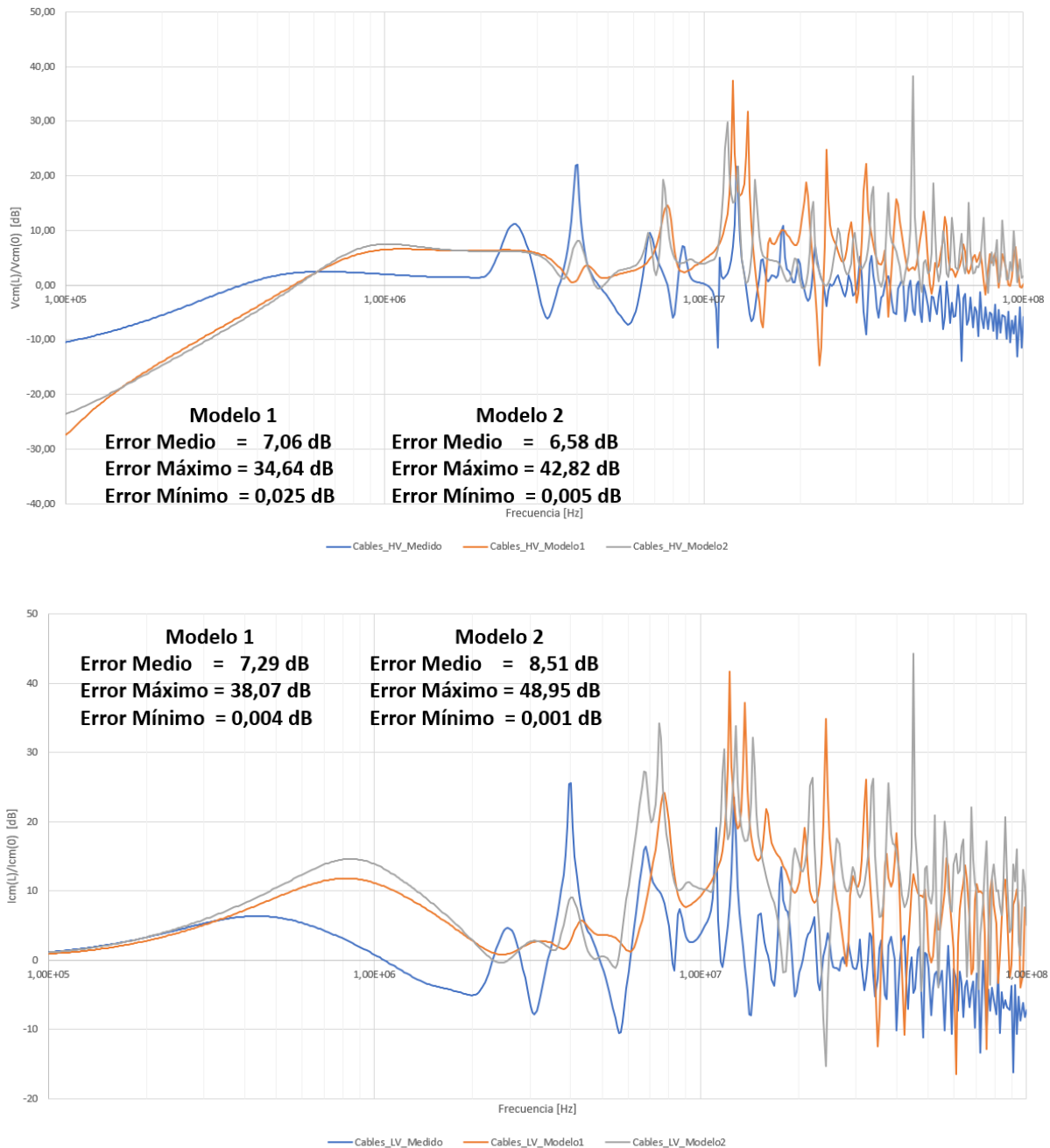


Figura 32: Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV33 y 34 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que es válido el uso de los parámetros simulados en los modelos 2D del prototipo para el cálculo de la función de transferencia del ruido, obteniendo un error medio entre 3,38 dB y 10,48 dB en los casos estudiados. Para la obtención del error real cometido con modelos 2D sería necesario realizar un estudio de propagación del ruido completo del cable, considerando todas las transferencias posibles tanto de ruido en modo común como en modo diferencial, lo que escapa del alcance de este trabajo.

El valor del error cometido con el uso de modelos 2D en el cálculo de la propagación del ruido en cables multiconductores es algo que no se encuentra en la bibliografía científica actual. Como se ha observado en este trabajo, no existe gran diferencia en los resultados obtenidos con los modelos utilizando las cotas nominales del cable y utilizando las cotas reales medidas en laboratorio. De forma adicional, esto permitirá el cálculo de la propagación del ruido en la etapa de diseño del cable, sin la necesidad de medir los parámetros en el laboratorio, lo que implica un ahorro considerable de tiempo y recursos. Un punto extra es que permitirá la consideración de la propagación del ruido en el diseño del cable, especialmente en la disposición de los conductores, permitiendo así evitar acoplamientos indeseados en los cables más sensibles.

Por último cable mencionar que se podrían mejorar considerablemente los resultados obtenidos aplicando el método Montecarlo en los parámetros eléctricos simulados, considerando la variabilidad debido a los procesos de fabricación tal como se recoge en [11]. Otra opción consistiría en el uso de modelos 3D para la obtención de los parámetros del cable considerando todos los trenzados, sin embargo esta es una alternativa que consume muchos recursos informáticos tal como se ha recogido en este trabajo.

Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo la realización de un modelo de simulación de alta frecuencia de un cable multiservicio del detector de pixeles para la Fase 2 del experimento CMS del CERN basado en los parámetros por unidad de longitud del cable. Adicionalmente y como aplicación práctica de este trabajo se ha analizado los efectos de propagación del ruido electromagnético a lo largo del cable, comparando los resultados obtenidos a partir de los parámetros calculados por simulación y los obtenidos a partir de medidas reales con el fin de estimar el error cometido según sea el modelo de cable simulado.

En el proceso de caracterización se identificaron todos los elementos del prototipo junto con sus características principales. Se contó con el apoyo del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos para realizar las secciones transversales del cable junto con el tratamiento superficial de una de las muestras. También se contó con el apoyo del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación para el proceso de media de las cotas de los elementos del cable. Se tomaron todas las medidas geométricas necesarias para la realización de un modelo de simulación, minimizando posibles fuentes de errores.

En el proceso de las medidas eléctricas se utilizaron los equipos del Departamento de Ingeniería Eléctrica aplicando los montajes recogidos en documentaciones científicas. Al ser un cable multiconductor complejo compuesto por 36 cables más una pantalla, fueron necesarios 1369 montajes

para la obtención de las matrices R, L y C. Cada una de las medidas fueron tomadas a 200 y 300 kHz. Se identificaron posibles fuentes de error humano en las medidas, llegando a cuantificar el orden de magnitud en algunos de los casos. La obtención de todos los parámetros es un proceso laborioso y el tratamiento de los resultados requiere el uso de programación debido a que es inviable el tratamiento de los datos a mano.

En el proceso de modelado se realizaron diferentes modelos 2D tanto con las cotas nominales recogidas en los informes de diseño del prototipo como con las cotas reales medidas en laboratorio, parametrizando todas las variables geométricas. Se desarrollaron diferentes modelos 2D donde se consideró el efecto del trenzado entre el grupo externo e interno de conductores del prototipo, obteniendo un error medio aceptable. En todos los casos, la precisión de la simulación de las capacitancias es mejor con un error medio inferior al 7%, mientras que para las inductancias es del orden del 80% debido tanto a la propia variabilidad del cable como a que el valor medido se encuentra en el orden de la resolución de los equipos de medida. Además, se realizaron modelos 3D considerando también los diferentes trenzados de los conductores. Sin embargo no pudieron ser ejecutados los modelos 3D debido a la elevada demanda de recursos informáticos.

Adicionalmente se presenta un estudio de un caso de propagación de ruido aplicando los parámetros eléctricos medidos y simulados. Se definieron las condiciones de contorno basadas en estudios aplicados en el CERN. En este estudio se comprobó la validez del uso de modelos 2D para el cálculo de un caso de propagación del ruido, obteniendo un error medio entre 3,38 dB y 10,48 dB en los casos estudiados. Estos resultados indican que el uso de modelos 2D son viables para la obtención de los parámetros eléctricos para un cálculo inicial del efecto de propagación de ruidos en cables multiconductores, debido a que con la técnica actual la tolerancia se encuentra en 6 dB. Cabe indicar que el error cometido con el uso de modelos 2D sería reducido considerablemente si se aplicara el método de Montecarlo.

La caracterización de modelos y el cálculo de propagación de ruido en cables es algo recogido en bibliografía especializada y que ya existe actualmente, sin embargo es la primera vez que se realiza este estudio en un cable multiservicios de 36 conductores destinados a un experimento de física de altas energías. No solo se caracterizó el error de los parámetros simulados con respecto a medidas en laboratorio, sino que se obtuvo un primer orden de magnitud del error cometido con estos parámetros en un caso de propagación de ruidos.

Finalmente cabe mencionar la metodología seguida y la aplicación del trabajo a un caso real que será utilizado en posteriores estudios relacionados con la actualización del experimento CMS.



Adilson Alberto Moyses

En Zaragoza a 16 de junio de 2020

Bibliografía

- [1] A. Ball and D. C. Contardo, "New paradigms for the CMS Phase-2 Upgrades," *CMS - CERN*, 2017.
- [2] J. E. V. Fassarella, M. Z. Fortes, and G. G. Sotelo, "Measurement, evaluation and proposed solution for power distribution arrangements with electrical cables in parallel," *Measurement*, vol. 119, pp. 196–204, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.01.056.
- [3] J. Knockaert, J. Catrysse, J. Peuteman, D. Iw, and R. Belmans, "Measuring Line Parameters of Multiconductor Cables using a Vector Impedance Meter," *EMC Europe, Proceedings*, pp. 109–112, 2010.
- [4] Y. Gan and X. Xu, "Experiments study of coupling parameters characterization of the multiconductor transmission lines," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 418, Mar. 2013, doi: 10.1088/1742-6596/418/1/012058.
- [5] C. Jiao, Z. Xia, and W. N. Fu, "A Generalized Multiconductor Transmission Line Model and Optimized Method for the Solution of the MTL Equations," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1155/2012/827240.
- [6] H. Toki and K. Sato, "New circuit theory of multiconductor transmission lines resulting from a new practice of noise reduction," *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 90, no. 2, pp. 29–46, 2014, doi: 10.2183/pjab.90.29.
- [7] S. Bajracharya, "Characterization and modeling of multi-conductor transmission line using Finite-difference Time-Domain method," Florida International University, 1996.
- [8] "Krim et al. - 2018 - VHDL-AMS based frequency domain model of four-wire.pdf." .
- [9] F. J. G. Arteché, "EMC: A mapping for the CMS experiment," PhD. Thesis, Universidad de Oviedo, CERN-THESIS-2004-027, 2004.
- [10] Power System WG, "CMS Tracker phase 2 upgrade IT services." CERN, May 18, 2018, [Online]. Available: <https://indico.cern.ch/event/728517/> consultado el 10/01/2020.
- [11] M. Iglesias, "Caracterización electromagnética para la futura generación de detectores tipo vértice," Tesis, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2019.
- [12] J. Webb, "LHC smashes energy record with test collisions," *21/05/2015*, *accesado el 24/09/2019*.
- [13] "CERN," <https://home.cern/> consultado el 19/09/2019.
- [14] CERN, "The accelerator complex." <https://public-archive.web.cern.ch/en/research/AccelComplex-en.html> consultado el 22/09/2019.
- [15] CERN, "CMS," <https://home.cern/science/experiments/cms> consultado el 24/09/2019.
- [16] CMS Collaboration, "CMS Physics : Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software," Geneva : CERN, 2006. - 521 p., CERN-LHCC-2006-001 ; CMS-TDR-8-1.
- [17] T. Sakuma and T. McCauley, "Detector and Event Visualization with SketchUp at the CMS Experiment," *J. Phys.: Conf. Ser.* 513 022032, doi:10.1088/1742-6596/513/2/022032, CMS-OUTREACH-2019-001, May 2019.
- [18] "European Strategy Session of Council." 16th Session - 30 May 2013, CERN ESC-E-106 (2013).
- [19] "Plan Estatal de Investigación científica y técnica y de Innovación." 2020 2017.
- [20] "The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker – Technical Design Report." CMS Collaboration, CERN-LHCC-2017-009, CMS-TDR-17-001, 1 July 2017.
- [21] "RD Collaboration Proposal: Development of pixel readout integrated circuits for extreme rate and radiation." RD53 Collaboration, Scientific Committee Paper CERN-LHCC-2013-008, LHCC-P-006, 2013.
- [22] "DC-DC switching converter based power distribution vs serial power distribution: EMC strategies." F. Arteché, F.J. Arcega et Al., *Proceedings of Science, TWEPP 2009*.
- [23] "Serial Powering for Pixel Detectors." S. Orfanelli et al, *ACES 2018*.
- [24] Circuit Globe, "Transmission Lines." <https://circuitglobe.com/transmission-lines.html> consultado el 30/09/2019.
- [25] M. Cenk'ý, "Electrical Parameters of HV and UHV Overhead Lines and their Influence on the Line Transposition." MSc Thesis, Slovak University of Technology, Bratislava, (2015).
- [26] M. Cenk'ý, J. Bend'ík, and Z. Eleschova, "Advanced methods for computation of electrical parameters for overhead transmission lines." *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, VOL 68 (2017), NO2, 143–147.
- [27] A. Usón Sardaña and J. Letosa Fleta, "Apuntes de Asignatura Líneas Eléctricas." 3er año de Grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, 2016.
- [28] H. Zhang, K. Siebert, S. Frei, T. Wenzel, and W. Mickisch, "Multiconductor transmission line modeling with VHDL-AMS for EMC applications," in *2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Detroit, MI, Aug. 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/ISEMC.2008.4652114.

- [29] L. Znamirovski and O. A. Palusinski, "Algorithm for Accurate Capacitance Matrix Measurements of the Multi-conductor Structure for VLSI Interconnections." Silesian University of Technology 2003.
- [30] L. Znamirovski and O. A. Palusinski, "Analysis of error propagation in computing the Maxwell matrix of multi-conductor structure from measurements." Proc. IEEE Science, Measurement and Technology, Vol 145, pp 117 - 121, May 1998.
- [31] A. A. Moyses, "Modelado y simulación de líneas eléctricas compuestas por cables simples y multiconductores." Beca de Colaboración departamento Ing. Eléctrica, Curso /2019 2018.
- [32] A. A. Moyses, "Memoria de Prácticas." Prácticas en Departamento de Ingeniería Eléctrica Curso 2018/2019.
- [33] "IEC 60228:2004, 'Conductors of insulated cables' The International Electrotechnical Commission. Third edition."
- [34] A. A. Moyses, M. Iglesias, F. Arteché, and F. J. Arcega, "Effects of fabrication processes in power cable electrical parameters," IEEE, EMC Europe, Barcelona, Poster sesión III, Sep. 2019, pp. 1–7.
- [35] "WAYNE & KEER, Model 6425 – Datasheet page 10. https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/wayne-kerr-6425_datasheet.pdf consultado en 02/02/2019."
- [36] "GWINSTEK, Precision LCR meter LCR-8000G Series. User manual page 135. <https://www.gwinstek.com/en-global/products/downloadSeriesDownNew/10096/742> consultado el 12/02/2019."

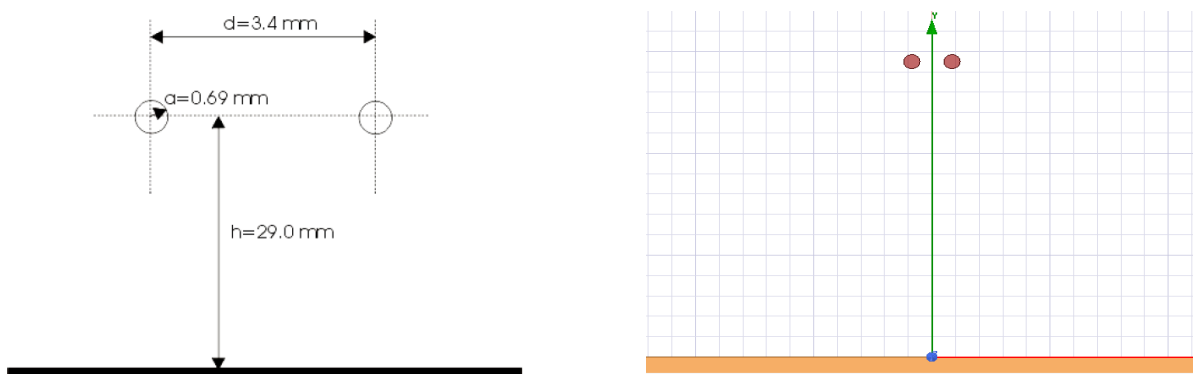
ANEXO A: MODELOS PREVIOS

Simulación de dos conductores y plano de referencia infinito

El primer modelo realizado consistió en dos conductores paralelos con un plano de referencia infinito. Este modelo estaba basado en los resultados y esquemas descritos en [3]. En el modelo de partida se indicaban los valores de los parámetros característicos del circuito calculados de forma teórica y medidos experimentalmente para una frecuencia de 100 kHz.

El objetivo de las simulaciones era obtener los mismos parámetros de línea que en el modelo de partida con un error por debajo del 5%. La primera simulación realizada obtuvo un error de hasta un 13,7% que estaba fuera de los límites propuestos. Se rehízo el modelo corrigiendo la superficie de referencia, en este caso se alcanzaron errores por debajo del 3,24% en comparación con los resultados de los cálculos teóricos y los resultados de las medidas recogidas en la bibliografía. Este error fue considerado aceptable debido a incertidumbres vinculadas tanto con el cálculo teórico (simplificaciones del modelo matemático) como a la incertidumbre vinculada con la simulación en sí. Consecuentemente, se consideró el modelo como válido.

A continuación se recoge el modelo de partida y la simulación final realizada. Por otra parte, en las Tablas I y II se recoge un resumen los resultados obtenidos con la primera y la segunda simulación respectivamente.



En la parte izquierda se representa el modelo de partida y en la parte derecha el modelo creado.

Tabla 1 Resultados del primer modelo de simulación. Algunos de los errores eran superiores al 5% por lo que no se consideró válido el modelo.

<i>L Matrix Table 100 kHz - Simulation</i>			<i>Error on L Matrix 100 KHz Simulation vs Paper_Calc</i>		
	L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]		L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]
L(Cable_1) [nH]	989,9546601	646,0553241	L(Cable_1) [nH]	11,73%	13,74%
L(Cable_2) [nH]	646,0553241	989,9546574	L(Cable_2) [nH]	13,74%	11,73%

<i>Calculated L Matrix Table 100 kHz - Paper</i>			<i>Measured L Matrix Table 100 kHz - Paper</i>		
	L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]		L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]
L(Cable_1) [nH]	886	568	L(Cable_1) [nH]	892	558
L(Cable_2) [nH]	568	886	L(Cable_2) [nH]	562	895

<i>C Matrix Table 1 kHz - Simulation</i>			<i>Error on C Matrix 100 kHz Simulation vs Paper_Calc</i>		
	C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]		C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]
C(Cable_1) [pF]	21,33992654	-14,4355101	C(Cable_1) [pF]	0,19%	6,14%
C(Cable_2) [pF]	-14,4355101	21,33992647	C(Cable_2) [pF]	6,14%	0,19%

<i>Calculated C Matrix Table 100 kHz - Paper</i>			<i>Measured C Matrix Table 100 kHz - Paper</i>		
	C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]		C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]
C(Cable_1) [pF]	21,3	-13,6	C(Cable_1) [pF]	22,6	-14,3
C(Cable_2) [pF]	-13,6	21,3	C(Cable_2) [pF]	-14,3	22,6

Tabla 2 Resultados del segundo modelo de simulación. Errores inferiores al 5% por lo que se considera válida la simulación.

<i>L Matrix Table 100 kHz - Simulation</i>			<i>Error on L Matrix 100 KHz Simulation vs Calculated</i>		
	L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]		L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]
L(Cable_1) [nH]	912,6228353	568,8103714	L(Cable_1) [nH]	3,00%	0,14%
L(Cable_2) [nH]	568,8103714	912,6229932	L(Cable_2) [nH]	0,14%	3,00%

<i>Calculated L Matrix Table 100 kHz - Paper</i>			<i>Measured L Matrix Table 100 kHz - Paper_Calc</i>		
	L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]		L(Cable_1) [nH]	L(Cable_2) [nH]
L(Cable_1) [nH]	886	568	L(Cable_1) [nH]	892	558
L(Cable_2) [nH]	568	886	L(Cable_2) [nH]	562	895

<i>C Matrix Table 100 kHz - Simulation</i>			<i>Error on C Matrix 100 kHz Simulation vs Paper_Calc</i>		
	C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]		C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]
C(Cable_1) [pF]	21,72670052	-14,041046	C(Cable_1) [pF]	2,00%	3,24%
C(Cable_2) [pF]	-14,041046	21,72687891	C(Cable_2) [pF]	3,24%	2,00%

<i>Calculated C Matrix Table 100 kHz - Paper</i>			<i>Measured C Matrix Table 100 kHz - Paper</i>		
	C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]		C(Cable_1) [pF]	C(Cable_2) [pF]
C(Cable_1) [pF]	21,3	-13,6	C(Cable_1) [pF]	22,6	-14,3
C(Cable_2) [pF]	-13,6	21,3	C(Cable_2) [pF]	-14,3	22,6

Simulación de un cable de potencia de cuatro conductores sin pantalla

El siguiente modelo realizado estuvo basado en el cable Powerflex RV-K 4G-2,5 del fabricante Top Cable. Consiste en un cable de cuatro conductores de 2,5 mm² de sección cada uno en una misma manguera, con un aislante externo de PVC además de los aislantes propios de cada conductor.

Modelo creado a partir de una estimación inicial

Para la obtención de los datos geométricos del cable se hizo una estimación basada en la norma IEC 60228:2004 en la cual está certificado el fabricante [33]. En ella se indicaban los valores máximos de sección y de resistencia por metro de longitud de los conductores del cable. Los valores estimados fueron:

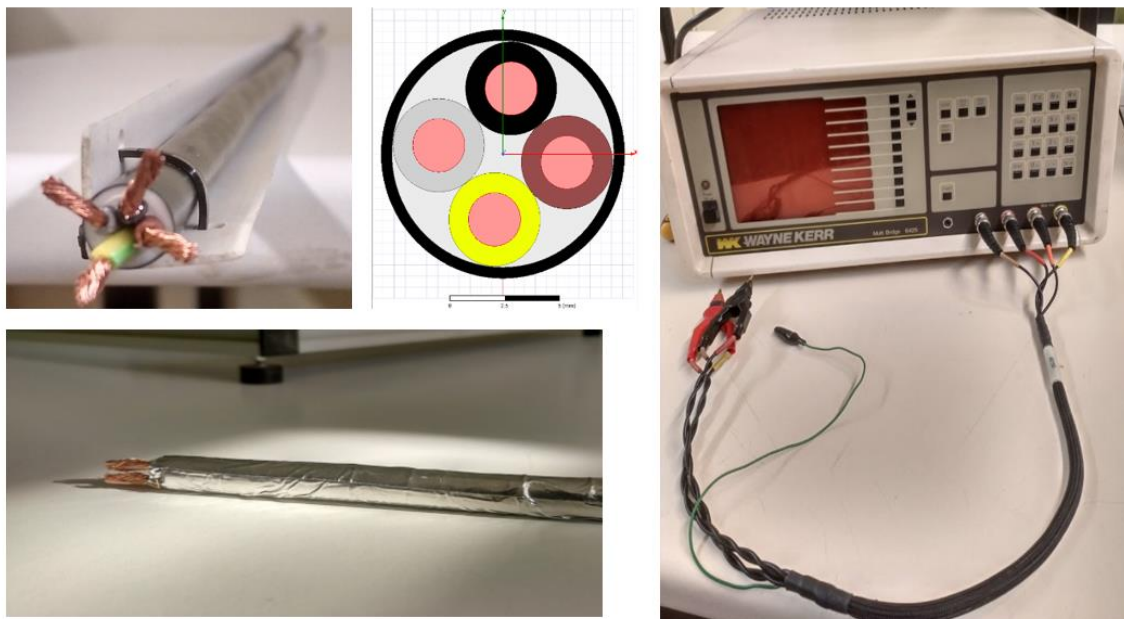
- Diámetro externo: 10,7 mm.

- Diámetro de conductor: 2,2 mm.
- Número de hilos por conductor: 71.

Posteriormente, se hizo el modelado y simulación del cable con los datos estimados obteniendo las matrices de inductancia, capacitancia, resistencia y conductancia (L, C, R y G respectivamente) por unidad de longitud en función de la frecuencia.

Para la verificación del modelo se optó por medir estas matrices con el Precision Component Analyzer Wayne Kerr 6425. En este equipo el procedimiento de medida es manual y no existe posibilidad de exportación automática de los resultados de medida, por lo que el rango de frecuencia se quedó restringido a frecuencias comprendidas entre 500 Hz y 150 kHz. El método de medida aplicado es el indicado en el capítulo previo. Para asegurar que el cable estuviera debidamente recto, se preparó un soporte con ayuda de los técnicos del laboratorio de ingeniería eléctrica.

Debido a que el cable no estaba apantallado, las medidas previstas podrían verse afectadas por campos electromagnéticos externos. Por ello, también se preparó con la ayuda de los técnicos de laboratorio otro cable con una pantalla de aluminio como repuesto (en caso de que los resultados de las medidas en el cable no fueran como lo previsto). A continuación se muestra el cable real, el modelo creado para la simulación, el cable con la pantalla de aluminio y el analizador Wayne Kerr utilizado.



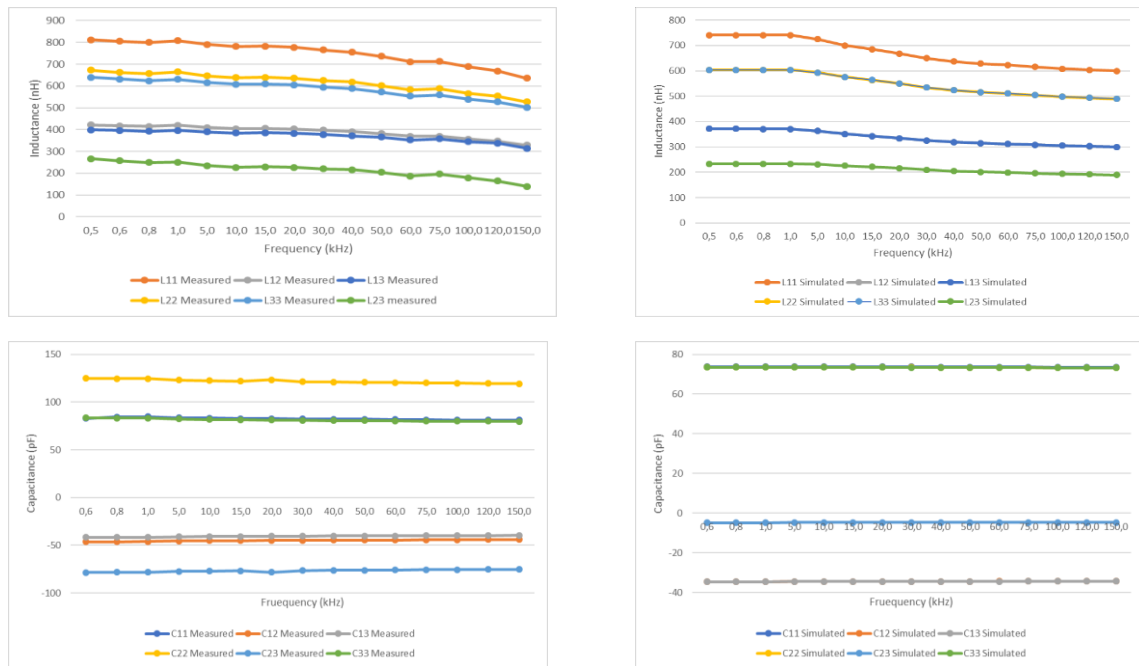
Cable real con el soporte en la parte superior izquierda. Modelo de simulación del cable en la parte superior en el centro. Cable con pantalla de aluminio preparado en el laboratorio en la parte inferior izquierda. Analizador Wayne Krer 6425 empleado en la parte derecha

Se realizaron tres medidas de todos los parámetros por unidad de longitud del cable para cada frecuencia utilizando una velocidad de medida lenta, velocidad que aporta mayor precisión según datos del fabricante. Se calculó el valor medio y la desviación estándar de los valores medidos. Se realizaron los tratamientos de los datos para obtener la matriz definitiva. Primero se propuso realizar la transformación de la matriz C utilizando la herramienta Engineering Equation Solver (EES), sin

embargo resulto más sencilla y ágil la programación del código en lenguaje Visual Basic (VBA) en Excel.

Comparando los resultados de la simulación con los obtenidos en la medida tras el tratamiento de datos, se observa que existen errores entre 0,53% hasta un 18,3% para la inductancia y de hasta un 13% para la capacitancia. La incertidumbre asociada del Wayne Kerr 6425 para los valores medidos y el ancho de banda elegido está entre un 0,2% y un 0,5% según [35].

A continuación se presentan los resultados obtenidos en simulación en comparación con los obtenidos en la medición. Se observa que las formas de las gráficas son similares y que las curvas representadas siguen el mismo perfil pese a que los valores no coincidieran exactamente.



En la parte superior se comparan los resultados para los valores de inductancia. En la parte inferior se comparan los valores obtenidos para la capacitancia. En la parte izquierda se encuentran los valores medidos y en la parte derecha los valores simulados.

También cabe observar que el valor de la inductancia es dependiente de la frecuencia debido al efecto pelicular, por el que la corriente circula cada vez más por la parte externa del cable en lugar de aprovechar toda la sección. En la matriz de inductancia cada valor está representado por la suma de inductancia interna y la inductancia externa del conductor.

La inductancia externa en sí no depende de la frecuencia de la señal sino que depende de la configuración y distribución geométrica de todo el circuito. Sin embargo, la inductancia interna sí que es dependiente de la frecuencia. Ella es constante en el rango de baja frecuencia, cuando esta sube el valor de la inductancia interna se reduce debido al efecto pelicular. A partir de una frecuencia determinada, en este caso concreto en torno a 10 kHz, la inductancia interna disminuye en el orden de la raíz cuadrada de la frecuencia (\sqrt{f}). A altas frecuencias, el valor de la inductancia interna es despreciable frente a al valor de la inductancia externa, por lo que se puede asumir como constante el valor de la inductancia por unidad de longitud, siendo igual al valor de la inductancia externa.

En los resultados se puede apreciar que los valores de capacitancia se mantienen constantes independientemente del valor de la frecuencia. Por otro lado, los valores de inductancia son constantes en un primer tramo (hasta 10 kHz aproximadamente para este cable), luego decrecen considerablemente según avanza la frecuencia debido al efecto pelicular para volver a ser constante en alta frecuencia (a partir de 100 -120 kHz para este cable). Los resultados obtenidos experimentalmente tanto por simulación como en las mediciones coinciden cualitativamente con lo esperado tras el estudio de la bibliografía mencionada.

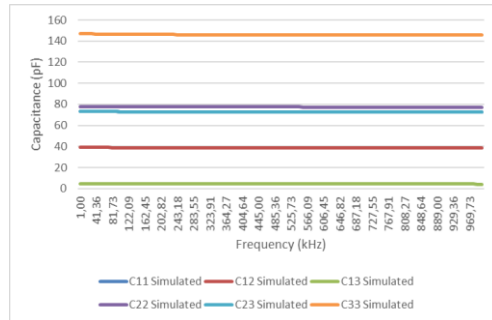
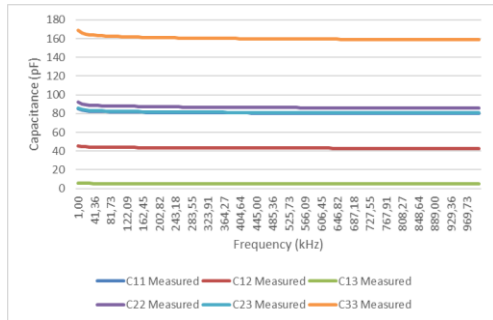
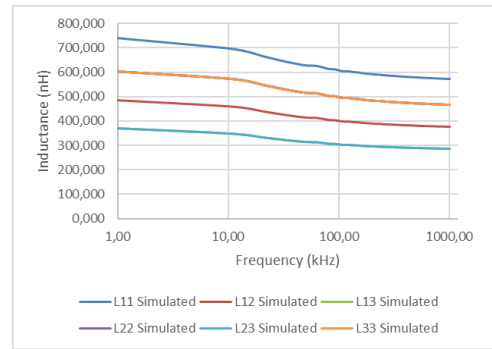
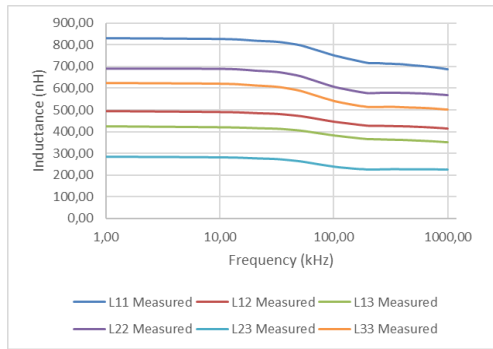
Con los resultados obtenidos no se pudo considerar el modelo de simulación como válido cuantitativamente. La causa del error pudo venir del modelo de simulación o de las medidas realizadas con el Wayne Kerr. Para asegurarse que el error no provenía del proceso de medición, se decidió repetir las medidas de los parámetros por unidad de longitud en el laboratorio del ITAINNOVA con un equipo recién calibrado.

En esta ocasión el equipo de medida empleado fue el Precision LCR meter Instek LCR-8101G aplicando el mismo método de medida mencionado en el Capítulo 3 de la memoria. Debido a la automatización de la medida y a la facilidad de exportación de los datos a Excel, la banda de frecuencia medida estaba comprendida entre 1 kHz y 1 MHz. Se midieron 100 puntos dentro de la banda de frecuencia y se realizaron tres medidas por punto. En este caso, las mediciones se realizaron con una velocidad de medida media que según el fabricante tiene una incertidumbre asociada entre un 1% y un 5% para los valores medidos [36]. En la Tabla 3 se representan los resultados junto con los errores para la frecuencia de 950 kHz (zona donde ya no se aprecia el efecto pelicular).

Tabla 3 Resultados del segundo modelo de simulación. Errores fuera del rango aceptable por lo que no se considera válida la simulación

	L11 (nH)	L12 (nH)	L13 (nH)	L22 (nH)	L23 (nH)	L33 (nH)	C11 (pF)	C12 (pF)	C13 (pF)	C22 (pF)	C23 (pF)	C33 (pF)
Medida	690,2	416,4	351,4	569,9	225,6	502,2	80,1	-37,2	-37,7	81,0	-5,4	78,3
Simulación	574,3	377,1	287,1	467,5	287,3	467,6	72,4	-33,8	-34,1	72,7	-4,7	73,0
Error	16,80%	9,44%	18,28%	17,97%	27,3%	6,9%	9,59%	9,18%	9,61%	10,19%	12,27%	6,79%

A continuación se representa los resultados de medida para una frecuencia entre 1 kHz y 1 MHz en comparación con el primer modelo de simulación.

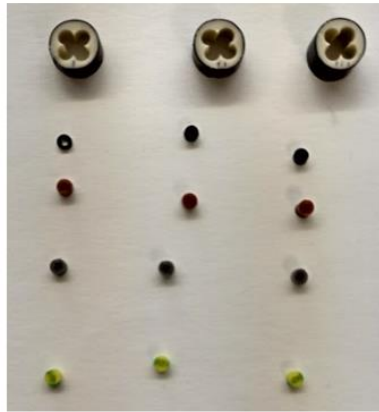


En la parte superior se comparan los resultados para los valores de inductancia. En la parte inferior se comparan los valores obtenidos para la capacitancia. En la parte izquierda se encuentran los valores medidos y en la parte derecha los valores simulados.

Se observa que los valores medidos con el Precision LCR meter Instek LCR-8101G son coherentes con las mediciones realizadas en el Wayne Kerr 6425 por lo que se considera válido el método de medición empleado y los resultados obtenidos en la medición. Consecuentemente, se concluyó que la principal fuente de error provenía del modelo de simulación realizado con parámetros geométricos estimados.

Modelo realizado con medidas reales de los parámetros geométricos del cable

Para solventar el error de simulación, se propuso medir los parámetros geométricos del cable. Se cortaron muestras de aproximadamente cinco milímetros de espesor, se separaron los aislantes internos del aislante externo y a su vez se separaron los conductores de cobre de los aislantes internos. Se cortaron veinte muestras por aislante, de los cuales los tres con mejores características (con un corte más ortogonal y con menores deformaciones) fueron seleccionados como muestras finales. Las muestras finales fueron marcadas con un rotulador para asegurar la trazabilidad de las medidas. A continuación se representan las muestras elegidas.

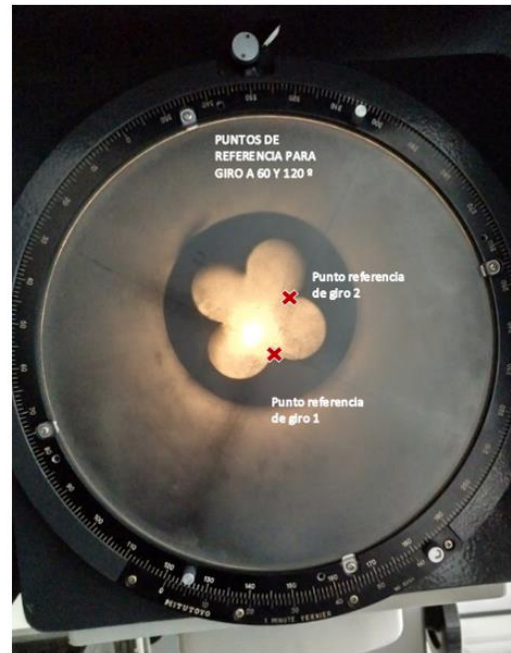
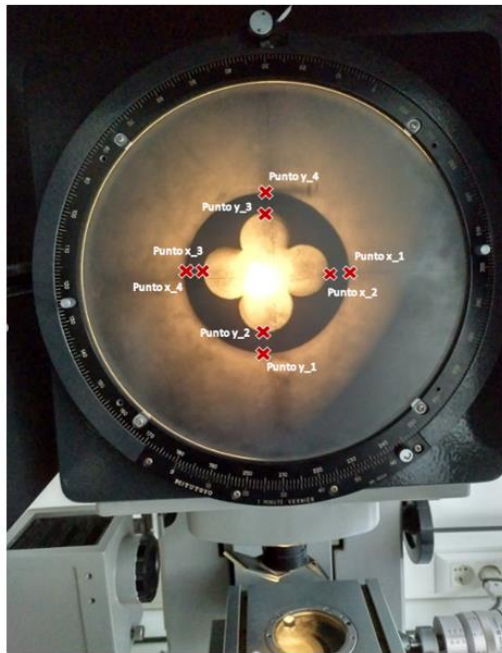


Muestras elegidas para las mediciones de los parámetros geométricos del cable

Las medidas se realizaron en el proyector de perfiles Mitutoyo PJ-250C, equipo que permite medir longitudes por comparación óptica con una resolución de $5\ \mu\text{m}$. Se midieron cuatro puntos en el eje horizontal denominados Point x_1, Point x_2, Point x_3 y Point x_4, y cuatro puntos en el eje vertical denominados Point y_1, Point y_2, Point y_3 y Point y_4. Se realizaron tres medidas para cada uno de los puntos. Este proceso se repitió tras girar cada muestra 60° y 120° .

De esta forma el diámetro externo se podría calcular mediante la resta entre los valores de los puntos 4 y 1, mientras que los espesores de los aislantes se podrían calcular mediante la resta de los puntos 4 y 3 y mediante la resta entre los puntos 2 y 1. Ambas formas de medición de diámetro externo como de espesor interno se aplicaron tanto para los puntos de los ejes horizontales como para los puntos de los ejes verticales.

A continuación se representan los puntos medidos, los puntos de referencia para realizar los giros (de 60 y 120 grados) y el equipo empleado. En la Tabla 4 se recogen los valores medios finales junto con el rango de error obtenido (diferencia los valores máximos y mínimos medidos para cada parámetro).



Puntos medidos para cada aislante en el proyector de perfiles a la izquierda y puntos de referencia para los giros de 60 y 120 grados a la derecha

Tabla 4 Resultados de medición de los parámetros geométricos del cable

	External Isolation	Internal Black Isolation	Internal Brown Isolation	Internal Grey Isolation	Internal Yellow-Green Isolation
Diam. (mm)	10,568	3,237	3,317	3,382	3,342
Rango del diámetro (mm)	0,010	0,015	0,014	0,043	0,066
Espesor. (mm)	1,489	0,767	0,759	0,876	0,773
Rango de espesor (mm)	0,067	0,044	0,028	0,082	0,052

Gracias a las mediciones realizadas no solo se obtuvieron los valores de los parámetros geométricos del cable, también sirvió para detectar posibles causas de errores del primer modelo de simulación. Entre ellos cabe destacar que en el primer modelo se supuso que, en el centro del cable, entre los aislantes internos, estaba cubierto por aislante. Sin embargo, tras seccionar el cable se observó que no había ningún material en el centro del cable, había únicamente aire. Por lo que esta característica también se debería tener en cuenta en el nuevo modelo.

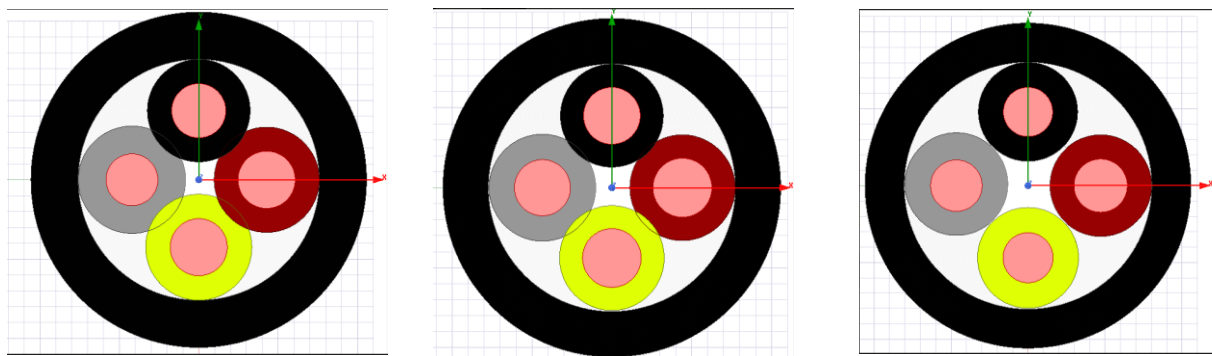
Por otra parte, se pudo observar que la disposición de los conductores en el cable e incluso dentro de los aislantes internos no era simétrica, sino que los conductores no se encontraban perfectamente centrados. Estos desplazamientos pueden tener origen en el proceso de fabricación (valores aceptables dentro del proceso de fabricación bajo tolerancias geométricas y tolerancias de posición) y en el proceso de corte de las muestras de medidas.

Tras modelar el cable de acuerdo con los parámetros geométricos medidos se observó que con los valores medios los aislantes internos no cabían dentro del aislante externo. Se ajustaron las tolerancias al valor máximo de diámetro del aislante externo y a los valores mínimos para los aislantes internos observando el mismo resultado. La principal causa era la compactación de los aislantes

internos en el proceso de fabricación debido a que es un material fácilmente deformable y se compactan en el proceso de fabricación al meterlos dentro del aislante externo. Al separar los aislantes internos de la capa externa las medidas realizadas no tuvieron en cuenta este efecto. Adicionalmente, como fuente de error cabe destacar que el equipo de medida no estaba calibrado y que el proceso de seccionamiento de los cables en sí también produjo deformaciones en las secciones de los aislantes.

Como solución se decidió ampliar la sección del aislante externo manteniendo la sección de los aislantes internos. Tras realizar la simulación de este modelo se observa que los errores se redujeron considerablemente tanto para las inductancias como para las capacitancias. A excepción de la inductancia L12 y la capacitancia C23, los demás parámetros se encontraban por debajo del 10% de error como máximo. La L12 mantenía un error del orden del 20% para todo el rango de frecuencia mientras que el error de la C23 se mantenía del orden del 14%. En esta simulación se considera el elemento central del cable como aire y se considera que todos los conductores están ubicados simétricamente en el cable.

A continuación se recoge la evolución del modelo hasta este punto mientras que en la Tabla 5 se indican los resultados obtenidos para el modelo tras encajar todos los aislantes internos adecuadamente.



A la izquierda se representa el modelo creado con los valores medios de la medición, en el centro el modelo tras ajustar los rangos de medición y a la derecha tras ampliar el aislante externo manteniendo los internos intactos

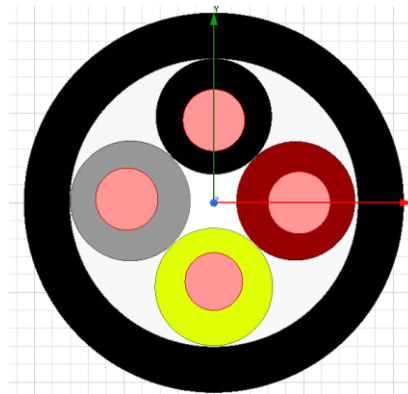
Tabla 5 Resultados de la simulación para 950 kHz considerando los conductores simétricamente distribuidos.

	L11 (nH)	L12 (nH)	L13 (nH)	L22 (nH)	L23 (nH)	L33 (nH)	C11 (pF)	C12 (pF)	C13 (pF)	C22 (pF)	C23 (pF)	C33 (pF)
Medida	690,2	416,4	351,4	569,9	225,6	502,2	80,1	-37,2	-37,7	81,0	-5,4	78,3
Simulación	663,8	327,7	327,6	530,9	212,5	535,6	74,5	-34,6	-34,7	76,6	-6,2	76,5
Error	3,84%	21,31%	6,77%	6,85%	5,80%	6,64%	7,09%	7,20%	8,06%	5,43%	13,51%	2,34%

Modelo creado considerando disposición asimétrica de los conductores

El error mencionado debería ser principalmente debido a que la disposición de los conductores en el interior del cable no era simétrica, tal como se observó en la medición de los espesores de los aislantes. Modificando la disposición de los cables entre 50 μm y 150 μm se consiguió reducir el error de la capacitancia por debajo del 5% para casi todo el espectro de frecuencia estudiado. Sin embargo,

los errores de las inductancias seguían superiores al 10%, principalmente para los valores de la L12. A continuación se recoge el modelo tras modificar las disposiciones geométricas de los conductores mientras que en la Tabla 6 se resumen los resultados para la frecuencia de 950 kHz.

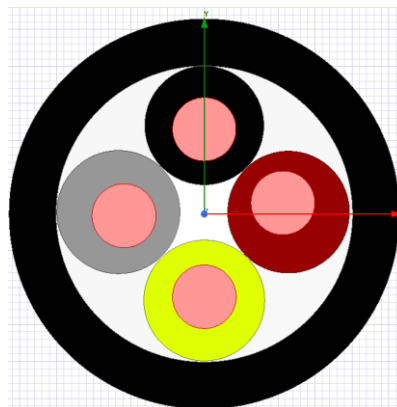


Modelo de simulación del conductor tras considerar que la disposición de los conductores no era simétrica

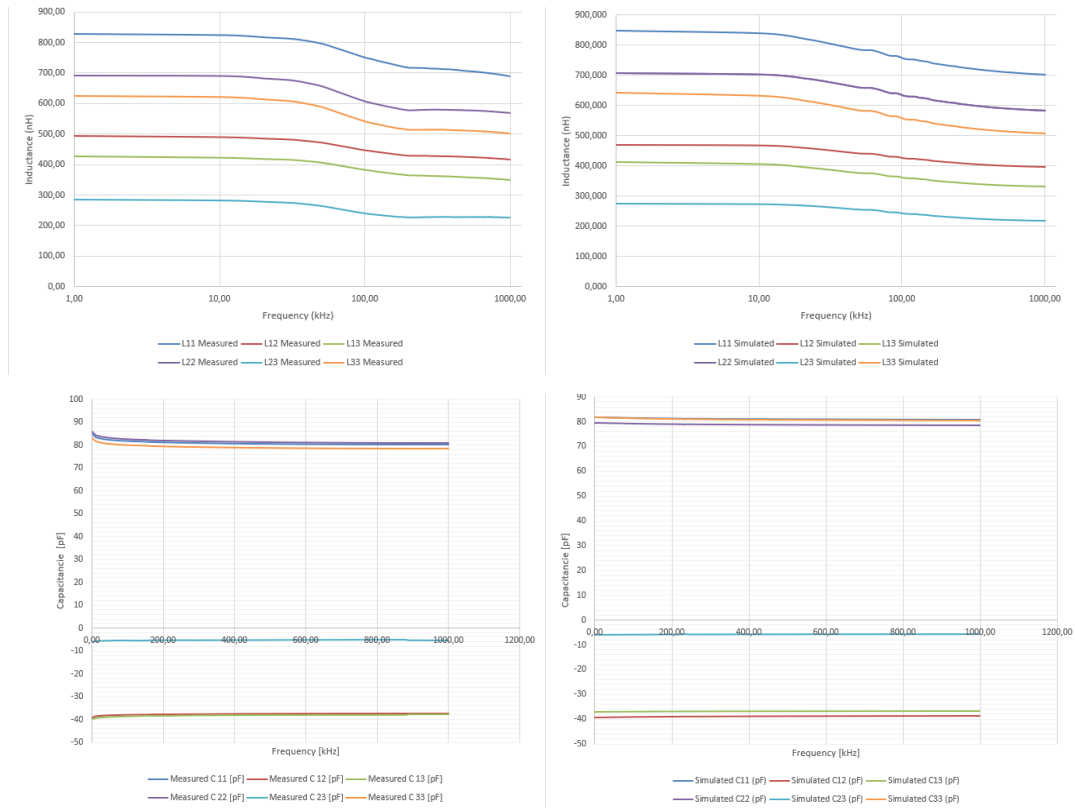
Tabla 6 Resumen de los resultados para el modelo que considera asimetría en la disposición de los conductores.

	L11 (nH)	L12 (nH)	L13 (nH)	L22 (nH)	L23 (nH)	L33 (nH)	C11 (pF)	C12 (pF)	C13 (pF)	C22 (pF)	C23 (pF)	C33 (pF)
Medida	690,2	416,4	351,4	569,9	225,6	502,2	80,1	-37,2	-37,7	81,0	-5,4	78,3
Simulación	629,0	317,9	326,3	521,1	209,0	533,3	80,9	-37,2	-37,9	79,7	-5,6	78,5
Error	8,87%	23,65%	7,14%	8,57%	7,35%	6,17%	0,90%	0,24%	0,36%	1,69%	2,82%	0,21%

Se observó que los materiales empleados en el modelo creado eran los materiales estándar de las librerías y que el aire del interior del cable se había considerado con un modelo ideal. Tras modificar ligeramente las propiedades de los materiales y modificar la disposición de los conductores se consiguió finalmente un modelo cuyos errores eran inferiores al 5% para la capacitancia e inferiores al 6% para las inductancias para la mayoría de las frecuencias estudiadas en comparación con las medidas experimentales, considerando como válido el modelo. A continuación se recogen el modelo final junto con la comparación de los resultados obtenidos en simulación con los resultados de medición para las frecuencias estudiadas, mientras que en la Tabla 7 se presentan los resultados numéricos para la frecuencia de 950 kHz.



Modelo final del cable considerando asimetría en la disposición de los conductores



En la parte superior se encuentran los resultados de las inductancias y en la parte inferior los resultados de las capacitancias medidas en comparación con las simuladas

Tabla 7 Resumen de los resultados del modelo final para 950 kHz

	L11 (nH)	L12 (nH)	L13 (nH)	L22 (nH)	L23 (nH)	L33 (nH)	C11 (pF)	C12 (pF)	C13 (pF)	C22 (pF)	C23 (pF)	C33 (pF)
Medida	690,2	416,4	351,4	569,9	225,6	502,2	80,1	-37,2	-37,7	81,0	-5,4	78,3
Simulación	702,3	396,9	331,5	584,2	219,4	508,7	81,0	-38,7	-36,7	78,5	-5,5	80,7
Error	1,74%	4,69%	5,66%	2,50%	2,77%	1,28%	0,96%	3,92%	2,83%	3,15%	1,12%	2,91%

Estudio de la influencia de desplazamiento de los conductores en los parámetros eléctricos

Tras haber validado el modelo, se decidió realizar un estudio de cómo afectan las variaciones de las disposiciones de los conductores en el interior del cable en los parámetros por unidad de longitud. Se trata de una idea de la que no se ha encontrado mucha información en las publicaciones científicas actuales y que representa un caso de posible aplicación práctica e inmediata. El proceso de fabricación no puede asegurar una simetría perfecta de los conductores, desviaciones de 50 μm - 150 μm son muy factibles tal como se ha visto en el modelo final presentado. Adicionalmente, los procesos de instalación de cables también pueden causar desviaciones y deformaciones en los mismos.

Para llevar a cabo el estudio se ha decidido fijar la frecuencia en 950 kHz (en la que el efecto pilicular es despreciable). Se estudió el efecto de desplazamientos en cada uno de los conductores de 50 μm , 100 μm y de 150 μm con respecto la disposición inicial del modelo validado. Las direcciones de desplazamientos estudiadas fueron hacia arriba, abajo, izquierda y derecha. Todas las variaciones

de los parámetros por unidad de longitud del cable se calcularon con respecto a los valores de simulación indicados previamente.

Se obtuvo que para variaciones de 50 μm se podrían llegar a producir variaciones de hasta un 2,3% para la capacitancia y de 5,4% para la inductancia por unidad de longitud. Para 100 μm las variaciones registradas llegaron a ser de hasta un 4,6% para la capacitancia y un 6,7% para la inductancia. Finalmente, para 150 μm de desviación se obtuvieron variaciones de hasta un 7,0% para la capacitancia y de 8,8% para la inductancia. En la tabla 8 se recoge un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 8 Resumen de variaciones máximas obtenidas para desviaciones en la disposición de cada uno de los conductores y en la referencia

Desplazamiento	Conductor 1		Conductor 2		Conductor 3		Referencia		Máximo	
	C	L	C	L	C	L	C	L	C	L
Max 50 μm	2,30%	3,32%	2,20%	4,89%	2,16%	4,58%	1,63%	5,04%	2,30%	5,04%
Max 100 μm	4,61%	4,24%	4,49%	6,59%	4,40%	6,02%	3,37%	6,97%	4,61%	6,97%
Max 150 μm	7,02%	5,40%	6,91%	8,69%	6,73%	7,44%	5,15%	8,89%	7,02%	8,89%

Para este caso de estudio las variaciones en los parámetros por unidad de longitud se incrementan para mayores desplazamientos como es esperado. Se observa que para este conductor las mayores variaciones de la capacitancia se obtienen para desplazamientos del conductor 1 (cubierto por el aislante interior negro), mientras que las mayores variaciones de la inductancia se obtienen para desplazamientos del conductor de referencia (aislante interior amarillo-verde).

Por otra parte, para desplazamientos pequeños (inferiores a 50 μm) las variaciones máximas de las inductancias son muy superiores que las variaciones en la capacitancia, casi el doble. Sin embargo, a partir de 100 μm de desplazamiento, el crecimiento de la variación de la capacitancia es superior al crecimiento de la variación de la inductancia.

Con las conclusiones obtenidas en este modelo se redactó una publicación científica que fue aceptada como póster en el Congreso Europeo de Compatibilidad Electromagnética (EMC Europe) organizada por la asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) [34]. El congreso fue celebrado en Barcelona durante los días 2 y el 6 de septiembre de 2019.

ANEXO B: SCRIPTS REALIZADOS PARA MODELO INICIAL

Script para cálculo de la matriz H

Sub Cálculo_H()

```
'Worksheets("MATRIZ H").Activate

Application.ScreenUpdating = False

Dim n, filas, columnas, v, i, j As Integer

'n = numero de cables
n = Cells(2, 2)

'Tamaño del vector
v = Cells(3, 2)

'Definir punto de partida a escribir
Dim fila0, columna0 As Integer
fila0 = 4
columna0 = 2

** ESCRIBIR NOMBRE DE FILAS **
Inicializar subindices ij de Cmij
i = 1
j = 1
'Bucle para pasar todas las filas
For filas = 1 To v
  Cells(filas + fila0, columna0).Value = "Cm" & i & "_" & j
  j = j + 1
  If j > n Then
    i = i + 1
    j = 1
  'Al ser simetrica el subindice j siempre es mayor o igual a i
  j = i
  End If
Next filas

** ESCRIBIR NOMBRE DE COLUMNAS **
'Definir i1 y j1 para pasar las columnas en una misma fila Cpij
Dim i1, j1 As Integer

Inicializar subindices i1 j1 de Cpij
i1 = 1
j1 = 1

For columnas = 1 To v

  Cells(fila0, columnas + columna0).Value = "Cp" & i1 & "_" & j1

  j1 = j1 + 1

  If j1 > n Then
    i1 = i1 + 1
    j1 = i1
  End If

Next columnas

** RELLENAR LA MATRIZ H
Inicializar subindices ij
i = 1
j = 1

'Para el calculo de Cmij: definir las variables s, k, delta_s y delta_ks
Dim s, k, delta_s, delta_ks As Integer

'Primer bucle para pasar por todas las filas
For filas = 1 To v

  'Comprobar si se trata de un elemento Cmii
  If i = j Then
    i1 = 1
    j1 = 1

  'Bucle para rellenar toda la relación del elemento Cmii con Cpij
  For columnas = 1 To v

    'El elemento Cmii solo tiene la suma de las capacitancias entre él y los demás conductores y ref
    If (i1 = i) Or (j1 = j) Then
      Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 1
    Else
      Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 0
    End If

    j1 = j1 + 1
```

```

If j1 > n Then
    i1 = i1 + 1
    j1 = i1
End If

Next columns

Else
'En este caso se aplica el algoritmo para Cmij
'Primero rellenar los valores de Cpij que entran en la relacion con Cmij
For k = i To j

    For s = 1 To n

        If (s >= i) And (s <= j) Then
            delta_s = 1
        Else
            delta_s = 0
        End If

        If k = s Then

            delta_ks = 1
        Else
            delta_ks = 0
        End If

        'Comprobar si para estos k y s existe relación entre Cm y Cp
        If (1 - delta_s * (1 - delta_ks)) = 1 Then

            'Comprobar si se debe introducir Cpks o Cpsk
            If k <= s Then
                'En este caso introducir Cpks

                i1 = 1
                j1 = 1
                For columnas = 1 To v

                    If (i1 = k) And (j1 = s) Then
                        Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 1
                    End If

                    j1 = j1 + 1
                    If j1 > n Then
                        i1 = i1 + 1
                        j1 = i1
                    End If
                Next columnas
            Else
                'En este caso se introduce Cpsk
                i1 = 1
                j1 = 1
                For columnas = 1 To v

                    If (i1 = s) And (j1 = k) Then
                        Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 1
                    End If

                    j1 = j1 + 1
                    If j1 > n Then
                        i1 = i1 + 1
                        j1 = i1
                    End If
                Next columnas
            End If

        End If

    Next s

Next k

'Poner a cero las columnas Cpij que no entren en relación con Cmij
For columnas = 1 To v

    If Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = "" Then
        Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 0
    End If

    j1 = j1 + 1
    If j1 > n Then
        i1 = i1 + 1
        j1 = i1
    End If
Next columnas
End If

j = j + 1

If j > n Then
    i = i + 1

```



```

** RELLENAR LA MATRIZ D
Inicializar subíndices i y j de Cpij
i = 1
j = 1

For filas = 1 To v

'Comprobar si se trata de un elemento Cpii
If i = j Then
    i1 = 1
    j1 = 1

'Bucle para rellenar toda la relación del elemento Cmii con Cpij
For columnas = 1 To v

'El elemento Cii solo tiene la suma de las capacitancias entre él y los demás conductores y ref
If (i1 = i) Or (j1 = j) Then
    Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 1
Else
    Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 0
End If

    j1 = j1 + 1

    If j1 > n Then
        i1 = i1 + 1
        j1 = i1
    End If

Next columnas

Else
'En este caso rellenamos con la relación entre Cpij y Cij sabiendo que Cpij = -Cij
i1 = 1
j1 = 1
For columnas = 1 To v
    If (i1 = i) And (j1 = j) Then
        Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = -1
    Else
        Cells(filas + fila0, columnas + columna0).Value = 0
    End If

    j1 = j1 + 1
    If j1 > n Then
        i1 = i1 + 1
        j1 = i1
    End If
Next columnas

End If

j = j + 1

If j > n Then
    i = i + 1
    j = i
End If

Next filas

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

```

Con el código se creó una hoja Excel que solicita el número de cables n , calcula el tamaño del vector $v = [n*(n+1)] / 2$ y posteriormente calcula la matriz H de tamaño $v \times v$.

Cálculo de matriz D		CALCULAR MATRIZ D																		
Nº de cables	36	NOTA: HAY QUE VACIAR TODAS LAS CELDAS ANTES DE EJECUTAR PARA EVITAR ERROR																		
Tamaño del vector	666																			
Cpi_j / Cj_i	C1_1	C1_2	C1_3	C1_4	C1_5	C1_6	C1_7	C1_8	C1_9	C1_10	C1_11	C1_12	C1_13	C1_14	C1_15	C1_16	C1_17	C1_18	C1_19	
Cp1_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Cp1_2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_3	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_5	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_6	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_7	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_8	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_9	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Cp1_10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Script de cálculo de los elementos Mij en función de la matriz L de simulación

Sub Calcular_L()

Worksheets("Matriz Lij simulada").Activate

'Fila de referencia, columna de referencia, distancia entre L y Lij, filas, columnas, valores totales

Dim frec, cref, dist, filas, columnas, i, j, n, v, frec As Integer

Dim Lii, Ljj, Lij As Double

Dim i1, j1, filas1 As Integer

frec = 3

cref = 12

dist = 10

n = 32

v = n * (n + 1) / 2

frec = 6

i = 1

j = 1

For filas = 1 To v

'Comprobar si es un elemento de la diagonal

If (i = j) Then

For columnas = 1 To frec

Cells(filas + frec, columnas + cref).Value = Cells(filas + frec, columnas + cref - dist).Value

Next columnas

Else

'En este caso no es de la diagonal tenemos el Lij

For columnas = 1 To frec

Lij = Cells(filas + frec, columnas + cref - dist).Value

i1 = 1

j1 = 1

For filas1 = 1 To v

If j1 = i1 Then

If (i1 = i) Then

Lii = Cells(filas1 + frec, columnas + cref - dist).Value

End If

If (j1 = j) Then

Ljj = Cells(filas1 + frec, columnas + cref - dist).Value

End If

End If

j1 = j1 + 1

If j1 > n Then

i1 = i1 + 1

j1 = i1

End If

Next filas1

Cells(filas + frec, columnas + cref).Value = Lii + Ljj - (2 * Lij)

Next columnas

End If

j = j + 1

If j > n Then

i = i + 1

j = i

For columnas = 1 To frec

'Cells(filas + frec + 1, columnas + cref).Value = Cells(filas + frec, columnas + cref - dist).Value

' Next columnas

End If

Next filas

End Sub

Script para ajustar las unidades de los resultados de simulación

Sub Unidades()

Dim fF, farad As String

fF = "[fF]"

farad = "[farad]"

Dim valores, filas, columnas, num_filas As Integer

'En realidad serán 528 + 1 posiciones que corresponden al numero de vectores a analizar
valores = 529
num_filas = 7

For columnas = 1 To valores

posicion = InStr(Cells(1, columnas).Value, fF)

If posicion > 0 Then

Cells(1, columnas).Value = Replace(Cells(1, columnas), fF, "[pF]")

For filas = 2 To num_filas

'f es E-15 mientras que p es E-12

Cells(filas, columnas).Value = Cells(filas, columnas).Value / 1000

Next filas

End If

posicion = InStr(Cells(1, columnas).Value, farad)

If posicion > 0 Then

Cells(1, columnas).Value = Replace(Cells(1, columnas), farad, "[pF]")

For filas = 2 To num_filas

'farad es fadios que p es E-12

Cells(filas, columnas).Value = Cells(filas, columnas).Value * 1000000000000#

Next filas

End If

Next columnas

'Los datos de L están todos en nH mientras que los datos de R hay algunos en micromios (uohm)
Worksheets("R Matrix_PS_PPI").Activate

Dim uohm As String

uohm = "[uOhm]"

For columnas = 1 To valores

posicion = InStr(Cells(1, columnas).Value, uohm)

If posicion > 0 Then

Cells(1, columnas).Value = Replace(Cells(1, columnas), uohm, "[mOhm]")

For filas = 2 To num_filas

'uohm es E-6 mientras que mohm es E-3

Cells(filas, columnas).Value = Cells(filas, columnas).Value / 1000

Next filas

End If

Next columnas

End Sub

Script para pasar de los componentes vectoriales a las matrices simétricas L, C y R

Sub Matriz()

Worksheets("Matriz C").Activate

Dim filas, fref, cref, fdatos, cdatos, i, j, v, n As Integer
'Dim x As Double

fref = 2
cref = 29
fdatos = 3
cdatos = 17
v = 666
n = 36

i = 1
j = 1
For filas = 1 To v

 If j = i Then

 Cells(fref + i, cref + j).Value = Cells(fdatos + filas, cdatos).Value
 'x = Cells(fdatos + filas, cdatos).Value

 Else

 Cells(fref + i, cref + j).Value = Cells(fdatos + filas, cdatos).Value
 Cells(fref + j, cref + i).Value = Cells(fdatos + filas, cdatos).Value

 End If

 j = j + 1
 If j > n Then

 i = i + 1
 j = i

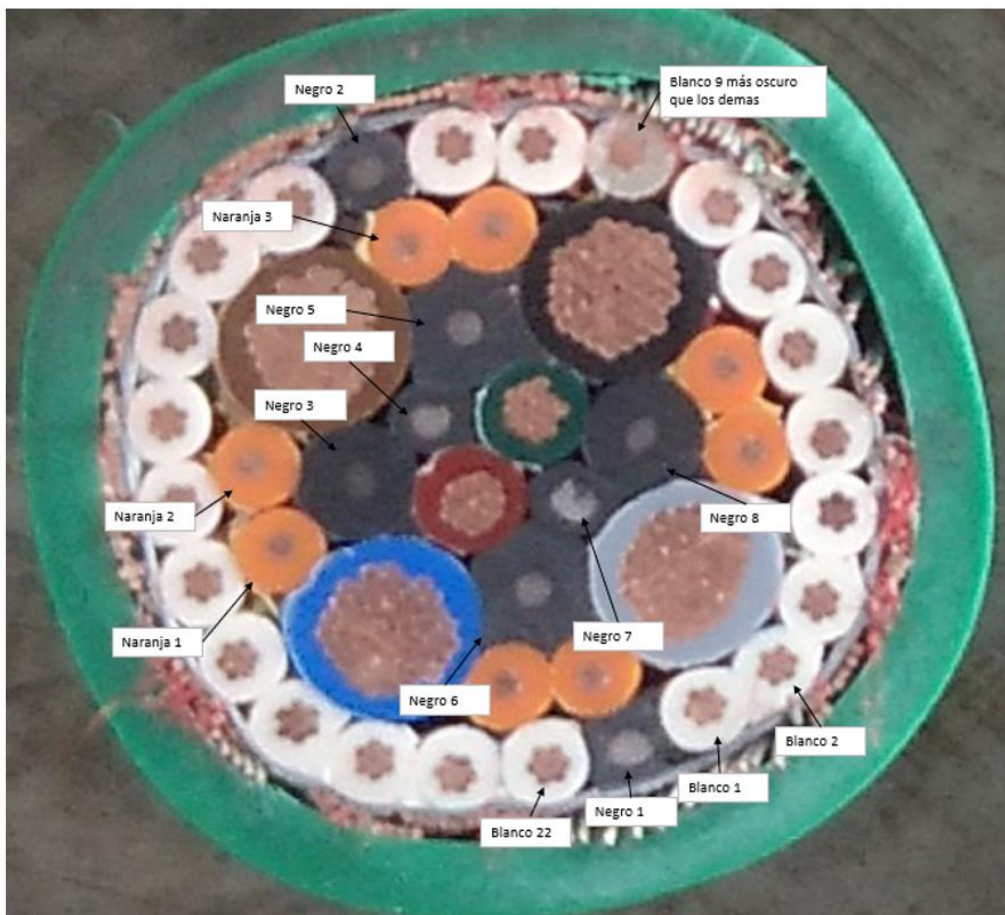
 End If

Next filas

End Sub

ANEXO C: RESULTADOS DE MEDIDAS GEOMÉTRICAS DEL PROTOTIPO

A continuación se recoge la fotografía seleccionada como muestra para las medidas geométricas y una tabla con todas las medidas realizadas.



Escala 10:1	Media 1 horizontal, Medida Vertical, Medidas 3 y 4 Diagonales	Ampliando la foto IMG_20200211_100209_379 al 131%													
Numeración		Diámetro externo [mm]							Diámetro interno [mm]						
Numeración real	Numeración de tratamiento de datos	Nominal	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media	Variación	Nominal	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media	Variación
Cable Blanco 1	Cable 1	1,2	1,5	1,4	1,6	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 2	Cable 2	1,2	1,5	1,4	1,5	1,4	1,45	21%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 3	Cable 3	1,2	1,5	1,4	1,5	1,5	1,48	23%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 4	Cable 4	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 5	Cable 5	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 6	Cable 6	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 7	Cable 7	1,2	1,6	1,5	1,5	1,5	1,53	27%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 8	Cable 8	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 9	Cable 9	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 10	Cable 10	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 11	Cable 11	1,2	1,5	1,5	1,6	1,6	1,55	29%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 12	Cable 12	1,2	1,6	1,5	1,5	1,6	1,55	29%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 13	Cable 13	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 14	Cable 14	1,2	1,5	1,4	1,4	1,4	1,43	19%	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 15	Cable 15	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 16	Cable 16	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 17	Cable 17	1,2	1,5	1,5	1,4	1,5	1,48	23%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 18	Cable 18	1,2	1,5	1,5	1,4	1,5	1,48	23%	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 19	Cable 19	1,2	1,5	1,5	1,4	1,5	1,48	23%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 20	Cable 20	1,2	1,5	1,4	1,6	1,4	1,48	23%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Blanco 21	Cable 21	1,2	1,5	1,4	1,5	1,5	1,48	23%	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,68	13%
Cable Blanco 22	Cable 22	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	25%	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,70	17%
Cable Naranja 1	Cable 23	0,6	1,5	1,4	1,5	1,5	1,48	146%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40	0%
Cable Naranja 2	Cable 24	0,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,53	154%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40	0%
Cable Naranja 3	Cable 25	0,6	1,4	1,4	1,4	1,5	1,43	138%	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	25%
Cable Naranja 4	Cable 26	0,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	150%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40	0%
Cable Naranja 5	Cable 27	0,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,45	142%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40	0%
Cable Naranja 6	Cable 28	0,6	1,5	1,4	1,4	1,4	1,43	138%	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,43	6%
Cable Naranja 7	Cable 29	0,6	1,5	1,4	1,4	1,5	1,45	142%	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	25%
Cable Naranja 8	Cable 30	0,6	1,5	1,5	1,6	1,3	1,48	146%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40	0%
Cable Marron	Cable 31	3,3	3,3	3,1	3,2	3,1	3,18	-4%	2,1	2,4	2,4	2,4	2,4	2,40	14%
Cable Azul	Cable 32	3,3	3,4	3,1	3,3	3,1	3,23	-2%	2,1	2,5	2,4	2,3	2,4	2,40	14%
Cable Gris	Cable 33	3,3	3,3	3,2	3,2	3,1	3,20	-3%	2,1	2,2	2,4	2,4	2,2	2,30	10%
Cable Negro	Cable 34	3,3	3,2	3,2	3	3,1	3,13	-5%	2,1	2,3	2,4	2,4	2,4	2,38	13%
Cable Rojo	Cable 35	1,45	2	1,9	1,8	1,9	1,90	31%	0,9	1,2	1,1	1,2	1,1	1,15	28%
Cable Verde	Cable 36	1,45	1,8	1,8	1,9	1,8	1,83	26%	0,9	1,1	1,2	1,1	1,2	1,15	28%
Pantalla	Referencia	12,1	14	14	13	14	13,75	14%	11,6	12,9	12,2	12,8	13,5	12,85	11%
Cubierta externa	Cubierta externa	13,4	16,5	15,7	16,5	16,8	16,38	22%							
Aislante negro 1	Aislante negro 1	-	1,4	1,3	1,5	1,5	1,43								
Aislante negro 2	Aislante negro 2	-	1,4	1,3	1,5	1,4	1,40								
Aislante negro 3	Aislante negro 3	-	2	1,9	2	2	1,98								
Aislante negro 4	Aislante negro 4	-	1,4	1,2	1,4	1,4	1,35								
Aislante negro 5	Aislante negro 5	-	2	2	2	2	2,00								
Aislante negro 6	Aislante negro 6	-	1,9	2	2,3	2	2,05								
Aislante negro 7	Aislante negro 7	-	1,4	1,3	1,3	1,4	1,35								
Aislante negro 8	Aislante negro 8	-	2	2	2	2	2,00								

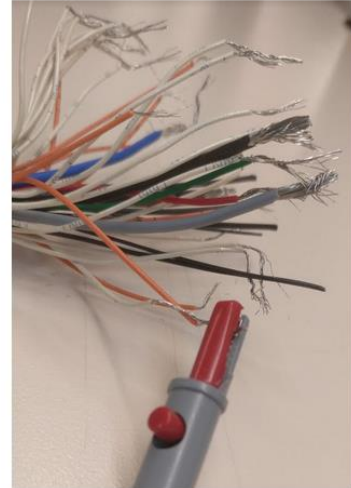
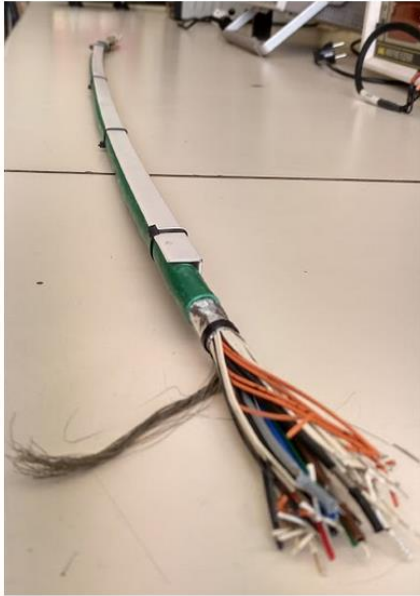
Observaciones: dado que el cable no está relleno con aislante entre los conductores, se ha aumentado el tamaño de los aislantes individuales y aumentado la compactación para rellenar huecos, principalmente con los cables de sensores de temperatura. Por otra parte los hecos restantes fueron rellenados con cables sin conductores, hechos solo de aislante. Todos los cables presentan deformaciones debido a la compactación.

Se plantó realizar un modelo con los diámetros individuales de cada conductor

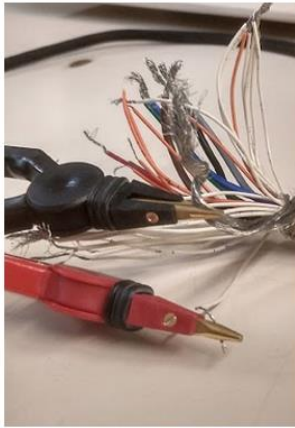
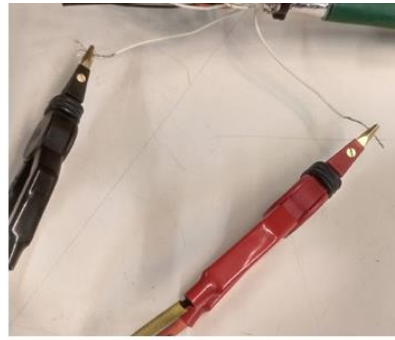
ANEXO D: MEDIDAS EN EL LABORATORIO

Comentarios sobre el procedimiento de medida y errores detectados

A continuación se recoge el cable con el soporte fabricado, el conector que se planteó utilizar para realizar los montajes junto con el cocodrilo que se utilizó finalmente para las conexiones.



Las siguientes fotos recogen algunas de las diferentes posiciones utilizadas para verificar su influencia en las medidas realizadas. Las capacitancias eran invariables a cualquier modificación de disposición mientras que las inductancias eran muy sensibles a cualquier desplazamiento. Se probó tanto con la apertura de los cables como la altura a la que se ponía la pinza en la pantalla de la referencia.



Capacitancias

A continuación se recogen algunos de los resultados de los 666 montajes de medidas de capacitancia C_m junto con los comentarios anotados en el laboratorio. Se observa que las medidas son estables, que la variación máxima entre las medidas entre 300 y 200 kHz es de un 2% lo que coincide con lo esperado que las capacitancias sean independientes de la frecuencia de medida.

También se observa que la capacitancia no se ve afectada por la posición de los conductores o de las pinzas. Las medidas tampoco se ven afectadas por la tensión de medida seleccionada. Por último, se ha comprobado que la pinza aporta aproximadamente 4 pF a la medida, lo que se puede considerar despreciable dado que las medidas están en el orden de cientos de picofaradios.

Matriz de medias C		Cm = H * D * C		Medias tomadas en laboratorio												Observaciones:
		El cocodrilo añade aproximadamente 4 pF a la media, error que se considera aceptable. Se ha podido juntar los conductores trenzándolos y cuando el numero era elevado (>10) se sujetaba con el cocodrilo														
Núm Medida	Freq [kHz]	200					300					Variacion (300 -200)/200				
		Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango					
1	Cm1_1 [pF]	122	122	122	122	0	123	123	123	123	0	1%				
2	Cm1_2 [pF]	202	202	202	202	0	202	202	202	202	0	0%				
3	Cm1_3 [pF]	282	282	282	282	0	284	284	284	284	0	1%				
4	Cm1_4 [pF]	364	364	364	364	0	366	366	366	366	0	1%				
5	Cm1_5 [pF]	443	443	443	443	0	445	445	445	445	0	0%				
6	Cm1_6 [pF]	518	518	518	518	0	519	519	519	519	0	0%				
7	Cm1_7 [pF]	597	597	597	597	0	598	598	598	598	0	0%				
8	Cm1_8 [pF]	675	675	675	675	0	676	677	676	676	1	0%				
9	Cm1_9 [pF]	754	755	754	754	1	755	756	755	755	1	0%				
10	Cm1_10 [pF]	834	835	835	835	1	836	836	836	836	0	0%				
11	Cm1_11 [pF]	910	910	910	910	0	920	920	920	920	0	1%				
12	Cm1_12 [pF]	1022	1022	1023	1022	1	1032	1032	1032	1032	0	1%				
13	Cm1_13 [pF]	1102	1102	1102	1102	0	1102	1112	1112	1109	10	1%				
14	Cm1_14 [pF]	1188	1188	1188	1188	0	1194	1196	1194	1195	2	1%				
15	Cm1_15 [pF]	1272	1272	1272	1272	0	1274	1274	1274	1274	0	0%				
16	Cm1_16 [pF]	1350	1350	1350	1350	0	1352	1352	1352	1352	0	0%				
17	Cm1_17 [pF]	1432	1431	1432	1432	1	1434	1434	1436	1435	2	0%				
18	Cm1_18 [pF]	1512	1511	1511	1511	1	1516	1516	1516	1516	0	0%				
19	Cm1_19 [pF]	1592	1592	1593	1592	1	1598	1596	1596	1597	2	0%				
20	Cm1_20 [pF]	1674	1674	1674	1674	0	1678	1678	1678	1678	0	0%				
21	Cm1_21 [pF]	1754	1755	1754	1754	1	1760	1760	1760	1760	0	0%				
22	Cm1_22 [pF]	1824	1824	1825	1824	1	1830	1830	1830	1830	0	0%				
23	Cm1_23 [pF]	1842	1842	1843	1842	1	1848	1848	1846	1847	2	0%				
24	Cm1_24 [pF]	1837	1836	1836	1836	1	1840	1840	1840	1840	0	0%				
25	Cm1_25 [pF]	1852	1852	1852	1852	0	1856	1856	1856	1856	0	0%				
26	Cm1_26 [pF]	1845	1845	1844	1845	1	1848	1848	1848	1848	0	0%				
27	Cm1_27 [pF]	1860	1860	1860	1860	0	1864	1864	1864	1864	0	0%				
28	Cm1_28 [pF]	1856	1856	1856	1856	0	1862	1860	1860	1861	2	0%				
29	Cm1_29 [pF]	1869	1869	1868	1869	1	1869	1869	1868	1869	1	0%				
30	Cm1_30 [pF]	1865	1866	1866	1866	1	1870	1870	1870	1870	0	0%				
31	Cm1_31 [pF]	1779	1779	1779	1779	0	1784	1782	1784	1783	2	0%				
32	Cm1_32 [pF]	1697	1697	1697	1697	0	1700	1700	1700	1700	0	0%				
33	Cm1_33 [pF]	1595	1595	1595	1595	0	1598	1598	1600	1599	2	0%				
34	Cm1_34 [pF]	1496	1496	1497	1496	1	1500	1500	1502	1501	2	0%				
35	Cm1_35 [pF]	1457	1457	1457	1457	0	1462	1460	1460	1461	2	0%				
36	Cm1_36 [pF]	1358	1358	1357	1358	1	1360	1362	1360	1361	2	0%				
37	Cm2_2 [pF]	126	126	126	126	0	128	128	127	128	1	1%				
38	Cm2_3 [pF]	207	207	207	207	0	208	208	208	208	0	0%				
39	Cm2_4 [pF]	288	288	288	288	0	288	288	288	288	0	0%				
40	Cm2_5 [pF]	367	367	367	367	0	368	368	370	369	2	0%				

658	Cm33_34 [pF]	326	326	326	326	0	326	326	326	326	0	0%
659	Cm33_35 [pF]	399	399	399	399	0	399	399	399	399	0	0%
660	Cm33_36 [pF]	354	354	354	354	0	354	354	354	354	0	0%
661	Cm34_34 [pF]	173	173	176	174	3	173	173	173	173	0	1%
662	Cm34_35 [pF]	267	267	267	267	0	267	267	267	267	0	0%
663	Cm34_36 [pF]	242	242	242	242	0	242	242	242	242	0	0%
664	Cm35_35 [pF]	98	98	98	98	0	98	98	98	98	0	0%
665	Cm35_36 [pF]	138	138	138	138	0	138	138	138	138	0	0%
666	Cm36_36 [pF]	99	99	100	99	1	100	100	100	100	0	1%

Variacion Capacitancia en función de la posición de la medida													
200 kHz Cerca				200 kHz Lejos									
Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Variacion con respecto a referencia			Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Variacion con respecto a referencia		
Cm1_1 [pF]	121	121	121	121	-1%	121	121	121	121	121	-1%	0%	
Cm1_2 [pF]	203	202	202	202,3333	0%	202	202	202	202	202	0%	0%	
Se observa que el efecto de la distancia no afecta a la medida de la capacitancia													
Variacion Capacitancia en función del voltaje de medida													
200 kHz													
1 V	0,9 V	0,8 V	0,7 V	0,6 V			0,5 V	1,1 V	1,2 V	1,3 V			
M1_1 [nH]	121	121	121	121	679	679	121	121	121	121	121		
M1_2 [nH]	202	202	202	202	202	203	203	203	203	203	203		
Se observa que la variación del voltaje no afecta a la medida de la capacitancia													
También se ha probado a hacer elementos metálicos a los elementos de media y tampoco se nota ninguna variación													

Se utilizaron los scripts descritos en el Anexo B para el cálculo de las matrices H y D, posteriormente se utilizó la función en Excel minverse() para calcular las matrices H⁻¹ y D⁻¹. Con ello se calcularon los componentes vectoriales esenciales de la matriz de capacitancias C final como: C = D⁻¹ * H⁻¹ * Cm. Por último se utilizó un script para transformarlo de forma vectorial a la matriz simétrica final.

Matriz de Capacitancias C del prototipo en pF/m																																				
	Cable 1	Cable 2	Cable 3	Cable 4	Cable 5	Cable 6	Cable 7	Cable 8	Cable 9	Cable 10	Cable 11	Cable 12	Cable 13	Cable 14	Cable 15	Cable 16	Cable 17	Cable 18	Cable 19	Cable 20	Cable 21	Cable 22	Cable 23	Cable 24	Cable 25	Cable 26	Cable 27	Cable 28	Cable 29	Cable 30	Cable 31	Cable 32	Cable 33	Cable 34	Cable 35	Cable 36
Cable 1	98	-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-3	0	0	0	0	0	-2	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-3	-5	-1	-5	-1	0
Cable 2	-18	101	-18	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-8	0	-1	-1
Cable 3	0	-18	101	-17	0	-1	-1	0	-1	0	0	0	-2	0	-1	-3	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-4	-2	-1	-4	-2	-2	
Cable 4	0	-1	-17	100	-17	0	0	0	-1	0	-1	0	-2	0	0	-1	-1	0	-2	0	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-2	-2	-2	
Cable 5	0	0	0	-17	98	-16	0	-1	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-2	-1	-2	-2	-4	-2	0	-1	
Cable 6	0	0	-1	0	-16	96	-16	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	-3	0	-1	-1	0	-1	0	-1	-3	-3	-2	-3	-2	-1
Cable 7	0	0	-1	0	-16	97	-17	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	0	-2	-4	-1	-1	0	-3	-2	-3	-2	0	-1		
Cable 8	0	0	0	0	-1	0	-17	97	-17	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	-2	-5	-3	-1	-1	-1	-1	0	-2	-3	-3	-1	-1	-1	
Cable 9	0	0	-1	-1	0	0	0	-17	98	-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-3	0	-1	-1	-1	-3	-2	-2	-2	0	-1	
Cable 10	0	0	0	0	0	0	0	0	-16	98	-17	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	0	-3	-3	-1	-5	-1	-1
Cable 11	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	-17	95	-2	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-3	-1	-5	-3	-1	-1
Cable 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	95	-16	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-4	-5	-3	-3	0	0
Cable 13	0	0	-2	-2	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-16	98	-17	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-2	-3	-3	-3	-3	0	-1
Cable 14	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-17	99	-17	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-3	-2	-2	-2	0	-1	
Cable 15	-2	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-17	100	-17	-1	0	0	0	0	0	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-2	0	0	
Cable 16	-3	0	-3	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-17	100	-17	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-3	-3	-2	-2	0	0	
Cable 17	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-17	101	-18	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-3	-2	-1	
Cable 18	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-18	101	-18	0	0	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-4	0	-7	-2	-1	0
Cable 19	0	-1	0	-2	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-18	101	-18	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-3	-1	-1	-4	-1	-3	0	-2	
Cable 20	0	-1	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18	100	-17	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-3	-1	-3	-4	-2	-1	-2
Cable 21	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-17	99	-17	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-2	-1	-4	-3	-2	-2	-1	0	
Cable 22	-2	0	-1	-1	-1	-1	-2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-17	96	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-18	-20	-16	-4	-2	-4	0	-1
Cable 23	-1	-1	-1	0	-1	-3	0	-2	0	-1	-1	-1	-1	0	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	54	-10	0	0	0	0	-18	-18	-23	-15	11	-1	-2	-1	
Cable 24	-1	0	-1	-1	-1	0	-2	-5	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	-1	-1	-1	-10	54	0	-1	0	0	-1	-1	-17	-3	-1	-1	-2	-1	
Cable 25	0	-1	-1	-1	-1	-1	-4	-3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	54	-8	0	0	-2	-1	-18	0	-1	-4	-1	-2	
Cable 26	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	0	-1	-8	54	0	0	-1	-1	-4	0	0	-13	0	-2
Cable 27	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	54	-8	-1	0	0	-36	-3	-14	-1	-3
Cable 28	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-2	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-2	0	-1	0	0	0	0	0	-8	54	0	0	0	-36	-19	-38	-1	-1	
Cable 29	-1	-1	-1	-1	-2	0	-2	-1	-1	-1	-2	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-3	-1	-2	-18	-18	-1	-2	-1	0	54	-9	-2	-4	-15	-1	-1	0	
Cable 30	-1	-2	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	-2	-1	-1	0	-1	-1	-1	-3	-1	-20	-18	-1	-1	-1	0	0	-9	54	0	-18	-4	0	-2	-1
Cable 31	-3	-1	-4	-2	-2	-3	-3	-2	-3	-3	-3	-4	-3	-3	-2	-3	-2	-4	-1	-1	-4	-16	-23	-17	-18	-4	0	0	-2	0	128	-4	0	-7	-9	-10
Cable 32	-5	-1	-2	-2	-2	-3	-2	-3	-2	-3	-1	-5	-3	-2	-2	-3	-2	0	-4	-3	-3	-4	-15	-3	0	0	-36	-36	-4	-18	-4	138	-6	-1	-25	-2
Cable 33	-1	-8	-1	-3	-4	-2	-3	-3	-2	-1	-5	-3	-3	-2	-3	-2	-1	-7	-1	-4	-2	-2	11	-1	-1	0	-3	-19	-15	-4	0	-6	134	-6	-8	-8
Cable 34	-5	0	-4	-2	-2	-3	-2	-1	-2	-5	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-3	-2	-3	-2	-2	-4	-1	-1	-4	-13	-14	-38	-1	0	-7	-1	-6	139	-2	-26
Cable 35	-1	-1	-2	-2	0	-2	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-2	-1	0	-1	-1	0	-2	-2	-1	0	-1	-1	-1	-2	-9	-25	-8	-2	78	-24
Cable 36	0	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	-2	-2	0	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-1	0	-1	-10	-2	-8	-26	-24	79

Inductancias

A continuación se recogen algunos de los resultados de los 666 montajes de medidas de inductancias M_{ij} junto con los comentarios anotados en el laboratorio. Se observa que las medidas son estables, que la variación máxima entre las medidas entre 300 y 200 kHz es de un -7% lo que confirma que en este rango de frecuencias ya se encuentra en la zona que se puede considerar constante, sin efecto pelicular.

Se observa que la inductancia está muy afectada por la distancia entre los conductores a medir y las pinzas, también se ve afectada según la posición de la pinza del medidor LRC en la pantalla de referencia. Además, se observa que las medidas no se ven afectadas por la corriente seleccionada de medida para el circuito cerrado.

Núm Medida	Freq [kHz] Mij	200					300					Variacion (300/200)/200
		Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	Media 1	Media 2	Medida 3	Media	Rango	
1	M1_1 [nH]	684	684	682	683	2	653	652	652	652	1	-5%
2	M1_2 [nH]	815	815	816	815	1	790	790	790	790	0	-3%
3	M1_3 [nH]	1116	1117	1116	1116	1	1072	1072	1072	1072	0	-4%
4	M1_4 [nH]	1156	1155	1156	1156	1	1102	1104	1102	1103	2	-5%
5	M1_5 [nH]	1177	1178	1177	1177	1	1124	1124	1124	1124	0	-5%
6	M1_6 [nH]	1161	1161	1161	1161	0	1114	1112	1112	1113	2	-4%
7	M1_7 [nH]	1208	1208	1209	1208	1	1164	1164	1164	1164	0	-4%
8	M1_8 [nH]	1207	1208	1208	1208	1	1164	1164	1164	1164	0	-4%
9	M1_9 [nH]	1157	1157	1156	1157	1	1112	1112	1112	1112	0	-4%
10	M1_10 [nH]	1225	1225	1224	1225	1	1180	1180	1182	1181	2	-4%
11	M1_11 [nH]	1227	1226	1226	1226	1	1182	1182	1182	1182	0	-4%
12	M1_12 [nH]	1233	1234	1234	1234	1	1190	1190	1188	1189	2	-4%
13	M1_13 [nH]	1201	1201	1201	1201	0	1158	1158	1158	1158	0	-4%
14	M1_14 [nH]	1202	1203	1203	1203	1	1160	1160	1160	1160	0	-4%
15	M1_15 [nH]	1225	1225	1225	1225	0	1182	1182	1182	1182	0	-4%
16	M1_16 [nH]	1215	1215	1215	1215	0	1168	1168	1170	1169	2	-4%
17	M1_17 [nH]	1203	1204	1203	1203	1	1158	1158	1158	1158	0	-4%
18	M1_18 [nH]	1209	1209	1209	1209	0	1160	1160	1162	1161	2	-4%
19	M1_19 [nH]	1199	1199	1199	1199	0	1144	1144	1146	1145	2	-5%
20	M1_20 [nH]	1121	1121	1121	1121	0	1062	1062	1064	1063	2	-5%
21	M1_21 [nH]	1039	1039	1039	1039	0	982	982	981	982	1	-6%
22	M1_22 [nH]	947	947	947	947	0	898	898	899	898	1	-5%
23	M1_23 [nH]	1344	1344	1344	1344	0	1312	1312	1312	1312	0	-2%
24	M1_24 [nH]	1379	1379	1379	1379	0	1350	1348	1350	1349	2	-2%
25	M1_25 [nH]	1367	1367	1366	1367	1	1332	1334	1332	1333	2	-2%
26	M1_26 [nH]	1383	1383	1383	1383	0	1352	1352	1350	1351	2	-2%
27	M1_27 [nH]	1345	1346	1346	1346	1	1312	1312	1312	1312	0	-3%
28	M1_28 [nH]	1332	1332	1332	1332	0	1302	1302	1302	1302	0	-2%
29	M1_29 [nH]	1332	1331	1332	1332	1	1298	1298	1298	1298	0	-3%
30	M1_30 [nH]	1346	1346	1346	1346	0	1312	1312	1312	1312	0	-3%
31	M1_31 [nH]	873	873	873	873	0	841	840	841	841	1	-4%
32	M1_32 [nH]	945	945	945	945	0	912	911	911	911	1	-4%
33	M1_33 [nH]	954	953	953	953	1	923	924	923	923	1	-3%
34	M1_34 [nH]	975	974	974	974	1	940	940	940	940	0	-4%
35	M1_35 [nH]	1195	1194	1194	1194	1	1156	1158	1158	1157	2	-3%
36	M1_36 [nH]	1201	1192	1188	1194	13	1156	1146	1144	1149	12	-4%
37	M2_2 [nH]	648	648	648	648	0	623	621	623	622	2	-4%
38	M2_3 [nH]	904	904	905	904	1	878	879	877	878	2	-3%
39	M2_4 [nH]	1136	1136	1136	1136	0	1086	1086	1086	1086	0	-4%
40	M2_5 [nH]	1277	1276	1277	1277	1	1220	1220	1220	1220	0	-4%
650	M31_35 [nH]	767	767	767	767	0	745	745	745	745	0	-3%
651	M31_36 [nH]	749	749	749	749	0	728	726	726	727	2	-3%
652	M32_32 [nH]	476	476	476	476	0	454	453	453	453	1	-5%
653	M32_33 [nH]	691	691	691	691	0	667	667	667	667	0	-3%
654	M32_34 [nH]	755	755	755	755	0	732	732	733	732	1	-3%
655	M32_35 [nH]	713	713	713	713	0	693	693	693	693	0	-3%
656	M32_36 [nH]	884	885	885	885	1	862	862	862	862	0	-3%
657	M33_33 [nH]	482	482	482	482	0	461	461	461	461	0	-4%
658	M33_34 [nH]	637	637	637	637	0	614	614	614	614	0	-4%
659	M33_35 [nH]	788	788	788	788	0	765	766	765	765	1	-3%
660	M33_36 [nH]	802	802	802	802	0	779	780	780	780	1	-3%
661	M34_34 [nH]	491	491	491	491	0	470	470	470	470	0	-4%
662	M34_35 [nH]	816	817	817	817	1	795	795	796	795	1	-3%
663	M34_36 [nH]	676	676	676	676	0	626	626	626	626	0	-7%
664	M35_35 [nH]	750	750	750	750	0	732	733	733	733	1	-2%
665	M35_36 [nH]	707	707	708	707	1	688	688	687	688	1	-3%
666	M36_36 [nH]	729	729	729	729	0	711	711	712	711	1	-2%

Variacion Inductancia en función de la posición de la medida											
	200 kHz Cerca				Variacion con respecto a referencia	200 kHz Lejos				Variacion con respecto a referencia	Variacion lejos y cerca
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media		
M1_1 [nH]	584	584	585	584	-14%	735	735	736	735	8%	26%
M1_2 [nH]	767	767	767	767	-6%	920	920	919	920	13%	20%

Se observa el mismo efecto el desplazamiento si se pone la pinza más arriba o más abajo en el cable de la referencia. Más arriba mayor distancia y mayor inductancia propia medida. Más abajo todo se

Variacion Inductancia en función de la corriente de medida											
	200 kHz				60 mA	50 mA					
	100 mA	90 mA	80 mA	70 mA							
M1_1 [nH]	680	379	678	679	679	679					
M1_2 [nH]	830	829	828	829	827	828					

Posteriormente se utilizó el script "Matiz L" del Apéndice B para el tratamiento de los datos, obteniendo la matriz Lij en forma vectorial desde los valores medidos Mij. Por último se trasladaron los resultados de la forma vectorial a forma matricial usando otro script "Matriz" del apéndice B.

Matriz de Inductancias L del prototipo en nH/m																																				
	Cable 1	Cable 2	Cable 3	Cable 4	Cable 5	Cable 6	Cable 7	Cable 8	Cable 9	Cable 10	Cable 11	Cable 12	Cable 13	Cable 14	Cable 15	Cable 16	Cable 17	Cable 18	Cable 19	Cable 20	Cable 21	Cable 22	Cable 23	Cable 24	Cable 25	Cable 26	Cable 27	Cable 28	Cable 29	Cable 30	Cable 31	Cable 32	Cable 33	Cable 34	Cable 35	Cable 36
Cable 1	522	194	108	88	67	62	74	140	101	67	71	63	83	81	82	81	92	83	92	103	130	175	75	60	74	47	76	90	84	79	120	78	76	73	91	86
Cable 2	194	498	173	83	16	15	43	103	38	30	31	25	34	24	38	37	53	43	58	90	86	112	20	20	29	45	27	35	38	24	32	22	24	15	12	10
Cable 3	108	173	551	145	58	27	57	123	63	52	40	38	45	41	62	48	65	46	62	73	63	93	27	45	37	53	39	52	47	31	69	66	55	43	38	46
Cable 4	88	83	145	536	132	85	89	153	83	82	93	72	76	81	90	88	103	91	91	91	88	143	78	84	86	48	61	83	85	74	97	93	77	70	80	75
Cable 5	67	16	58	132	510	138	106	153	89	81	72	72	72	68	94	83	93	74	86	91	67	163	90	78	88	79	65	86	70	70	102	89	77	69	80	80
Cable 6	62	15	27	85	138	492	159	164	81	75	72	68	66	68	65	68	70	59	61	76	64	134	56	68	87	60	59	70	64	54	89	81	75	74	61	76
Cable 7	74	43	57	89	106	159	557	232	106	79	76	67	71	66	77	73	81	55	58	77	63	137	69	63	94	67	57	64	64	58	94	92	81	72	78	76
Cable 8	140	103	123	153	153	164	232	689	256	181	172	159	152	149	167	155	168	154	159	168	159	200	153	149	172	152	153	158	153	156	1089	168	164	152	152	161
Cable 9	101	38	63	83	89	81	106	256	569	187	120	86	90	86	104	94	100	87	95	94	140	156	102	95	115	92	88	94	98	83	117	112	91	101	107	107
Cable 10	67	30	52	82	81	75	79	181	187	557	276	137	159	140	165	146	150	132	122	93	88	99	93	91	102	86	88	99	111	110	102	97	106	111	107	105
Cable 11	71	31	40	93	72	72	76	172	120	276	565	171	154	165	166	154	146	136	125	91	82	99	102	93	103	79	91	99	125	107	115	93	103	109	104	93
Cable 12	63	25	38	72	72	68	67	159	86	137	171	555	258	194	158	152	160	136	143	106	107	107	97	92	97	80	89	100	112	103	116	98	99	104	105	101
Cable 13	83	34	45	76	72	66	71	152	90	159	154	258	570	276	190	173	176	159	148	114	96	95	100	118	116	108	113	122	130	108	131	110	116	115	114	109
Cable 14	81	24	41	81	68	68	66	149	86	140	165	194	276	568	272	189	164	151	142	103	102	106	116	109	116	110	114	131	131	116	134	117	119	129	119	110
Cable 15	82	38	62	90	94	65	77	167	104	165	166	158	190	272	587	287	219	171	154	111	109	112	131	116	127	105	122	134	140	121	135	118	122	130	125	114
Cable 16	81	37	48	88	83	68	73	155	94	146	154	152	173	189	287	576	299	190	147	108	108	121	121	109	118	107	114	126	155	126	135	120	119	125	132	119
Cable 17	92	53	65	103	93	70	81	168	100	150	146	160	176	164	219	299	589	286	191	123	116	122	115	123	122	116	124	132	156	128	139	124	127	131	135	118
Cable 18	83	43	46	91	74	59	55	154	87	132	136	136	159	151	171	190	286	574	251	145	119	118	110	116	115	93	113	128	156	146	133	123	120	124	120	118
Cable 19	92	58	62	91	86	61	58	159	95	122	125	143	148	142	154	147	191	251	578	219	139	126	116	114	112	101	116	139	150	144	133	128	129	138	134	121
Cable 20	103	90	73	91	91	76	77	168	94	93	91	106	114	103	111	108	123	145	219	535	237	185	123	122	121	95	67	89	103	84	108	105	82	80	82	75
Cable 21	130	86	63	88	67	64	63	159	140	88	82	107	96	102	109	108	116	119	139	237	524	216	77	79	67	43	42	61	74	54	77	76	62	61	63	56
Cable 22	175	112	93	143	163	134	137	200	156	99	99	107	95	106	112	121	122	118	126	185	216	547	88	81	74	50	47	61	78	60	77	75	67	68	68	65
Cable 23	75	20	27	78	90	56	69	153	102	93	102	97	100	116	131	121	115	110	116	123	77	88	678	235	39	20	9	19	46	56	105	149	23	29	115	64
Cable 24	60	20	45	84	78	68	63	149	95	91	93	92	118	109	116	109	123	116	114	122	79	81	235	678	77	18	12	15	37	40	159	87	20	37	107	67
Cable 25	74	29	37	86	88	87	94	172	115	102	103	97	116	116	127	118	122	115	112	121	67	74	39	77	693	190	41	46	53	43	177	57	36	101	100	110
Cable 26	47	45	53	48	79	60	67	152	92	86	79	80	108	110	105	107	116	93	101	95	43	50	20	18	190	653	53	43	41	25	107	25	25	136	65	99
Cable 27	76	27	39	61	65	59	57	153	88	88	91	89	113	114	122	114	124	113	116	67	42	47	9	12	41	53	680	224	73	64	83	52	114	182	101	132
Cable 28	90	35	52	83	86	70	64	158	94	99	99	100	122	131	134	126	132	128	139	89	61	61	19	15	46	43	224	700	130	113	83	67	184	152	132	156
Cable 29	84	38	47	85	70	64	64	153	98	111	125	112	130	131	140	155	156	156	150	103	74	78	46	37	53	41	73	130	684	262	77	119	190	105	157	118
Cable 30	79	24	31	74	70	54	58	156	83	110	107	103	108	116	121	126	128	146	144	84	54	60	56	40	43	25	64	113	262	686	78	191	140	100	162	120
Cable 31	120	32	69	97	102	89	94	189	117	102	115	116	131	134	135	135	139	133	133	108	77	77	105	159	177	107	83	83	77	78	390	135	97	128	190	189
Cable 32	78	22	66	93	89	81	92	168	112	97	93	98	110	117	118	120	124	123	128	105	76	75	149	87	57	25	52	67	119	191	135	363	99	76	197	121
Cable 33	76	24	55	77	77	75	81	164	91	106	103	99	116	119	122	119	127	120	129	82	62	67	23	20	36	25	114	184	190	140	97	99	369	127	171	157
Cable 34	73	15	43	70	69	74	72	152	101	111	109	104	115	129	130	125	131	124	138	80	61	68	29	37	101	136	182	152	105	100	128	76	127	376	163	222
Cable 35	91	12	38	80	80	61	78	152	107	107	104	105	114	119	125	132	135	120	134	82	63	68	115	107	100	65	101	132	157	162	190	197	171	163	586	303
Cable 36	86	10	46	75	80	76	76	161	107	105	93	101	109	110	114	119	118	118	121	75	56	65	64	67	110	99	132	156	118	120	189	121	157	222	303	569

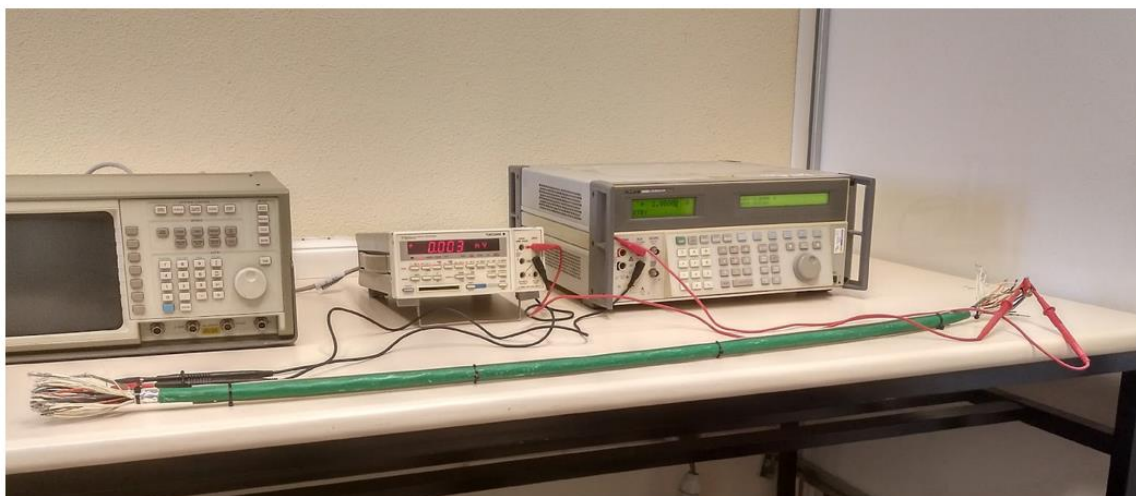
Resistencia

Para la medida de la matriz de resistencia R se optó por medir cada uno de los tipos de conductores (HV, LV, T-Sensor, Preheaters y Pantalla) utilizando el método de cuatro hilos. La fuente de alimentación empleada fue el equipo de calibrador multifunción Fluke que es capaz de proporcionar un valor de corriente continua estable con 6 dígitos de precisión. Como multímetro se utilizó el equipo Yokogawa 7552 del laboratorio de metrología eléctrica. Para una correcta medida es necesario que los conectores del medidor de tensión estén lo más pegado posible a la parte a la zona con aislante mientras que los conectores de la fuente de intensidad deben estar las extremidades más lejanas del cable a medir. Tras disponer de todas las resistencias, se calculó los elementos de la matriz R.

De forma adicional, se volvieron a medir los elementos de la matriz R de forma directa con el Wayne Kerr a 20 Hz que la frecuencia mínima disponible en el equipo. A esta frecuencia los valores de resistencia medidos se pueden considerar equivalentes a la medida en continua dado que no es apreciable el efecto pelicular. La variación de los resultados obtenidos con este equipo en comparación con los resultados obtenidos con el método de cuatro hilos era menor del 6%.

Medimos 1,25 m de cable	Medidas 4 hilos						Media
	Medida 1		Medida 2				
Cable	V1 [mV]	I1 [A]	R1 [mOhm]	V2 [mV]	I2 [A]	R2 [mOhm]	R [mOhm]
Pantalla [mOhm]	4,321	1	4,321	8,641	2	4,321	4,321
Azul [mOhm]	9,873	1	9,873	19,747	2	9,874	9,873
Rojo [mOhm]	47,899	1	47,899	95,828	2	47,914	47,907
Blanco [mOhm]	102,381	1	102,381	205,040	2	102,520	102,451
Naranja [mOhm]	253,000	1	253,000	507,370	2	253,685	253,343

Matriz R con media 4 hilos para 1,25 m		Matriz R con media Wayne Kerr a 20 Hz cable 1,25		
Cable	Valor	Cable	Valor	Error
R0 [mOhm/m]	4,321	R0 [mOhm/m]	4,100	-5%
R1 + R0 [mOhm/m]	106,771	R1 + R0 [mOhm/m]	110,000	3%
R2 + R0 [mOhm/m]	106,771	R2 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R3 + R0 [mOhm/m]	106,771	R3 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R4 + R0 [mOhm/m]	106,771	R4 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R5 + R0 [mOhm/m]	106,771	R5 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R6 + R0 [mOhm/m]	106,771	R6 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R7 + R0 [mOhm/m]	106,771	R7 + R0 [mOhm/m]	110,000	3%
R8 + R0 [mOhm/m]	106,771	R8 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R9 + R0 [mOhm/m]	106,771	R9 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R10 + R0 [mOhm/m]	106,771	R10 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R11 + R0 [mOhm/m]	106,771	R11 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R12 + R0 [mOhm/m]	106,771	R12 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R13 + R0 [mOhm/m]	106,771	R13 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R14 + R0 [mOhm/m]	106,771	R14 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R15 + R0 [mOhm/m]	106,771	R15 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R16 + R0 [mOhm/m]	106,771	R16 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R17 + R0 [mOhm/m]	106,771	R17 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R18 + R0 [mOhm/m]	106,771	R18 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R19 + R0 [mOhm/m]	106,771	R19 + R0 [mOhm/m]	110,000	3%
R20 + R0 [mOhm/m]	106,771	R20 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R21 + R0 [mOhm/m]	106,771	R21 + R0 [mOhm/m]	109,000	2%
R22 + R0 [mOhm/m]	106,771	R22 + R0 [mOhm/m]	108,000	1%
R23 + R0 [mOhm/m]	257,663	R23 + R0 [mOhm/m]	256,000	-1%
R24 + R0 [mOhm/m]	257,663	R24 + R0 [mOhm/m]	254,000	-1%
R25 + R0 [mOhm/m]	257,663	R25 + R0 [mOhm/m]	260,000	1%
R26 + R0 [mOhm/m]	257,663	R26 + R0 [mOhm/m]	255,000	-1%
R27 + R0 [mOhm/m]	257,663	R27 + R0 [mOhm/m]	259,000	1%
R28 + R0 [mOhm/m]	257,663	R28 + R0 [mOhm/m]	254,000	-1%
R29 + R0 [mOhm/m]	257,663	R29 + R0 [mOhm/m]	256,000	-1%
R30 + R0 [mOhm/m]	257,663	R30 + R0 [mOhm/m]	259,000	1%
R31 + R0 [mOhm/m]	14,194	R31 + R0 [mOhm/m]	15,000	6%
R32 + R0 [mOhm/m]	14,194	R32 + R0 [mOhm/m]	15,000	6%
R33 + R0 [mOhm/m]	14,194	R33 + R0 [mOhm/m]	15,000	6%
R34 + R0 [mOhm/m]	14,194	R34 + R0 [mOhm/m]	15,000	6%
R35 + R0 [mOhm/m]	52,227	R35 + R0 [mOhm/m]	54,000	3%
R36 + R0 [mOhm/m]	52,227	R36 + R0 [mOhm/m]	54,000	3%

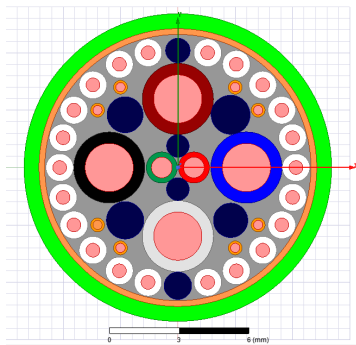


Matriz de Resistencias R del prototipo en mOhm/m																																						
	Cable 1	Cable 2	Cable 3	Cable 4	Cable 5	Cable 6	Cable 7	Cable 8	Cable 9	Cable 10	Cable 11	Cable 12	Cable 13	Cable 14	Cable 15	Cable 16	Cable 17	Cable 18	Cable 19	Cable 20	Cable 21	Cable 22	Cable 23	Cable 24	Cable 25	Cable 26	Cable 27	Cable 28	Cable 29	Cable 30	Cable 31	Cable 32	Cable 33	Cable 34	Cable 35	Cable 36		
Cable 1	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 2	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 3	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 5	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 6	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 7	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Cable 8	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 9	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 11	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 12	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 14	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 15	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 17	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 18	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 21	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	107	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 23	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 24	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 26	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 27	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 28	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 29	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 30	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	258	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Cable 31	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4	4	4	4	4	4	4	
Cable 32	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4	4	4	4	4	4	
Cable 33	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4	4	4	4	4	
Cable 34	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	14	4	4	4	4	4	
Cable 35	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	52	4
Cable 36	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	52

ANEXO E: MATRICES DE ERROR DE LOS MODELOS DE SIMULACION 2D

En las matrices de errores se recogen de forma visual las variaciones obtenidas entre las simulaciones y las medidas realizadas en laboratorio. Se han dividido las matrices en función del tipo de cables HV, LV, T-Sensor y Preheaters. Se han coloreado las combinaciones según su orden de relevancia indicada por el codirector del trabajo, el Dr. Fernando Arteché. En rojo se marcan las relaciones de gran importancia, en amarillo las de importancia baja y en verde las de importancia muy baja. Se observa que los de mayor importancia son las relaciones de los cables HV-HV y las de los cables HV-LV dado que son las principales entradas de los equipos electrónicos.

Modelo 1: en 2D con distribución simétrica y cotas nominales



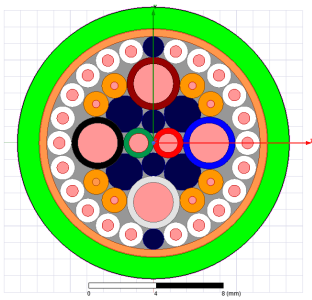
Matriz de errores de capacitancias:

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2		
HV1	14%	36%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV2	36%	9%	63%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV3	0%	63%	13%	51%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV4	0%	0%	51%	7%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV5	0%	0%	0%	21%	9%	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV6	0%	0%	0%	0%	24%	6%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV7	0%	0%	0%	0%	0%	25%	8%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	4%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	10%	59%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	59%	6%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	7%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	11%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	7%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	22%	11%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%	10%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	12%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	8%	53%	12%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	53%	12%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV21	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	8%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
T-S1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	87%	41%	100%	0%	0%	0%	0%	
T-S2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%	0%	
T-S5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	100%	0%	40%	0%	0%	0%	0%	
T-S6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	100%	54%	92%	0%	0%	0%	0%	
T-S7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	44%	0%	0%	0%	
T-S8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	0%	55%	0%	0%	0%	0%	0%	
LV1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	87%	47%	52%	0%	0%	0%	0%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
LV2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	55%	0%	17%	0%	0%	7%	0%	
LV3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	54%	44%	0%	0%	25%	0%	0%	0%	0%	0%
LV4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	40%	92%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	0%	2%	0%	
PreH1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	1%	38%	0%	0%	
PreH2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	38%	0%	0%	0%	

Matriz de error de inductancias

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH 1	PreH 2	
HV1	41%	74%	86%	92%	94%	94%	96%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	96%	91%	92%	90%	75%	22%	75%	79%	94%	96%	95%	91%	53%	82%	91%	84%	76%	75%	
HV2	74%	38%	74%	83%	68%	65%	91%	96%	95%	95%	95%	94%	96%	95%	96%	95%	96%	95%	95%	92%	93%	91%	76%	531%	61%	85%	88%	91%	90%	21%	5%	38%	77%	54%	32%	33%	
HV3	86%	74%	43%	66%	75%	65%	89%	95%	96%	96%	95%	96%	97%	97%	98%	97%	97%	96%	97%	92%	94%	94%	264%	116%	80%	90%	92%	94%	89%	42%	66%	64%	88%	85%	50%	70%	
HV4	92%	83%	66%	43%	62%	79%	89%	94%	95%	97%	97%	97%	98%	98%	99%	98%	98%	98%	98%	96%	97%	97%	52%	55%	93%	92%	95%	96%	91%	78%	83%	60%	89%	91%	72%	81%	
HV5	94%	68%	75%	62%	42%	65%	84%	92%	94%	95%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	98%	49%	77%	94%	95%	95%	95%	86%	68%	87%	43%	86%	90%	66%	80%	
HV6	94%	65%	65%	79%	65%	38%	68%	86%	89%	93%	94%	95%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	95%	96%	97%	53%	79%	94%	93%	92%	92%	78%	22%	84%	20%	81%	89%	44%	73%	
HV7	96%	91%	89%	89%	84%	68%	45%	72%	85%	91%	94%	95%	97%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	97%	98%	75%	84%	95%	94%	93%	92%	71%	18%	88%	42%	83%	90%	63%	78%	
HV8	98%	96%	95%	94%	92%	86%	72%	49%	77%	90%	95%	97%	97%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	89%	93%	97%	97%	96%	95%	66%	23%	94%	70%	86%	94%	79%	88%	
HV9	98%	95%	96%	95%	94%	89%	85%	77%	45%	76%	88%	93%	95%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	92%	94%	97%	97%	94%	91%	1%	73%	94%	78%	73%	93%	81%	87%	
HV10	98%	95%	96%	97%	95%	93%	91%	90%	76%	45%	81%	93%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	98%	94%	95%	97%	96%	92%	87%	11%	56%	94%	83%	64%	92%	82%	84%	
HV11	98%	95%	95%	97%	96%	94%	94%	95%	88%	81%	46%	89%	93%	96%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	98%	95%	96%	96%	94%	88%	81%	60%	78%	94%	85%	46%	89%	79%	78%	
HV12	97%	94%	96%	97%	97%	95%	95%	97%	93%	93%	89%	45%	80%	92%	96%	97%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	95%	96%	96%	94%	78%	50%	83%	87%	94%	88%	43%	86%	80%	79%	
HV13	98%	96%	97%	98%	97%	96%	97%	97%	95%	96%	93%	80%	46%	83%	92%	96%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	96%	97%	96%	94%	64%	4%	90%	91%	95%	92%	66%	85%	85%	82%	
HV14	98%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	98%	97%	97%	96%	92%	83%	45%	82%	91%	95%	96%	97%	95%	98%	98%	97%	97%	94%	88%	2%	71%	96%	96%	93%	94%	86%	71%	88%	80%	
HV15	98%	96%	98%	99%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	96%	92%	82%	48%	81%	92%	94%	96%	94%	97%	98%	98%	98%	97%	94%	88%	2%	71%	96%	96%	93%	94%	86%	71%	88%	80%
HV16	97%	95%	97%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	91%	81%	47%	82%	90%	93%	91%	96%	97%	97%	96%	91%	83%	57%	85%	97%	96%	91%	94%	88%	56%	87%	75%	
HV17	97%	96%	97%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	95%	92%	82%	48%	81%	91%	89%	95%	96%	96%	96%	88%	77%	78%	89%	96%	96%	90%	93%	89%	49%	85%	71%	
HV18	96%	95%	96%	98%	98%	97%	97%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	94%	90%	81%	47%	79%	85%	94%	96%	96%	95%	83%	47%	84%	92%	97%	97%	89%	94%	90%	56%	85%	75%	
HV19	96%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	93%	91%	79%	47%	73%	90%	95%	96%	95%	66%	17%	89%	95%	98%	97%	87%	95%	93%	72%	89%	81%	
HV20	91%	92%	92%	96%	97%	95%	96%	99%	98%	98%	97%	97%	97%	95%	94%	91%	89%	85%	73%	33%	77%	90%	94%	90%	22%	94%	71%	89%	95%	88%	65%	89%	84%	41%	67%	46%	
HV21	92%	93%	94%	97%	97%	96%	97%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	94%	90%	77%	41%	77%	90%	85%	82%	11%	87%	93%	96%	90%	52%	89%	90%	73%	75%	67%	
HV22	90%	91%	94%	97%	98%	97%	98%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	96%	95%	90%	77%	44%	88%	77%	33%	62%	89%	93%	95%	89%	28%	85%	89%	79%	70%	67%	
T-S1	75%	76%	264%	52%	49%	53%	75%	89%	92%	94%	95%	95%	96%	97%	98%	97%	96%	96%	96%	94%	90%	88%	24%	50%	59%	47%	20%	58%	65%	28%	56%	48%	26%	50%	54%	46%	
T-S2	22%	531%	116%	55%	77%	79%	84%	93%	94%	95%	96%	96%	97%	97%	97%	96%	96%	95%	95%	90%	85%	77%	50%	24%	66%	15%	43%	53%	71%	20%	50%	48%	34%	51%	56%	45%	
T-S3	75%	61%	80%	93%	94%	94%	95%	97%	97%	97%	96%	96%	96%	95%	94%	91%	88%	83%	66%	22%	82%	33%	59%	66%	26%	39%	61%	76%	86%	65%	55%	67%	59%	55%	62%	58%	
T-S4	79%	85%	90%	92%	95%	93%	94%	97%	97%	96%	94%	94%	94%	93%	88%	83%	77%	47%	17%	94%	11%	62%	47%	15%	39%	21%	52%	62%	81%	11%	56%	39%	40%	43%	48%	48%	
T-S5	94%	88%	92%	95%	95%	92%	93%	96%	94%	92%	88%	78%	64%	5%	2%	57%	78%	84%	89%	71%	87%	89%	20%	43%	61%	52%	24%	48%	78%	76%	77%	71%	59%	57%	66%	60%	
T-S6	96%	91%	94%	96%	95%	92%	92%	95%	91%	87%	81%	50%	4%	24%	71%	85%	89%	92%	95%	89%	93%	93%	58%	53%	76%	62%	48%	26%	80%	83%	81%	72%	61%	69%	71%	70%	
T-S7	95%	90%	89%	91%	86%	78%	71%	66%	1%	11%	60%	83%	90%	94%	96%	97%	96%	97%	98%	95%	96%	95%	65%	71%	86%	81%	78%	80%	25%	52%	80%	61%	58%	81%	70%	68%	
T-S8	91%	21%	42%	78%	68%	22%	18%	23%	73%	56%	78%	87%	91%	95%	96%	96%	96%	97%	97%	88%	90%	89%	28%	20%	65%	11%	76%	83%	52%	20%	68%	54%	61%	80%	63%	65%	
LV1	53%	5%	66%	83%	87%	84%	88%	94%	94%	94%	94%	94%	95%	95%	93%	91%	90%	89%	87%	65%	52%	28%	56%	50%	55%	56%	77%	81%	80%	68%	34%	62%	70%	59%	53%	53%	
LV2	82%	38%	64%	60%	43%	20%	42%	70%	78%	83%	85%	88%	92%	94%	94%	94%	93%	94%	95%	89%	89%	85%	48%	48%	67%	39%	71%	72%	61%	54%	62%	30%	49%	61%	35%	40%	
LV3	91%	77%	88%	89%	86%	81%	83%	86%	73%	64%	46%	43%	66%	79%	86%	88%	89%	90%	93%	84%	90%	89%	26%	34%	59%	40%	59%	61%	58%	61%	70%	49%	30%	59%	48%	44%	
LV4	84%	54%	85%	91%	90%	89%	90%	94%	93%	92%	89%	86%	85%	80%	71%	56%	49%	56%	72%	41%	73%	79%	50%	51%	55%	43%	57%	69%	81%	80%	59%	61%	59%	32%	55%	39%	
PreH 1	76%	32%	50%	72%	66%	44%	63%	79%	81%	82%	79%	80%	85%	88%	88%	87%	85%	85%	89%	67%	75%	70%	54%	56%	62%	48%	66%	71%	70%	63%	53%	35%	48%	55%	27%	33%	
PreH 2	75%	33%	70%	81%	80%	73%	78%	88%	87%	84%	78%	79%	82%	82%	80%	75%	71%	75%	81%	46%	67%	67%	46%	45%	58%	48%	60%	70%	68%	65%	53%	40%	44%	39%	33%	25%	

Modelo 2: en 2D con distribución simétrica y cotas reales



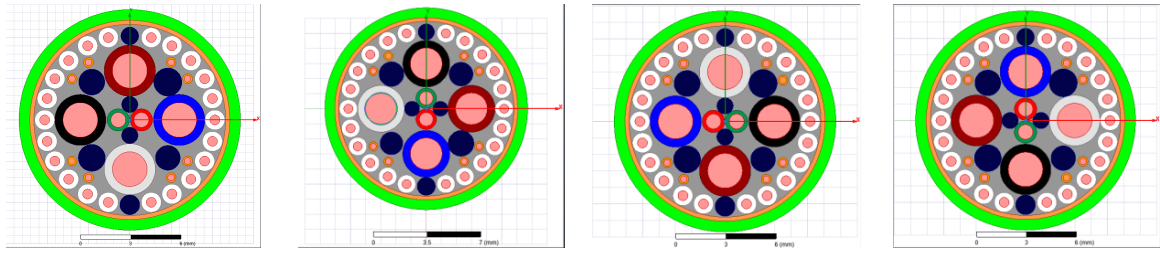
Matriz de errores de capacitancia

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2		
HV1	2%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV2	23%	6%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV3	0%	23%	7%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV4	0%	0%	17%	6%	19%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV5	0%	0%	0%	19%	7%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV6	0%	0%	0%	0%	17%	2%	19%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV7	0%	0%	0%	0%	0%	19%	6%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	3%	16%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	4%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	3%	16%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	4%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17%	6%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	6%	19%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	19%	9%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	3%	27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	27%	10%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	21%	6%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	22%	7%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV21	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	4%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	43%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	87%	39%	100%	0%	0%	0%		
T-S2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	24%	0%	0%	0%	0%		
T-S3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	0%	0%	0%	0%	0%		
T-S4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	0%		
T-S5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	45%	0%		
T-S6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	10%	91%	0%	0%		
T-S7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	0%	0%	40%	0%	0%	0%		
T-S8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	11%	0%	0%	0%	0%			
LV1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	87%	24%	18%	0%	0%	0%	0%	12%	0%	0%	0%	0%	0%			
LV2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	39%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	11%	0%	11%	0%	59%	0%		
LV3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	10%	40%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%	0%		
LV4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	45%	91%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	52%			
PreH1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	59%	0%	0%	0%	32%	51%		
PreH2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	51%	30%		

Matriz de errores de inductancia

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2	
HV1	43%	73%	85%	91%	93%	93%	95%	97%	98%	97%	97%	97%	98%	98%	97%	96%	96%	95%	95%	88%	90%	87%	70%	17%	58%	68%	91%	94%	93%	87%	45%	82%	92%	83%	76%	74%	
HV2	73%	39%	69%	79%	65%	62%	90%	95%	95%	95%	95%	94%	96%	95%	96%	94%	95%	94%	95%	91%	91%	88%	74%	356%	39%	78%	82%	88%	86%	16%	12%	39%	80%	54%	32%	29%	
HV3	85%	69%	45%	63%	74%	65%	88%	95%	96%	96%	95%	95%	97%	97%	98%	96%	97%	96%	97%	91%	92%	92%	151%	73%	69%	87%	89%	92%	86%	17%	65%	65%	90%	85%	50%	71%	
HV4	91%	79%	63%	43%	63%	79%	88%	94%	95%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	96%	96%	96%	19%	50%	90%	88%	93%	94%	88%	67%	83%	60%	90%	91%	70%	81%	
HV5	93%	65%	74%	63%	42%	65%	83%	91%	93%	95%	95%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	96%	96%	98%	42%	72%	92%	93%	92%	93%	81%	50%	88%	40%	87%	90%	62%	79%	
HV6	93%	62%	65%	79%	65%	40%	68%	86%	88%	92%	93%	94%	96%	97%	97%	97%	96%	96%	97%	94%	96%	97%	34%	72%	91%	89%	89%	89%	70%	8%	85%	16%	83%	88%	38%	73%	
HV7	95%	90%	88%	88%	83%	68%	46%	72%	84%	90%	93%	94%	96%	97%	98%	97%	97%	96%	97%	96%	96%	98%	61%	77%	93%	92%	90%	88%	64%	35%	89%	39%	84%	90%	59%	77%	
HV8	97%	95%	95%	94%	91%	86%	72%	50%	75%	88%	94%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	99%	84%	91%	96%	96%	95%	93%	62%	3%	95%	70%	87%	94%	78%	88%	
HV9	98%	95%	96%	95%	93%	88%	84%	75%	46%	71%	86%	91%	94%	96%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	99%	88%	93%	96%	95%	92%	87%	19%	19%	95%	79%	73%	93%	81%	87%	
HV10	97%	95%	96%	96%	95%	92%	90%	88%	71%	46%	81%	90%	95%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	97%	98%	98%	91%	94%	96%	94%	88%	80%	20%	57%	95%	83%	61%	92%	82%	85%	
HV11	97%	95%	95%	97%	95%	93%	93%	94%	86%	81%	47%	86%	91%	95%	97%	97%	97%	98%	98%	96%	98%	98%	92%	94%	95%	91%	82%	68%	57%	73%	94%	84%	36%	88%	78%	77%	
HV12	97%	94%	95%	97%	96%	94%	94%	96%	91%	90%	86%	47%	79%	91%	95%	96%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	93%	94%	94%	90%	74%	47%	72%	81%	94%	87%	33%	86%	80%	78%	
HV13	98%	96%	97%	98%	97%	96%	96%	97%	94%	95%	91%	79%	47%	80%	91%	95%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	95%	96%	95%	92%	65%	24%	85%	88%	96%	92%	64%	85%	86%	82%	
HV14	98%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	98%	96%	97%	95%	91%	80%	47%	80%	91%	94%	96%	97%	96%	98%	98%	96%	96%	96%	94%	89%	35%	39%	91%	93%	96%	94%	79%	81%	88%	82%
HV15	97%	96%	98%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	97%	95%	91%	80%	48%	81%	92%	94%	96%	94%	97%	98%	97%	96%	92%	83%	23%	68%	94%	94%	94%	94%	87%	71%	88%	79%	
HV16	96%	94%	96%	98%	98%	97%	97%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	91%	81%	48%	82%	90%	93%	90%	96%	97%	95%	94%	87%	74%	51%	81%	95%	94%	92%	94%	89%	53%	86%	72%	
HV17	96%	95%	97%	98%	98%	96%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	94%	92%	82%	50%	81%	91%	89%	95%	96%	94%	94%	84%	68%	70%	86%	95%	94%	90%	93%	90%	46%	85%	68%	
HV18	95%	94%	96%	98%	97%	96%	96%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	94%	90%	81%	48%	79%	84%	93%	95%	94%	93%	79%	40%	75%	88%	96%	95%	90%	94%	91%	53%	85%	72%	
HV19	95%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	93%	91%	79%	48%	70%	88%	94%	95%	92%	62%	8%	84%	93%	97%	96%	88%	95%	94%	73%	89%	80%	
HV20	88%	91%	91%	96%	96%	94%	96%	98%	98%	97%	96%	97%	97%	96%	94%	90%	89%	84%	70%	34%	73%	88%	91%	85%	2%	33%	59%	86%	93%	83%	65%	90%	87%	43%	68%	46%	
HV21	90%	91%	92%	96%	96%	96%	96%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	93%	88%	73%	43%	76%	86%	75%	32%	12%	80%	91%	94%	86%	48%	89%	91%	74%	75%	67%	
HV22	87%	88%	92%	96%	98%	97%	98%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	94%	88%	76%	46%	81%	61%	28%	54%	83%	90%	93%	83%	15%	84%	90%	79%	69%	66%	
T-S1	70%	74%	151%	19%	42%	34%	61%	84%	88%	91%	92%	93%	95%	96%	97%	95%	94%	94%	95%	91%	86%	81%	21%	42%	26%	8%	125%	21%	35%	50%	48%	27%	11%	35%	34%	30%	
T-S2	17%	356%	73%	50%	72%	72%	77%	91%	93%	94%	94%	94%	96%	96%	96%	94%	94%	93%	92%	85%	75%	61%	42%	21%	32%	53%	167%	17%	50%	50%	33%	34%	26%	37%	42%	30%	
T-S3	58%	39%	69%	90%	92%	91%	93%	96%	96%	96%	95%	94%	95%	94%	92%	87%	84%	79%	62%	2%	32%	28%	26%	32%	23%	28%	26%	58%	75%	35%	39%	58%	54%	43%	52%	44%	
T-S4	68%	78%	87%	88%	93%	89%	92%	96%	95%	94%	91%	90%	92%	89%	83%	74%	68%	40%	8%	33%	12%	54%	8%	53%	28%	18%	0%	28%	64%	108%	49%	21%	27%	21%	32%	26%	
T-S5	91%	82%	89%	93%	92%	89%	90%	95%	92%	88%	82%	74%	65%	35%	23%	51%	70%	75%	84%	59%	80%	83%	125%	167%	26%	0%	21%	39%	61%	58%	72%	62%	52%	40%	55%	43%	
T-S6	94%	88%	92%	94%	93%	89%	88%	93%	87%	80%	68%	47%	24%	39%	68%	81%	86%	88%	93%	86%	91%	90%	21%	17%	58%	28%	39%	24%	60%	69%	78%	64%	47%	61%	64%	60%	
T-S7	93%	86%	86%	88%	81%	70%	64%	62%	19%	20%	57%	72%	85%	91%	94%	95%	95%	96%	97%	93%	94%	93%	35%	50%	75%	64%	61%	60%	22%	44%	77%	52%	43%	76%	61%	60%	
T-S8	87%	16%	17%	67%	50%	8%	35%	3%	19%	57%	73%	81%	88%	93%	94%	94%	94%	95%	96%	83%	86%	83%	50%	50%	35%	108%	58%	69%	44%	17%	61%	36%	54%	74%	47%	55%	
LV1	45%	12%	65%	83%	88%	85%	89%	95%	95%	95%	94%	94%	96%	96%	94%	92%	90%	90%	88%	65%	48%	15%	48%	33%	39%	49%	72%	78%	77%	61%	40%	68%	78%	66%	62%	62%	
LV2	82%	39%	65%	60%	40%	16%	39%	70%	79%	83%	84%	87%	92%	94%	94%	94%	93%	94%	95%	90%	89%	84%	27%	34%	58%	21%	62%	64%	52%	36%	68%	34%	57%	64%	36%	45%	
LV3	92%	80%	90%	90%	87%	83%	84%	87%	73%	61%	36%	33%	64%	79%	87%	89%	90%	91%	94%	87%	91%	90%	11%	26%	54%	27%	52%	47%	43%	54%	78%	57%	36%	66%	58%	55%	
LV4	83%	54%	85%	91%	90%	88%	90%	94%	93%	92%	88%	86%	85%	81%	71%	53%	46%	53%	73%	43%	74%	79%	35%	37%	43%	21%	40%	61%	76%	74%	66%	64%	66%	36%	59%	39%	
PreH1	76%	32%	50%	70%	62%	38%	59%	78%	81%	82%	78%	80%	86%	88%	88%	86%	85%	85%	89%	68%	75%	69%	34%	42%	52%	32%	55%	64%	61%	47%	62%	36%	58%	59%	35%	43%	
PreH2	74%	29%	71%	81%	79%	73%	77%	88%	87%	85%	77%	78%	82%	82%	79%	72%	68%	72%	80%	46%	67%	66%	30%	30%	44%	26%	43%	60%	60%	55%	62%	45%	55%	39%	43%	33%	

Modelo 1: en 2D con cotas nominales y giros a 90°



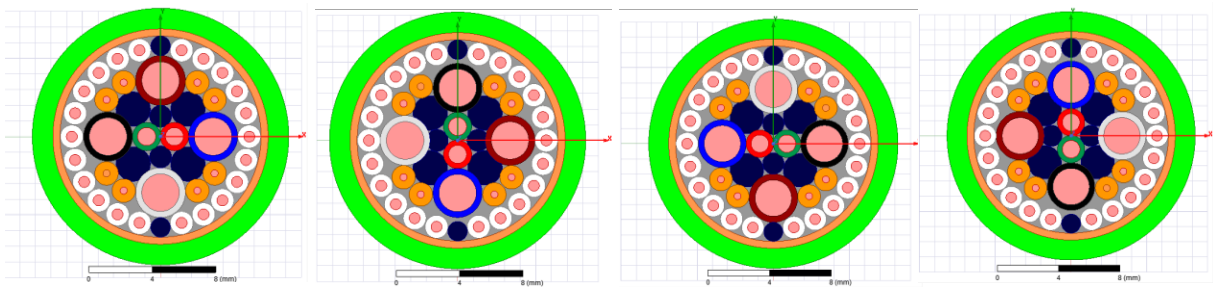
Matriz de error de capacitancias

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2		
HV1	14%	36%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV2	36%	9%	63%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV3	0%	63%	13%	51%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV4	0%	0%	51%	7%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV5	0%	0%	0%	21%	9%	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV6	0%	0%	0%	0%	24%	6%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV7	0%	0%	0%	0%	0%	25%	8%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	4%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	10%	59%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	59%	6%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	7%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	11%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	7%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	22%	11%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%	10%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	12%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	8%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	53%	12%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV21	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	8%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	87%	41%	100%	0%	0%	0%		
T-S2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	0%	0%	0%	0%	0%		
T-S3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	0%	0%	0%	0%	0%		
T-S4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%			
T-S5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	100%	0%	40%	0%	0%	0%		
T-S6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	0%	0%	100%	54%	92%	0%	0%	0%		
T-S7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	14%	0%	0%	44%	0%	0%	0%			
T-S8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	55%	0%	0%	0%	0%			
LV1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	87%	47%	52%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	0%	0%	1%	38%			
LV2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%	0%	0%	100%	100%	0%	55%	0%	19%	0%	0%	7%	0%		
LV3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	54%	44%	0%	0%	0%	23%	0%	0%			
LV4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	40%	92%	0%	0%	0%	20%	0%	2%			
PreH1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	1%	38%			
PreH2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	38%	0%	0%		

Matriz de error de las inductancias

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2
HV1	41%	74%	86%	92%	94%	94%	96%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	96%	91%	93%	90%	85%	73%	85%	65%	85%	81%	86%	78%	81%	72%	72%	70%	75%	73%
HV2	74%	38%	74%	83%	68%	65%	91%	96%	95%	95%	95%	94%	96%	95%	96%	95%	96%	95%	96%	92%	93%	91%	34%	79%	53%	27%	49%	5%	63%	30%	52%	35%	37%	9%	28%	49%
HV3	86%	74%	43%	66%	75%	65%	89%	95%	96%	96%	95%	96%	97%	97%	98%	97%	97%	96%	97%	92%	94%	94%	5%	37%	21%	47%	24%	46%	37%	14%	78%	77%	72%	66%	57%	64%
HV4	92%	83%	66%	43%	62%	79%	89%	94%	95%	97%	97%	97%	98%	98%	99%	98%	98%	98%	98%	96%	97%	97%	57%	83%	61%	71%	47%	82%	61%	81%	82%	82%	78%	76%	78%	76%
HV5	94%	68%	75%	62%	42%	65%	84%	92%	94%	95%	96%	97%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	98%	82%	86%	82%	87%	76%	88%	78%	85%	80%	77%	74%	71%	74%	74%
HV6	94%	65%	65%	79%	65%	38%	68%	86%	89%	93%	94%	95%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	95%	96%	97%	78%	81%	85%	79%	79%	81%	80%	76%	71%	69%	66%	65%	58%	66%
HV7	96%	91%	89%	89%	84%	68%	45%	72%	85%	91%	94%	95%	97%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	97%	98%	84%	74%	88%	75%	81%	74%	83%	72%	77%	77%	74%	71%	73%	72%
HV8	98%	96%	95%	94%	92%	86%	72%	49%	77%	90%	95%	97%	97%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	87%	69%	89%	70%	87%	71%	87%	71%	88%	86%	86%	84%	84%	85%
HV9	98%	95%	96%	95%	94%	89%	85%	77%	45%	76%	88%	93%	95%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	99%	71%	67%	75%	66%	67%	66%	71%	62%	86%	86%	82%	84%	84%	84%
HV10	98%	95%	96%	97%	95%	93%	91%	90%	76%	45%	81%	93%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	98%	98%	63%	84%	66%	83%	60%	85%	69%	86%	83%	82%	83%	84%	83%	83%
HV11	98%	95%	95%	97%	96%	94%	94%	95%	88%	81%	46%	89%	93%	96%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	98%	98%	83%	87%	83%	85%	81%	88%	86%	89%	80%	76%	78%	79%	78%	76%
HV12	97%	94%	96%	97%	97%	95%	95%	97%	93%	93%	89%	45%	80%	92%	96%	97%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	88%	81%	88%	79%	87%	82%	90%	83%	81%	78%	77%	78%	79%	78%
HV13	98%	96%	97%	98%	97%	96%	97%	97%	95%	96%	93%	80%	46%	83%	92%	96%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	85%	70%	87%	67%	86%	70%	88%	67%	86%	84%	85%	85%	84%	83%
HV14	98%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	98%	97%	97%	96%	92%	83%	45%	82%	91%	95%	96%	97%	95%	98%	98%	73%	73%	73%	74%	73%	78%	76%	75%	88%	86%	87%	88%	86%	84%
HV15	98%	96%	98%	99%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	96%	92%	82%	48%	81%	92%	94%	96%	94%	97%	98%	74%	88%	73%	86%	72%	89%	76%	88%	87%	85%	86%	87%	85%	84%
HV16	97%	95%	97%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	91%	81%	47%	82%	90%	93%	91%	96%	97%	86%	89%	85%	89%	85%	91%	89%	91%	84%	82%	81%	82%	83%	81%
HV17	97%	96%	97%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	95%	92%	82%	48%	81%	91%	89%	95%	96%	89%	90%	89%	89%	90%	90%	92%	90%	81%	79%	79%	80%	81%	78%
HV18	96%	95%	96%	98%	98%	97%	97%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	94%	90%	81%	47%	79%	85%	94%	96%	89%	85%	90%	81%	90%	86%	93%	88%	83%	82%	82%	82%	81%	81%
HV19	96%	96%	97%	98%	98%	97%	97%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	93%	91%	79%	47%	73%	90%	95%	87%	70%	87%	67%	87%	75%	90%	76%	87%	86%	86%	87%	86%	85%
HV20	91%	92%	92%	96%	97%	95%	96%	99%	98%	98%	97%	97%	97%	95%	94%	91%	89%	85%	73%	33%	77%	90%	65%	62%	64%	44%	2%	36%	55%	31%	77%	76%	64%	62%	60%	53%
HV21	93%	93%	94%	97%	97%	96%	97%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	94%	90%	77%	41%	77%	55%	81%	48%	67%	19%	75%	53%	73%	78%	78%	73%	72%	71%	68%
HV22	90%	91%	94%	97%	98%	97%	98%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	96%	95%	90%	77%	44%	80%	86%	76%	77%	64%	81%	78%	81%	71%	71%	67%	68%	67%	66%	
T-S1	85%	34%	5%	57%	82%	78%	84%	87%	71%	63%	83%	88%	85%	73%	74%	86%	89%	89%	87%	65%	55%	80%	24%	50%	59%	47%	21%	58%	65%	53%	56%	47%	26%	50%	54%	46%
T-S2	73%	79%	37%	83%	86%	81%	74%	69%	67%	84%	87%	81%	70%	73%	88%	89%	90%	85%	70%	62%	81%	86%	50%	24%	66%	15%	43%	53%	71%	60%	50%	47%	35%	51%	56%	45%
T-S3	85%	53%	21%	61%	82%	85%	88%	89%	75%	66%	83%	88%	87%	73%	73%	85%	89%	90%	87%	64%	48%	76%	59%	66%	26%	39%	60%	76%	86%	81%	55%	67%	59%	54%	62%	58%
T-S4	65%	27%	47%	71%	87%	79%	75%	70%	66%	83%	85%	79%	67%	74%	86%	89%	89%	81%	67%	44%	67%	77%	47%	15%	39%	21%	51%	62%	81%	71%	56%	39%	40%	43%	48%	48%
T-S5	85%	49%	24%	47%	76%	79%	81%	87%	67%	60%	81%	87%	86%	73%	72%	85%	90%	90%	87%	2%	19%	64%	21%	43%	60%	51%	24%	48%	78%	83%	77%	71%	59%	57%	65%	60%
T-S6	81%	5%	46%	82%	88%	81%	74%	71%	66%	85%	88%	82%	70%	78%	89%	91%	90%	86%	75%	36%	75%	81%	58%	53%	76%	62%	48%	26%	80%	86%	81%	72%	61%	69%	71%	70%
T-S7	86%	63%	37%	61%	78%	80%	83%	87%	71%	69%	86%	90%	88%	76%	76%	89%	92%	93%	90%	55%	53%	78%	65%	71%	86%	81%	78%	80%	25%	56%	80%	61%	58%	81%	70%	68%
T-S8	78%	30%	14%	81%	85%	76%	72%	71%	62%	86%	89%	83%	67%	75%	88%	91%	90%	88%	76%	31%	73%	81%	53%	60%	81%	71%	83%	86%	56%	25%	75%	59%	66%	84%	67%	71%
LV1	81%	52%	78%	82%	80%	71%	77%	88%	86%	83%	80%	81%	86%	88%	87%	84%	81%	83%	87%	77%	78%	71%	56%	50%	55%	56%	77%	81%	80%	75%	34%	62%	70%	59%	53%	53%
LV2	72%	35%	77%	82%	77%	69%	77%	86%	86%	82%	76%	78%	84%	86%	85%	82%	79%	82%	86%	76%	78%	71%	47%	47%	67%	39%	71%	72%	61%	59%	62%	30%	49%	61%	35%	40%
LV3	72%	37%	72%	78%	74%	66%	74%	86%	82%	83%	78%	77%	85%	87%	86%	81%	79%	82%	86%	64%	73%	67%	26%	35%	59%	40%	59%	61%	58%	66%	70%	49%	30%	59%	48%	44%
LV4	70%	9%	66%	76%	71%	65%	71%	84%	84%	84%	79%	78%	85%	88%	87%	82%	80%	82%	87%	62%	72%	68%	50%	51%	54%	43%	57%	69%	81%	84%	59%	61%	59%	32%	54%	39%
PreH1	75%	28%	57%	78%	74%	58%	73%	84%	84%	83%	78%	79%	84%	86%	85%	83%	81%	81%	86%	60%	71%	67%	54%	56%	62%	48%	65%	71%	70%	67%	53%	35%	48%	54%	27%	33%
PreH2	73%	49%	64%	76%	74%	66%	72%	85%	84%	83%	76%	78%	83%	84%	84%	81%	78%	81%	85%	53%	68%	66%	46%	45%	58%	48%	60%	70%	68%	71%	53%	40%	44%	39%	33%	25%

Modelo 2: en 2D con cotas nominales y giros a 90°



Matriz de error de las capacitancias

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2			
HV1	7%	36%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
HV2	36%	7%	63%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV3	0%	63%	9%	51%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV4	0%	0%	51%	6%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV5	0%	0%	0%	21%	8%	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV6	0%	0%	0%	0%	24%	1%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV7	0%	0%	0%	0%	0%	25%	7%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	18%	3%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%	6%	59%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	59%	4%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV12	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	5%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV14	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	7%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV15	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	6%	22%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV16	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	22%	10%	29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV17	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	29%	4%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV18	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	11%	23%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV19	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	7%	53%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	53%	8%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
HV21	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	5%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
HV22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	32%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	8%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	87%	41%	100%	0%	0%	0%	0%		
T-S2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	47%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
T-S3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	52%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
T-S4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	0%	0%	0%		
T-S5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	40%	0%	0%	0%	0%		
T-S6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	100%	54%	92%	0%	0%	0%		
T-S7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	
T-S8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	55%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
LV1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	87%	47%	52%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
LV2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	41%	0%	0%	100%	100%	0%	55%	0%	1%	0%	0%	7%	0%	0%		
LV3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	54%	44%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%		
LV4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	38%	40%	92%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2%	0%		
PreH1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	0%	0%	25%	38%	0%	0%			
PreH2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	38%	23%	0%	0%		

Matriz de errores de inductancias

	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV11	HV12	HV13	HV14	HV15	HV16	HV17	HV18	HV19	HV20	HV21	HV22	T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S6	T-S7	T-S8	LV1	LV2	LV3	LV4	PreH1	PreH2
HV1	42%	73%	85%	91%	93%	93%	95%	97%	98%	97%	97%	97%	98%	98%	97%	96%	96%	96%	95%	89%	91%	88%	80%	69%	82%	62%	80%	78%	81%	75%	81%	71%	68%	69%	74%	72%
HV2	73%	39%	70%	80%	65%	63%	90%	95%	95%	95%	94%	96%	95%	96%	95%	95%	94%	95%	91%	92%	90%	22%	56%	51%	43%	42%	24%	58%	3%	52%	33%	34%	6%	30%	53%	
HV3	85%	70%	44%	63%	74%	65%	88%	95%	96%	96%	95%	97%	97%	98%	96%	97%	96%	97%	91%	93%	92%	11%	33%	40%	53%	40%	53%	51%	26%	78%	77%	73%	66%	58%	64%	
HV4	91%	80%	63%	43%	62%	79%	88%	94%	95%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	96%	96%	97%	55%	80%	67%	65%	55%	79%	67%	78%	82%	81%	78%	76%	78%	76%	
HV5	93%	65%	74%	62%	42%	65%	83%	91%	93%	95%	95%	96%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	98%	80%	82%	78%	82%	71%	83%	74%	82%	79%	77%	73%	70%	74%	73%	
HV6	93%	63%	65%	79%	65%	40%	68%	86%	88%	92%	93%	94%	96%	97%	97%	96%	96%	97%	94%	96%	97%	73%	76%	80%	72%	71%	75%	74%	72%	71%	68%	65%	64%	58%	65%	
HV7	95%	90%	88%	88%	83%	68%	46%	72%	84%	90%	93%	94%	96%	97%	98%	97%	97%	97%	97%	96%	96%	98%	81%	70%	84%	70%	73%	69%	78%	68%	76%	76%	73%	69%	72%	70%
HV8	97%	95%	95%	94%	91%	86%	72%	50%	75%	89%	94%	96%	97%	98%	99%	98%	98%	99%	99%	98%	99%	99%	85%	74%	87%	74%	84%	76%	85%	69%	88%	86%	86%	84%	84%	85%
HV9	98%	95%	96%	95%	93%	88%	84%	75%	46%	72%	86%	92%	95%	97%	98%	98%	98%	99%	98%	99%	99%	75%	74%	78%	73%	71%	75%	69%	60%	87%	86%	83%	84%	84%	84%	
HV10	97%	95%	96%	96%	95%	92%	90%	89%	72%	46%	81%	91%	95%	97%	98%	98%	98%	98%	99%	97%	98%	98%	70%	81%	73%	80%	69%	84%	67%	84%	82%	82%	84%	84%	83%	82%
HV11	97%	95%	95%	97%	95%	93%	93%	94%	86%	81%	47%	87%	92%	96%	97%	97%	97%	98%	98%	96%	98%	98%	80%	82%	80%	80%	79%	86%	84%	85%	78%	75%	78%	78%	77%	75%
HV12	97%	94%	95%	97%	96%	94%	94%	96%	92%	91%	87%	46%	79%	92%	95%	97%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	84%	78%	83%	75%	83%	80%	88%	81%	79%	76%	77%	77%	77%	77%
HV13	98%	96%	97%	98%	97%	96%	96%	97%	95%	95%	92%	79%	46%	81%	91%	95%	97%	97%	98%	97%	98%	98%	83%	76%	85%	74%	84%	69%	88%	74%	86%	83%	85%	84%	83%	83%
HV14	98%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	98%	97%	97%	96%	92%	81%	46%	80%	91%	94%	96%	97%	95%	98%	98%	79%	77%	79%	78%	71%	77%	82%	78%	88%	86%	87%	87%	86%	85%
HV15	97%	96%	98%	98%	98%	97%	98%	99%	98%	98%	97%	95%	91%	80%	48%	81%	92%	94%	96%	94%	97%	98%	78%	85%	78%	84%	71%	87%	80%	86%	87%	85%	86%	87%	85%	84%
HV16	96%	95%	96%	98%	98%	97%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	95%	91%	81%	48%	82%	90%	93%	90%	96%	97%	83%	86%	83%	87%	83%	88%	87%	87%	83%	81%	81%	82%	82%	81%
HV17	96%	95%	97%	98%	98%	96%	97%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	94%	92%	82%	49%	81%	91%	89%	95%	96%	85%	86%	86%	87%	88%	87%	89%	86%	81%	78%	79%	80%	80%	78%
HV18	96%	94%	96%	98%	98%	96%	97%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	96%	94%	90%	81%	47%	79%	84%	93%	95%	85%	82%	87%	79%	88%	84%	90%	86%	83%	81%	81%	82%	81%	81%
HV19	95%	95%	97%	98%	98%	97%	97%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	97%	96%	93%	91%	79%	48%	71%	88%	94%	85%	75%	85%	65%	86%	79%	88%	80%	87%	86%	86%	87%	86%	85%
HV20	89%	91%	91%	96%	97%	94%	96%	98%	98%	97%	96%	97%	97%	95%	94%	90%	89%	84%	71%	34%	74%	89%	69%	71%	62%	41%	13%	51%	60%	46%	78%	76%	65%	62%	60%	54%
HV21	91%	92%	93%	96%	96%	96%	96%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	93%	88%	74%	42%	76%	64%	80%	46%	61%	36%	72%	63%	69%	78%	77%	72%	71%	71%	67%
HV22	88%	90%	92%	97%	98%	97%	98%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	97%	96%	95%	94%	89%	76%	45%	78%	83%	73%	70%	58%	73%	74%	74%	71%	69%	63%	66%	65%	64%
T-S1	80%	22%	11%	55%	80%	73%	81%	85%	75%	70%	80%	84%	83%	79%	78%	83%	85%	85%	85%	69%	64%	78%	22%	44%	32%	15%	30%	28%	42%	16%	48%	32%	9%	38%	39%	34%
T-S2	69%	56%	33%	80%	82%	76%	70%	74%	74%	81%	82%	78%	76%	77%	85%	86%	86%	82%	75%	71%	80%	83%	44%	22%	40%	40%	45%	23%	54%	33%	36%	37%	22%	39%	45%	32%
T-S3	82%	51%	40%	67%	78%	80%	84%	87%	78%	73%	80%	83%	85%	79%	78%	83%	86%	87%	85%	62%	46%	73%	32%	40%	24%	31%	34%	62%	77%	68%	42%	59%	52%	45%	54%	47%
T-S4	62%	43%	53%	65%	82%	72%	70%	74%	73%	80%	80%	75%	74%	78%	84%	87%	87%	79%	65%	41%	61%	70%	15%	40%	31%	19%	12%	36%	67%	51%	49%	24%	26%	26%	36%	32%
T-S5	80%	42%	40%	55%	71%	71%	73%	84%	71%	69%	79%	83%	84%	71%	71%	83%	88%	88%	86%	13%	36%	58%	30%	45%	34%	12%	22%	41%	64%	73%	72%	64%	52%	44%	58%	47%
T-S6	78%	24%	53%	79%	83%	75%	69%	76%	75%	84%	86%	80%	69%	77%	87%	88%	87%	84%	79%	51%	72%	73%	28%	23%	62%	36%	41%	24%	64%	76%	77%	65%	50%	63%	65%	62%
T-S7	81%	58%	51%	67%	74%	74%	78%	85%	69%	67%	84%	88%	88%	82%	80%	87%	89%	90%	88%	60%	63%	74%	42%	54%	77%	67%	64%	64%	23%	50%	76%	54%	46%	77%	63%	61%
T-S8	75%	3%	26%	78%	82%	72%	68%	69%	60%	84%	85%	81%	74%	78%	86%	87%	86%	86%	80%	46%	69%	74%	16%	33%	68%	51%	73%	76%	50%	23%	70%	46%	60%	80%	57%	64%
LV1	81%	52%	78%	82%	79%	71%	76%	88%	87%	82%	78%	79%	86%	88%	87%	83%	81%	83%	87%	78%	78%	71%	48%	36%	42%	49%	72%	77%	76%	70%	38%	65%	73%	63%	58%	58%
LV2	71%	33%	77%	81%	77%	68%	76%	86%	86%	82%	75%	76%	83%	86%	85%	81%	78%	81%	86%	76%	77%	69%	32%	37%	59%	24%	64%	65%	54%	46%	65%	33%	53%	63%	35%	44%
LV3	68%	34%	73%	78%	73%	65%	73%	86%	83%	84%	78%	77%	85%	87%	86%	81%	79%	81%	86%	65%	72%	63%	9%	22%	52%	26%	52%	46%	60%	73%	53%	34%	62%	53%	49%	
LV4	69%	6%	66%	76%	70%	64%	69%	84%	84%	84%	78%	77%	84%	87%	87%	82%	80%	82%	87%	62%	71%	66%	38%	39%	45%	26%	44%	63%	77%	80%	63%	63%	62%	35%	58%	39%
PreH1	74%	30%	58%	78%	74%	58%	72%	84%	84%	83%	77%	77%	83%	86%	85%	82%	80%	81%	86%	60%	71%	65%	39%	45%	54%	36%	58%	65%	63%	57%	58%	35%	53%	58%	33%	41%
PreH2	72%	53%	64%	76%	73%	65%	70%	85%	84%	82%	75%	77%	83%	85%	84%	81%	78%	81%	85%	54%	67%	64%	34%	32%	47%	32%	47%	62%	61%	64%	58%	44%	49%	39%	41%	31%

Factores de corrección del modelo 2D estudiados

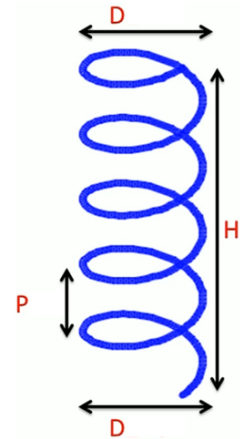
Al comparar los errores en los elementos de la diagonal entre la simulación 2D y las mediciones se observa que ellos son constantes y que los valores simulados en 2D son siempre menores que los medidos. La relación entre los valores medidos y los simulados en los elementos de la diagonal son:

- 1,764 para los cables HV.
- 1,266 para los cables T-Sensor.
- 1,583 para los cables LV.
- 1,506 para los cables Preheaters.

Como propuesta inicial se decidió considerar el efecto del error de la longitud al considerar los cables como rectos en los modelos 2D, dado que el trenzado al aportar una mayor longitud de conductor la inductancia real se vería afectada. Con la utilización de los datos geométricos se pudo acotar este error:

Corrección de las longitudes

- H = 1 m para todos
- P = 0,2 m para los cables HV → n = 5 vueltas.
- P = 0,1 m para los cables LV, T-Sensor y Preheaters → n = 10 vueltas
- D = 0,01136 m para los cables HV.
- D = 0,0084 m para los cables T-Sensor.
- D = 0,00716 m para los cables LV.
- D = 0,0018 m para los cables Preheaters.



$$\text{Length of helix} = n\sqrt{C^2 + p^2}$$

$$C = \pi D$$

- Las longitudes reales de los cables teniendo en cuenta el trenzado son:
 - L = 1,016 m para los cables HV.
 - L = 1,034 m para los cables T-Sensor.
 - L = 1,025 m para los cables LV.
 - L = 1,0016 m para los cables Preheaters
- Debido a que el diámetro del trenzado es muy pequeño, la aportación a la longitud es de pocos milímetros.
- Al aplicar la corrección de las longitudes en todos los elementos de la matriz de Inductancias del Modelo con cotas reales y con giros a 90°, se observa una variación de un 1% en los elementos de la diagonal.

Sin Corrección longitudes

Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	3%
Mínimo error 300 kHz	3%
Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	99%
Media de errores 200 kHz	75%
Media de errores 300 kHz	76%

Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	17%
Mínimo error 300 kHz	17%
Máximo error 200 kHz	50%
Máximo error 300 kHz	56%
Media error 200 kHz	38%
Media error 300 kHz	38%

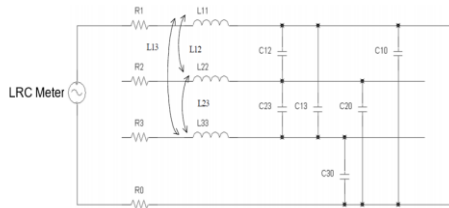
Con corrección de longitudes

Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	3%
Mínimo error 300 kHz	3%
Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	99%
Media de errores 200 kHz	75%
Media de errores 300 kHz	76%

Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	16%
Mínimo error 300 kHz	16%
Máximo error 200 kHz	49%
Máximo error 300 kHz	55%
Media error 200 kHz	37%
Media error 300 kHz	37%

Tras analizar el montaje de medida de las inductancias propias se observa que el hecho de haber un trenzado helicoidal, puede aparecer un efecto de inductancia similar a una bobina. Si se hace el desarrollo de la geometría (pantalla como cilindro y cable helicoidal) solo debería afectarle la longitud

extra. Sin embargo, al hacer la medición el cable está trenzado con n vueltas, pudiendo aportar su inducción propia a la medida.



La inductancia L de una bobina está dada por:

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I}$$

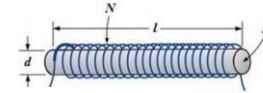
$$\Phi = B \cdot A$$

$$B = \mu \cdot H$$

$$H = N \cdot \frac{I}{l}$$

$$\Phi = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} \cdot A$$

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$$



$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Se calculó la inductancia propia de cada uno de los cables en función de su trenzado para tenerlo en cuenta en las matrices de inductancias. Al aplicar la corrección de las longitudes en todos los elementos de la matriz de Inductancias del Modelo con cotas reales y con giros a 90°, se observa una variación de un 2% en los elementos de la diagonal.

HV		T-Sensor		LV		Preheaters	
Diámetro de giro [m]	0,01136	Diámetro de giro [m]	0,0084	Diámetro de giro [m]	0,00716	Diámetro de giro [m]	0,0018
Vueltas	5	Vueltas	10	Vueltas	10	Vueltas	10
Paso [m]	0,2	Paso [m]	0,1	Paso [m]	0,1	Paso [m]	0,1
Longitud real para 1 m [m]	1,015796	Longitud real para 1 m [m]	1,034233982	Longitud real para 1 m [m]	1,024986399	Longitud real para 1 m [m]	1,0015976
mu	1,26E-06	mu	1,25664E-06	mu	1,25664E-06	mu	1,25664E-06
area	0,000101	area	5,54177E-05	area	4,02639E-05	area	2,54469E-06
L [nH/m]	3,184171	L [nH/m]	6,963992865	L [nH/m]	5,059711914	L [nH/m]	0,319775183

Sin Corrección longitudes

Con corrección de longitudes

Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	3%
Mínimo error 300 kHz	3%
Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	99%
Media de errores 200 kHz	75%
Media de errores 300 kHz	76%

Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	17%
Mínimo error 300 kHz	17%
Máximo error 200 kHz	50%
Máximo error 300 kHz	56%
Media error 200 kHz	38%
Media error 300 kHz	38%

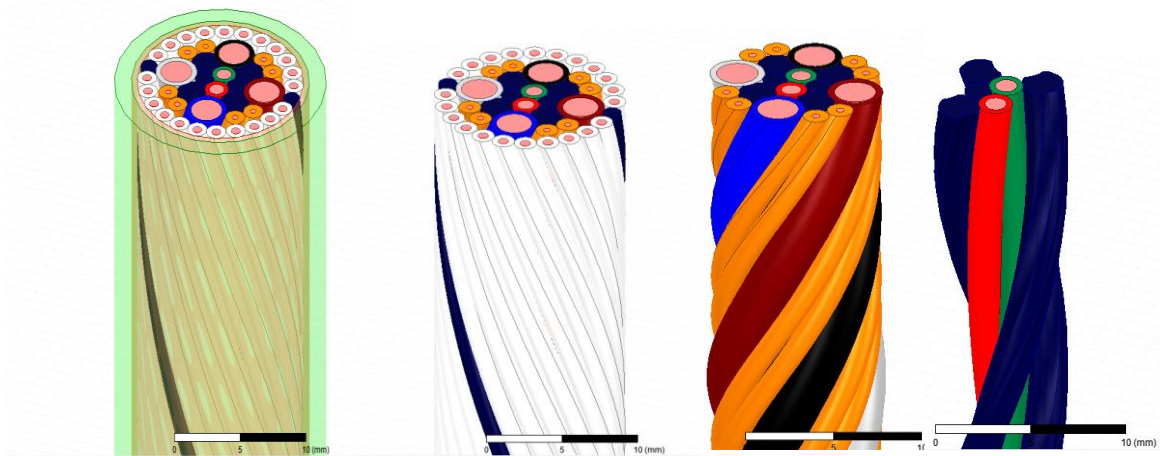
Errores en toda la matriz	
Mínimo error 200 kHz	3%
Mínimo error 300 kHz	3%
Máximo error 200 kHz	99%
Máximo error 300 kHz	99%
Media de errores 200 kHz	75%
Media de errores 300 kHz	75%

Errores en las diagonales	
Mínimo error 200 kHz	15%
Mínimo error 300 kHz	15%
Máximo error 200 kHz	48%
Máximo error 300 kHz	54%
Media error 200 kHz	36%
Media error 300 kHz	36%

ANEXO F: MODELOS 3D DEL PROTOTIPO

Se realizó un modelo 3D del cable teniendo en cuenta el trenzado de todos los elementos. Para ello se modeló un prototipo de 20 cm, lo suficiente para que hubiera una vuelta completa de los conductores externos HV y dos vueltas del bloque de conductores internos LV, T-Sensor y Preheaters.

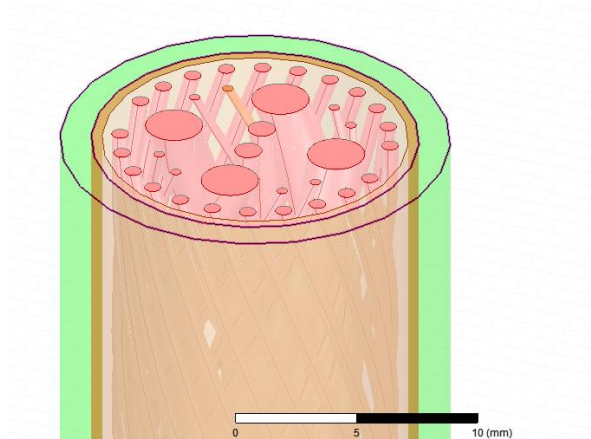
A continuación se recoge el modelo 3D completo en sus diferentes capas.



Modelo 3D de 20 cm del prototipo. Visualización de izquierda a derecha de todas las capas del modelo

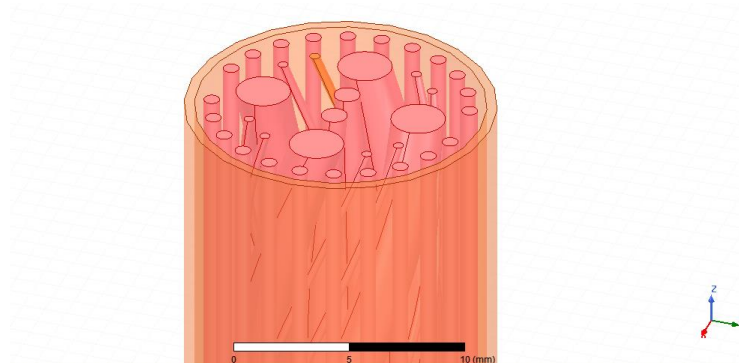
Se definieron los conductores como señal indicando los puntos de entrada y salida de corriente (necesarios en el modelo 3D), la pantalla fue indicada como referencia y se comprobó que no hubiera errores en la geometría (colisiones y superposiciones entre elementos). Posteriormente, se definió un setup de simulación en corriente continua para la simulación de la matriz R y un setup a 200 kHz para la simulación de las matrices L y C con un criterio de parada de 10 simulaciones con refinamiento de malla o menos de un 1% de variación en la convergencia de los resultados. Sin embargo, no se pudo finalizar la simulación debido a que el modelo consumía demasiados recursos informáticos, tras varias horas con la CPU al 100% generaba un error que suspendía la simulación para proteger el equipo. Se probó a simplificar el modelo a 10 cm para reducir el tamaño de la malla de cálculo, pero seguía consumiendo demasiados recursos informáticos.

La siguiente simplificación consistió en definir todo el interior como aislante, la geometría del aire interno era demasiado compleja para el cálculo. Por ello se consideró tanto el aire interno como los aislantes individuales como un único elemento aislante. De esta forma se reducía el número de elementos considerablemente, principalmente para las comprobaciones geométricas como para la definición de la malla. Sin embargo, este modelo seguía consumiendo demasiados recursos informáticos. A continuación se recoge la primera simplificación realizada.



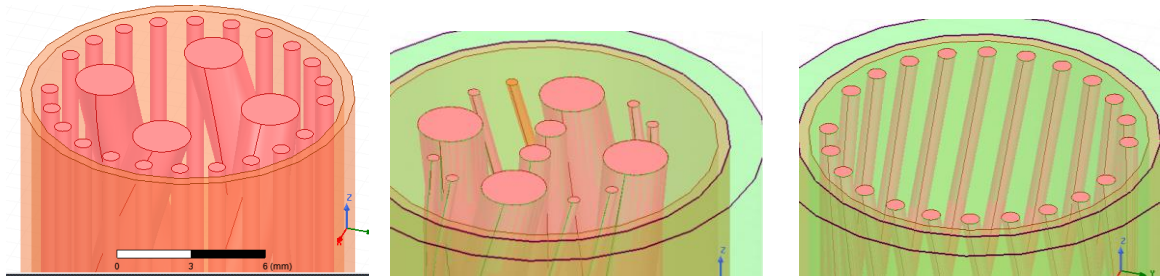
Simplificación basada en la reducción de elementos no conductores internos.

La siguiente simplificación consistió en eliminar los elementos aislantes tanto internos como externos, dejando los huecos como vacío que es el material por defecto del fondo de simulación denominado en el software como Background. De esta forma se reducían considerablemente los elementos de cálculo. Con el objetivo de simplificar todavía más el modelo, no se consideró el trenzado de los conductores externos HV. Sin embargo seguía consumiendo demasiados recursos para ejecutar la simulación.



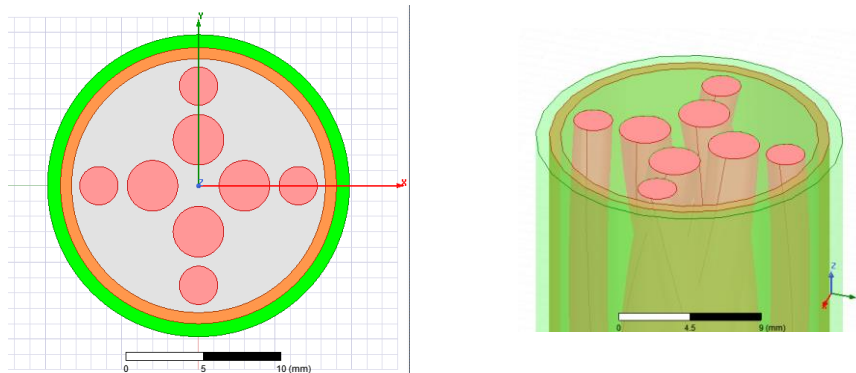
Simplificación basada en la eliminación de todos los elementos aislantes y eliminación del trenzado de los conductores externos HV

Con el objetivo de ver cuál es el límite que se puede simular en 3D con el equipo se siguieron las simplificaciones. Se probó un modelo con la eliminación de los conductores T-Sensor y Preheaters, otro con la eliminación de todo el bloque interno y otro con la eliminación de todo el bloque externo de conductores. Todos sobrecargaban la CPU.



Simplificaciones basadas en la eliminación conductores y la variación de la geometría

Lo máximo que se podría simular con el equipo era un modelo de 8 conductores, cuatro internos y cuatro externos. Los internos con un trenzado a derechas y los externos con un trenzado a izquierdas. Los cables internos eran de 3,3 mm de diámetro mientras que los externos eran de 2,5 mm de diámetro. Se consideró todo el interior como aislante. Se hizo también un modelo 2D de este cable considerando un metro de cable plano para comparar los efectos del trenzado en los conductores.



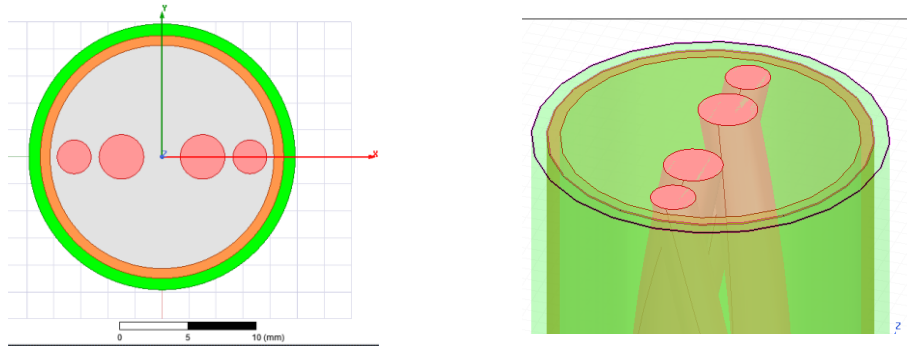
Modelos 2D y 3D de 8 conductores

En la comparación de las inductancias se observa que en el trenzado aumentan considerablemente los valores tanto de las inductancias propias como el de las inductancias mutuas. Además se verifica una homogeneización de las inductancias mutuas, teniendo casi todas el mismo orden de magnitud en el modelo 3D, mientras que en el modelo 2D las inductancias mutuas no son homogéneas con variaciones significantes en función de la distancia entre los conductores.

2D Matriz Lij 200 kHz	3D Matriz Lij 200 kHz	Simulacion 20 cm	Simulacion 10 cm	2*Simulacion 10 cm	10*Simulacion 10 cm	5*Simulacion 20cm	Media para 1 metro	Variacion 3D y 2D
L(Cable_1,Cable_1) [nH] 168	L(Cable_1,Cable_1) [nH]	145	60	120	602	727	664	296%
L(Cable_1,Cable_2) [nH] 11	L(Cable_1,Cable_2) [nH]	115	45	90	448	577	512	4537%
L(Cable_1,Cable_3) [nH] 7	L(Cable_1,Cable_3) [nH]	114	44	88	439	572	505	6948%
L(Cable_1,Cable_4) [nH] 11	L(Cable_1,Cable_4) [nH]	115	45	90	448	577	513	4537%
L(Cable_1,Cable_5) [nH] 73	L(Cable_1,Cable_5) [nH]	120	47	94	470	601	535	637%
L(Cable_1,Cable_6) [nH] 30	L(Cable_1,Cable_6) [nH]	120	47	95	474	599	537	1701%
L(Cable_1,Cable_7) [nH] 20	L(Cable_1,Cable_7) [nH]	120	47	94	470	598	534	2587%
L(Cable_1,Cable_8) [nH] 30	L(Cable_1,Cable_8) [nH]	120	47	93	465	599	532	1686%
L(Cable_2,Cable_2) [nH] 168	L(Cable_2,Cable_2) [nH]	145	60	120	602	727	664	296%
L(Cable_2,Cable_3) [nH] 11	L(Cable_2,Cable_3) [nH]	115	45	90	448	577	513	4537%
L(Cable_2,Cable_4) [nH] 7	L(Cable_2,Cable_4) [nH]	114	44	88	439	572	505	6948%
L(Cable_2,Cable_5) [nH] 30	L(Cable_2,Cable_5) [nH]	120	47	93	465	599	532	1686%
L(Cable_2,Cable_6) [nH] 73	L(Cable_2,Cable_6) [nH]	120	47	94	470	601	535	637%
L(Cable_2,Cable_7) [nH] 30	L(Cable_2,Cable_7) [nH]	120	47	95	474	599	537	1701%
L(Cable_2,Cable_8) [nH] 20	L(Cable_2,Cable_8) [nH]	120	47	94	470	598	534	2587%
L(Cable_3,Cable_3) [nH] 168	L(Cable_3,Cable_3) [nH]	145	60	121	603	726	664	296%
L(Cable_3,Cable_4) [nH] 11	L(Cable_3,Cable_4) [nH]	115	45	90	448	577	512	4537%
L(Cable_3,Cable_5) [nH] 20	L(Cable_3,Cable_5) [nH]	120	47	94	470	598	534	2587%
L(Cable_3,Cable_6) [nH] 30	L(Cable_3,Cable_6) [nH]	120	47	93	465	599	532	1686%
L(Cable_3,Cable_7) [nH] 73	L(Cable_3,Cable_7) [nH]	120	47	94	470	601	535	637%
L(Cable_3,Cable_8) [nH] 30	L(Cable_3,Cable_8) [nH]	120	47	95	474	599	537	1701%
L(Cable_4,Cable_4) [nH] 168	L(Cable_4,Cable_4) [nH]	145	60	121	603	727	665	296%
L(Cable_4,Cable_5) [nH] 30	L(Cable_4,Cable_5) [nH]	120	47	95	474	599	537	1701%
L(Cable_4,Cable_6) [nH] 20	L(Cable_4,Cable_6) [nH]	120	47	94	470	598	534	2587%
L(Cable_4,Cable_7) [nH] 30	L(Cable_4,Cable_7) [nH]	120	47	93	465	599	532	1686%
L(Cable_4,Cable_8) [nH] 73	L(Cable_4,Cable_8) [nH]	120	47	94	470	601	535	637%
L(Cable_5,Cable_5) [nH] 212	L(Cable_5,Cable_5) [nH]	155	64	129	643	774	708	234%
L(Cable_5,Cable_6) [nH] 82	L(Cable_5,Cable_6) [nH]	130	52	104	521	651	586	612%
L(Cable_5,Cable_7) [nH] 55	L(Cable_5,Cable_7) [nH]	125	49	98	492	623	558	911%
L(Cable_5,Cable_8) [nH] 82	L(Cable_5,Cable_8) [nH]	130	52	104	521	651	586	612%
L(Cable_6,Cable_6) [nH] 212	L(Cable_6,Cable_6) [nH]	155	64	129	643	774	708	234%
L(Cable_6,Cable_7) [nH] 82	L(Cable_6,Cable_7) [nH]	130	52	104	521	651	586	612%
L(Cable_6,Cable_8) [nH] 55	L(Cable_6,Cable_8) [nH]	125	49	98	492	623	558	911%
L(Cable_7,Cable_7) [nH] 212	L(Cable_7,Cable_7) [nH]	155	64	129	643	774	708	234%
L(Cable_7,Cable_8) [nH] 82	L(Cable_7,Cable_8) [nH]	130	52	104	521	651	586	612%
L(Cable_8,Cable_8) [nH] 212	L(Cable_8,Cable_8) [nH]	155	64	129	643	774	708	234%

Comparación de inductancias entre modelo 2D y 3D

También se decidió realizar modelos 2D y 3D de cuatro conductores a partir del modelo anterior para confirmar el efecto del trenzado en el cable. En este caso, al haber la mitad de conductores se pudo modelar hasta 40 cm de cable.



Modelos 2D y 3D de 4 conductores

Se observa en el modelo 3D que tanto las inductancias propias como mutuas aumentan considerablemente y que las inductancias mútuas se homogeneizan en el mismo orden de magnitud.

2D Matriz Lij 200 kHz	3D Matriz Lij	Simulacion 20 cm	Simulacion 40 cm	2*Simulacion 20 cm	5*Simulacion 20 cm	2,5*Simulacion 40cm	Media para 1 metro	Variacion 3D y 2D
L(Cable_1,Cable_1) [nH] 1	L(Cable_1,Cable_1) [nH]	147	347	294	735	867	801	364%
L(Cable_1,Cable_2) [nH]	L(Cable_1,Cable_2) [nH]	114	282	228	569	705	637	8105%
L(Cable_1,Cable_3) [nH]	L(Cable_1,Cable_3) [nH]	121	295	242	604	738	671	677%
L(Cable_1,Cable_4) [nH]	L(Cable_1,Cable_4) [nH]	120	294	240	600	735	668	2953%
L(Cable_2,Cable_2) [nH] 1	L(Cable_2,Cable_2) [nH]	147	347	294	735	867	801	364%
L(Cable_2,Cable_3) [nH]	L(Cable_2,Cable_3) [nH]	120	294	240	600	735	668	2952%
L(Cable_2,Cable_4) [nH]	L(Cable_2,Cable_4) [nH]	121	295	242	604	738	671	677%
L(Cable_3,Cable_3) [nH] 2	L(Cable_3,Cable_3) [nH]	167	388	334	834	969	902	259%
L(Cable_3,Cable_4) [nH]	L(Cable_3,Cable_4) [nH]	127	307	253	633	768	700	1035%
L(Cable_4,Cable_4) [nH] 2	L(Cable_4,Cable_4) [nH]	167	388	334	834	969	902	259%

Comparación de inductancias entre modelo 2D y 3D

ANEXO G: CASOS DE PROPAGACIÓN DEL RUIDO

Con objeto de comprobar la validez de los resultados obtenidos de las simulaciones 2D de los parámetros eléctricos del prototipo se decidió simular un caso de propagación del ruido en el cable con un software de cálculo de MTL desarrollado en el ITA. Se realizaron dos estudios previos, uno con 2 conductores y otro con 30 conductores, antes de estudiar el prototipo de 36 conductores. Los tres estudios se recogen a continuación.

Caso de 2 conductores

El objetivo era analizar el caso de 2 conductores recogido en [9], utilizando el software proporcionado y posteriormente contrastar los resultados. Al ser un caso sencillo se puede realizar el dibujo del esquema y las ecuaciones a mano.

Posteriormente se generaron los archivos Excel con los datos del cable (matrices R,L,C y G) junto con las Excel de las condiciones de contorno para cargar los datos en el software MTL.

- Definición del conductor (sistema): Matrices R, L, C, G definidas en la tesis.

Element	Type	Height (m)
1	conductor	0,01
2	conductor	0,01

Ri (Ω/m)	Ro (Ω/m)
$0.0017 \cdot (1 + \sqrt{w/5400})$	$0.0035 \cdot (1 + \sqrt{w/160000})$
$0.0018 \cdot (1 + \sqrt{w/5400})$	

Lij (H/m)	
1,479E-07	2,6E-08
2,6E-08	1,54E-07

Gij (S/m)	
0	0
0	0

Cij (F/m)	
2,292E-10	-4,12E-11
-4,12E-11	2,339E-10

- Definición del lado Source y Load (en función del caso)

Definición Source: equivalente Thevenin fuente ideal para CM	
Zij (Ω)	Vi (V)
0 0 0 0	1 1

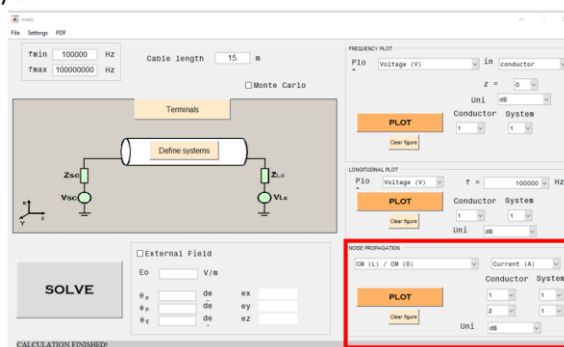
Definición Load: equivalente Thevenin caso A. Cargas equilibradas desacopladas.	
Zij (Ω)	Vi (V)
30,4 0 0 30,4	0 0

Definición Load: equivalente Thevenin caso B. Cargas equilibradas desacopladas.	
Zij (Ω)	Vi (V)
150 0 0 150	0 0

Definición Load: equivalente Thevenin caso C. Cargas desequilibradas desacopladas.	
Zij (Ω)	Vi (V)
150 0 0 0	0 0

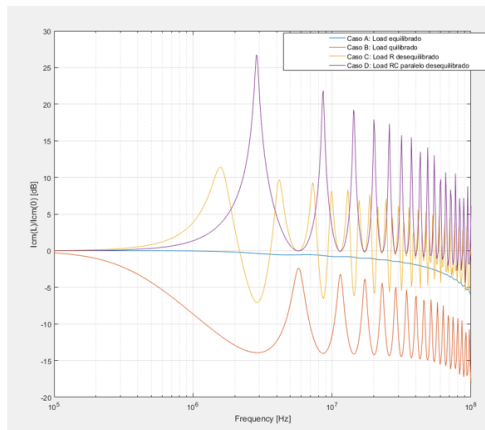
Definición Load: equivalente Thevenin caso D. Cargas desequilibrada RC paralelo desacopladas.	
Zij (Ω)	Vi (V)
$150(1+1500i \cdot \omega \cdot 1e-6)$ 0 0 0	0 0

- Se han cargado los archivos en el programa y calculado T_{cm1} entre el cable 1 y 2.

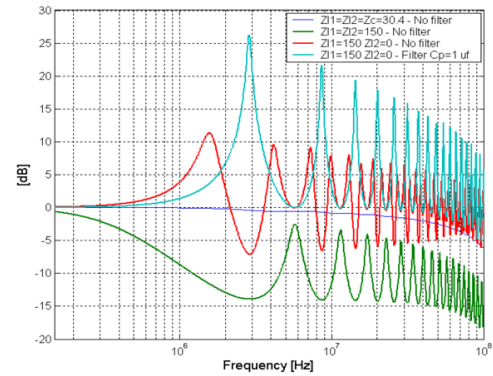


- Contraste de resultados en comparación con la tesis: [TcmI](#)

Calculado con software

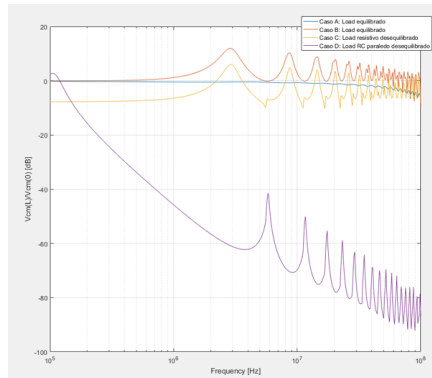


Tesis Fernando

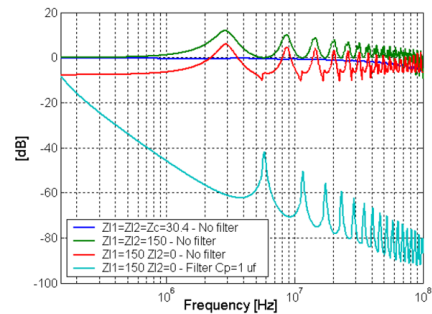


- Contraste de resultados en comparación con la tesis: [TcmV](#)

Calculado con software

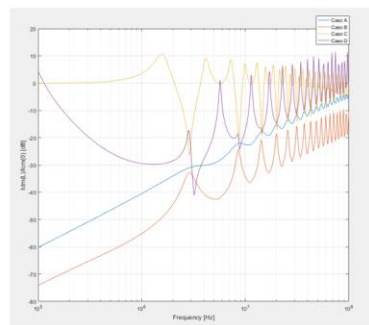


Tesis Fernando

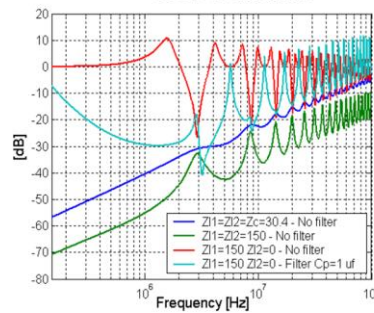


- Contraste de resultados en comparación con la tesis: [TcmI-dmI](#)

Calculado con software



Tesis Fernando



Caso cable de 30 conductores

El siguiente paso consistió en estudiar y replicar un caso complejo de 30 conductores recogido en [11], concretamente el caso de la propagación de ruido en modo común en la fuente DC/DC1.

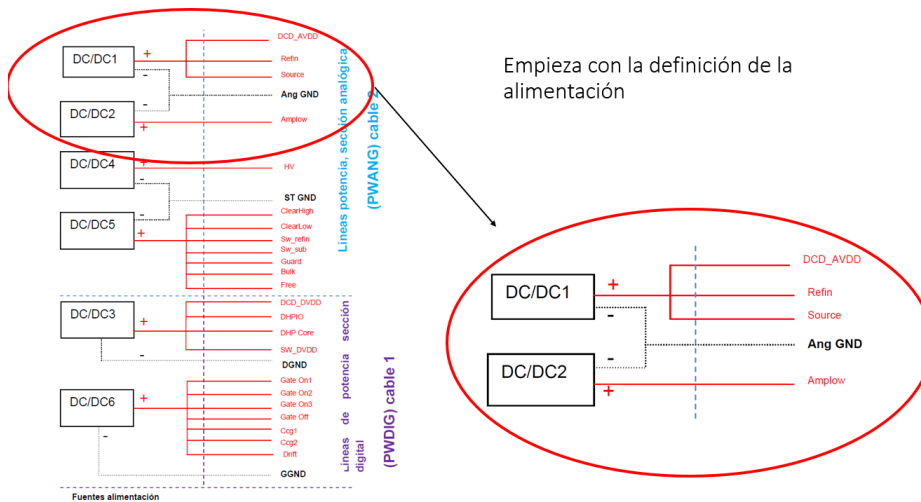
El prototipo consistía en 30 conductores con dos pantallas internas lo que implicaba 3 sistemas distintos distribuidos de la siguiente forma:

- 13 conductores en el sistema interno (denominado analógico).

- 17 conductores en el sistema intermedio.
- 1 conductor (pantalla) en el sistema externo.

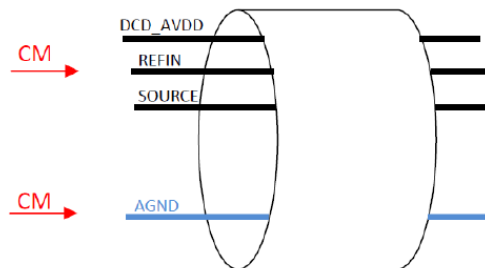


En este caso el sistema de alimentación era el siguiente:



Empieza con la definición de la alimentación

Para el estudio del CM en el DC/DC 1 aplica el voltaje y la corriente en los tres conductores del terminal positivo (DCD_AVDD, REFIN, SOURCE) y al conductor de retorno (AGND).



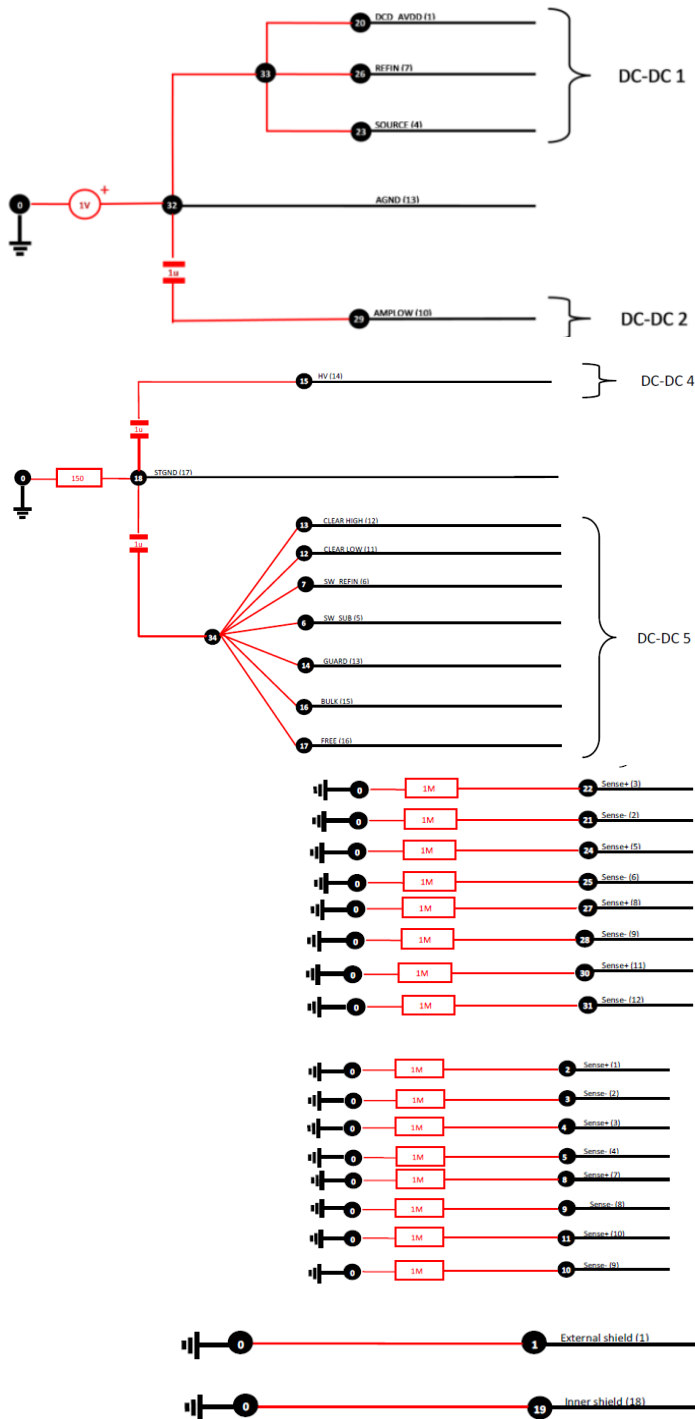
En este caso:

- $V_{cm} = (V_{dcd} + V_{refin} + V_{source} + V_{agnd})/4$
- $I_{cm} = (I_{dcd} + I_{refin} + I_{source} + I_{agnd})/4$

Para ello se añade una fuente de 1 V en los 4 conductores. Como el DC/DC1 y el DC/DC2 comparten el mismo terminal negativo, el cable del terminal positivo del DC/DC2 se ve afectado. Para ello se modela el DC/DC2 como un condensador de $1\mu F$. En los demás conductores que están dentro de la misma pantalla se les pone a tierra con una resistencia de $150\ \Omega$ y se consideran las fuentes

DC/DC4 y DC/DC5 como un condensador de $1\mu\text{F}$. Los cables del sistema intermedio (sense) se les pone a tierra con una resistencia de $1\text{M}\Omega$. Las dos pantallas se les cortocircuita a tierra.

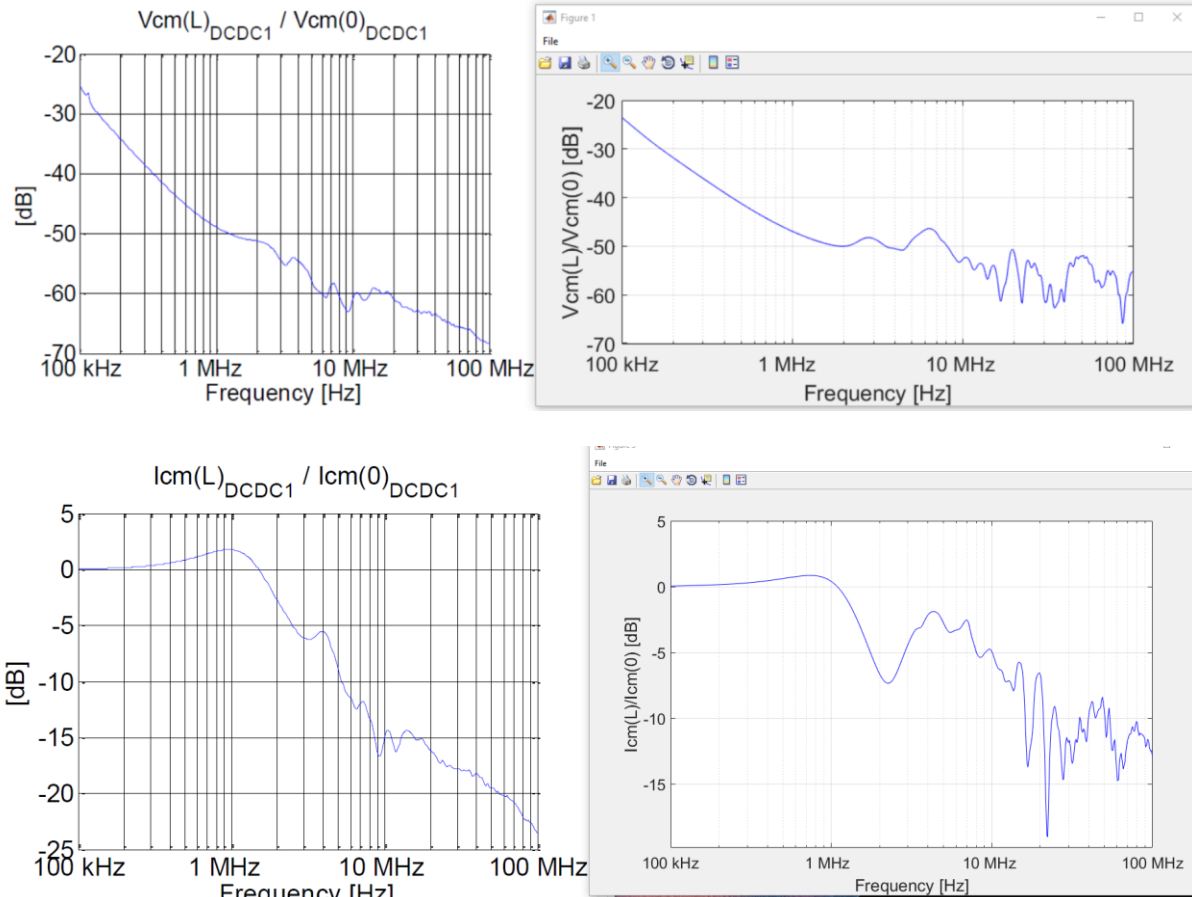
Se define la siguiente conducción de contorno del lado fuente:



Para el lado carga se define la siguiente condición de contorno:

del cable aplicando el método de Montecarlo y calculando finalmente la transferencia como la media de todos los casos contemplados. Esta consideración atenúa el efecto de la resonancia en la propagación del ruido. Sin embargo, sí que se puede comprobar que la tendencia de la respuesta y el rango de dB son los mismos por lo que se da por válido el estudio realizado.

A continuación se recoge un ejemplo de los resultados obtenidos (a la derecha) en contraste con los resultados de la tesis (a la izquierda) para $V_{cm}(L)/V_{cm}(0)$ e $I_{cm}(L)/I_{cm}(0)$ en la fuente DC/DC1 constituida por los cables 1,4,7 y 13 (retorno de la fuente).



Caso de propagación de ruido en el prototipo de 36 conductores

Para el cálculo de los datos de los parámetros eléctricos del cable es necesario definir unas condiciones de contorno en el lado fuente y el lado de carga. En el lado fuente se consideró:

- Resistencias de puesta a tierra en los cables de potencia de 150Ω (valor estándar para el estudio de propagación de ruido) y en los cables de señal de $1 M\Omega$ que representa la alta impedancia asociada a estos cables.
- Fuentes de alimentación consideradas como un condensador de $1 \mu F$, se puede realizar esta aproximación debido a que se trata de una fuente DC/DC de tensión.
- Fuente de tensión ideal que introduce el ruido en una pareja de cables LV.
- Pantalla puesta a tierra.

En el lado carga se consideró:

- Resistencia de puesta a tierra de $200\text{ m}\Omega$ considerando así el efecto de las conexiones.
- Carga de los cables HV como una resistencia de $1\text{ M}\Omega$ relacionada con la alta impedancia de las cargas, cuyo filtro fue considerado como con un condensador de $1\text{ }\mu\text{F}$.
- Carga de los cables LV como un condensador de $1\text{ }\mu\text{F}$ considerando solo el filtro de la carga.
- Carga de los cables de sensores como una resistencia de $1\text{ M}\Omega$ considerando las altas impedancias que se distribuyen a lo largo de los cables de sensores. No se han conectado estos cables a los cables de potencia debido a que únicamente se quería observar el efecto del ruido en los cables LV y HV sin considerar los cables de señal.
- Pantalla puesta a tierra.

A continuación se recoge el esquema de alimentación propuesto junto con la definición de los datos de contorno del lado fuente para un ruido de modo común inyectado a la pareja de cables LV 31 y 32 junto con la definición de contorno del lado carga. Se observa que no se conecta los cables de sensores a los cables de potencia en el lado carga, debido a que el estudio pretende comparar únicamente la propagación del ruido en los cables LV y HV para un ruido inyectado en una pareja de cables LV.

Posteriormente se crearon los archivos Excel correspondientes a los parámetros del cable y a los circuitos de las condiciones de contorno referenciado por los nodos numerados, de esta forma el propio software calcula los equivalentes Thevenin para el cálculo de las funciones MTL con los parámetros del cable utilizando ecuaciones en Matlab. Se crearon tres casos diferentes, uno con los parámetros medidos en laboratorio y otros dos correspondientes con los parámetros simulados con los modelos 2D con giros a 90 grados denominados Modelos 1 y Modelo 2. A continuación se recoge la definición del lado carga basada en los nodos.

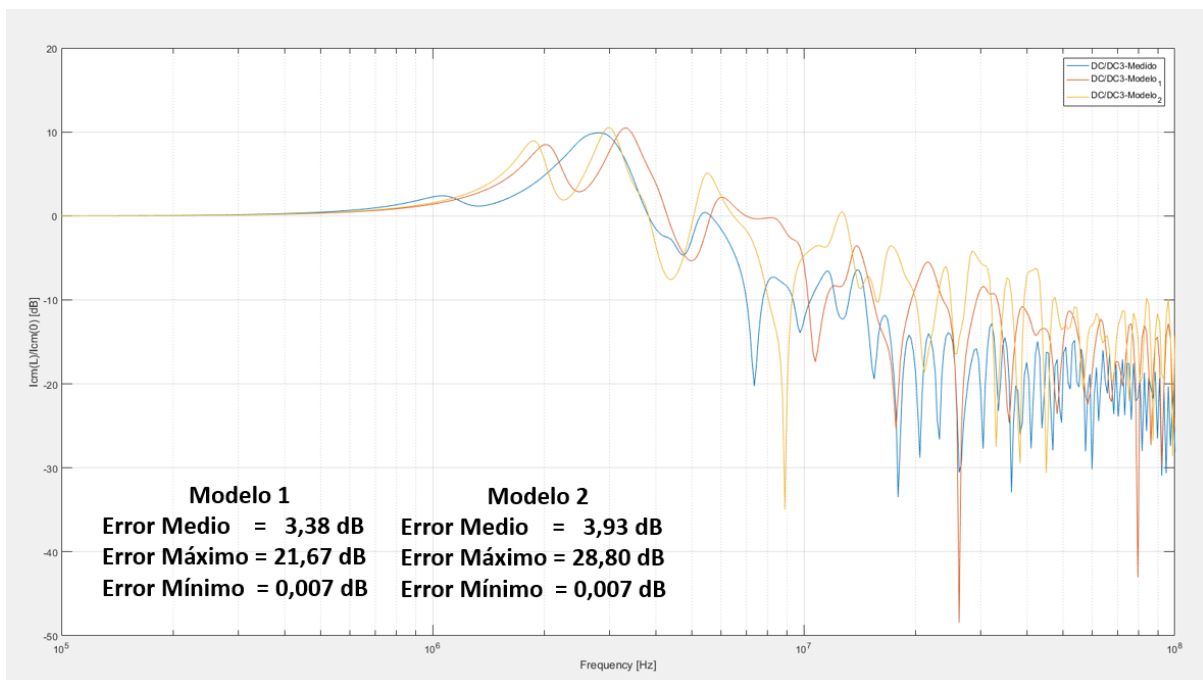
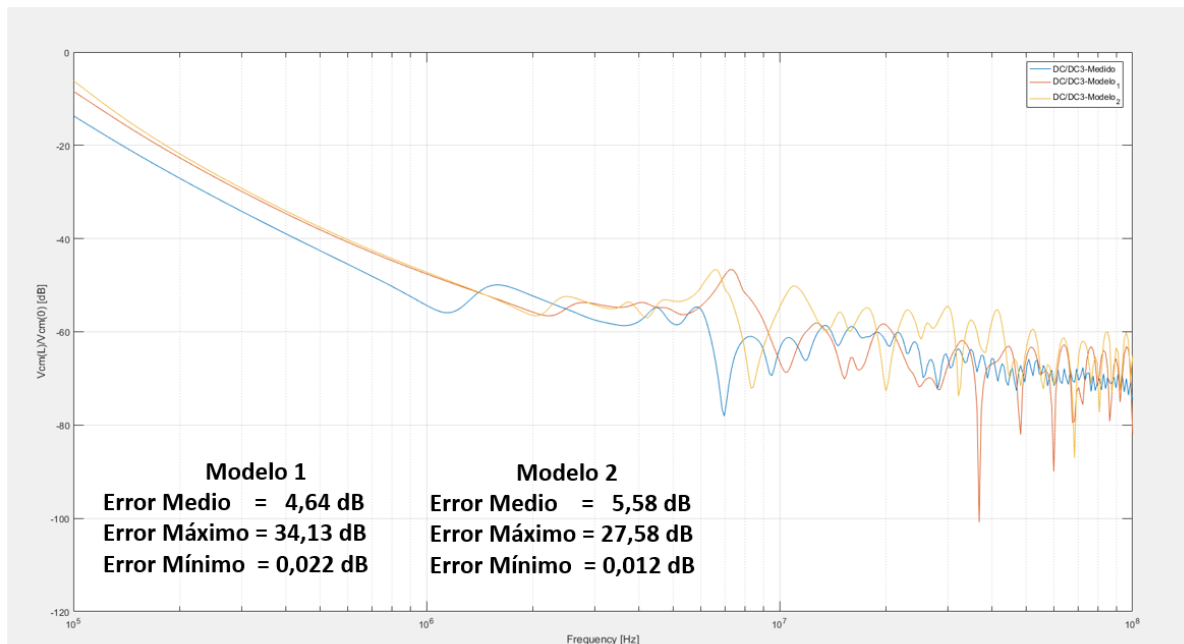
From	To	Ohm	From	To	F	From	To	V
23	0	1000000	2	38	0,000001	1	0	1E-14
24	0	1000000	3	39	0,000001	12	0	1E-14
25	0	1000000	4	40	0,000001	31	0	1E-14
26	0	1000000	5	41	0,000001	33	0	1E-14
27	0	1000000	6	42	0,000001			
28	0	1000000	7	43	0,000001			
29	0	1000000	8	44	0,000001			
30	0	1000000	9	45	0,000001			
35	0	1000000	10	46	0,000001			
36	0	1000000	11	47	0,000001			
38	0	1000000	13	48	0,000001			
39	0	1000000	14	49	0,000001			
40	0	1000000	15	50	0,000001			
41	0	1000000	16	51	0,000001			
42	0	1000000	17	52	0,000001			
43	0	1000000	18	53	0,000001			
44	0	1000000	19	54	0,000001			
45	0	1000000	20	55	0,000001			
46	0	1000000	21	56	0,000001			
47	0	1000000	22	57	0,000001			
48	0	1000000	32	58	0,000001			
49	0	1000000	34	59	0,000001			
50	0	1000000						
51	0	1000000						
52	0	1000000						
53	0	1000000						
54	0	1000000						
55	0	1000000						
56	0	1000000						
57	0	1000000						
58	0	0,20						
59	0	0,20						

A continuación se recoge un fragmento de la definición del lado fuente basada en los nodos definidos.

Cij (F/m)																			
9.76E-11	1.84E-11	4.00E-13	4.00E-13	0.00E+00	4.00E-13	0.00E+00	4.00E-13	1.33E-13	1.33E-13	2.67E-13	1.33E-13	1.33E-13	2.00E-12	1.60E-12	3.33E-12	2.67E-13	2.67E-13	9.09E-26	9.09E-26
1.84E-11	1.01E-10	1.80E-11	8.00E-13	4.00E-13	4.00E-13	1.33E-13	2.67E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	4.00E-13	4.00E-13	1.33E-13	1.33E-13
4.00E-13	1.80E-11	1.01E-10	1.68E-11	4.00E-13	4.00E-13	6.67E-13	2.67E-13	5.33E-13	1.33E-13	4.00E-13	4.00E-13	1.87E-12	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	3.07E-12	4.00E-13	4.00E-13	1.33E-13
4.00E-13	8.00E-13	1.68E-11	1.00E-10	1.72E-11	4.00E-13	4.00E-13	4.00E-13	5.33E-13	1.33E-13	5.33E-13	2.67E-13	2.00E-12	4.00E-13	1.33E-13	5.33E-13	5.33E-13	5.33E-13	5.33E-13	2.67E-13
0.00E+00	4.00E-13	4.00E-13	1.72E-11	9.76E-11	1.60E-11	1.33E-13	6.67E-13	0.00E+00	0.00E+00	1.33E-13	6.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	5.33E-13	4.00E-13	5.33E-13	5.33E-13	2.67E-13	8.00E-13
4.00E-13	4.00E-13	8.00E-13	4.00E-13	1.60E-11	9.60E-11	1.63E-11	1.33E-13	4.00E-13	4.00E-13	0.00E+00	0.00E+00	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	5.33E-13	2.67E-13	2.67E-13	8.00E-13	8.00E-13
0.00E+00	1.33E-13	6.67E-13	4.00E-13	1.33E-13	1.63E-11	9.68E-11	1.65E-11	2.67E-13	4.00E-13	1.33E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	8.00E-13	5.33E-13	5.33E-13	5.33E-13	5.33E-13
4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	4.00E-13	6.67E-13	1.33E-13	1.65E-11	9.71E-11	1.65E-11	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	5.33E-13	0.00E+00	5.33E-13	4.00E-13	9.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13
1.33E-13	0.00E+00	5.33E-13	5.33E-13	0.00E+00	4.00E-13	2.67E-13	1.65E-11	9.76E-11	1.64E-11	0.00E+00	4.00E-13	1.33E-13	2.27E-26	1.33E-13	0.00E+00	1.33E-13	4.00E-13	1.33E-13	2.67E-13
1.33E-13	0.00E+00	1.33E-13	1.33E-13	0.00E+00	4.00E-13	4.00E-13	1.64E-11	9.76E-11	1.68E-11	4.00E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.33E-13	1.33E-13
2.67E-13	0.00E+00	4.00E-13	5.33E-13	1.33E-13	0.00E+00	1.33E-13	2.67E-13	0.00E+00	1.68E-11	9.52E-11	2.00E-12	5.33E-13	0.00E+00	5.33E-13	0.00E+00	4.00E-13	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13
1.33E-13	4.00E-13	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	0.00E+00	2.67E-13	2.67E-13	4.00E-13	4.00E-13	2.00E-12	9.52E-11	1.64E-11	8.00E-13	0.00E+00	4.00E-13	2.67E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13
1.33E-13	2.67E-13	1.87E-12	2.00E-12	6.67E-13	2.67E-13	6.67E-13	5.33E-13	1.33E-13	0.00E+00	5.33E-13	1.64E-11	9.84E-11	1.68E-11	8.00E-13	0.00E+00	2.67E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13
2.00E-12	2.67E-13	2.67E-13	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	0.00E+00	2.27E-26	0.00E+00	5.33E-13	8.00E-13	1.68E-11	9.32E-11	1.73E-11	1.07E-12	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13
1.60E-12	2.67E-13	6.67E-13	1.33E-13	5.33E-13	1.33E-13	2.67E-13	5.33E-13	1.33E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.00E-13	1.73E-11	1.00E-10	1.73E-11	1.07E-12	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13
3.33E-12	1.33E-13	3.07E-12	5.33E-13	4.00E-13	5.33E-13	8.00E-13	4.00E-13	0.00E+00	0.00E+00	4.00E-13	4.00E-13	0.00E+00	1.07E-12	1.73E-11	1.00E-10	1.72E-11	1.00E-10	1.72E-11	6.67E-13
2.67E-13	4.00E-13	4.00E-13	5.33E-13	2.67E-13	2.67E-13	5.33E-13	9.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	1.07E-12	1.00E-10	1.72E-11	1.00E-10	1.80E-11
2.67E-13	9.09E-26	1.33E-13	2.67E-13	8.00E-13	8.00E-13	5.33E-13	9.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	6.67E-13	1.80E-11	1.00E-10	1.00E-10
2.67E-13	5.33E-13	2.67E-13	1.60E-12	8.00E-13	8.00E-13	6.67E-13	1.33E-13	1.33E-13	5.33E-13	6.67E-13	8.00E-13	4.00E-13	4.00E-13	2.67E-13	0.00E+00	1.33E-13	1.76E-11	1.76E-11	1.76E-11
0.00E+00	1.20E-12	1.20E-12	1.33E-13	9.33E-13	1.33E-13	1.47E-12	1.07E-12	4.00E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	1.33E-13	4.00E-13	4.00E-13	0.00E+00	4.00E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13
0.00E+00	4.00E-13	6.67E-13	2.67E-13	4.00E-13	1.33E-12	1.47E-12	2.67E-13	2.67E-13	1.33E-13	8.00E-13	6.67E-13	2.67E-13	0.00E+00	0.00E+00	2.67E-13	1.33E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2.00E-12	4.00E-13	5.33E-13	6.67E-13	9.33E-13	9.33E-13	2.00E-12	1.33E-12	1.33E-12	1.33E-12	1.33E-12	1.33E-12	0.00E+00	0.00E+00	2.67E-13	2.67E-13	0.00E+00	1.33E-13	1.33E-13	5.33E-13
6.67E-13	9.33E-13	9.33E-13	4.00E-13	6.67E-13	2.53E-12	2.67E-13	2.13E-12	4.00E-13	1.07E-12	9.33E-13	1.07E-12	5.33E-13	1.33E-13	1.73E-12	9.33E-13	1.20E-12	6.67E-13	6.67E-13	6.67E-13
1.33E-12	2.67E-13	5.33E-13	9.33E-13	5.33E-13	0.00E+00	1.60E-12	4.53E-12	6.67E-13	6.67E-13	6.67E-13	1.60E-12	6.67E-13	1.60E-12	6.67E-13	9.33E-13	1.20E-12	1.60E-12	1.60E-12	1.60E-12
4.00E-13	9.33E-13	6.67E-13	1.47E-12	1.20E-12	9.33E-13	3.87E-12	2.80E-12	1.07E-12	1.07E-12	1.33E-12	9.33E-13	9.33E-13	1.33E-12	6.67E-13	9.33E-13	1.07E-12	1.07E-12	1.07E-12	1.07E-12
5.33E-13	1.47E-12	1.33E-12	9.33E-13	2.67E-13	1.47E-12	9.33E-13	1.20E-12	8.00E-13	8.00E-13	1.47E-12	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	1.20E-12	1.47E-12	1.47E-12
1.20E-12	1.07E-12	9.33E-13	1.07E-12	1.47E-12	2.67E-13	1.47E-12	1.33E-12	1.33E-12	1.07E-12	6.67E-13	1.20E-12	1.47E-12	6.67E-13	6.67E-13	1.20E-12	5.33E-13	1.20E-12	5.33E-13	6.67E-13
1.20E-12	9.33E-13	6.67E-13	1.33E-12	4.00E-13	1.07E-12	9.33E-13	5.33E-13	2.40E-12	6.67E-13	1.87E-12	0.00E+00	1.47E-12	5.33E-13	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	1.20E-12	1.20E-12	1.20E-12
1.20E-12	5.33E-13	1.20E-12	5.33E-13	1.60E-12	2.67E-13	2.00E-12	9.33E-13	8.00E-13	1.33E-12	2.13E-12	1.20E-12	1.33E-13	4.00E-13	1.33E-12	1.07E-12	1.33E-12	1.07E-12	5.33E-13	9.33E-13
9.33E-13	1.73E-12	1.33E-13	1.07E-12	6.67E-13	1.47E-12	4.00E-13	4.00E-13	1.47E-12	1.33E-12	1.07E-12	6.67E-13	2.27E-12	8.00E-13	5.33E-13	2.67E-13	1.33E-12	1.07E-12	1.33E-12	9.33E-13
3.20E-12	1.07E-12	4.27E-12	2.13E-12	2.40E-12	2.60E-12	2.53E-12	2.13E-12	2.93E-12	2.53E-12	2.93E-12	4.00E-12	2.53E-12	2.93E-12	4.00E-12	2.53E-12	2.80E-12	2.27E-12	3.33E-12	3.60E-12
4.80E-12	1.47E-12	2.13E-12	2.00E-12	2.27E-12	2.53E-12	2.13E-12	2.93E-12	2.13E-12	2.40E-12	3.07E-12	1.07E-12	4.53E-12	2.53E-12	2.40E-12	2.27E-12	3.47E-12	2.00E-12	2.67E-13	2.67E-13
1.47E-12	8.00E-12	6.67E-13	2.80E-12	3.73E-12	1.87E-12	2.80E-12	3.07E-12	2.80E-12	2.40E-12	5.20E-12	3.07E-12	2.53E-12	2.40E-12	2.80E-12	1.87E-12	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13	8.00E-13
4.67E-12	1.33E-13	3.87E-12	2.40E-12	2.00E-12	2.67E-12	2.27E-12	1.33E-12	2.13E-12	4.53E-12	2.53E-12	2.93E-12	2.67E-12	2.40E-12	2.27E-12	2.13E-12	2.93E-12	1.60E-12	1.60E-12	1.60E-12
9.33E-13	1.33E-12	1.73E-12	2.00E-12	4.00E-13	2.00E-12	4.00E-13	1.47E-12	4.00E-13	1.20E-12	1.20E-12	1.33E-12	1.20E-12	1.33E-13	2.67E-13	1.33E-12	2.67E-13	1.60E-12	1.33E-12	1.33E-12
4.00E-13	6.67E-13	2.27E-12	1.87E-12	8.00E-13	1.47E-12	5.33E-13	1.33E-12	1.33E-12	1.20E-12	9.33E-13	4.00E-13	1.20E-12	6.67E-13	2.67E-13	0.00E+00	5.33E-13	2.67E-13	2.67E-13	2.67E-13

Lij (H/m)																			
5.47E-07	2.06E-07	1.13E-07	8.93E-08	7.60E-08	6.69E-08	8.16E-08	1.06E-07	1.07E-07	7.47E-08	7.80E-08	7.07E-08	8.85E-08	8.91E-08	9.01E-08	8.89E-08	9.96E-08	8.97E-08	9.57E-08	9.57E-08
2.06E-07	5.18E-07	1.83E-07	8.31E-08	2.21E-08	1.51E-08	4.55E-08	6.44E-08	4.21E-08	3.94E-08	3.60E-08	2.95E-08	3.59E-08	2.84E-08	4.28E-08	4.24E-08	5.76E-08	4.80E-08	6.12E-08	6.12E-08
1.13E-07	1.83E-07	5.72E-07	1.55E-07	6.71E-08	2.59E-08	5.44E-08	8.07E-08	6.37E-08	5.51E-08	4.31E-08	4.21E-08	4.63E-08	4.52E-08	6.61E-08	5.20E-08	6.97E-08	4.97E-08	6.49E-08	6.49E-08
8.93E-08	8.31E-08	1.55E-07	5.57E-07	1.51E-07	8.88E-08	8.89E-08	1.11E-07	8.07E-08	8.21E-08	9.37E-08	7.59E-08	7.72E-08	8.47E-08	9.37E-08	9.12E-08	1.06E-07	9.48E-08	9.67E-08	9.67E-08
7.60E-08	2.21E-08	6.71E-08	1.51E-07	5.47E-07	1.59E-07	1.19E-07	1.18E-07	9.55E-08	8.73E-08	8.09E-08	8.27E-08	8.05E-08	7.97E-08	1.05E-07	9.37E-08	1.02E-07	8.36E-08	9.35E-08	9.35E-08
6.69E-08	1.51E-08	2.59E-08	8.88E-08	1.59E-07	5.16E-07	1.73E-07	1.27E-07	7.81E-08	7.12E-08	7.00E-08	7.00E-08	6.52E-08	7.12E-08	6.80E-08	7.09E-08	7.28E-08	6.16E-08	6.36E-08	6.36E-08
8.16E-08	4.55E-08	5.44E-08	8.89E-08	1.19E-07	1.73E-07	5.83E-07	2.04E-07	1.10E-07	7.83E-08	7.40E-08	6.87E-08	7.25E-08	6.85E-08	8.07E-08	7.75E-08	8.55E-08	5.97E-08	6.24E-08	6.24E-08
1.06E-07	6.44E-08	8.07E-08	1.11E-07	1.18E-07	1.27E-07	2.04E-07	6.31E-07	2.28E-07	1.45E-07	1.30E-07	1.17E-07	1.09E-07	1.10E-07	1.29E-07	1.18E-07	1.32E-07	1.17E-07	1.22E-07	1.22E-07
1.07E-07	4.21E-08	6.37E-08	8.07E-08	9.55E-08	7.81E-08	1.10E-07	2.28E-07	5.92E-07	2.00E-07	1.24E-07	8.32E-08	8.48E-08	8.56E-08	1.06E-07	9.69E-08	1.03E-07	9.69E-08	9.76E-08	9.76E-08
7.47E-08	3.60E-08	5.51E-08	8.21E-08	8.73E-08	7.12E-08	7.83E-08	1.45E-07	2.00E-07	5.82E-07	2.90E-07									

los resultados obtenidos con las medidas por el laboratorio es inferior a 5 dB. A continuación se recogen las funciones de transferencia del ruido en tensión e intensidad para la fuente DC/DC3.

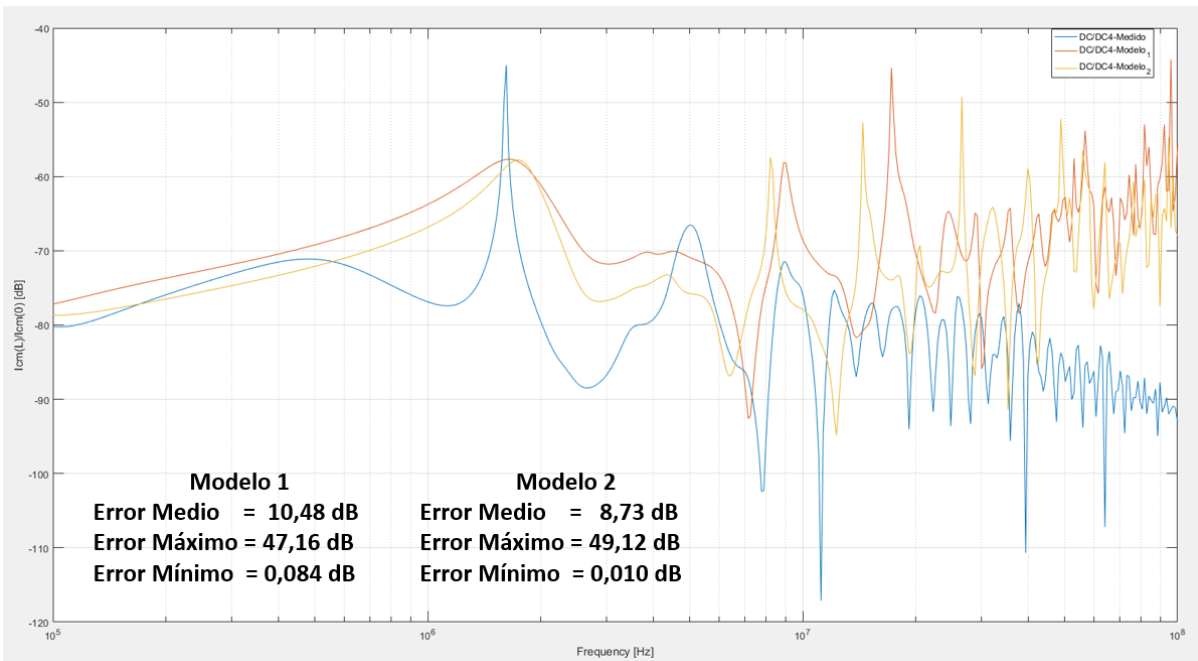


Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV31 y 32 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Ruido en fuente DC/DC4 cables LV 33 y 34

Se observa tanto en tensiones como en intensidades que no existe una transferencia del ruido inyectado en la fuente DC/DC3 en la fuente DC/DC4. La atenuación en ambos casos es del orden de - 50 dB para las tensiones y del orden de -80 dB para las intensidades, lo que implica un factor de reducción del orden del 800% y 1300% respectivamente. En este caso se observa que el error medio es del orden de 6 dB para la función de transferencia de las tensiones y del orden de 10 dB para la

función de transferencia de las intensidades. Esto es debido al efecto de las grandes resonancias en alta frecuencia. A continuación se recoge la función de transferencia para la fuente DC/DC4.

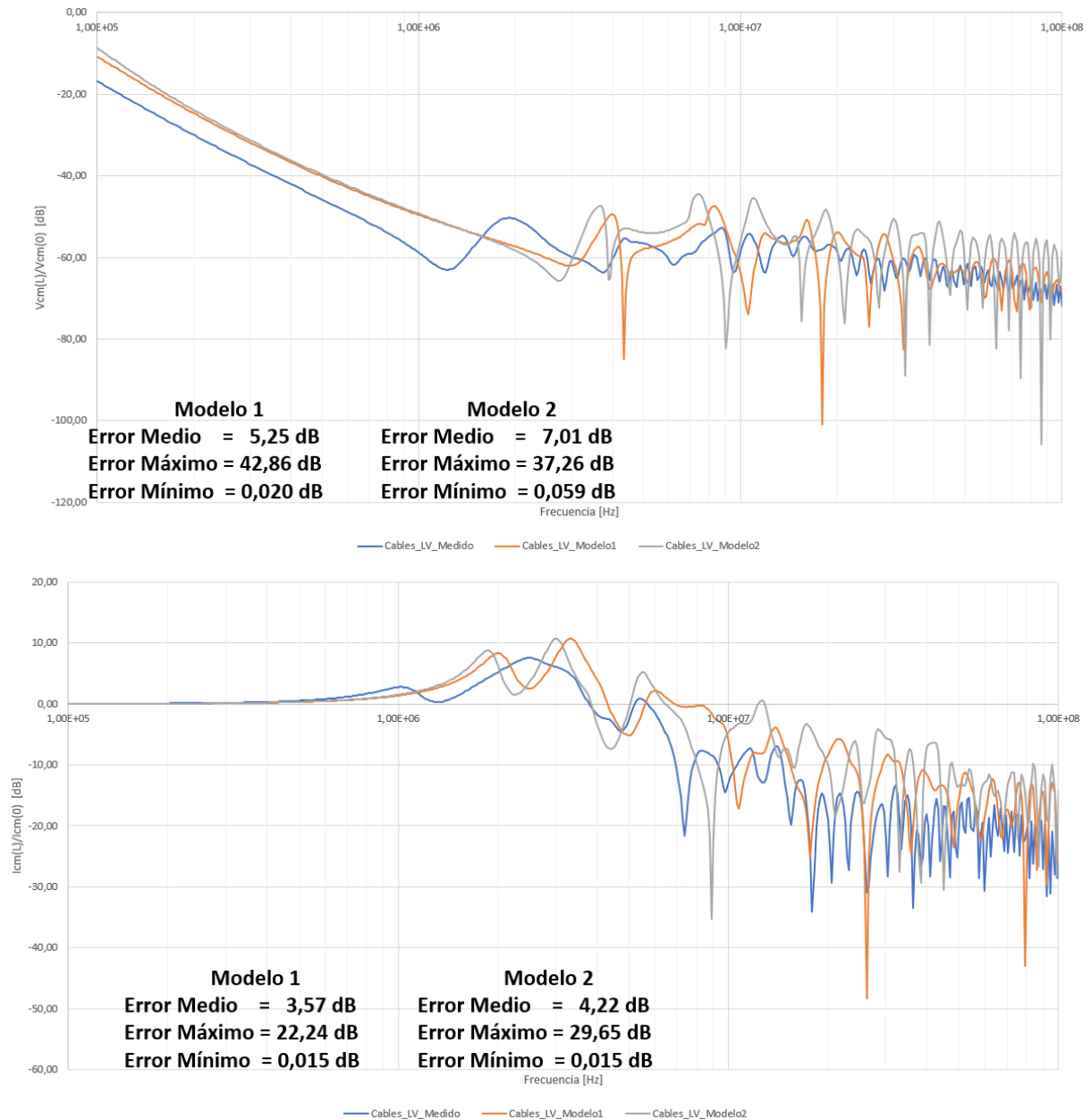


Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV33 y 34 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Ruido en Fuentes DC/DC3 y DC/DC4 todos los cables LV

Se cálculo la función de transferencia de todos los cables LV. Para las tensiones se observa una atenuación del ruido de aproximadamente 20 dB por década, a partir de 1 MHz se observa el efecto de las resonancias en la señal. En la función de transferencia de las intensidades se observa que es despreciable el efecto del ruido hasta aproximadamente 1 MHz, entre 1 y 5 MHz se observa una amplificación de la señal de hasta 10 dB, a partir de 5 MHz se observa una atenuación del ruido junto

con el efecto de las resonancias tendiendo a -30 dB en frecuencias más altas. Se observa que el error medio de las tensiones es de aproximadamente 5 dB para el Modelo 1 y de 7 dB para el Modelo 2. El error medio en las intensidades es de aproximadamente 4 dB para ambos modelos. A continuación se recogen los resultados obtenidos.

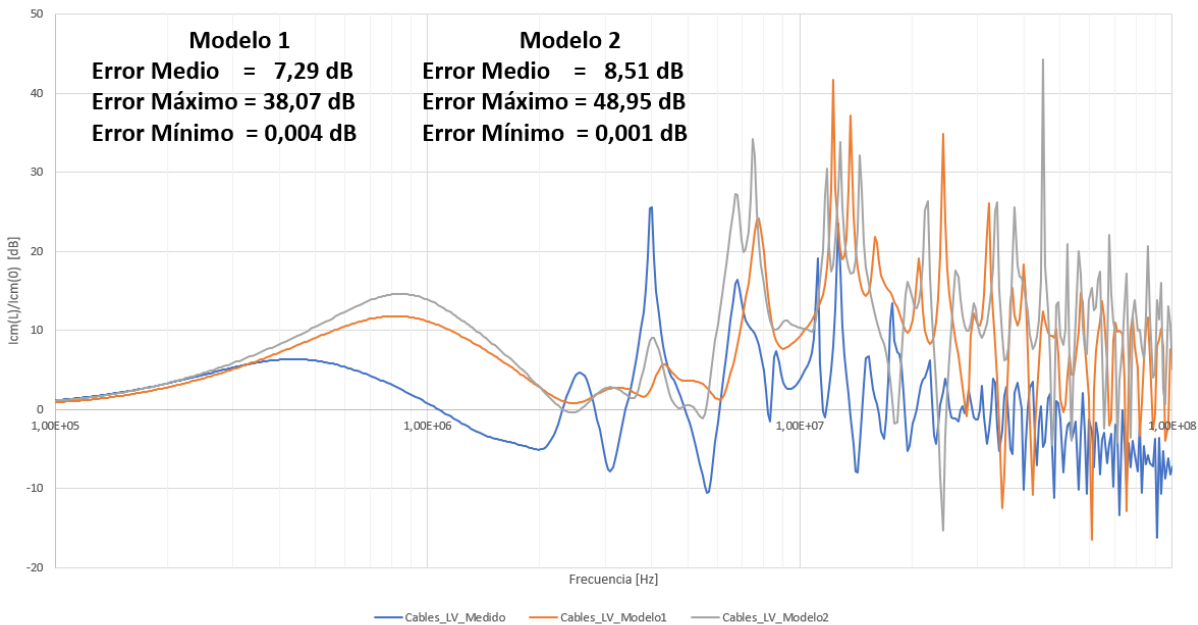
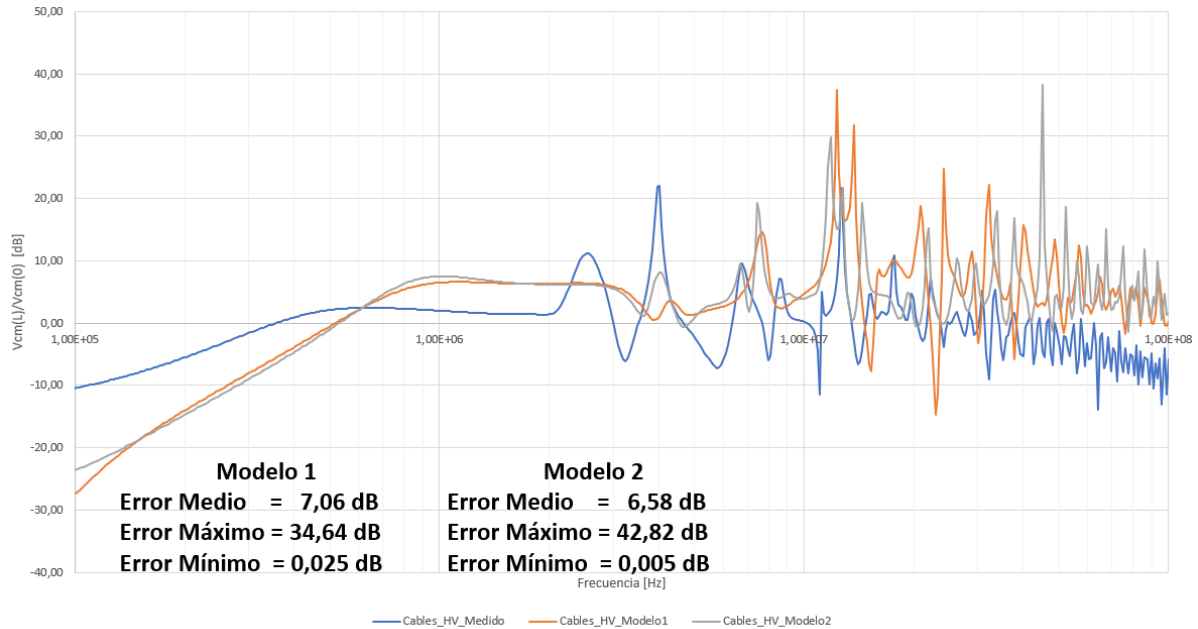


Resultados de la función de transferencia de ruido en todos los cables LV (31-34) con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Ruido en fuentes DC/DC1 y DC/DC2 desde cables HV 1 a HV 22

Con objeto de averiguar cómo afecta el ruido inyectado en la fuente DC/DC3 en los cables HV, se calculó la función de transferencia contando los 22 cables HV. Para las tensiones se observa que existe una atenuación del ruido hasta 300 kHz, entre 300 kHz y 20 MHz se observa un acoplamiento

del ruido por debajo de 10 dB, a partir de 20 MHz se vuelve a atenuar el ruido llegando hasta -10 dB. En las intensidades se observa que hasta 2 MHz existe un acoplamiento por debajo de 10 dB que se atenúa a mayores frecuencias hasta -10 dB. En las tensiones se observa que el error medio de los resultados obtenidos con los parámetros de los modelos 2D es aproximadamente 7 dB mientras que para las intensidades es de aproximadamente 7,5 dB. A continuación se recogen los resultados obtenidos.



Resultados de la función de transferencia de ruido en los cables LV33 y 34 con los parámetros eléctricos medidos (azul) y simulados en el Modelo 1 (naranja) y Modelo 2 (amarillo). En la parte superior se cogen los resultados para las tensiones y en la parte inferior para las intensidades.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que es válido el uso de los parámetros simulados en los modelos 2D del prototipo para el cálculo de la función de transferencia del ruido, obteniendo un error medio entre 3,3 dB y 10,4 dB en los casos estudiados.