

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

Mejora de sonda de medida de canal
MIMO Masivo en 5G: integración de un
conmutador de 4 puertos
(Massive MIMO channel measurement probe
improvement in 5G: integration of a 4-port
switch)

Para acceder al Título de

Graduado en

Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Adrian Costales Llata.

Junio - 2024



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN
CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

Realizado por: Adrian Costales Llata.

Directores del TFG: Jesús Ramón Pérez López

Título: “Mejora de sonda de medida de canal MIMO Masivo en 5G:
integración de un conmutador de 4 puertos”.

Title: “Mejora de sonda de medida de canal MIMO Masivo en 5G:
integración de un conmutador de 4 puertos”.

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Rafael Pedro Torres Jiménez

Secretario (Apellidos, Nombre): Olga María Conde Portilla

Vocal (Apellidos, Nombre): Pedro Corcuera Miro Quesada

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Resumen

A lo largo de varios proyectos de investigación y trabajos fin de Grado (TFG) y Máster, el grupo GISAR ha desarrollado una sonda de medida de canal en el dominio de la frecuencia utilizada para realizar la caracterización experimental del canal en bandas de interés para el despliegue de tecnologías de comunicaciones móviles. En este TFG se plantea continuar el trabajo realizado en este sistema, optimizando los tiempos de medida, que actualmente mide puntos en una malla virtual de uno en uno. Mediante la inclusión de un conmutador de 4 puertos, se abre la posibilidad de agilizar el proceso al poder medir 4 puntos antes de tener que realizar un movimiento en la malla de medida, principal cuello de botella del sistema.

Para poder llevar a cabo esta optimización, se requiere desarrollar una interfaz de control que configure el switch y depurarla para que pueda ser añadida al ya existente programa de control. Una vez se haya desarrollado el software, se probará en el laboratorio durante la caracterización del propio conmutador para comprobar si puede configurar en que puerto se miden las pérdidas.

Tras caracterizar el sistema, se realizará la prueba de medida de canal configurando una malla virtual 6X6, 36 puntos, y midiéndola empleando los 4 puertos del conmutador, y luego un único puerto. Completada la prueba, se analizarán los resultados obtenidos tras el post-procesado a fin de descubrir si las mediciones obtenidas son semejantes en cada puerto y punto de medida. Si es así, se concluirá que la mejora de la sonda es exitosa, pues al medir empleando 4 puertos se reducen los tiempos necesarios sin que ello comprometa la validez de los resultados, al no diferenciarse estos por el puerto con el que se han obtenido.

Por último, este TFG realizará un breve análisis de posibles líneas de trabajo futuro que permitan seguir avanzando en el desarrollo de la sonda, partiendo de los resultados aquí obtenidos y presentados.

Abstract

Throughout several research projects and Final Degree (TFG) and Master's degree projects, the GISAR group has developed a channel measurement probe in the frequency domain used to carry out the experimental characterization of the channel in bands of interest for the deployment of mobile communications technologies. This TFG plans to continue the work carried out in this system, optimizing measurement times, which currently measures points on a virtual mesh one at a time. By including a 4-port switch, the possibility of streamlining the process is opened by being able to measure 4 points before having to make a movement in the measurement mesh, the main bottleneck of the system.

In order to carry out this optimization, it is necessary to develop a control interface that configures the switch and debug it so that it can be added to the existing control program. Once the software has been developed, it will be tested in the laboratory during the characterization of the switch itself to see if it can configure which port the losses are measured on.

After characterizing the system, the channel measurement test will be carried out by configuring a 6X6 virtual mesh, 36 points, and measuring it using the 4 ports of the switch, and then a single port. Once the test is completed, the results obtained after post-processing will be analyzed in order to discover if the measurements obtained are similar in each port and measurement point. If so, it will be concluded that the improvement of the probe is successful, since by measuring using 4 ports the necessary times are reduced without compromising the validity of the results, as these are not differentiated by the port with which they were obtained.

Finally, this TFG will carry out a brief analysis of possible lines of future work that will allow further progress in the development of the probe, based on the results obtained and presented here.

Agradecimientos

A mi familia por criarme y educarme.

*A mis amigos por llenar mi tiempo de experiencias y
entretenimiento.*

A mis compañeros por acompañarme en este viaje por la ingeniería.

*A Jesús R. Pérez por su incansable guía en el desarrollo de este
trabajo.*

*Y finalmente, a todas las personas que me hicieron la persona que
soy.*

ÍNDICE

Contenido

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estructura del documento	4
Capítulo 2.	6
Sonda de medida del canal radio	6
2.1. Sonda de medida en el dominio de la frecuencia.....	6
2.2. Limitaciones y posibles mejoras	10
2.3. Conmutador de estado sólido.....	13
2.4. Interfaz de controlador	16
2.5. Mejoras en la aplicación de control.....	18
Capítulo 3.	23
Resultados	23
3.1. Caracterización del conmutador de RF, U9424B.....	23
3.3. Resultado de las medidas del array de 4 parches	28
3.4. Conclusiones	39
Capítulo 4.	42
Conclusiones y líneas futuras.	42
4.1. Conclusiones	42
4.2. Futuras líneas de desarrollo	43
Anexo	45

Indice de figuras

	Página
Capítulo I	
Figura 1.1. Logo oficial del 6G	2
Capítulo II	
Figura 2.1. Sonda de medida del canal radio en el dominio de la frecuencia. (a) Diagrama de bloques del sistema de medida, (b) Detalle de los equipos que integran la sonda.	7
Figura 2.2. Interfaz del programa “controlador”	8
Figura 2.3. Analizador P5006A de Keysight (a). Interfaz de control diseñada para configurar el dispositivo (b)	9
Figura 2.4. Diagrama de bloques del sistema de medida optimizado	11
Figura 2.5. Conmutador conectado al array 2X2 y montado en el escáner móvil	12
Figura 2.6. Conmutador U9424B de keysight	13
Figura 2.7. Esquema de conexiones del conmutador	14
Figura 2.8. Esquema simplificado del sistema de medida montado cuya funcionalidad comprobaremos	15
Figura 2.9. Diagrama de bloques de los elementos que establecerán la conexión	15
Figura 2.10. Ejemplo de configuración de matriz. Nota: la presentada en el ejemplo no es la versión final, es la versión previa a la inclusión en la aplicación central	17
Figura 2.11. Ejemplo de configuración de struct según lo indicado en la figura anterior	17
Figura 2.12. Ejemplo de configuración de struct con la configuración de todos los puertos. El campo “SelectedPorts” se queda con el último valor establecido, aunque a la hora de medir este no importará	18

Figura 2.13. Interfaz de la aplicación con un botón para acceder al controlador del conmutador	19
Figura 2.14. Controlador del conmutador desplegado sobre la interfaz de control de sonda. Se puede apreciar que es menos aparatosa que su versión de prueba de Matlab	20
Figura 2.15. Controlador del conmutador desplegado sobre la interfaz de control de sonda. Se pueden apreciar las mejoras visuales realizadas.	21

Capítulo III

Figura 3.1. Switch conectado mediante latiguillos al PNA para su caracterización. Se puede apreciar las transiciones necesarias para el enlace de ambos dispositivos.	25
Figura 3.2. Gráfica S21 del puerto 1	26
Figura 3.3. Gráfica S21 del puerto 2	26
Figura 3.4. Gráfica S21 del puerto 3	27
Figura 3.5. Gráfica S21 del puerto 4	27
Figura 3.6. Plano del laboratorio donde se realizarán las medidas	29
Figura 3.7. Array 2X2 usado para la medición en 4 puntos simultáneos	30
Figura 3.8. Esquema de distancias entre parches del array	30
Figura 3.9. Malla de medida 6X6, 36 puntos	31
Figura 3.10. Malla dividida en nueve centros de referencia	32
Figura 3.11. Esquema que muestra las distancias entre centros con relación a lo establecido en la figura 3.8 y lo explicado anteriormente	33
Figura 3.12. Movimiento del array receptor en la opción de medida de 4 puertos a lo establecido en la figura 3.8 y lo explicado anteriormente número de usuarios.	34
Figura 3.13. Movimiento del array receptor en la opción de medida de 1 puerto	34
Figura 3.14. Gráficas S21 del parche 1 en los 9 puntos	35

Figura 3.15. Gráficas S21 del parche 2 en los 9 puntos	36
Figura 3.16. Gráficas S21 del parche 3 en los 9 puntos	36
Figura 3.17. Gráficas S21 del parche 4 en los 9 puntos	37
Figura 3.18. Tiempos de ejecución de la medida analizando los ficheros de salida de los puntos medidos	38
Figura 3.19. Gráficas S21 del parche 1 en los 36 puntos	38
Figura 3.20. Hora de guardado de la primera y última medidas	39

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

A lo largo de la historia de las telecomunicaciones en términos de redes de comunicaciones móviles terrestres, podemos hablar de cinco grandes generaciones de sistemas. Empezó con la primera generación (1G) en los 80 con móviles analógicos que solo podían realizar llamadas, continuó con el 2G y una serie de cambios en protocolos y tecnologías, como el paso de analógico a digital, etc. Ya en el siglo XXI llegó el internet en el móvil y con ello vino el 3G plantando las bases de lo que es un teléfono móvil moderno. A la capacidad de hacer llamadas, se le sumaban las distintas apps de mensajería e interacción social como Facebook, YouTube o WhatsApp. Además, también surgió la compatibilidad mundial que permitía el uso de internet en el móvil en todo el globo, con sus limitaciones de cobertura claro está. La mejora de todos estos apartados produjo el llamado 4G, que generalizó los smartphones y aceleró los tiempos de conexión. En este punto, los teléfonos móviles se convierten en miniordenadores de bolsillo.

Cada generación implicaba un considerable avance tecnológico que hacía a las comunicaciones móviles más eficientes, rápidas, accesibles y manejables. Toda esta evolución continuó hasta llegar al actual 5G capaz de ofrecer velocidades mucho mayores a las de, ya de por sí altas, de las redes de 4G. Para visualizar, el 4G tenía una latencia de 200 milisegundos, mientras que el 5G puede llegar al milisegundo. Lo anterior mencionado se traduce en una mejor conectividad cuya importancia se vio en la pandemia ocasionada por el coronavirus. Muchas empresas y trabajadores se vieron forzados al teletrabajo ante las restricciones impuestas, mientras que la capacidad de verse o tan solo contactar con un familiar o amigo se vio reducida a una llamada. Este escenario, con una tecnología de 2 o 3 G sería inimaginable, la red simplemente sería incapaz de manejar todas las conexiones necesarias para el correcto desempeño de las actividades mencionadas o, directamente, no existiría la tecnología para realizarlas.

Dentro del paraguas que engloba a las tecnologías de quinta generación también destaca el llamado “internet de las cosas”. Hogares y ciudades inteligentes más avanzadas que las actuales domóticas y coches inteligentes son ejemplos de esta característica aun en desarrollo.

En este punto resulta evidente lo importante y presente que nos es el 5G. Sin embargo, la tecnología sigue avanzando, y las mejoras de capacidad y velocidad ya empiezan a plantear un posible 6G. Estimado para 2030, usará una banda de frecuencia más elevada que le permita proveer de mayores prestaciones al usuario final. Países como China o Corea del Sur con empresas como Huawei y Samsung ya han empezado a plantear y presentar esta generación que ya cuenta con el logo oficial presentado en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Logo oficial del 6G

Sin embargo, aunque prometedor, al 6G todavía le queda mucho para poder ser una realidad, y primero tendrán que venir pasos intermedios como el 5.5G que terminan la generación y den paso a una nueva.

El desarrollo tecnológico y el despliegue de una red de comunicaciones móviles precisa también del conocimiento del canal radio. A diferencia de los medios guiados, el canal radio es un medio hostil, altamente dispersivo. En el contexto de la 5G este aspecto cobra también especial importancia por los cambios de capa física y las nuevas bandas que se van autorizando para el despliegue de las redes. En el canal radio, las interferencias, fluctuaciones, etc, suelen ser los factores que más afectan a la calidad de la transmisión de las ondas enviadas. Si no se conoce el canal, no se puede calibrar la potencia de transmisión correctamente pues se desconocen las pérdidas de inserción que hay que compensar, resultando imposible saber si se cumple la sensibilidad. Para poder seguir mejorando y evolucionando las telecomunicaciones, se tiene que hacer de la caracterización de canal una tarea lo más rápida y funcional posible.

Con esto dicho, iniciamos este TFG consistente en optimizar una sonda de medida de canal ya desarrollada. Esta sonda mide el canal en el dominio de la frecuencia en

distintos puntos de una malla virtual de medida. El sistema más tarde lee los datos obtenidos y los procesa pudiendo así obtener la tan importante caracterización del canal. Sin embargo, aunque funcional, esta sonda presenta limitaciones que lastran su desempeño. Por eso es que en este trabajo se plantea continuar con el desarrollo de dicha sonda a fin de optimizarla y así poder obtener las medidas de canal más rápidamente y sin que esto comprometa la validez de las mismas.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este TFG es la optimización de una sonda de medida de canal ya desarrollada. Realizándose un pequeño análisis, saldrán a relucir limitaciones que lastran la eficiencia de la misma. La principal de ellas reside en el hecho de que el sistema mide individualmente los puntos de medida situados en una malla virtual. Esto causa que la antena receptora tenga que moverse tantas veces como puntos hay que medir. Dicha limitación será corregida mediante la implementación de un conmutador de cuatro puertos que permita a la antena receptora medir 4 puntos antes de tener que moverse, reduciendo el tiempo de medida total de la malla.

La tarea que hay que desarrollar para conseguir este objetivo empezará por la realización de una interfaz gráfica que configure una instrucción que contenga la dirección, el número de puertos a usar, y en caso de solo necesitar uno, que puerto en concreto. Esta interfaz, encargada de configurar el conmutador, será incorporada al programa principal que controla la sonda de medida y permitirá hacer mediciones más rápidas, al poder configurar que se hagan de 4 en 4 puntos, sin perder la capacidad original de medida individual al usar un único puerto. Esta interfaz deberá estar desarrollada en Matlab para continuar la lógica de programación establecida en proyectos previos.

Una vez esté realizada y se haya comprobado su funcionalidad en el entorno de Matlab, haremos una prueba de campo sobre el switch para asegurar que el programa desarrollado opera correctamente sobre el mismo. Tras realizar las pruebas, solo quedará analizar los resultados obtenidos en las opciones de 4 puertos y de 1, comprobando su semejanza y el tiempo que necesitó cada uno. Este análisis tendrá por objetivo verificar el ahorro de tiempo y confirmar que la optimización temporal es correcta, y comprobar la validez de los resultados. Sobre esto último, hay que añadir que el análisis en detalle de los resultados como tal, no es un objetivo del actual proyecto. Este proyecto solo se enfocará en comprobar que la optimización temporal y las dos opciones de medida, no comprometen las mediciones realizadas por la nueva sonda de medida de canal que se pretende desarrollar.

Otro objetivo que completar será el de mejorar la calidad de las mediciones haciéndolas más realistas. Esto se debe a que el sistema, que en el siguiente capítulo será comentado en detalle, emplea dos antenas para la realizar la medida. Este método resulta en comunicaciones muy artificiales que comprometen la validez de las medidas

realizadas al no poder ser llevadas a un entorno real. La incorporación del conmutador, y el montaje que se pretende realizar en la antena receptora, creará un entorno de medición más realista, y por lo tanto, más válido a la hora de obtener, analizar y aplicar los resultados.

1.3. Estructura del documento

El siguiente TFG este compuesto por cuatro capítulos, siendo el primero y actual una presentación que explicará el objetivo principal del mismo y cómo pretende lograrse. Además, explica el estado actual de las telecomunicaciones para saber en qué contexto se realiza el proyecto.

El segundo capítulo introduce la sonda de medida de canal cuya optimización se pretende conseguir. Tras presentar el sistema y sus limitaciones, el capítulo se centrará en cómo va a lograrse la optimización planeada. Primero comentando el equipo empleado actualmente y el que se planea usar para su mejora, cubriendo después el desarrollo de la interfaz de control del conmutador y su incorporación al programa central de medida.

El tercer capítulo parte del nuevo sistema de medida desarrollado en el anterior. En este capítulo dicho sistema se caracterizará para poder realizar medidas sin problemas de pérdidas de inserción. Tras esto, se procederá a hacer dos pruebas de medida, una empleando cuatro puertos, y otra usando solo uno. Realizadas las pruebas, se procederá a analizar los resultados obtenidos, verificar su validez y si cumple con los objetivos planteados anteriormente de forma breve.

El cuarto y último capítulo tratará de una conclusión completa de todo lo anterior desarrollado. Se comentarán los objetivos planteados para este proyecto y que también se han cumplido. Además, se hablará de posibles líneas futuras que, partiendo de lo obtenido en este proyecto, lo optimicen aún más y permitan obtener mejores y más rápidos resultados.

Tras los cuatro capítulos, se encuentra un anexo con el código de la interfaz de control desarrollado brevemente comentado.

Bibliografía

- [1] J. R. Pérez, “Comunicaciones Móviles e Inalámbricas”, disponible en <https://personales.unican.es/perezjr/CMEI/>.
- [2] 28/06/2023. ¿Qué es el 5g, para qué sirve y cómo funciona? Telefónica. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/noticias/que-es-el-5g-y-para-que-sirve-y-como-funciona/>
- [3] 06/07/2022. Las edades de la tecnología móvil: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G... Blog euskatel. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/noticias/que-es-el-5g-y-para-que-sirve-y-como-funciona/>
- [4] 22/3/2021. 5G. ¿qué es, cómo funciona y por qué es importante? Red hat. <https://www.redhat.com/es/topics/5g-networks/what-is-5g>
- [5] Ariadna. 21/6/2018. 5G. Generaciones de telefonía móvil. Del 0G al futuro 5G. Arde. <https://arde.io/2018/06/21/generaciones-de-telefonía-movil/>
- [6] Laura Sacristan. 3/6/2024. 6G: todo sobre su tecnología y cuándo llegará la próxima generación de redes móviles. Xatakamovil. Recuperado el día 15/4/2024 de <https://www.xatakamovil.com/nuevo/6g-toda-informacion>
- [7] Jesús R. Pérez, Óscar Fernández, Luis Valle, Abla Bedoui, Mohamed Et-tolba and Rafael P. Torres. Experimental Analysis of Concentrated versus Distributed Massive MIMO in an In door Cell at 3.5 GHz. 2021
- [8] Jesús R. Pérez, Rafael P. Torres, Lorenzo Rubio, Jose Basterrechea, Marta Domingo, Vicent Miguel Rodrigo Peñarroca, Juan Reig. Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array Antenna Systems in the 3 to 4 GHz Frequency Band. *IEEE-ACCESS*. Volume 7. 2019
- [9] Raichanny de la Nuez Diaz. TFM. Sistema de medida para la caracterización del canal MIMO masivo en comunicaciones 5G. Universidad de Cantabria. Septiembre – 2021
- [10] Alejandro Rodríguez Aparicio. TFG. Análisis del canal radio interior para sistemas 5G: parámetros de banda ancha y eficiencia espectral. Universidad de Cantabria. Julio – 2020

Capítulo 2.

Sonda de medida del canal radio

El grupo de ingeniería de sistemas, antenas y radiopropagación (GISAR) de la Universidad de Cantabria dispone de una sonda de medida del canal radio que ha sido desarrollada y mejorada en el contexto de diferentes proyectos de investigación y trabajos de fin de grado y máster. En este capítulo describiremos las principales características del sistema de medida y expondremos algunas de sus limitaciones para justificar los objetivos de este trabajo fin de grado. Básicamente, el sistema mide el canal en el dominio de la frecuencia, utilizando como equipo de medida un analizador de redes para realizar medidas de la respuesta en frecuencia del canal.

Este TFG se centra en introducir en la sonda de medida un conmutador de RF con un doble objetivo; por un lado, establecer un array MIMO virtual más realista en el extremo receptor y, por otro, reducir los tiempos de medida para un tamaño fijo de array y para cada posición del transmisor (considerando medidas que emulan el enlace ascendente de una comunicación entre un usuario equipado con una antena omnidireccional y una estación base).

2.1. Sonda de medida en el dominio de la frecuencia

El sistema de medida experimental del canal radio utilizado como punto de partida en este TFG es el que se muestra en la Figura 2.1 [1]-[3].

Dicho sistema se sirve de un dispositivo VNA, para generar y recibir señal, y un analizador, para interpretarla. Ambos elementos son controlados desde un ordenador central que alberga un programa desarrollado en Matlab que introduce las configuraciones necesarias para su funcionamiento.

La recepción se realizará mediante una antena móvil que se desplazará en un cierto espacio 2D a configurar gracias a unos servomotores que la moverán a cada punto de

medida. Para cada punto el VNA estará calibrado para enviar una señal, recibirla y enviarla al ordenador central, donde se producirá el post-procesado de la información recibida para obtener el parámetro S_{21} .

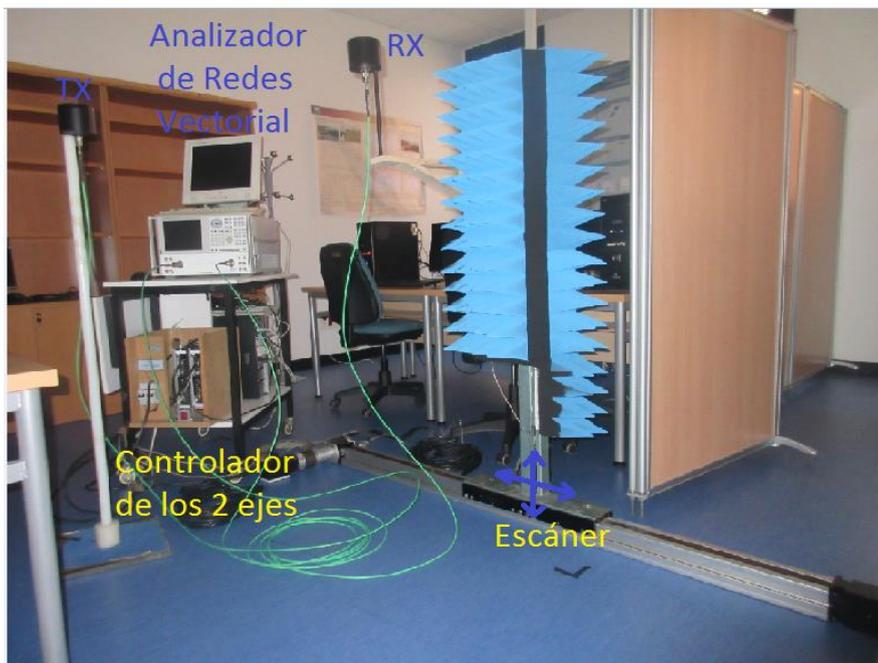
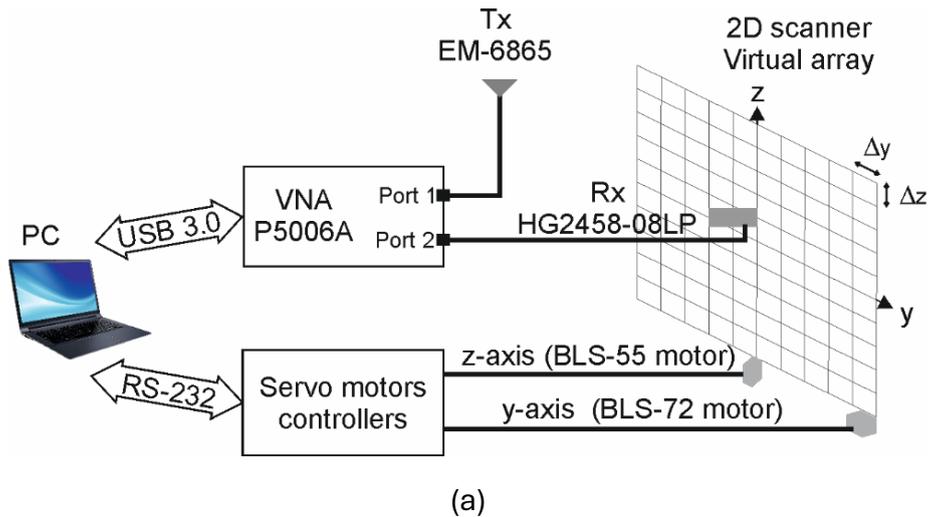


Figura 2.1. Sonda de medida del canal radio en el dominio de la frecuencia. (a) Diagrama de bloques del sistema de medida, (b) Detalle de los equipos que integran la sonda.

El proceso anteriormente descrito se controlará mediante un programa que recibe el nombre de “controlador” y consiste en un código central complementado con varias funciones y subrutinas que establecen una conexión con los equipos del sistema y los configuran según lo indicado en una interfaz gráfica de control definida en el programa.

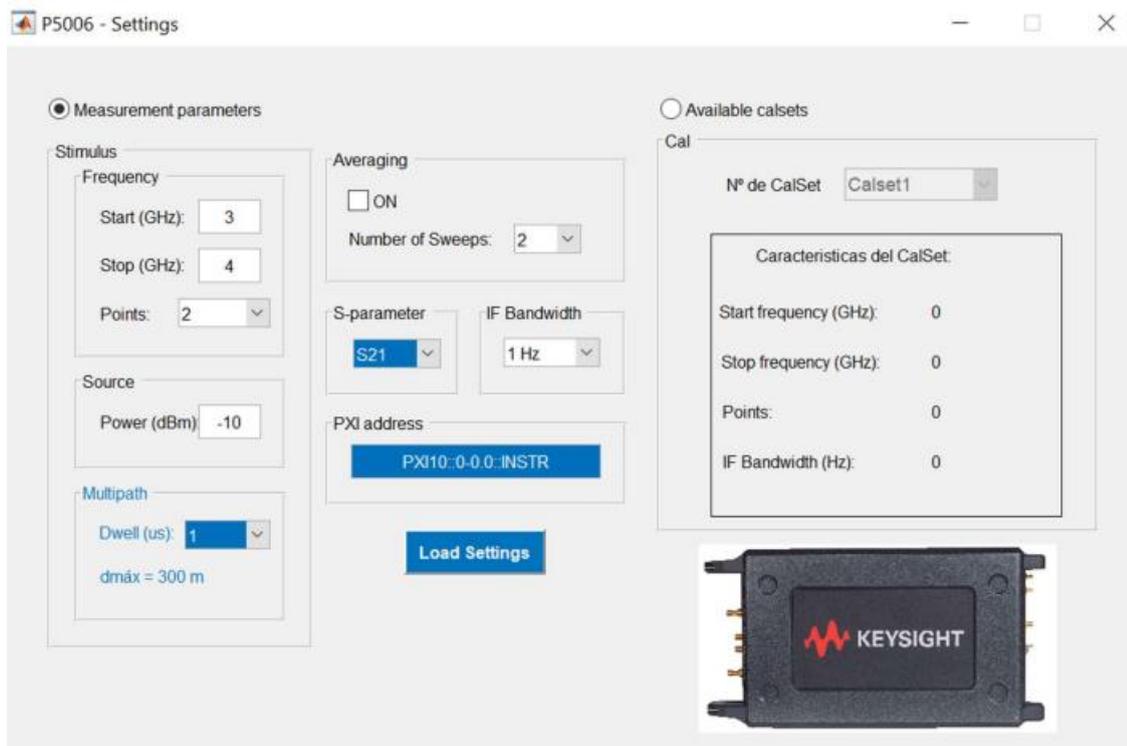


Figura 2.2. Interfaz del programa “controlador”

En esta interfaz, se establecerán los puntos a medir para formar el array virtual visto en la Figura 2.1. Además, también se cargará la caracterización de pérdidas requerida para el buen funcionamiento del sistema, la cual se realizará empleando el dispositivo VNA.



(a)



(b)

Figura 2.3. Analizador P5006A de Keysight (a). Interfaz de control diseñada para configurar el dispositivo (b)

Una vez se haya escrito en pantalla la medición que queremos realizar solo resta ejecutar el programa y analizar los resultados obtenidos.

2.2. Limitaciones y posibles mejoras

Aunque operativo y útil, el sistema anteriormente definido acarrea tres principales limitaciones: tiempo requerido, realismo del sistema y pérdidas.

La primera limitación es el más importante en el marco de este TFG pues el principal objetivo del mismo es su arreglo. Según lo anteriormente definido, el sistema establece un enlace de transmisión por cada punto de medida de forma individual, que, sumado a la necesidad de movimiento de la antena a cada nuevo punto, hace el proceso innecesariamente prolongado. Para optimizarlo, se ha propuesto la inclusión de un conmutador de 4 puertos que permitirá agilizar el proceso de medición al poder realizarlo en 4 puntos a la vez en lugar de 1, reduciéndose así la cantidad de movimientos de la antena receptora necesarios.

La segunda limitación del sistema es el hecho de que emplea dos antenas en el enlace. Esto difiere con cómo se hacen las comunicaciones en un entorno más real y menos experimental, por lo que las medidas obtenidas podrían ver su validez comprometida al no replicar las condiciones reales de un enlace. La inclusión de un cuadrado receptor array 2X2 para recibir una señal transmitida desde una antena transmisora representa un sistema de enlace más realista, lo cual mejora la calidad y la validez de los resultados obtenidos con su uso.

La tercera limitación recae en las pérdidas introducidas por los cables de transmisión. Aunque preparados para la tarea, su longitud eventualmente acaba ocasionando pérdidas de potencia que, aunque no muy altas, empeoran la calidad del sistema. Esto se puede arreglar mediante la integración de un conversor de fibra óptica. Esta limitación en concreto está siendo trabajada en un TFG paralelo que partirá de las optimizaciones realizadas en este.

Partiendo de lo anteriormente comentado, se realiza un nuevo sistema experimental cuyo esquema podemos ver en la figura 2.4.

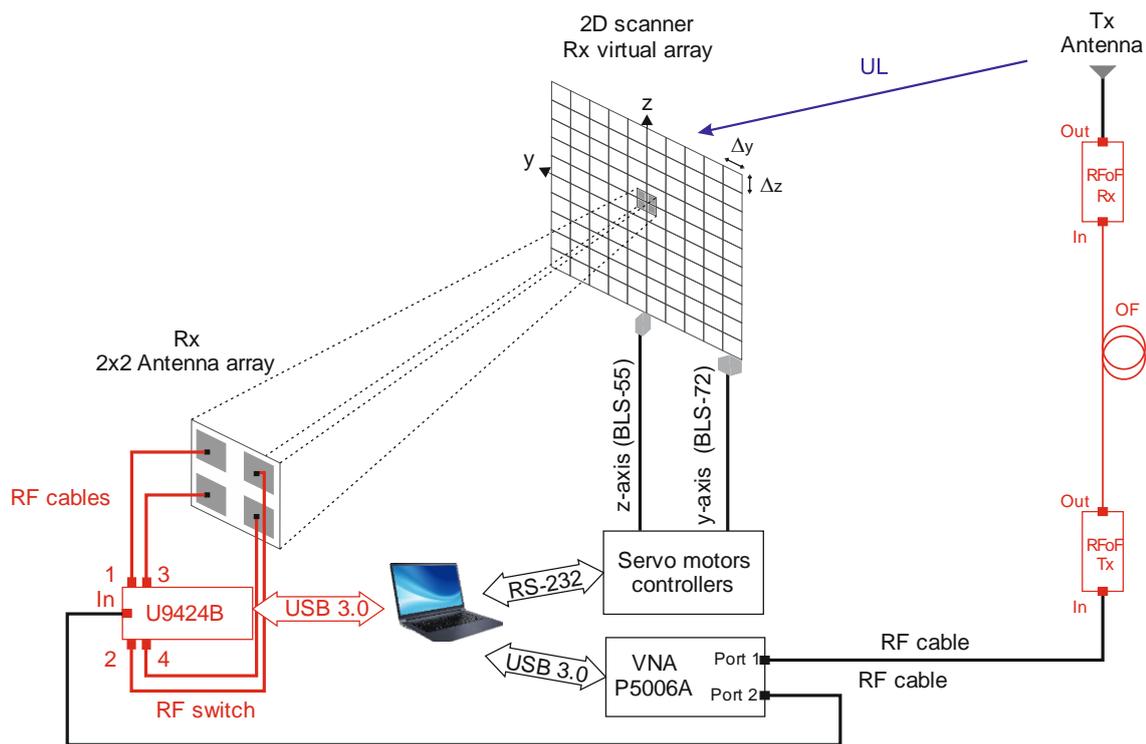


Figura 2.4. Diagrama de bloques del sistema de medida optimizado

El funcionamiento del equipo visto en el diagrama anterior operará de la siguiente forma. Primero tenemos un programa desarrollado en Matlab, que tendrá que ser actualizado para hacerlo compatible a las mejoras introducidas, configurará una señal a transmitir y en qué puntos. Pero antes de iniciar esa configuración, tendrá que realizarse una caracterización y calibración de los elementos del sistema, pérdidas de inserción debido a los cables, conexiones, etc. Una vez realizadas, se cargarán en el programa y se procederá a diseñar una malla de medida.

El switch estará conectado a un array 2X2 que nos permitirá medir los puntos de 4 en 4 y se montará en un soporte específicamente diseñado para el mismo dispositivo y su encaje en el escáner, el soporte se ha realizado en el TFG paralelo mencionado. Se entenderá que el montaje del array con el conmutador sobre el escáner móvil, mostrado en la Figura 2.5, resulta en la antena receptora del nuevo sistema. El conmutador también estará conectado mediante cables USB 3.0 al ordenador central, que alberga el programa de control.

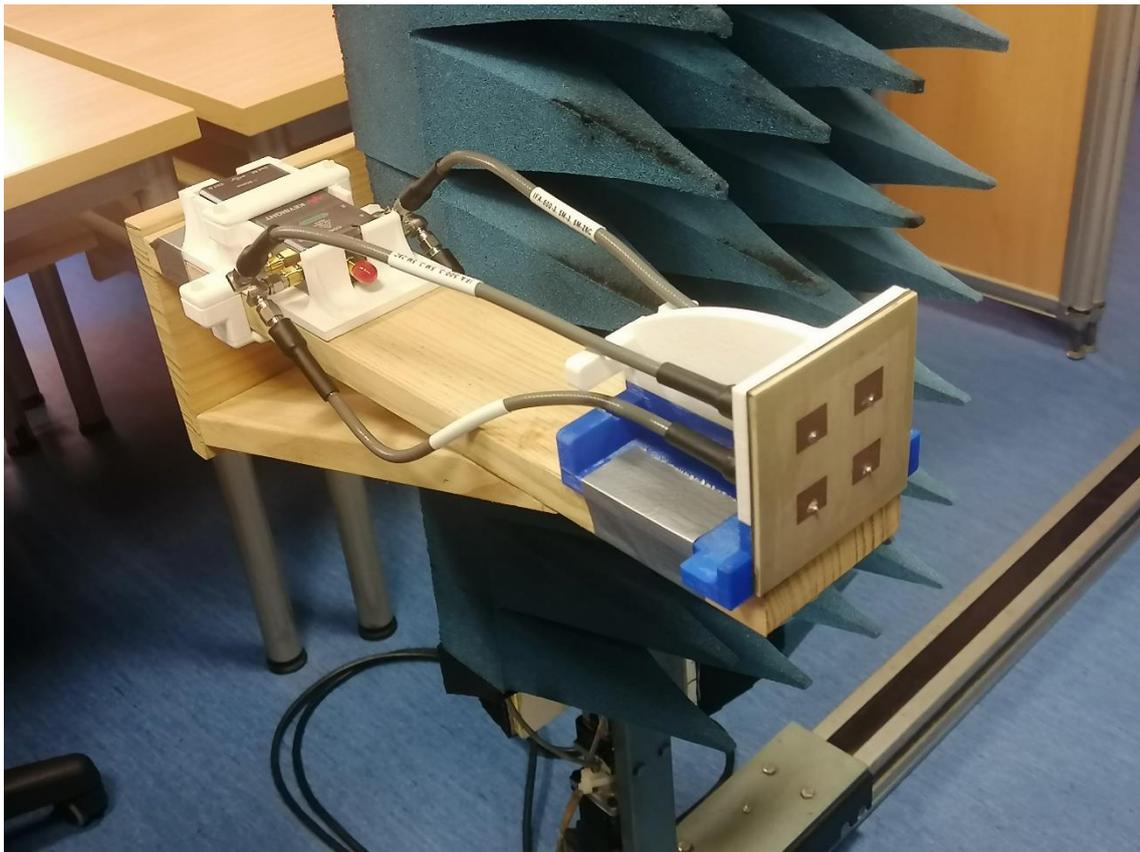


Figura 2.5. Conmutador conectado al array 2X2 y montado en el escáner móvil

Las conexiones del VNA se realizarán mediante cables RF (RadioFrequency) e irán desde el propio dispositivo al conmutador y a la antena transmisora. Este analizador es el principal encargado de hacer las labores de la calibrado y medida de señal. Opera a un rango de 100 kHz a 32 GHz, compatible con el rango de frecuencias que vamos a usar en este proyecto, y es el núcleo sobre el cual se ha escrito el programa controlador que tratamos de ampliar.

Teniendo todo conectado y configurado se realizará la propia medida. La configuración del programa del ordenador mandará al VNA transmitir una señal determinada, adaptada a las pérdidas de transmisión obtenidas mediante la caracterización, a la antena a través del cable RF preparado para la tarea. También enviará a la antena receptora móvil los puntos de referencia en los que deberá realizar las medidas según lo definido en la matriz de control del conmutador.

2.3. Conmutador de estado sólido

El conmutador, a quien también se puede referir como switch, es la pieza principal de este proyecto que nos permite aumentar la eficiencia de medida del sistema al permitirnos medir de cuatro en cuatro puntos en vez de individualmente.

Las principales características del dispositivo a interés del sistema a desarrollar son:

- Rango de frecuencia operativa de 300 kHz a 50 GHz. De este rango nos interesa el intervalo de 3.4 GHz a 7.125 GHz, esto debido a que las bandas de interés en las que operaremos son las de 3.4 a 3.8 GHz y 6.425 GHz a 7.125 GHz.
- Conexiones. 4 puertos de entrada que nos permitirán recibir 4 medidas simultáneas y un USB 3.0 que nos permitirá cargar la configuración de los puertos anteriormente mencionados



Figura 2.6. Conmutador U9424B de keysight

Como se puede ver visualmente, el conmutador posee los 4 puertos de medida mencionados que se conectarán a conveniencia para realizar la medición que deseemos, además de un quinto puerto que transmitirá la señal recibida de nuevo al VNA. El esquema base de esta conexión sería el siguiente:

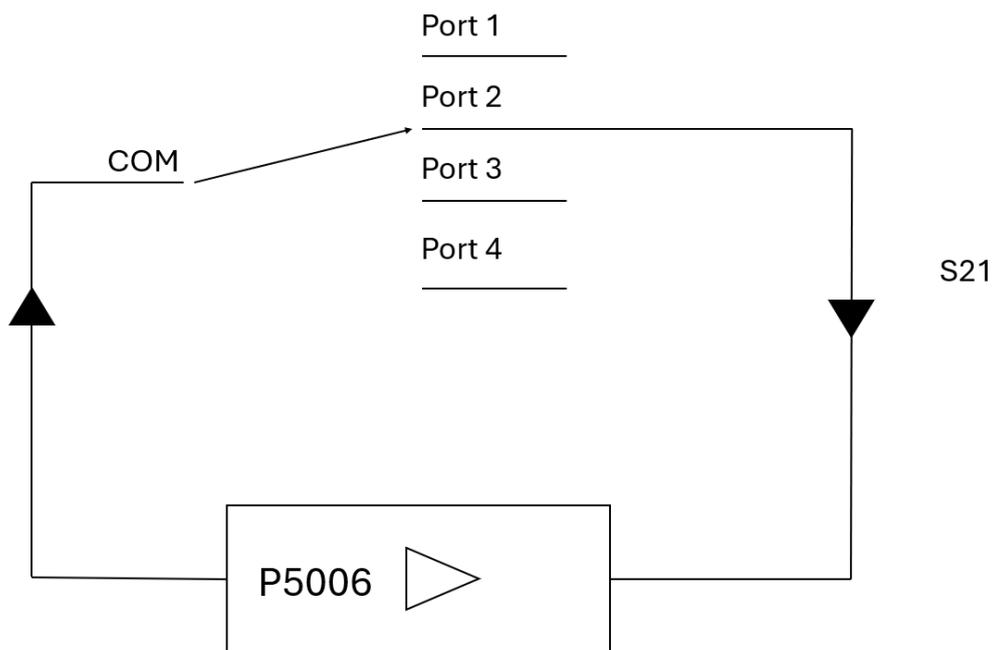


Figura 2.7. Esquema de conexiones del conmutador

Desde el P5006 se genera la señal a transmitir que llega al conmutador. La onda entra al mismo por el puerto configurado y regresa al dispositivo mediante su puerto de salida obteniendo así la señal de la que se podrá sacar su parámetro S_{21} . Aunque explicativo, este esquema es demasiado simple pues obvia varios elementos intermedios, como el array 2X2 o las antenas Rx/Tx. El esquema mostrado en la Figura 2.8 ofrece una mejor visualización del sistema de conexiones que se establece en el montaje de la antena receptora.

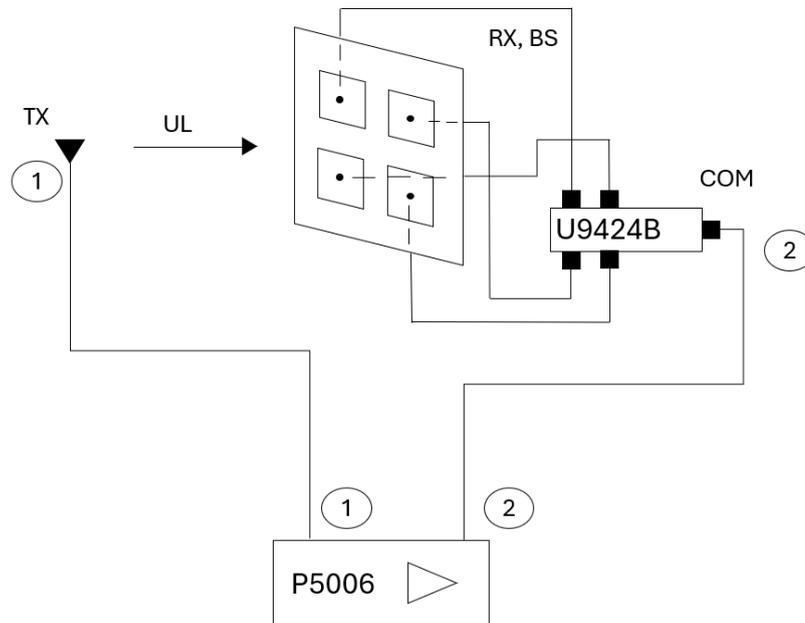


Figura 2.8. Esquema simplificado del sistema de medida montado y cuya funcionalidad comprobaremos

Como ya se ha explicado, la señal se envía desde el P5006 hasta la antena emisora, generándose un enlace de comunicación. La onda llega al array 2X2 que funciona como antena receptora y está conectado con cada puerto del conmutador. El switch transmite la señal recibida a un quinto puerto de salida conectado con el P5006 mediante cables RF, cerrándose así el circuito.

El sistema de transmisión resultante del proceso descrito sigue el siguiente diagrama de bloques:

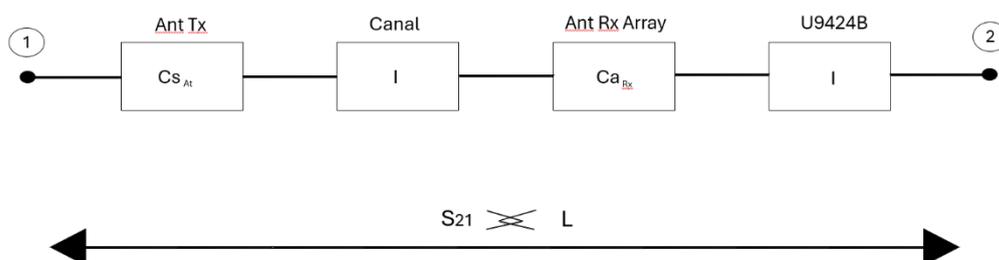


Figura 2.9. Diagrama de bloques de los elementos que establecerán la conexión.

El diagrama anteriormente presentado representa los elementos sobre los que haremos una posterior prueba de campo a fin de obtener una gráfica que muestre el parámetro S_{21} en el punto medido. El esquema parte desde el punto 1, donde solo se tiene la señal transmitida por el dispositivo P5006, se ignorarán las pérdidas introducidas por los cables dado que su corrección es tarea de un futuro TFG en actual proceso de realización. El primer elemento de interés es la antena transmisora que introduce una determinada ganancia. La señal enviada continúa por el canal aleatorio al aire libre hasta llegar al array que funciona como receptor. Desde el array, la onda recibida sigue las conexiones hasta llegar al conmutador por el puerto configurado para la recepción. Por último, la señal continúa por un cable RF hasta llegar de nuevo al P5006. Desde ahí solo se necesitará el software para obtener los datos de las mediciones, ejecutar el post-procesado y elaborar gráficas para la visualización de los resultados

Es necesario recalcar que las ganancias y pérdidas introducidas por antenas o canal no es necesario tenerlo en cuenta ni obtenerlas, pues el objetivo de este trabajo es establecer el sistema y comprobar su funcionalidad, no caracterizarlo como tal, solo lo estrictamente necesario para comprobar su validez.

2.4. Interfaz de controlador

La principal tarea de este TFG reside en el correcto desarrollo de la interfaz controladora y su posterior inclusión en la matriz de medida central.

Visualmente podemos ver 3 campos, véase Figura 2.10, “Device address”, “Ports” y “Selector”. En el primer campo se introduce la dirección del conmutador a utilizar, aunque de base, contendrá la del que se usará en las pruebas de campo. El campo “Ports” permite comprobar los puertos que se hallan actualmente conectados y así verificar si la configuración está correctamente cargada. El campo “Selector” será el encargado de cargar la configuración de cuantos puertos tienen que estar conectados, y, en caso de solo necesitar uno, cuál de ellos.

El resultado de este programa será un “struct” que contendrá 4 campos, “Port”, “SelectedPorts”, “dirección” y “Estado” que definen el número de puertos conectados, el puerto en concreto, la dirección del dispositivo a conectar y un verificador de estado.

La Figura 2.10 muestra la interfaz desarrollada en el entorno de Matlab en una configuración de prueba para luego visualizar el “struct” resultado en la Figura 2.11.

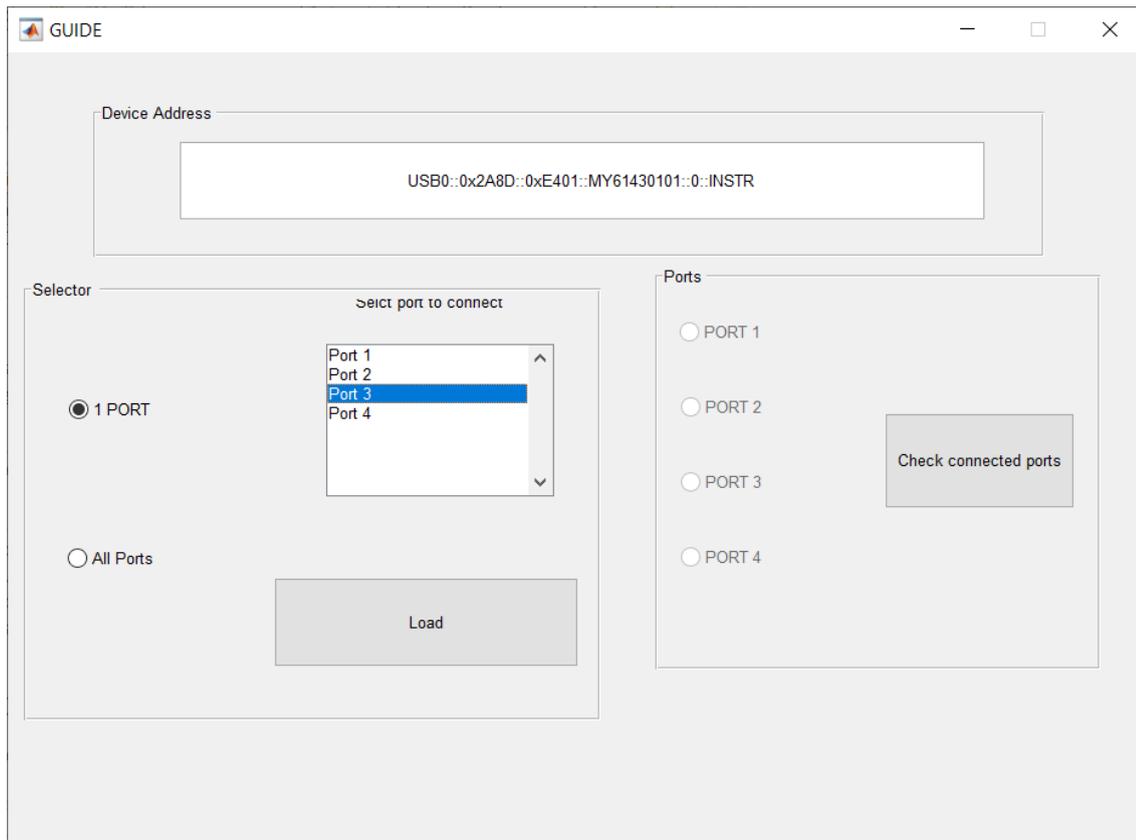


Figura 2.10. Ejemplo de configuración de matriz. Nota: la presentada en el ejemplo no es la versión final, es la versión previa a la inclusión en la aplicación central

```

struct with fields:

    Port: 1
    SelectedPorts: 3
    Direccion: 'USB0::0x2A8D::0xE401::MY61430101::0::INSTR'
    Estado: 1
  
```

Figura 2.11. Ejemplo de configuración de struct según lo indicado en la figura anterior

En este ejemplo concreto, el dispositivo que recibe la configuración mostrada en la Figura 2.10 sería aquel llamado por la dirección “USB0: :0x2A8D: :0xE401: :MY61430101::0::INSTR”. Dicho conmutador operará usando únicamente el puerto tres. Para asegurar la validez del “struct” de configuración, el campo de estado adquiere el valor de 1.

Algo para tener en cuenta, es que el campo “SelectedPorts” pierde su relevancia si “Ports” es igual a 4 dado que en esta opción no tiene sentido concretar un puerto si de base se van a medir en los cuatro. Para ilustrar, se puede ver una configuración de prueba en 4 puertos, Figura 2.12, realizada tras la mostrada en la Figura 2.11.

`struct` with fields:

```
Port: 4
SelectedPorts: 3
Direccion: 'USB0::0x2A8D::0xE401::MY61430101::0::INSTR'
Estado: 1
```

Figura 2.12. Ejemplo de configuración de struct con la configuración de todos los puertos. El campo “SelectedPorts” se queda con el último valor establecido, aunque a la hora de medir este no importará.

La interfaz también cargará de forma automática la última configuración. Es decir, en el caso del ejemplo mostrado en la figura anterior, si volvemos a ejecutar la interfaz, el campo dirección tendrá la contenida en el anterior “struct” y la opción “All Ports” ya estará seleccionada. De esta forma, el operador podrá saber en qué estado de configuración se encuentra el switch.

Desarrollada la interfaz de controlador del conmutador, y comprobado que funciona correctamente en el entorno de Matlab, queda incluirla en la matriz central y arreglar los problemas que puedan surgir de su incorporación, redundancia de código, incompatibilidad de variables, etc. Además, se mejorará estéticamente para que resulte menos aparatosa y más vistosa.

2.5. Mejoras en la aplicación de control

La mejora consistirá en la inclusión de la interfaz desarrollada en la aplicación central, para lo cual primero tendremos que adaptar el código de la última a la nueva opción de medir en cuatro puertos. Recordemos que el programa “controlador” está desarrollado para medir los puntos de forma individual.

Según lo visto en la Figura 2.2, el programa realiza mediciones empleando el dispositivo P5006A. Pulsando el botón de identificación accederemos a su interfaz de control, Figura 2.3 (b), aunque antes de eso se tienen que cargar la calibración y los puntos de medida, posicionamiento de las referencias en el eje X e Y. Estas indicaciones son parte de un proceso de preparación de la prueba de medida que se llevará a cabo en el siguiente capítulo, una vez el software desarrollado en el actual esté listo.

El primer paso de la mejora es simplemente añadir un botón que permita abrir el controlador del conmutador desde el programa central, tal y como se ve en la Figura 2.13, además, se añadirá una función que bloquee la interfaz según la ocasión.



Figura 2.13. Interfaz de la aplicación con un botón para acceder al controlador del conmutador

El primer bloqueo que introducir es el de la propia interfaz una vez se abre. Mientras se esté configurando el dispositivo U9424B la pantalla estará en un plano principal sin posibilidad de minimizarse o cerrarse hasta que se pulse el botón “Load” y se cargue la configuración, momento en el que se cerrará automáticamente. Esto se hace principalmente para seguir la arquitectura de acción del resto de controladores. Dicha arquitectura consiste en primero conectar con el escáner móvil y localizar los puntos de referencia de posicionamiento, cargar la caracterización requerida, la realizada anteriormente para este entorno concreto, y por último, se configuran los propios dispositivos que se van a emplear en la medida. En caso de no tener la caracterización cargada o la malla virtual de medida configurada, no se podrán acceder a las interfaces de control de los dispositivos.

A la nueva funcionalidad también se le agregarán mejoras visuales anteriormente mencionadas, visibles en la Figura 2.14.

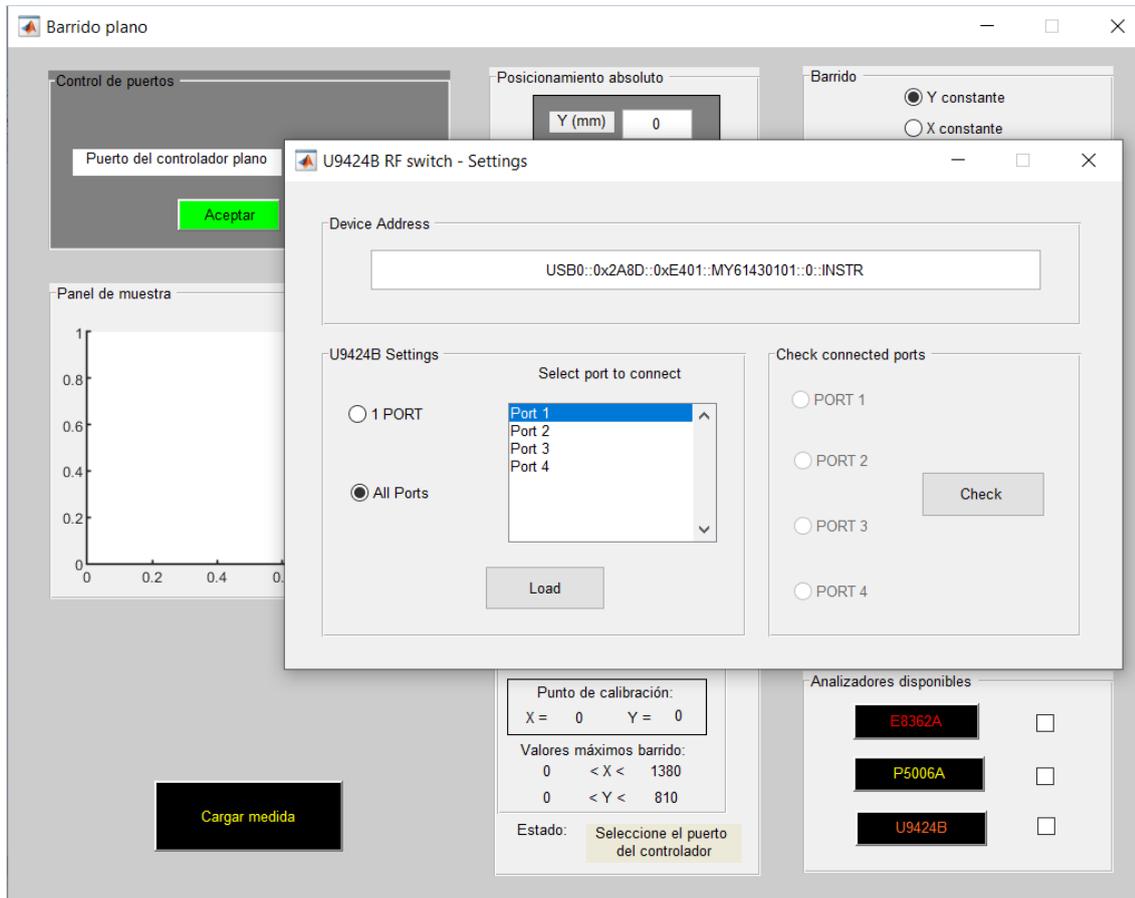


Figura 2.14. Controlador del conmutador desplegado sobre la interfaz de control de sonda. Se pueden apreciar que es menos aparatosa que la versión de prueba de Matlab.

Continuando con la funcionalidad, también se ha añadido un bloqueo en caso de error. Esto principalmente se hace en el caso de que el conmutador no esté conectado, o no lo esté correctamente, la Figura 2.15 muestra un ejemplo de este caso, evitándose así una medición errónea por mala conexión del sistema. El bloqueo también puede surgir debido a un malfuncionamiento de las librerías o comandos de keysight. En resumen, en caso de que haya algún problema de conectividad que impida configurar el conmutador por causas ajenas al programa, este se bloqueará y no permitirá actuar hasta que se pueda establecer la conexión necesaria para la configurarlo. Resultando este caso en el hecho de que los problemas surgidos han sido debidamente solventados.

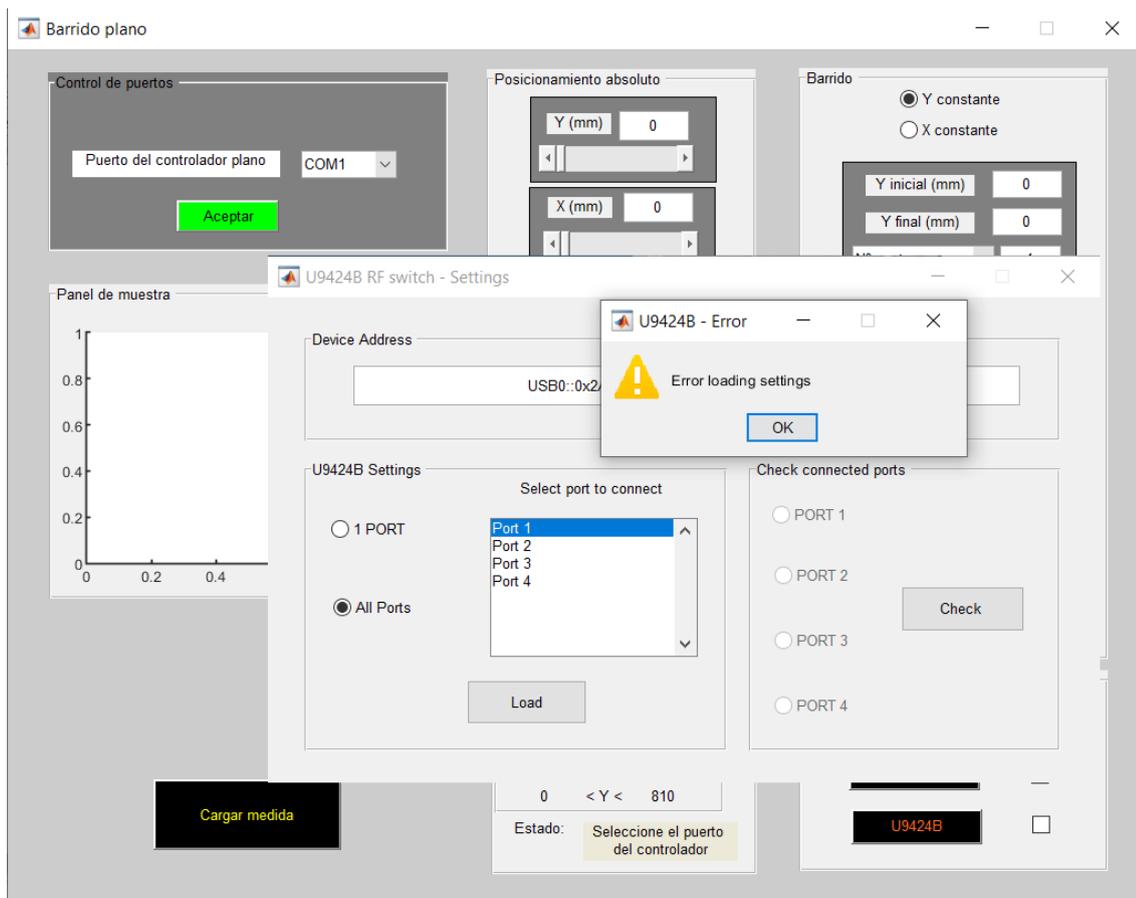


Figura 2.15. Controlador del conmutador desplegado sobre la interfaz de control de sonda. Se pueden apreciar las mejoras visuales realizadas.

Concluye así todas las modificaciones realizadas en el propio controlador de conmutador a fin de hacerlo compatible con el programa controlador central. Finaliza así la parte de software y quedaría realizar una prueba de campo del sistema planteado y desarrollado en este capítulo.

Bibliografía

- [1] Jesús R. Pérez, Óscar Fernández, Luis Valle, Abla Bedoui, Mohamed Et-tolba and Rafael P. Torres. Experimental Analysis of Concentrated versus Distributed Massive MIMO in an Indoor Cell at 3.5 GHz. 2021
- [2] Jesús R. Pérez, Rafael P. Torres, Lorenzo Rubio, Jose Basterrechea, Marta Domingo, Vicent Miguel Rodrigo Peñarroca, Juan Reig. Empirical Characterization of the Indoor Radio Channel for Array Antenna Systems in the 3 to 4 GHz Frequency Band. *IEEE-ACCESS*. Volume 7. 2019
- [3] Raichanny de la Nuez Diaz. TFM. Sistema de medida para la caracterización del canal MIMO masivo en comunicaciones 5G. Universidad de Cantabria. Septiembre – 2021
- [4] Alejandro Rodríguez Aparicio. TFG. Análisis del canal radio interior para sistemas 5G: parámetros de banda ancha y eficiencia espectral. Universidad de Cantabria. Julio – 2020
- [5] KEYSIGHT, « U9424B FET Solid State Switch, 300 kHz to 50 GHz, SP4T,» [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/product/U9424B/fet-solid-state-switch-300-khz-to-50-ghz-sp4t.html>

Capítulo 3.

Resultados

En este capítulo se realizará una prueba de funcionalidad del software y de la nueva sonda de canal desarrollada según lo estipulado en el capítulo anterior. Para dicha prueba, fijados los parámetros de medida, primero será necesario realizar una calibración del analizador de redes, utilizando para ello el kit de calibración electrónica N7555A de Keysight Technologies. En primer lugar, se procederá a caracterizar el switch y después se procederá con la caracterización de la propia sonda de canal, donde se evaluarán las pérdidas en las zonas de interés de frecuencia, las cuales se han situado en el inicio, final e intermedio de las bandas de frecuencia a fin de ver su evolución.

Tras la caracterización experimental del conmutador, se podrá realizar la prueba de medida con la certeza de que sus resultados no se verán distorsionados por fallas de potencia. Es importante notar que no se han caracterizado las pérdidas ocasionadas por el canal o por los cables de RF. Más bien, no se han concretado porque, como se ha mencionado anteriormente, ya hay en desarrollo un TFG paralelo centrado en ello.

Realizadas las medidas, el último paso consistirá en llevar a cabo su análisis para comprobar el correcto funcionamiento del conmutador al integrarlo en la sonda de canal. Aparte de resultados temporales obtenidos en las medidas, también habrá gráficas del parámetro S_{21} en cada uno de los puntos de medida. Estos serán analizados brevemente para comprobar la validez de la medida y su semejanza con el resto de los puntos del mallado rectangular que conforma el array virtual en la estación base. Queda como línea futura utilizar la sonda para realizar medidas del canal radio en las bandas de interés de 5G y en entornos de interior y exterior.

3.1. Caracterización del conmutador de RF, U9424B

La caracterización del dispositivo U9424B consistirá en realizar una medida del parámetro S_{21} entre el puerto COM y cada una de las 4 salidas del conmutador, con el

objetivo de analizar las pérdidas de inserción del conmutador y ver si los cuatro puertos tienen el mismo comportamiento. Este proceso resulta de vital importancia debido a que las conexiones, circuitería, etc, del dispositivo no son perfectas e incurrir en pérdidas de potencia que hay que valorar a la hora de realizar la transmisión de una señal para evitar problemas de sensibilidad. Un ejemplo rápido de esto sería un enlace de 15 dBm de potencia necesaria al que le llegan 17dBm, técnicamente sería suficiente, pero el operador no tuvo en cuenta los 3 dB de pérdidas, lo cual resultó en una falta de un dB para llegar al mínimo y el malfuncionamiento del sistema.

Para empezar la caracterización, lo primero que haremos será calibrar las conexiones a puerto, principalmente debido a las transiciones usadas por la incompatibilidad de los conectores y que podremos ver en la Figura 3.1. Dado que el kit de calibración tiene terminación en 3.5 mm (H) y los extremos del conmutador están conectorizados en 2.4 mm; emplearemos dos transiciones, la primera será de 2.4 mm (M) a 3.5 mm (H) y la segunda de 3.5 (M) a 3.5 (M). Es de vital importancia conservar el estado de estas conexiones cuando conectemos el conmutador al array puesto que la caracterización depende incluso de que tan apretadas estén.

Después de calibrar el PNA y conectar el conmutador entre la puerta COM y cada uno de los puertos del mismo (de acuerdo con la disposición que se muestra en la Figura 3.1), desde el ordenador se monitorizará el parámetro S_{21} que dará cuenta de las pérdidas de inserción del dispositivo en cada caso.

Una vez realizadas las medidas sobre los cuatro puertos, las cargamos y acondicionamos en Matlab. A priori, el resultado deseado debería ser pérdidas menores a 5 dB y similares en cada puerto.

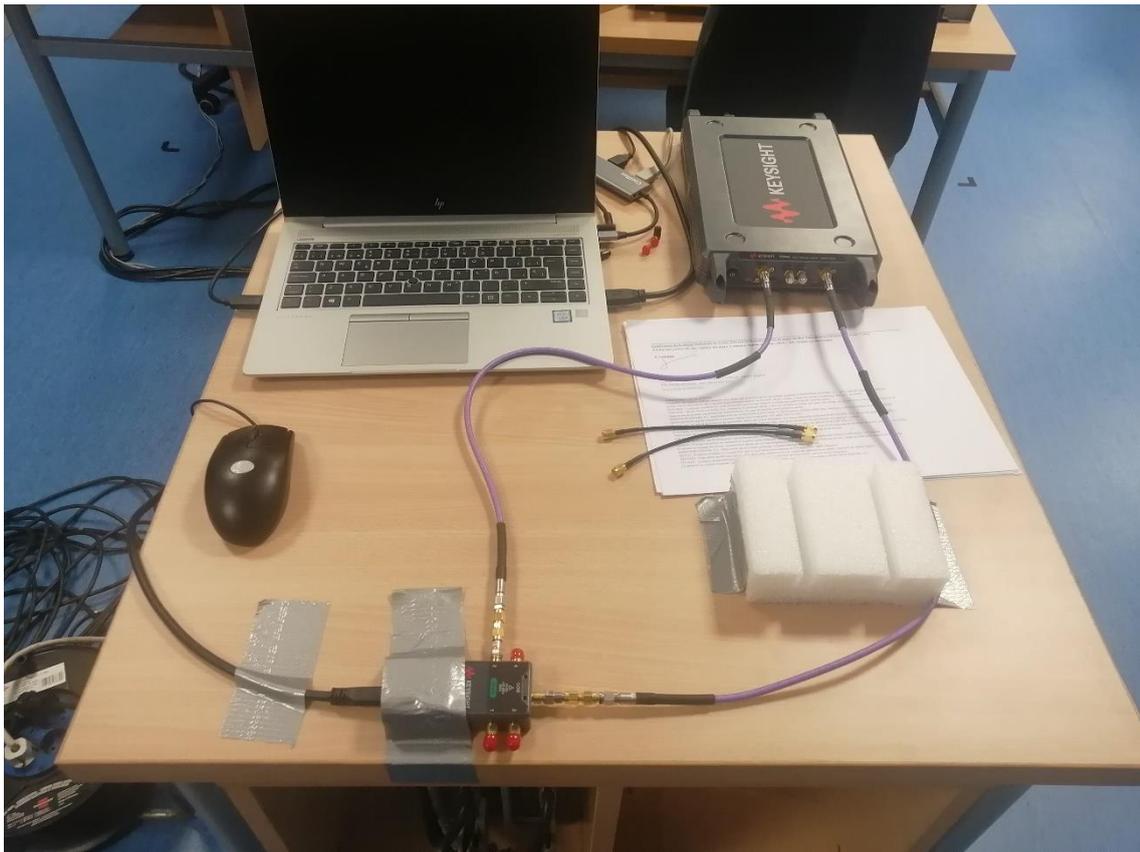


Figura 3.1. Switch conectado mediante latiguillos al PNA para su caracterización. Se puede apreciar las transiciones necesarias para el enlace de ambos dispositivos.

Las medidas se han realizado entre 3.2 y 7.2 GHz, con muestreo de 1601 puntos, en los que en cada uno de ellos se guardará el valor de los cuatro parámetros [S], S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} . Aunque para lo que se quiere comprobar en este proyecto solo interesa el S_{21} . Mediante un sencillo código de Matlab, se leerá el documento/medida guardada, obteniéndose así dos columnas de S_{21} las cuales contienen el valor de su potencia en cada uno de los 1601 puntos de medida. El siguiente paso es calcular el módulo de dicha potencia según la ecuación (3.1), para luego pasarlo a escala logarítmica según la ecuación (3.2).

$$S_{21} (\text{módulo}) = \sqrt{S_{21}(\text{real})^2 + S_{21}(\text{imaginaria})^2} \quad (3.1)$$

$$S_{21} = 20 * \log (S_{21} (\text{módulo})) \quad (3.2)$$

Tras obtener las pérdidas de inserción en decibelios, se procederá a graficar el resultado para su interpretación visual, obteniéndose las Figuras 3.2-3.6 que mostrarán las pérdidas de inserción de cada puerto.

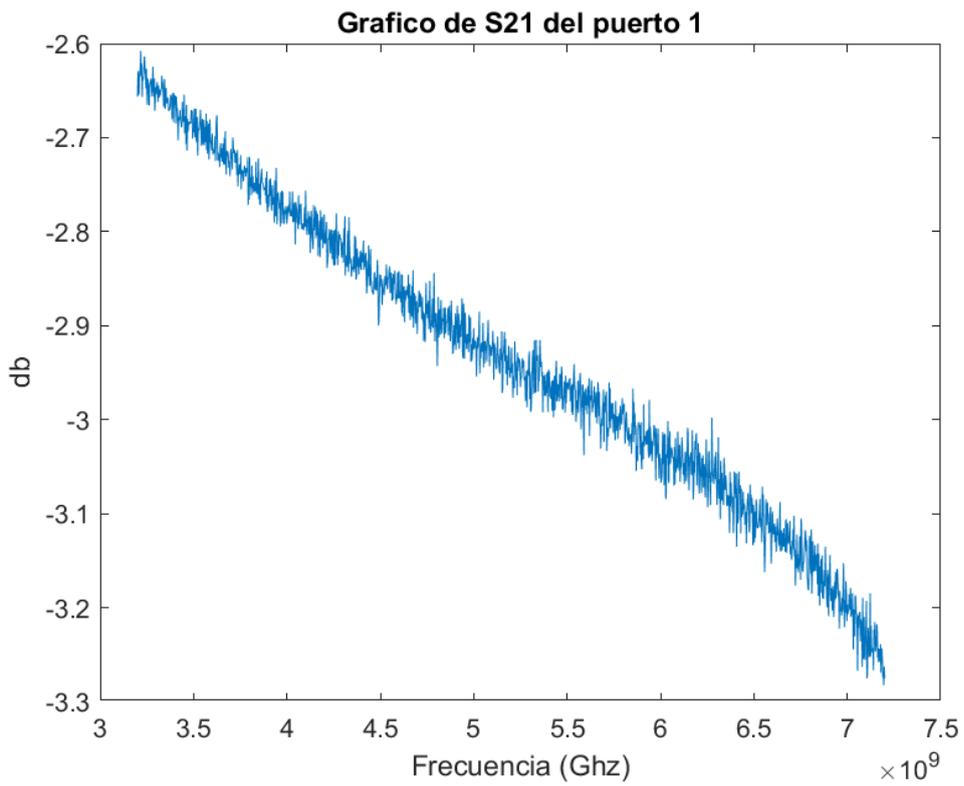


Figura 3.2. Gráfica S21 del puerto 1

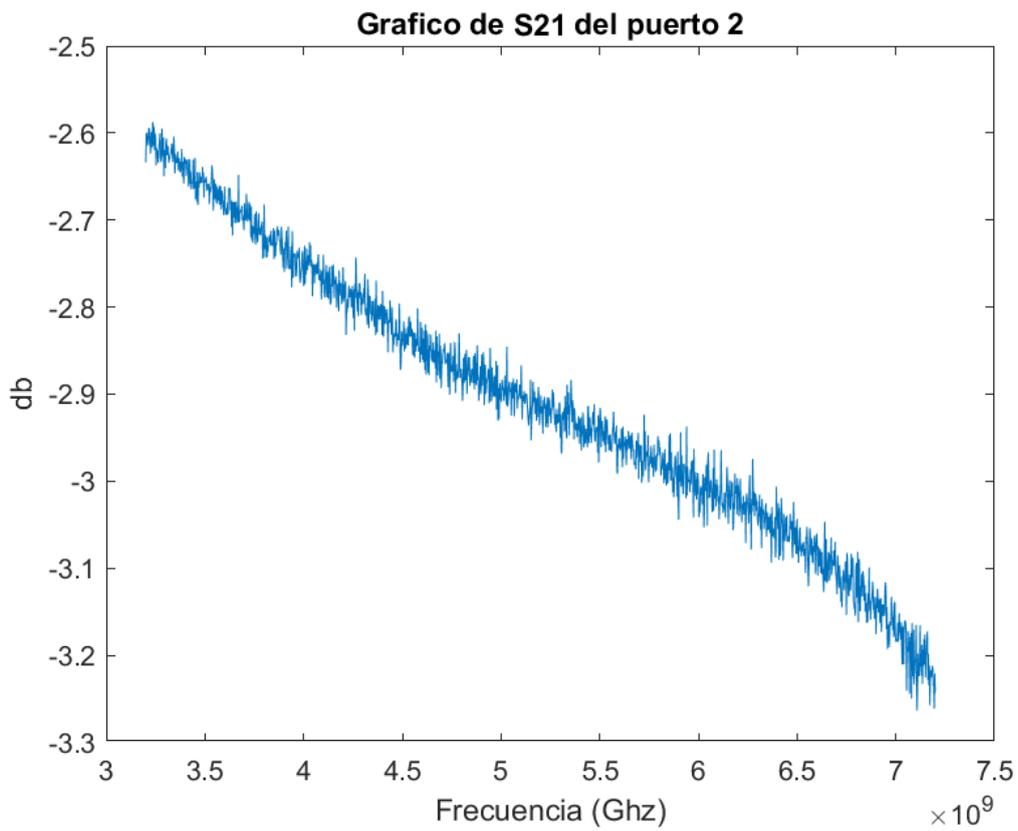


Figura 3.3. Gráfica S21 del puerto 2

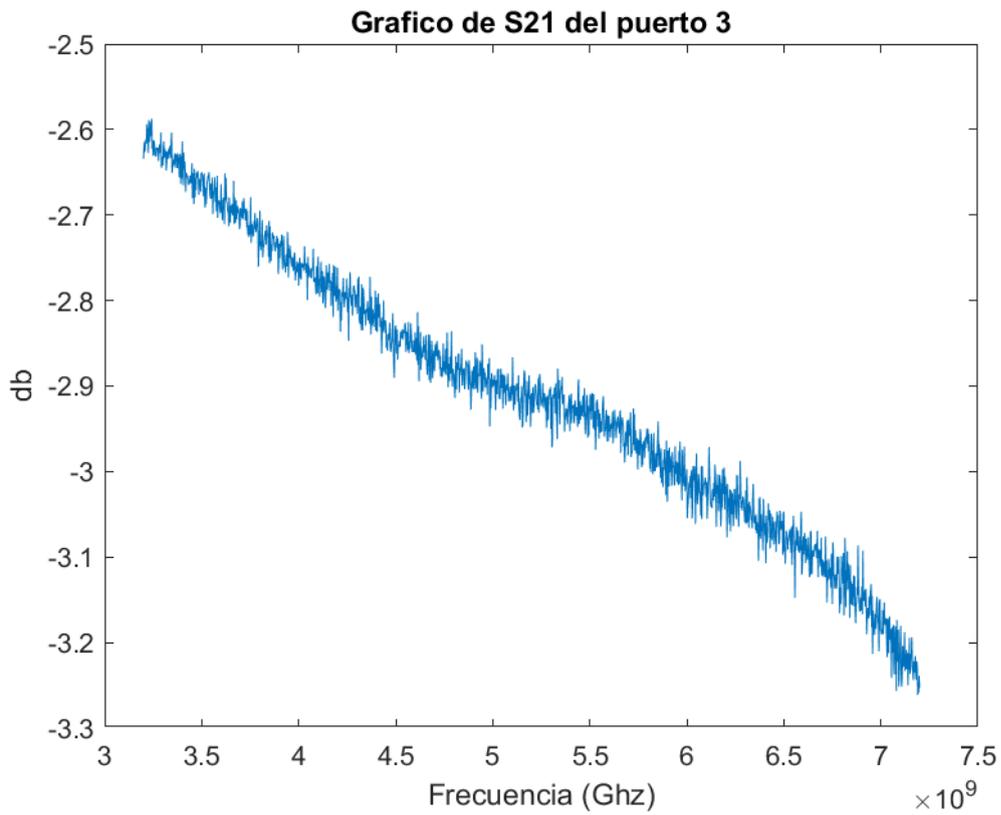


Figura 3.4. Gráfica S21 del puerto 3

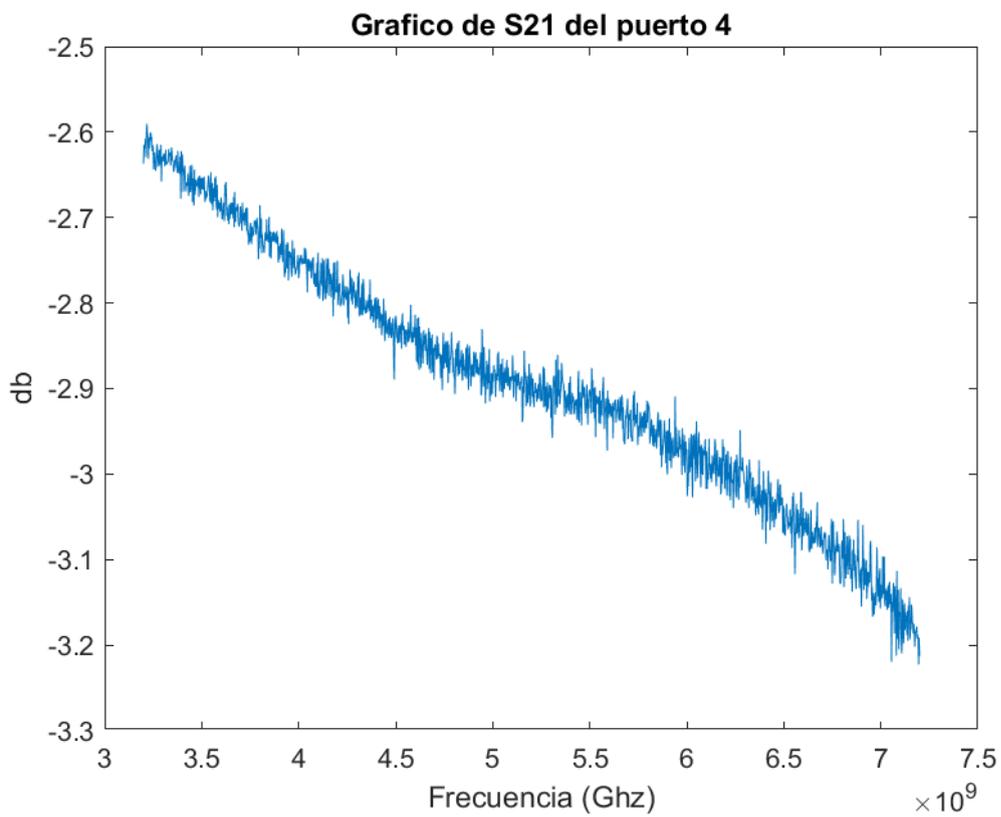


Figura 3.5. Gráfica S21 del puerto 4

Visualmente, podemos ver que las gráficas son similares, aunque no exactamente iguales, y con valores de pérdidas menores que 5 dB, por lo que a priori podemos concluir que todos los puertos funcionan virtualmente con las mismas pérdidas, que además están en un rango aceptable. Para una mayor sencillez en la interpretación de dichas pérdidas, se elaborarán dos tablas, una en la banda 3.4 a 3.8 GHz, Tabla 3.1, y otra en la banda 6.425 a 7.125 GHz, Tabla 3.2. Estas tablas contienen el valor exacto de las pérdidas de inserción en el inicio, punto medio y final de la banda, con lo que se podrá ver su evolución en cada una de las frecuencias.

Un dato a destacar de las gráficas es que son visualmente coherentes puesto que las pérdidas aumentan cuanto mayor es la frecuencia a la que operamos.

Tabla 3.1. Pérdidas de inserción en los puntos de interés de la banda de 3.4 a 3.8 GHz.

	$f=3.4$ GHz	$f=3.6$ GHz	$f=3.8$ GHz
Puerto 1	2.66 dB	2.70 dB	2.72 dB
Puerto 2	2.63 dB	2.66 dB	2.68 dB
Puerto 3	2.61 dB	2.66 dB	2.69 dB
Puerto 4	2.63 dB	2.68 dB	2.69 dB

Tabla 3.2. Pérdidas de inserción en los puntos de interés de la banda de 6.425 a 7.125 GHz.

	$f=6.425$ GHz	$f=6.775$ GHz	$f=7.125$ GHz
Puerto 1	3.08 dB	3.12 dB	3.25 dB
Puerto 2	3.05 dB	3.08 dB	3.21 dB
Puerto 3	3.06 dB	3.10 dB	3.23 dB
Puerto 4	3.02 dB	3.07 dB	3.18 dB

Comprobamos que efectivamente todos los puertos tienen las mismas pérdidas, con variaciones máximas de 0.05 dB, lo cual verificara el correcto funcionamiento del switch. Además, dado que se ha empleado el programa controlador para configurar en que puerto se envía la señal para su caracterización, se entiende que la interfaz desarrollada en el marco de este TFG, e incluida en el mismo, opera adecuadamente.

3.3. Resultado de las medidas del array de 4 parches

Una vez caracterizado el switch, se podrán hacer las medidas con el margen de error ocasionado por las pérdidas de inserción adaptado. Dicha medición se realizará sobre un array virtual de 6X6 puntos, 36, primero usando el array de parches 2X2, y luego de forma individual, considerando un único parche activo y replicando la geometría de medida original con 6X6 puntos. Se verá así claramente que el primer método es más rápido que el segundo, lo cual es el propósito original de este TFG de optimizar el

proceso de medida. También se comprobará que, independientemente del método que se use, las medidas serán correctas mediante comparación de las gráficas S_{21} generadas en los procesos.

La prueba se realizará en un laboratorio del Edificio de Ingeniería de Telecomunicación Prof. Jose Luis Garcia Garcia de la Universidad de Cantabria. El laboratorio tiene forma aproximada de L debido a una sala dentro del mismo, véase el plano mostrado en la Figura 3.6, y varios obstáculos, mesas y ordenadores, aunque estos no obstruirán la línea de visión directa antena/receptor.

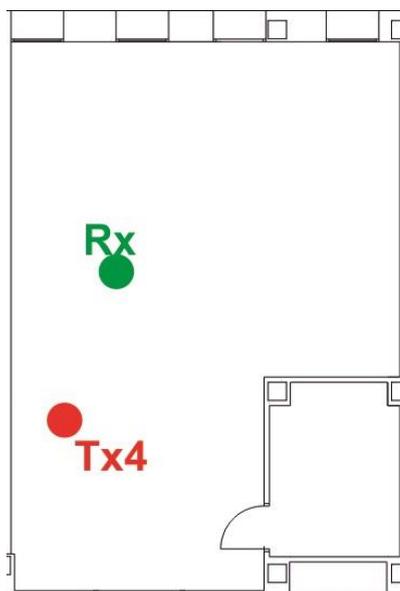


Figura 3.6 Plano del laboratorio donde se realizarán las medidas

La primera medida consistirá en la opción All Ports, en la que el array virtual MIMO 6X6 se medirá en 9 puntos de referencia (posiciones del escáner plano) usando la agrupación de antenas 2X2 mostrada en la Figura 3.7. Como el cuadrado receptor cuenta con 4 parches, si se consideran los 9 centros de referencia se obtiene $4 \cdot 9 = 36$ puntos de medida de la malla virtual.

Los centros de medida, o puntos de referencia, se colocarán en la malla de medida en base a la distancia entre parches que se puede ver en la Figura 3.8.

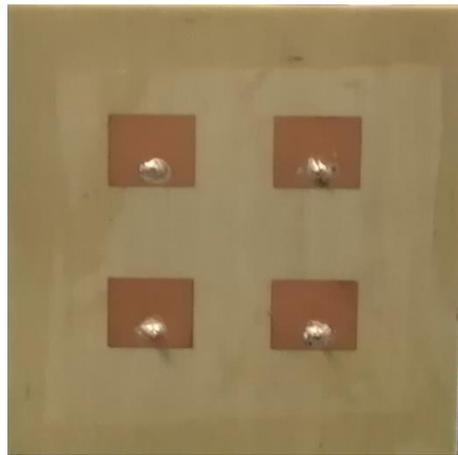


Figura 3.7. Array 2X2 usado para la medición en 4 puntos simultáneos

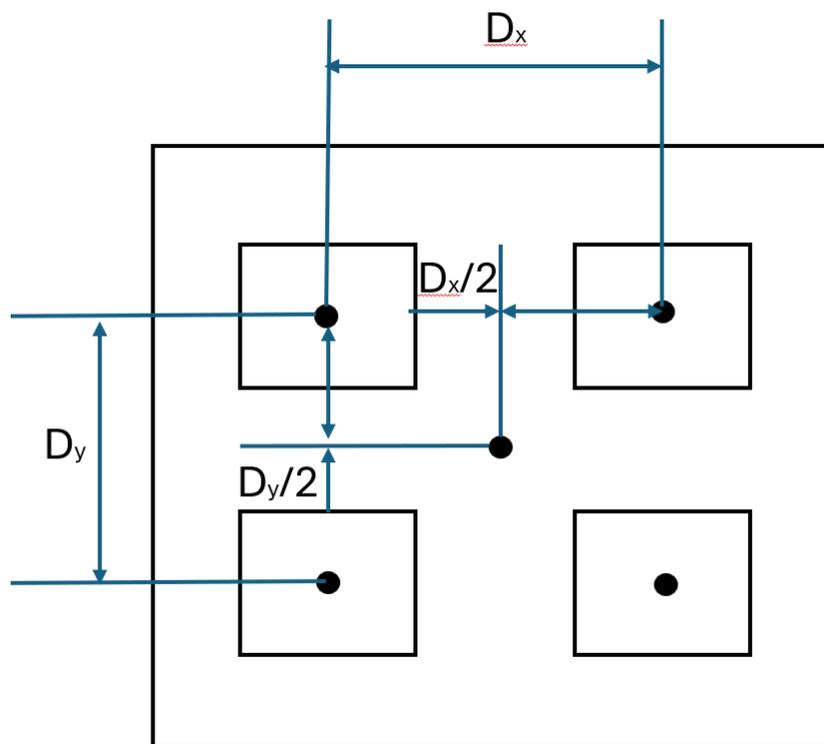


Figura 3.8. Esquema de distancias entre parches del array

El esquema expuesto en la anterior figura muestra dos distancias entre parches que denominamos D_x y D_y , según su eje. Es importante notar que D_x y D_y son distintas pues el array no es simétrico. A la vista de la Figura 3.8, se considera el centro del cuadrado receptor, de coordenadas $(D_x/2, D_y/2)$, el punto de referencia a partir del cual se

colocarán los puntos de medida de la malla en el posicionador plano. Así, en cada posición del escáner plan, ese centro de referencia permite realizar 4 medidas del array virtual al incorporar el conmutador. Si la idea pasa por simular un array virtual con 6x6 elementos, el movimiento del array de antenas debe realizarse sobre un barrido 3x3; es decir deberemos realizar 3 desplazamiento en X y otros 3 en Y. Así, es necesario encontrar una algorítmica para colocar esos 9 centros de forma que todos los puntos de medida generados hagan que todos los parches estén distanciados entre sí D_x y D_y , y emular lo que sería un gran array.

Para visualizar lo explicado, pueden verse algunos esquemas donde se muestra la malla virtual de medida, Figura 3.9, y dicha malla dividida en 9 arrays 2X2 con sus respectivos centros de referencia, Figura 3.10. En la Figura 3.10, los 9 centros de referencia coincidirán con las posiciones que deberá visitar el escáner plano para realizar una medida homogénea en la que la separación entre todos los elementos del array sea la misma.

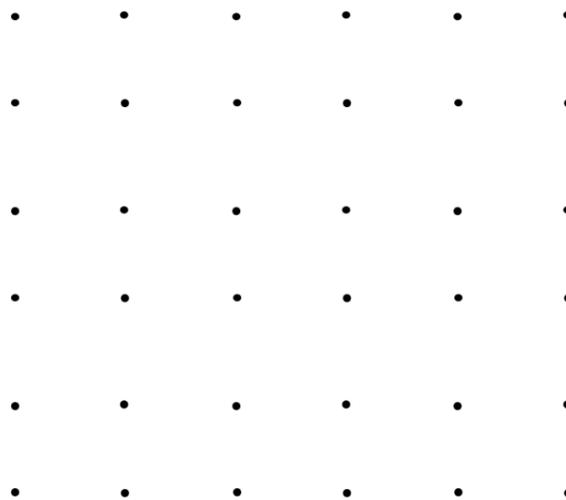


Figura 3.9. Malla de medida 6X6, 36 puntos.

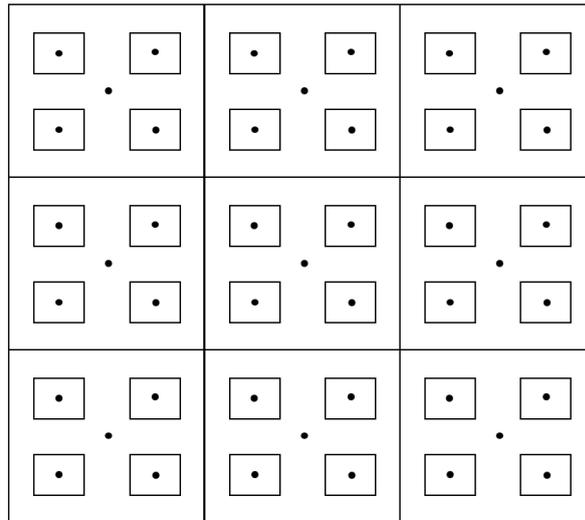


Figura 3.10. Malla dividida en nueve centros de referencia

En este punto, el objetivo es hallar la distancia que separa los centros de referencia que permita conservar la simetría de la malla evitando solapamientos de puntos de medida. Viendo la Figura 3.10 puede apreciarse que, en cada línea, desde el punto 1 al punto 6, tenemos $5D_x$ correspondientes a las cinco separaciones entre los puntos, $5D_y$ en el caso del eje Y. Según lo visto en la Figura 3.8, podemos ubicar el centro 1, que generó el primer punto de medida, a $D_x/2$ del mismo. Si lo aplicamos a ambos extremos de la línea tenemos $5D_x - 2 * D_x/2 = 4D_x$ de distancia entre los puntos de referencia más alejados de la línea. Dividiendo este resultado a la mitad, por las dos distancias entre centros que hay, el resultado son $2D_x$ de separación entre centros.

La Figura 3.11 muestra el esquema de distancias obtenido aplicado a dos centros contiguos.

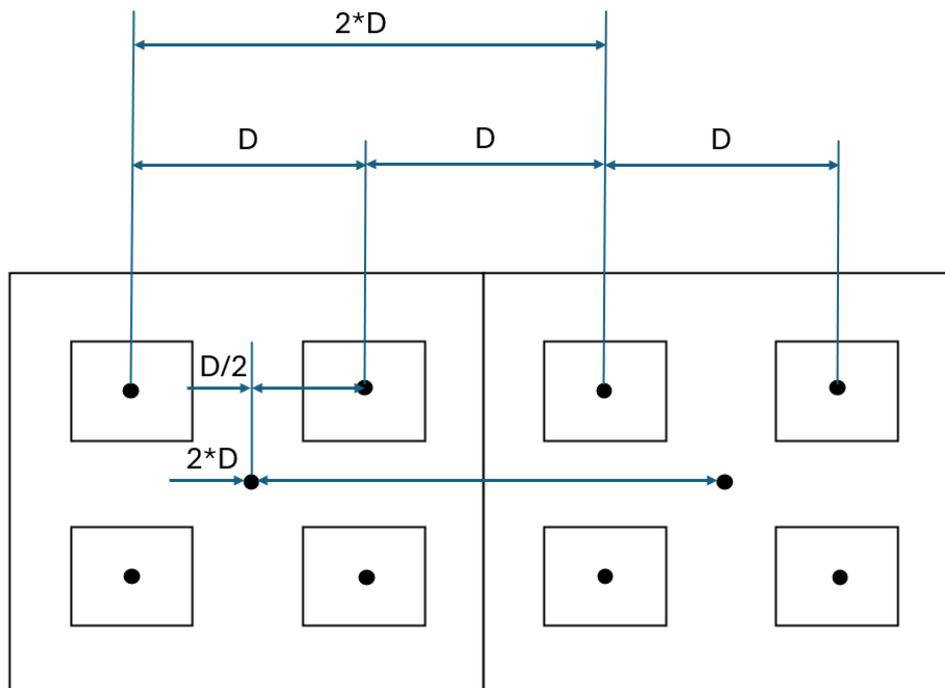


Figura 3.11. Esquema que muestra las distancias entre centros con relación a lo establecido en la figura 3.8 y lo explicado anteriormente.

Esta conclusión resulta de vital importancia pues se evita de esta forma el solapamiento entre puntos o la ruptura de la simetría de la malla al separar los puntos de medida de forma desigual.

Es importante resaltar que la algorítmica usada para obtener la fórmula de separación entre centros se puede aplicar a otros posibles arrays receptores. Es decir, en el marco de un posible proyecto en el que se buscase ampliar el cuadrado receptor, un 2X8 por ejemplo, la lógica seguida para hallar la distancia entre centros de referencia sería la misma que la usada anteriormente para el cuadrado 2X2. La fórmula como tal, evidentemente variaría, pero el planteamiento desarrollado y presentado en la Figura 3.11 es válido para futuros proyectos de optimización.

Para poder visualizar mejor la optimización temporal conseguida con todo el proceso anterior, se han modificado las figuras 3.9 y 3.10 para mostrar el movimiento de la antena receptora. Además, al verse la diferencia de movimiento entre ambas formas de medida, se aprecia mejor el cómo y porqué del proceso seguido para configurar la ruta de medida de la malla en caso de medir haciendo uso del array 2X2 entero.

En la figura 3.12 se muestra en la opción de 4 puertos, viéndose los 8 movimientos que requiere hacer para completar la medida.

Estas dos figuras muestran claramente el ahorro temporal conseguido en el proceso de medida al reducir la cantidad de movimientos de la antena receptora necesarios, además de la necesidad de las fórmulas y algorítmica de desplazamiento desarrolladas.

Una vez se hayan configurado los puntos de referencia de la malla adecuándolos al movimiento que sigue la antena receptora en cada caso mediante las fórmulas de separación de centros obtenidas, puede empezarse a medir según la calibración y caracterización realizadas con anterioridad a fin de obtener el S_{21} en cada punto de medida.

En las siguientes figuras, Figuras 3.14-3.17, se han organizado los resultados mencionados anteriormente en 4 gráficas que muestran el parámetro S_{21} en cada puerto.

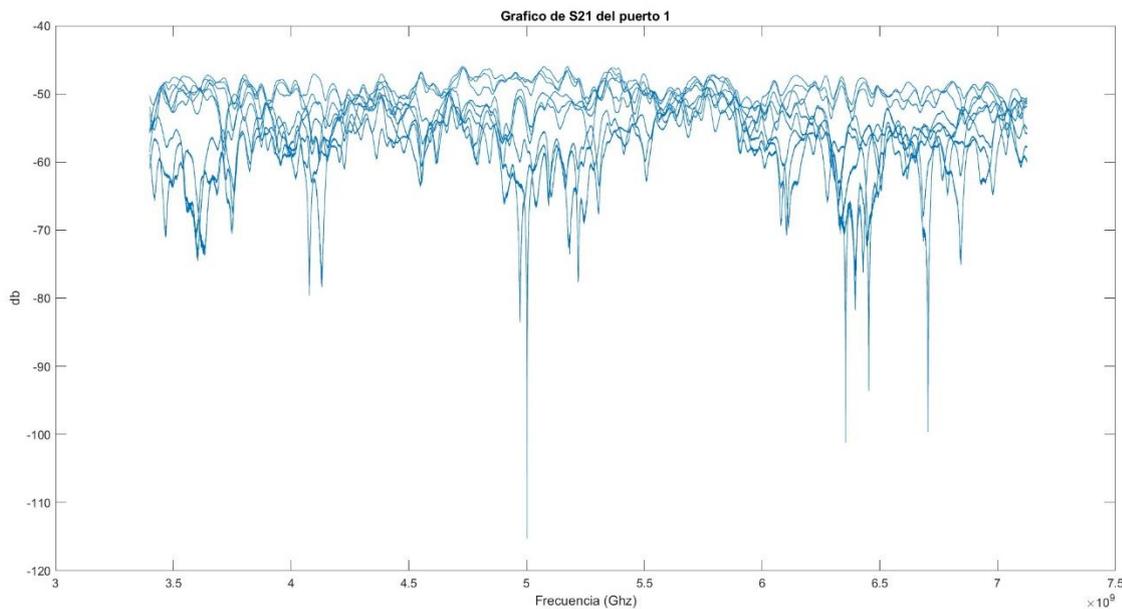


Figura 3.14. Gráficas S21 del parche 1 en los 9 puntos

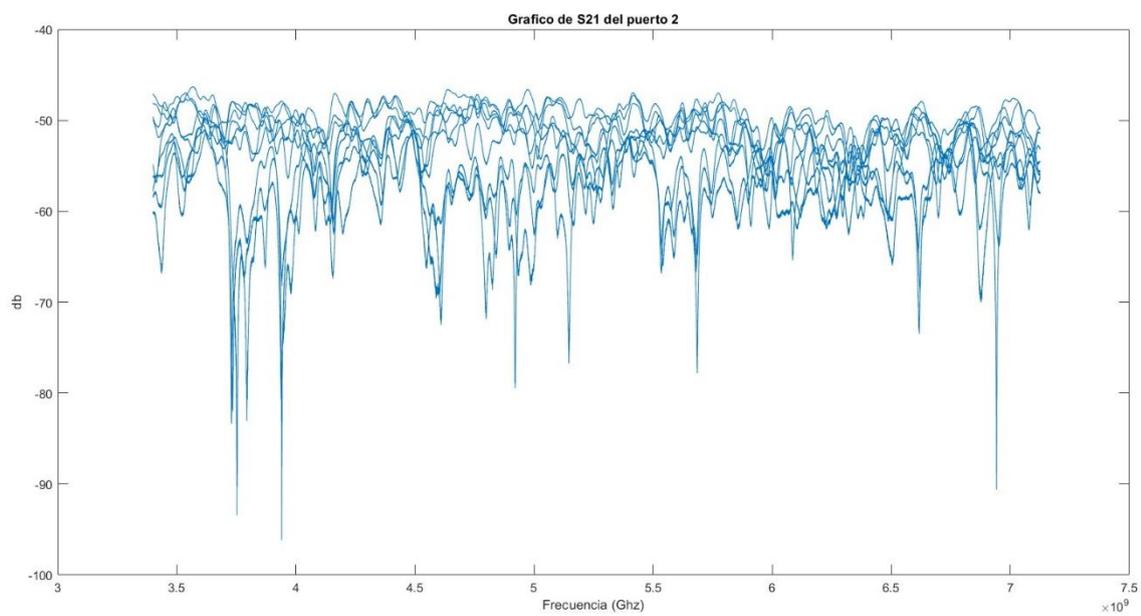


Figura 3.15. Gráficas S21 del parche 2 en los 9 puntos

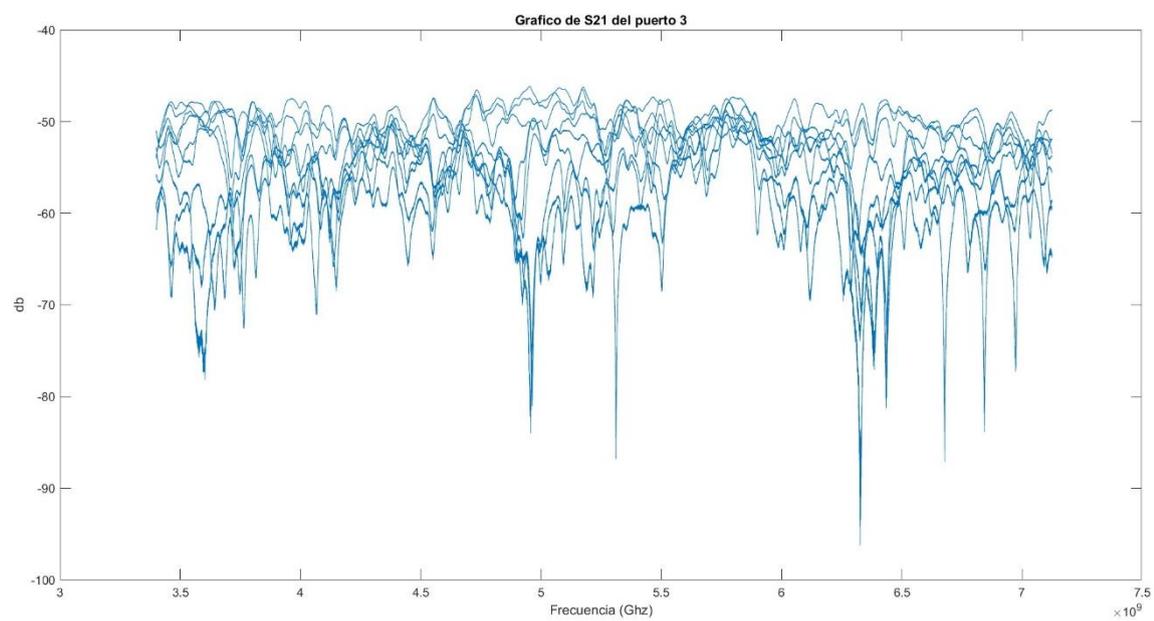


Figura 3.16. Gráficas S21 del parche 3 en los 9 puntos

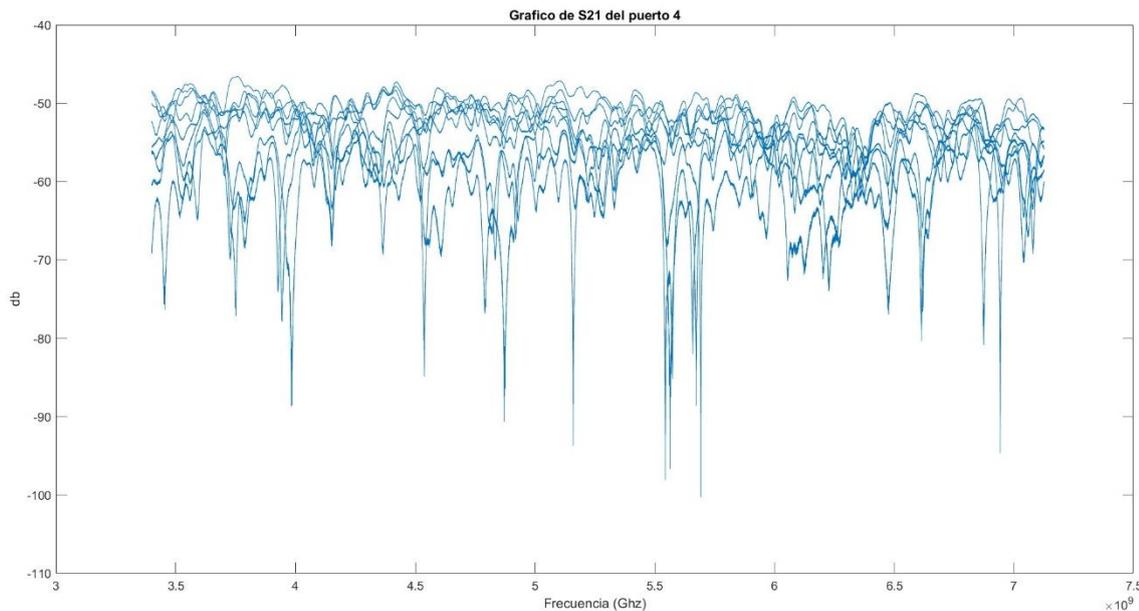


Figura 3.17. Gráficas S21 del parche 4 en los 9 puntos

Analizando las gráficas, puede observarse cierto parecido en la respuesta del canal en el dominio de la frecuencia medido. Tomando de ejemplo la Figura 3.11, donde se colocaron las nueve mediciones realizadas en los 9 puntos del primer parche, puede verse como la evolución de las pérdidas no difiere demasiado en cada caso individual, pese a que cada línea tiene sus propias fluctuaciones ocasionadas por el multicamino.

Este comportamiento también se aprecia cuando se comparan las gráficas entre ellas. Es decir, no solo se parecen las mediciones del parche 1 con las del parche 1 en otras posiciones, sino también el conjunto del parche 1 con el parche 2.

Este análisis preliminar y no muy exhaustivo aporta suficiente información para confirmar la validez del cuadrado receptor al verse que, el centro de referencia y el parche escogido para realizar la medida no modifica en exceso su resultado. Las variaciones observadas pueden atribuirse a agentes externos a lo que se pretende comprobar en este proyecto, como por ejemplo, las fluctuaciones del canal radio aleatorio.

Con respecto al tiempo requerido para realizar la prueba de medición, se aislará el archivo de guardado del primer punto medido con el último, tal y como se muestra en la Figura 3.18.

X_51.0_Y_52.2_Puerto4.out	10/04/2024 12:06	Archivo OUT	489 KB
X_51.0_Y_52.2_Puerto3.out	10/04/2024 12:06	Archivo OUT	495 KB
X_51.0_Y_52.2_Puerto2.out	10/04/2024 12:06	Archivo OUT	487 KB
X_51.0_Y_52.2_Puerto1.out	10/04/2024 12:06	Archivo OUT	494 KB
X_-51.0_Y_-52.2_Puerto4.out	10/04/2024 12:01	Archivo OUT	497 KB
X_-51.0_Y_-52.2_Puerto3.out	10/04/2024 12:01	Archivo OUT	494 KB
X_-51.0_Y_-52.2_Puerto2.out	10/04/2024 12:01	Archivo OUT	492 KB
X_-51.0_Y_-52.2_Puerto1.out	10/04/2024 12:01	Archivo OUT	490 KB

Figura 3.18. Tiempos de ejecución de la medida analizando los ficheros de salida de los puntos medidos.

Comparando el tiempo de guardado de cada archivo, se calcula un tiempo de 5 minutos necesarios para realizar una medición completa de la malla 6X6 empleando la opción de medir de 4 en 4 puertos.

Se procederá a comprobar el funcionamiento de la opción de un puerto de medida, es decir, como originalmente funcionaba el sistema, eligiendo el puerto 1. En este caso, calibrar la distancia entre puntos es más sencillo, pues el centro de referencia parte del propio punto de medida y simplemente hay que moverlo Dx o Dy según el eje.

Los resultados de esta prueba se visualizarán en la Figura 3.19.

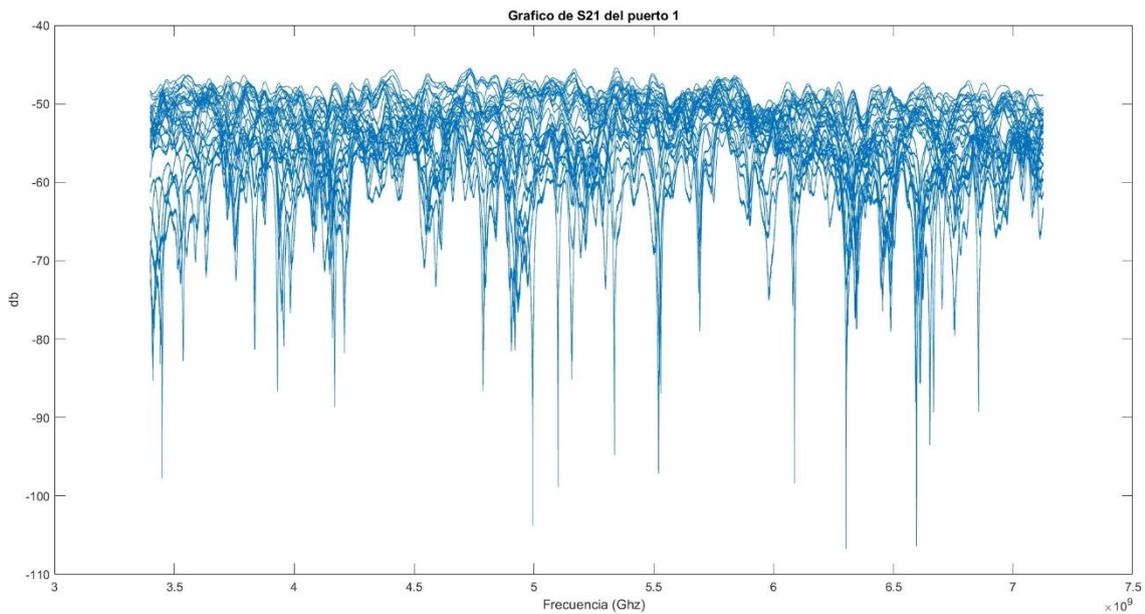


Figura 3.19. Gráficas S21 del parche 1 en los 36 puntos

En la Figura 3.19 se han superpuesto las 36 trazas con información del parámetro S_{21} medidas. Tras ver de nuevo la relativa semejanza en los resultados obtenidos, puede concluirse preliminarmente que el parche mide de manera consistente independientemente de la posición en la que lo haga. De nuevo se atribuyen las diferencias en los resultados a la influencia del multicamino que con pequeños cambios de posición de la antena puede conducir a variaciones significativas en la envolvente de la señal recibida.

Si esta conclusión se suma a la obtenida de la medida utilizando eficientemente el conmutador con los 4 puertos y el array 2x2, puede reafirmarse la conclusión central y más importante del array receptor. Los 4 parches de medida funcionan igual a la hora de medir y su posicionamiento no compromete la validez de las medidas.

Con respecto al tiempo de ejecución de esta prueba, se ha seguido el mismo planteamiento que en la anterior. Los tiempos de almacenamiento de los ficheros de salida se han presentado en la Figura 3.18.

 X_-63.8_Y_65.3_Puerto1.out	10/04/2024 12:25	Archivo OUT	494 KB
 X_-63.8_Y_-65.3_Puerto1.out	10/04/2024 12:16	Archivo OUT	492 KB

Figura 3.20. Hora de guardado de la primera y última medidas.

En este caso la medición ha tardado 9 minutos, lo cual supone casi el doble que si usamos la opción de 4 parches, esto era de esperar pues la cantidad de movimientos que tiene que hacer la antena receptora es mayor.

3.4. Conclusiones

Con respecto al tiempo empleado en cada medición, es claramente visible que el sistema de medida que emplea el array de 2x2 parches es más rápido que el individual, debido a la menor necesidad de moverse a puntos de referencia, 9 frente a 36. En este caso, el ahorro de tiempo ha sido de solo 4 minutos. Sin embargo, hay que tener en cuenta la reducida dimensión del experimento. En un proyecto más complejo y cuya función sea la de medir, y no la de comprobar si esta se realiza correctamente, podría tener que caracterizarse 500 canales en 500 puntos distintos. Esta malla propuesta requeriría de $500/4=125$ puntos de referencia con el nuevo método frente a los 500 del antiguo. Si se tiene en cuenta que 9 puntos han tardado 5 minutos, haciendo una sencilla regla de tres puede calcularse que 125 requerirían algo más de una hora.

En cuanto al tiempo que necesitaría si solo se usase un parche de medida, empleando el tiempo que se ha tardado en el experimento de medida en un solo puerto como referencia, y siguiendo el planteamiento anterior, puede suponerse que la nueva malla planteada requeriría aproximadamente 2 horas para realizar la medida según el método de la antigua sonda de medida de canal. En este caso, el ahorro de tiempo aumenta de 4 minutos a una hora, lo cual es un tiempo mucho más considerable y provechoso.

Con respecto a las gráficas S_{21} obtenidas puede verse que las curvas siguen cierta regularidad dentro de la aleatoriedad causada por el subcanal transmisor-receptor y hay picos muy pronunciados fruto de las contribuciones del multicamino.

Sin embargo, gracias a las tablas de pérdidas de inserción obtenidas y a las gráficas presentadas, Figuras 3.14-17 y 3.19, sí que puede concluirse que las diferencias ocasionadas entre medidas no se deben principalmente al array 2X2 o a la posición de este, sino a efectos no caracterizados en este proyecto. De esta forma, se valida definitivamente la correcta funcionalidad de la sonda al integrar el conmutador de RF, objetivo central de este TFG.

Bibliografía

[1] Raichanny de la Nuez Diaz. TFM. Sistema de medida para la caracterización del canal MIMO masivo en comunicaciones 5G. Universidad de Cantabria. Septiembre – 2021

[2] KEYSIGHT, « U9424B FET Solid State Switch, 300 kHz to 50 GHz, SP4T,» [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/product/U9424B/fet-solid-state-switch-300-khz-to-50-ghz-sp4t.html>

[3] KEYSIGHT, « P5006A Keysight Streamline USB Vector Network Analyzer, 32 GHz,» [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/product/P5006A/streamline-usb-vector-network-analyzer-32-ghz-2-ports.html>

[4] J. R. Pérez, “Comunicaciones Móviles e Inalámbricas”, disponible en <https://personales.unican.es/perezjr/CMEI/>.

Capítulo 4.

Conclusiones y líneas futuras.

4.1. Conclusiones

En este TFG se ha modificado una sonda de medida del canal radio en el dominio de la frecuencia. Para mejorar el sistema de medida, el objetivo de este TFG se ha centrado en integrar en la mencionada sonda un conmutador de radiofrecuencia de cuatro puertos. Teniendo en cuenta que el sistema de medida se centra en el enlace ascendente, el conmutador permitirá utilizar agrupaciones de antenas 2x2 en el extremo receptor, emulando un array virtual de MIMO Masivo más realista, permitiendo realizar medidas sobre arrays más realistas en mucho menos tiempo.

El primer objetivo era mejorar la eficiencia de medida mediante la inclusión de un conmutador que permitiese recibir información desde 4 puntos simultáneamente. La interfaz desarrollada para su configuración ha sido desarrollada con éxito, así como su inclusión en el programa controlador central, requiriendo esta tarea la depuración del código de la misma. Tras realizarse una prueba de caracterización, se comprobó que, efectivamente, la interfaz de control permitía configurar adecuadamente a qué puerto del switch se enviaba la señal de prueba, además de poder comprobar si las instrucciones de bloqueo en caso de malfuncionamiento funcionaban correctamente. Tras completar la caracterización, se realizó la prueba de medida. Examinando los resultados, tanto en la opción de 4 puertos como de 1, se comprobó de nuevo el buen funcionamiento de la interfaz a la hora de configurar las entradas del conmutador. Puede concluirse entonces que la parte de software, tanto el desarrollo de nuevo código como su inclusión, funciona de acuerdo con la premisa planteada de habilitar una opción de medida de 4 puntos simultánea. Eso sí, las mejoras pasan por mantener la opción de medir en un solo puerto sin comprometer la validez de las propias mediciones.

En lo que respecta a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio presentadas en el capítulo 3, se puede decir que el principal objetivo de este TFG ha sido completado. Se ha verificado el correcto funcionamiento del conmutador al integrarlo en la sonda de medida de canal. En este sentido, la sonda de medida del canal radio desarrollada por el grupo GISAR ha sido debidamente analizada a fin de obtener sus

limitaciones, que a su vez también han sido analizadas a fin de poder elaborar una serie de contramedidas. Las posibles soluciones han sido planteadas en un nuevo sistema experimental que introduce nuevos elementos para dicho fin. Dicho sistema ha sido desarrollado en función del análisis previo de las limitaciones centrándose en solucionar las dos primeras, tiempo y realismo.

También se comprobaron los tiempos de guardado y realización de los archivos generados del post-procesado de la medición y se vio claramente una disminución del tiempo de medida de 4 minutos en el caso planteado de una malla 6X6. Se termina de verificar entonces el correcto cumplimiento del objetivo principal de este TFG, la optimización temporal de la sonda de medida de canal.

El segundo objetivo de este TFG era el de aumentar el realismo de la medida realizada mediante la sustitución de una de las antenas del sistema original. Como se mencionó en el capítulo 2, la conexión generada por las antenas era poco realista y generaba resultados correctos y útiles en términos de caracterización de canal, pero que dista del tipo de antenas que nos encontramos en las estaciones base. Esta limitación se solucionó con la integración del array receptor 2X2 que, montado con conmutador a la plataforma móvil, actuaba como una antena receptora mucho más realista.

4.2. Futuras líneas de desarrollo

El último punto de este TFG será plantear posibles evoluciones y líneas de trabajo que, tomando como punto de partida este TFG, puedan servir para mejorar el sistema ya establecido o usarlo para obtener información de interés.

La primera línea de desarrollo reside en la optimización de la tercera limitación planteada en el capítulo 2, la cual pasaba por la integración de fibra óptica para reducir las pérdidas de los cables RF. Esta línea de actuación está actualmente siendo desarrollada en un TFG paralelo y que partirá de los resultados ya obtenidos durante las pruebas de medida realizadas en este TFG.

La segunda línea de posible desarrollo sería una mayor optimización temporal de la sonda de medida. En este TFG se ha desarrollado una interfaz de control que permitía emplear un conmutador para recibir las mediciones. Para este proyecto en concreto se ha usado uno de 4 puertos, pero nada impide que se puedan incorporar conmutadores de más puertos que permitan realizar más medidas en simultáneo. Esto sería tan fácil como modificar la interfaz de control del conmutador y adaptarla al número de puertos disponibles del nuevo. Además, se puede seguir el estudio de colocación de centros de referencia del array receptor desarrollado en este TFG para obtener la fórmula del nuevo cuadrado usado en el hipotético nuevo proyecto de optimización.

Otra opción de esta línea de desarrollo sería la incorporación de un nuevo sistema de medida que requiriese de una nueva interfaz de control, la cual podría basarse en las ya desarrolladas.

La tercera, última y posiblemente más importante línea futura que se va a plantear es la caracterización de la propia sonda de canal. Como ya se ha mencionado activamente en los capítulos 2 y 3, el objetivo de este TFG nunca fue la recolección y análisis de los datos asociados con medidas de canal en escenarios de interés, limitándonos a unas medidas concretas que nos permitiesen comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Un ejemplo de ello es la atención que se puso al realismo que añadiría el cuadro receptor 2X2, pero sin fijarse en la ganancia que introducía su montaje con el conmutador. Así pues, se podría plantear un futuro proyecto que caracterice apropiadamente cada uno de los elementos que componen la nueva sonda de medida de canal, que analice en detenimiento los datos obtenidos en el desarrollo de este TFG y los compare en el futuro cuando el sistema haya sido optimizado mediante la inclusión del enlace de fibra óptica.

Anexo

En esta sección se mostrará el código de Matlab desarrollado para la interfaz controladora del conmutador. Es necesario tener en cuenta que el programa emplea librerías y comandos de keysight para conectarse con el conmutador y conectar/desconectar los distintos puertos.

Sección de código 1. Función de inicio

```
function U9424B_new_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

global U9424B

% Choose default command line output for U9424B_new
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

%Cargar Configuración previa de usuario si se vuelve a entrar
if not(isempty(U9424B))

    %Volcar dirección del dispositivo
    set(handles.direct,'string', U9424B.Direccion);

    %Opción de medida con 1 ó 4 puertos
    if U9424B.Port==1
        set(handles.port,'Value',1);

        %Puerto conectado
        set(handles.Listport,'Value', U9424B.SelectedPorts);
    else
        set(handles.AllPorts,'Value',1);
    end
end

% UIWAIT makes U9424B_new wait for user response (see UIRESUME)
uiwait(handles.U9424B_fig); %Para que devuelva control al salir en el OutPutFcn
```

Esta función se activa nada más iniciar la interfaz y se encarga de verificar si hay una alguna configuración del conmutador previa. En caso de ser así, la previsualizará para mejorar el control del usuario sobre conmutador al informarle de su estado de configuración. Además, contiene la instrucción de bloqueo “uiwait” para bloquear la pantalla de la interfaz.

Sección de código 2. Control de errores

```
% --- Executes on button press in checkbox.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

    %Control de errores
    try

        %Establecer conexión con el equipo
        Direccion=get(handles.direct,'String');
        U9424B=visa('agilent', Direccion);
        U9424B.InputBufferSize=8388608;
        U9424B.ByteOrder='littleEndian';
        fopen(U9424B);

        % Lee el puerto con el que esta conectado, y lo guarda en variable
        retval=query(U9424B,':ROUT:CLOS?');

        %Cerrar conexión con equipo
        fclose(U9424B);
        delete(U9424B);
        %clear U9424B;

        set(handles.radiobutton1,'Value',0);
        set(handles.radiobutton2,'Value',0);
        set(handles.radiobutton3,'Value',0);
        set(handles.radiobutton4,'Value',0);

        %Actualizar puerto
        puerto=str2num(retval);

        if puerto == 1
            set(handles.radiobutton1,'Value',1);
        end
    end
```

```

%Actualizar puerto
puerto=str2num(retval);

if puerto == 1
    set(handles.radiobutton1, 'Value',1);

elseif puerto == 2
    set(handles.radiobutton2, 'Value',1);

elseif puerto == 3
    set(handles.radiobutton3, 'Value',1);

else
    set(handles.radiobutton4, 'Value',1);

end

%Presentar mensaje en caso de error
catch
    uiwait(msgbox("Error with the RF switch. Unable to establish connection"...
        , "U9424B - Error", "warn", "modal"));
end

```

Esta sección de código configura el botón “check” de la interfaz de control. Su cometido es la de conectarse con el conmutador y comprobar qué puertos están conectados. De esta forma, se verifica si la configuración va correctamente al mostrar los puertos que el usuario anteriormente seleccionó. Además, contiene al igual que la sección 1 la instrucción de bloqueo “uiwait” con el objetivo de bloquear la configuración en marcha si la conexión con el conmutador es imposible. Una vez se haya corregido el programa, ya bien sea por mala conexión de cables, o mala lectura/carencia de los comandos y librerías de keysight necesarios, la pantalla se desbloqueará.

Sección de código 3. Carga de la configuración del conmutador

```
% --- Executes on button press in EXIT.
function EXIT_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to EXIT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global U9424B      %Tiene 4 campos: direccion, cantidad de puertos a conectar y que puertos conectar
global controlRFS %Variabe de control de configuración del Switch (0 ó 1)

%Control de errores
try

    %Comprobar conexión del equipo para evitar errores futuros al ir a medir
    Direccion=get(handles.direct,'String');
    U9424B_equipo=visa('agilent', Direccion);
    U9424B_equipo.InputBufferSize=8388608;
    U9424B_equipo.ByteOrder='littleEndian';
    fopen(U9424B_equipo);

    %Si hay seleccionado un puerto, forzarle
    unpuerto=get(handles.port,'Value')

    if unpuerto==1
        % Obtiene el puerto de la lista de índices
        val = get(handles.Listport, 'Value');

        %Fuerza conexión con el puerto a modo de prueba
        fprintf(U9424B_equipo,[':ROUT:CLOS ' , ' ' ,num2str(val)]);

        %Actualiza variable con selección
        U9424B.Port=1;
        U9424B.SelectedPorts=val;
    else
```

```

else
    %Forzar conexión con el puerto 1 para ver si todo está ok: defecto
    fprintf(U9424B_equipo,':ROUT:CLOS 1');
    %Actualiza variable con selección
    U9424B.Port=4;
    U9424B.SelectedPorts=1;

end

%Cerrar conexión con equipo
fclose(U9424B_equipo);
delete(U9424B_equipo);
clear U9424B_equipo;

%Dirección del equipo
U9424B.Direccion= get(handles.direct, 'String');

%La configuración del equipo es correcta
U9424B.Estado=1;
controlRFS=1;

% Use UIRESUME instead of delete because the OutputFcn needs
% to get the updated handles structure.Cuando se usa el uiwait es
% necesario hacerlo así.
uiresume(handles.U9424B_fig);
catch
    uiwait(msgbox("Error loading settings","U9424B - Error","warn","modal"));
    controlRFS=0;
end

```

La sección de código 3 corresponde al botón “Load” de salida de la interfaz. Establece conexión con el equipo para evitar errores y poder configurarlo. Una vez conectado, la función lee los distintos campos de selección “Device address” y “U9424B Settings” y llena los campos del struct de configuración U9424B. Esta sección también cuenta con instrucciones de bloqueo en caso de malfuncionamiento en el proceso de configuración.

