



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Ampliación sonda de medición del canal radio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Orts Fullana, Diego

Tutor/a: Rubio Arjona, Lorenzo

Cotutor/a: Rodrigo Peñarrocha, Vicent Miquel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación

### Ampliación sonda de medición del canal radio

#### Trabajo Fin de Grado

#### Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

AUTOR/A: Orts Fullana, Diego

Tutor/a: Rubio Arjona, Lorenzo

Cotutor/a: Rodrigo Peñarrocha, Vicent Miquel

## Resumen

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha ampliado y mejorado una sonda de canal existente realizada por Cristina Català Lahoz en su Trabajo Fin de Máster (TFM) [1] [2]. Se ha incorporado al sistema de medida un posicionador circular y dos conmutadores electromecánicos. Con esta ampliación se podrán realizar medidas con múltiples antenas en configuración MIMO, obteniendo información más detallada sobre el comportamiento del canal radio.

La nueva configuración de la sonda está formada por un analizador de redes vectorial y tres sistemas de posicionadores, así como el uso de dos conmutadores de 6 posiciones, uno en transmisión y otro en recepción. Las opciones entre los posicionadores son: un posicionador lineal X, uno rectangular XY y un posicionador circular. Las distintas configuraciones de media permiten extraer métricas de dispersión angular y en retardo, aplicando algoritmos de estimación de las características de amplitud, retardo y direcciones de llegada de las contribuciones multicamino que alcanzan al receptor

## Resum

En aquest Treball de Fi de Grau (TFG) s'ha ampliat i millorat una sonda de canal existent realitzada per Cristina Català Lahoz en el seu Treball de Fi de Màster (TFM) [1] [2]. S'ha incorporat al sistema de mesura un posicionador circular i dos commutadors electromecànics. Amb aquesta ampliació, es podran realitzar mesures amb múltiples antenes, en configuració MIMO, obtenint informació més detallada sobre el comportament del canal ràdio.

La nova configuració de la sonda està formada per un analitzador de xarxes vectorial i tres sistemes de posicionadors, així com l'ús de dos commutadors de 6 posicions, un en transmissió i l'altre en recepció. Les opcions entre els posicionadors són: un posicionador lineal X, un rectangular XY i un posicionador circular. Les diferents configuracions de mesura permeten extreure mètriques de dispersió angular i de retard, aplicant algorismes d'estimació de les característiques d'amplitud, retard i direccions d'arribada de les contribucions multicami que arriben al receptor.

## Abstract

In this undergraduate Final Degree Project (FDP), an existing channel sounder developed by Cristina Català Lahoz in her Master's Thesis (MT) [1] [2] has been expanded and improved. A circular positioner and two electromechanical switches have been incorporated into the measurement system. With this expansion, measurements can be carried out with multiple antennas in MIMO configuration, providing more detailed information about the behavior of the radio channel.

The new configuration of the sounder consists of a vector network analyzer and three positioner systems, along with the use of two 6-position switches, one for transmission and the other for reception. The options for the positioners include a linear X positioner, a rectangular XY positioner, and a circular positioner. The different measurement configurations allow for the extraction of metrics related to angular and delay dispersion, applying algorithms to estimate the amplitude, delay, and arrival directions of the multipath contributions reaching the receiver.



## Índice

1.	Introducción y objetivos.....	1
1.1	Introducción .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Organización de la memoria .....	1
2.	Metodología .....	3
3.	Aspectos básicos relacionados con la caracterización del canal Radio.....	5
3.1	Introducción .....	5
3.2	Efecto multicamino .....	5
3.3	Parámetros de caracterización del canal radio .....	6
3.3.1	Parámetros de dispersión temporal.....	6
3.3.2	Parámetros de dispersión frecuencial .....	7
3.4	Caracterización del canal radio .....	9
3.4.1	Funciones de Bello .....	10
3.4.2	Técnicas de medida en el dominio del tiempo .....	10
3.4.3	Medida en el dominio de la frecuencia .....	12
4.	Instrumentos y programas .....	14
4.1	Entorno de trabajo .....	14
4.1.1	Introducción .....	14
4.1.2	Analizador de redes .....	14
4.1.3	Posicionadores lineales .....	14
4.1.4	Posicionador circular .....	15
4.1.5	Controladores y conmutadores.....	17
4.1.6	AppDesigner.....	18
5.	Desarrollo y resultados del trabajo.....	26
5.1	Introducción .....	26
5.2	Equipamiento .....	26
5.3	Manual de conexiones del equipamiento para el usuario.....	27
5.3.1	Conexión del ordenador de control con el analizador de redes.....	27
5.3.2	Conexión del ordenador de control con los posicionadores lineales.....	29
5.3.3	Conexión del ordenador de control con los conmutadores .....	31
5.3.4	Conexión del ordenador de control con el posicionador Circular .....	33
5.4	Manual de conexiones del equipamiento mediante programación en Matlab.....	34
5.4.1	Conexión con el analizador de redes por código en Matlab.....	34
5.4.2	Conexión con los posicionadores lineales mediante código en Matlab .....	35



5.4.3	Conexión con los conmutadores mediante código en Matlab .....	35
5.4.4	Conexión con el posicionador Circular mediante código en Matlab.....	36
5.5	Interfaz gráfica .....	37
5.5.1	Diagrama de flujo.....	37
5.5.2	Ventana de configuración del ARV .....	39
5.5.3	Ventana de los posicionadores .....	42
5.6	Diseño de la interfaz del posicionador circular .....	44
5.7	Incorporación del posicionador circular en la sonda.....	47
5.8	Diseño de la interfaz para control de los conmutadores.....	49
5.9	Incorporación de los conmutadores en la sonda.....	50
5.10	Medidas .....	51
5.10.1	Procesado de medidas .....	53
6.	Valoración económica.....	59
7.	Conclusiones y propuestas de trabajo futuro.....	60
7.1	Conclusiones .....	60
7.2	Propuestas de trabajo futuro .....	60
8.	Referencias .....	61



## Índice de figuras

Figura 1: Desarrollo de las tareas.....	4
Figura 2: Efecto multicamino.....	5
Figura 3: Retardo de señales en recepción.....	6
Figura 4: Funciones de Bello o de transferencia. Fuente [1].....	10
Figura 5: Esquema de caracterización por impulsos.....	11
Figura 6: Esquema por espectro ensanchado. Fuente [2].....	11
Figura 7: Analizador de redes Keysight N5227A. Fuente: [6].....	14
Figura 8: Posicionador de un eje. Fuente: [2]. ....	15
Figura 9: Posicionador en dos ejes. Fuente: [2]. ....	15
Figura 10: MD-2 y módulo C4 Fuente: [2]. ....	15
Figura 11: Esquema de conexiones del posicionador circular.....	16
Figura 12: Variables modificables de la mesa de rotación. Fuente: [7]. ....	16
Figura 13: Modelo de controlador USB-6501. Fuente: [8]. ....	17
Figura 14: Modelo de controlador RF U7106F. Fuente: [9]. ....	18
Figura 15: Abrir AppDesigner.....	18
Figura 16: Pantalla de selección aplicación en blanco.....	19
Figura 17: Ventana principal AppDesigner.....	19
Figura 18: Ejemplo botón en Component Browser.....	20
Figura 19: Bloque Containers.....	20
Figura 20: Bloque común.....	21
Figura 21: Bloque figure tools.....	21
Figura 22: Instrumentation.....	22
Figura 23: Ventana Code View.....	22
Figura 24. Estructura de código.....	23
Figura 25: Ejemplo propiedad.....	24
Figura 26: Función Calculo.....	24
Figura 27: Añadir función StartupFcn.....	25
Figura 28: Ejemplo Callback.....	25
Figura 29: Esquema del montaje de los instrumentos.....	26
Figura 30: Configuración LAN del ordenador.....	28
Figura 31: Configuración LAN del analizador.....	28
Figura 32: Conexión <i>Keysight connection expert</i> .....	29
Figura 33: Conexión posicionadores lineales. Fuente [2]. ....	29
Figura 34: Panel principal <i>MD2xp Control System</i> .....	30



Figura 35: Ventana <i>Parameters</i> . .....	30
Figura 36: MD2 <i>Connection</i> . .....	31
Figura 37: Esquema de conexiones de los conmutadores. ....	31
Figura 38: Ventana emergente <i>NI Device Monitor</i> . ....	32
Figura 39: Panel de control <i>NI Device Monitor</i> . ....	32
Figura 40: Esquema de conexiones físicas del USB-6501.....	33
Figura 41: Direcciones mesa de rotación. ....	33
Figura 42: Ventana <i>Instrument control</i> . ....	34
Figura 43: El código de conexión con el analizador. ....	34
Figura 44: Código de conexión con los posicionadores lineales.....	35
Figura 45: Código de conexión al controlador.....	35
Figura 46: Conexión UDP mediante Matlab.....	36
Figura 47: Diagrama de flujo de la aplicación. ....	37
Figura 48: Error de conexión con el analizador. ....	38
Figura 49: Error de conexión con los posicionadores. ....	39
Figura 50: Ventana de configuración ARV.....	39
Figura 51: Modelos de frecuencias. ....	40
Figura 52: Puertos de los posicionadores.....	40
Figura 53: Despliegue de ancho de banda.....	41
Figura 54: Pestaña “Escala” . ....	41
Figura 55: Pestaña “Referencia” . ....	42
Figura 56: Ventana selección posicionadores. ....	42
Figura 57: Ventana de configuración de los posicionadores.....	43
Figura 58: Ventana circular.....	44
Figura 59: Diseño de la interfaz de la aplicación del posicionador circular. ....	44
Figura 60: Comando UDP de envío de estado. Fuente: [7].....	45
Figura 61: Mensaje de error del eje.....	45
Figura 62: Mensaje de error de movimiento. ....	45
Figura 63: Mensaje de error de velocidad. ....	46
Figura 64: Mensaje de error de aceleración. ....	46
Figura 65: Mensaje de error de posición. ....	46
Figura 66: Comando UDP envío de parámetros. Fuente: [7].....	46
Figura 67: Diseño de la interfaz para el posicionador circular en la sonda.....	47
Figura 68: Selección posicionador transmisor. ....	48
Figura 69: Selección posicionador receptor habiendo tomado el circular como transmisor.....	48
Figura 70: Propuesta de selección posicionador X y circular. ....	49



Figura 71: Interfaz gráfica aplicación de los conmutadores.....	49
Figura 72: Archivo .txt del contador. ....	51
Figura 73: Fotografía antena Rx.....	52
Figura 74: Fotografía antenas Tx. ....	52
Figura 75: Representación del PDP para la Antena 1. ....	53
Figura 76: Representación del PDP para la Antena 2. ....	54
Figura 77: Medianas del Delay Spread para la antena 1 con un TH de 30 dB.....	54
Figura 78: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 1 con un TH de 30 dB	55
Figura 79: Medianas del Delay Spread para la antena 2 con un TH de 30 dB.....	55
Figura 80: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 2 con un TH de 30 dB.	56
Figura 81: Medianas del Delay Spread para la antena 1 con un TH de 20 dB.....	56
Figura 82: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 1 con un TH de 20 dB.	57
Figura 83: Medianas del Delay Spread para la antena 2 con un TH de 20 dB.....	57
Figura 84: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 2 con un TH de 20 dB.	58





## Acrónimos

<b>APL</b>	<i>Antenna Propagation Lab.</i> 1, 51.
<b>ARV</b>	Analizador de redes vectorial. 1, 27, 39, 51.
<b>DFT</b>	<i>Discrete Fourier Transform.</i> 10.
<b>IFT</b>	<i>Inverse Fourier Transform.</i> 10.
<b>iTEAM</b>	Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia. 1, 51.
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol.</i> 15, 17, 27, 28, 33, 34, 36.
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network.</i> 27.
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output.</i> 14, 38, 42.
<b>MISO</b>	<i>Multiple Input Single Output.</i> 14, 38, 42.
<b>NF</b>	<i>Noise Figure.</i> 41.
<b>PDP</b>	<i>Power Delay Profile.</i> 9, 10, 13, 53, 54.
<b>SCPI</b>	<i>Standard Commands for Programmable Instruments.</i> 3, 27, 29.
<b>SIMO</b>	<i>Single Input Multiple Output.</i> 14, 38, 42.
<b>SISO</b>	<i>Single Input Single Output.</i> 14, 38, 42.
<b>TCP</b>	<i>Transmission Control Protocol.</i> 33.
<b>TFG</b>	Trabajo Fin de Grado. 1, 60.
<b>TFM</b>	Trabajo Fin de Máster. 38, 43, 47, 60.
<b>TTL</b>	<i>Transistor Transistor Logic</i> 17, 27, 35.
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol.</i> 15, 16, 17, 33, 34, 36, 45, 46, 48.
<b>ULA</b>	<i>Uniform Lineal Array.</i> 53, 54.
<b>UPV</b>	<i>Universitat Politècnica de València.</i> 1.
<b>URA</b>	<i>Uniform Rectangular Array.</i> 53.
<b>VISA</b>	<i>Virtual Instrument Software Architecture.</i> 34, 35.

## 1. Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Con el creciente desarrollo de tecnologías móviles e inalámbricas, la necesidad de caracterizar el canal radio se ha vuelto cada vez más crítica para el éxito de los sistemas de telecomunicaciones. La propagación de la señal en el canal radio se ve afectada por diversos factores, como la presencia de obstáculos, el movimiento del transmisor o receptor y las condiciones atmosféricas lo que dificulta la transmisión de información entre dispositivos.

El conocimiento preciso del comportamiento del canal radio es esencial para el desarrollo y optimización de los sistemas de telecomunicaciones. Las sondas de canal permiten extraer los parámetros que caracterizan el comportamiento del canal radio. En este sentido, este trabajo consiste en ampliar el diseño de una sonda de canal para caracterizar el canal radio utilizando una aplicación que controla diferentes instrumentos y un analizador de redes vectorial (ARV). La sonda de canal es una herramienta de medición que se utiliza para obtener información sobre el canal radio. A la sonda de partida se le ha añadido un posicionador circular y dos conmutadores de RF que dirigirán la señal a distintas antenas para realizar mediciones en diferentes puntos del espacio y en diferentes direcciones.

El resultado de este trabajo es una aplicación diseñada en *AppDesigner* de Matlab que permite definir las medidas con la sonda de canal y, por tanto, controlar tanto el analizador de redes como los posicionadores y conmutadores. Con esta herramienta se espera caracterizar el canal radio de forma más precisa y eficiente, lo que permitirá mejorar el rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos.

### 1.2 Objetivos

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado (TFG) son ampliar y mejorar el diseño de una sonda de canal que permita caracterizar el canal por medio de una aplicación que controle distintos instrumentos y el equipamiento disponible en el *Antenna Propagation Lab* (APL) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la *Universitat Politècnica de València* (UPV).

La aplicación consiste en añadir a la sonda anterior un posicionador circular y dos conmutadores de RF de 1 a 6 posiciones, logrando así tener una aplicación diseñada en *AppDesigner* de Matlab que permite medir el canal radio escogiendo entre distintas estructuras y agrupaciones de antenas. Finalmente, se han tomado medidas con esta nueva versión y extraído los parámetros necesarios para demostrar el correcto funcionamiento de la sonda.

### 1.3 Organización de la memoria

La memoria está estructurada de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se dedica a presentar un resumen detallado de la distribución del trabajo y las tareas realizadas a lo largo del tiempo proporcionando una visión general de la evolución del proyecto.

En el Capítulo 3 se realiza un repaso de los aspectos teóricos básicos necesarios para comprender la caracterización del canal radio abordándolo desde las perspectivas del dominio del tiempo y la frecuencia.

En el Capítulo 4 se describen los instrumentos utilizados en el desarrollo del trabajo así como las conexiones entre ellos. Además, se ofrece una breve introducción al entorno de trabajo del programa *AppDesigner* donde se diseñó la aplicación y sus ampliaciones.



En el Capítulo 5 se centra en el desglose del trabajo realizado incluyendo una explicación concisa sobre la conexión con los instrumentos, el desarrollo e implementación de la interfaz gráfica en Matlab y la presentación de las medidas tomadas junto con sus respectivas explicaciones.

En el Capítulo 6 se presenta el análisis del coste económico de la ampliación de la sonda, detallando el coste de cada instrumento utilizado y proporcionando una comparación con el costo total de la sonda anterior.

Por último, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado junto con las propuestas de mejora para futuros proyectos y desarrollos.

## 2. Metodología

El desarrollo de este proyecto se ha estructurado en diferentes fases para lograr un diseño y funcionamiento adecuados. En primer lugar, se llevó a cabo una fase inicial centrada en el estudio teórico de la caracterización del canal radio y el análisis de la sonda existente para comprender su funcionamiento. Durante este período, se realizó una exhaustiva revisión del material teórico disponible, incluyendo el TFG de Cristina Catalá Lahoz [2] y su TFM [1], donde se detallaba el desarrollo de la aplicación. Además, se dedicó tiempo al estudio y aprendizaje de *AppDesigner*, un entorno de desarrollo de Matlab, y se desarrollaron aplicaciones simples como pruebas preliminares.

Posteriormente se avanzó a una segunda fase enfocada en el desarrollo de una aplicación en Matlab para el control del posicionador circular, abordando todos sus parámetros. Aunque surgieron algunos problemas y hubo un tiempo en el que la mesa circular no estuvo disponible debido a reparaciones y ampliaciones se logró desarrollar con éxito esta aplicación. A falta de incorporar la capacidad de control del analizador y su integración en la sonda.

La siguiente fase consistió en estudiar y comprender el uso del analizador de redes vectorial. Durante este proceso se adquirieron conocimientos sobre las características esenciales de control del analizador y su comunicación con el ordenador a través de comandos SCPI (del inglés, *Standard Commands for Programmable Instruments*).

Una vez se recibió el controlador USB-6501 se llevó a cabo un estudio e investigación sobre el control de dicho dispositivo mediante código en Matlab, además del desarrollo de una interfaz gráfica que permitiera el control de los conmutadores utilizando este dispositivo.

Después de diseñar exitosamente la interfaz, se procedió a la incorporación de esta aplicación en la sonda ya existente. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo del código implementado en la aplicación de la sonda con el objetivo de lograr la integración de los conmutadores. Esta tarea llevó más tiempo y presentó algunos problemas debido a que el código no estaba orientado a objetos y resultaba difícil de dividir y comprender. Sin embargo, se logró incorporar con éxito el control de los conmutadores incluyendo un contador para medir la cantidad de veces que se realizaba la conmutación.

La última fase consistía en la incorporación de la mesa circular y la toma de medidas. Sin embargo, tras analizar el código de los posicionadores lineal se concluyó que para incorporar la mesa circular sería necesario reestructurar completamente el código existente. Por lo que la opción óptima sería diseñar una nueva aplicación desde cero. Esta tarea, por lo tanto, se plantea como trabajo futuro.

Finalmente se llevó a cabo un repaso exhaustivo del código añadiendo pequeños detalles, revisando y corrigiendo errores existentes para, posteriormente, tomar con éxito medidas y procesarlas para la extracción de los parámetros del canal radio.

Las tareas que han marcado este trabajo aparecen indicadas en el siguiente diagrama temporal.

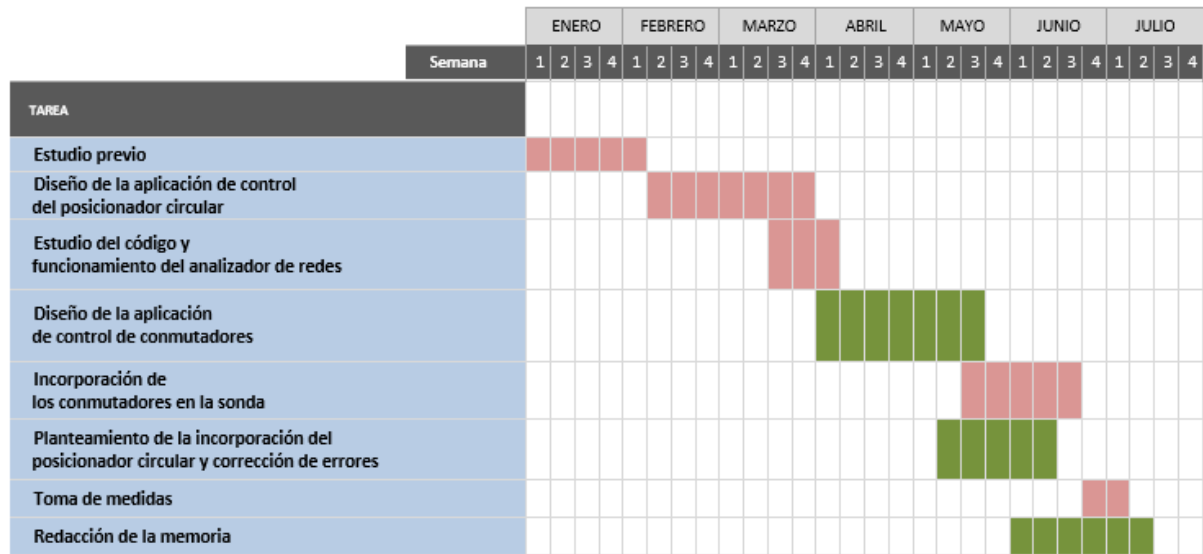


Figura 1: Desarrollo de las tareas.

### 3. Aspectos básicos relacionados con la caracterización del canal Radio

#### 3.1 Introducción

La teoría del electromagnetismo formulada inicialmente por el físico y matemático Michael Faraday en 1867 y posteriormente avanzada por James Clerk Maxwell en 1831 con sus ecuaciones conocidas como “Ecuaciones de Maxwell” sentaron las bases para el desarrollo de las tecnologías con bases electromagnéticas. Estas ecuaciones estudian y definen el comportamiento del campo eléctrico y magnético lo cual resulta fundamental para los avances y estudios en el campo de las telecomunicaciones.

El canal por el que se propagan las señales electromagnéticas es un medio complejo que presenta una gran variabilidad tanto en el tiempo como en la frecuencia. Por lo tanto, resulta crucial extraer los parámetros que lo caracterizan adecuadamente para implementar mecanismos que compensen sus efectos y, de esta manera, optimizar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones.

En este capítulo se llevará a cabo un repaso y estudio de los aspectos más importantes en la caracterización del canal radio y del método usado en este trabajo para ello.

Se realizará un repaso de los parámetros más importantes que caracterizan el canal radio en tiempo y frecuencia así como las técnicas de medidas existentes y utilizadas para el desarrollo de este trabajo.

#### 3.2 Efecto multicamino

La presencia de edificios, árboles y objetos variados va a producir que en nuestra antena receptora, no solo llegue la señal directa, si no infinitas contribuciones producidas por las reflexiones y refracciones de la señal en su recorrido.

Para el desarrollo de este trabajo se han llevado a cabo medidas del canal en un entorno de espacio cerrado con múltiples objetos, como podrían ser sillas, mesas, dispositivos y diversos materiales metálicos.

Estas contribuciones que llegan de forma simultánea al receptor es lo que produce el efecto multicamino y conllevará que nuestro canal presente una distribución gaussiana en fase y cuadratura.

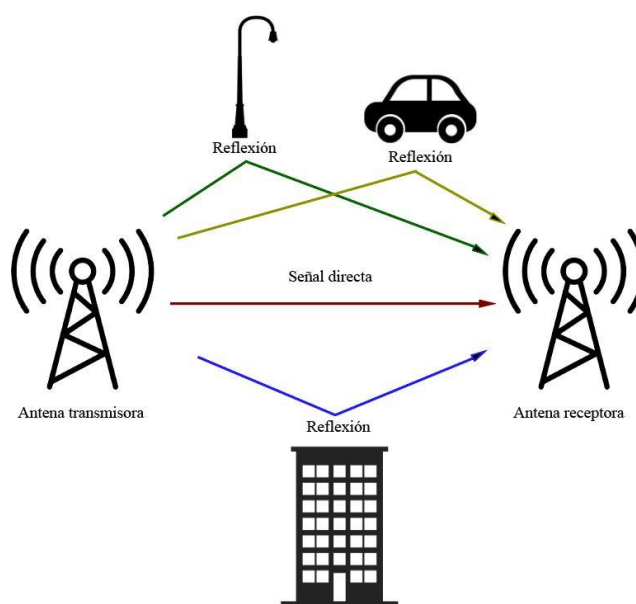


Figura 2: Efecto multicamino.

La llegada de contribuciones con distinto retardo, amplitud y fase producirá que nuestra señal presente distorsiones tanto temporales como en frecuencia dando paso a ISI (interferencias entre símbolos) y, posteriormente, errores en la comunicación.

Teniendo en cuenta el carácter variable del canal en el tiempo, desplazar el terminal conllevará dos efectos. Un desvanecimiento selectivo en el tiempo, también conocido como “*fading*”, y el denominado “Efecto Doppler” producido por la dispersión selectiva en frecuencia.

A continuación se llevará un repaso de los parámetros que definen la dispersión del canal separándolos en el dominio del tiempo y en frecuencia.

### 3.3 Parámetros de caracterización del canal radio

#### 3.3.1 Parámetros de dispersión temporal

##### 3.3.1.1 Mean Excess Delay

Se define  $\tau$  como el retardo que tiene una contribución de la señal en recepción [2]. En la Figura 3 se puede observar un ejemplo de la señal enviada en un tiempo  $t$  y la recepción se la señal en  $t + \tau$  y dos contribuciones retardadas en  $t + \tau_1$  y  $t + \tau_2$  con niveles en potencia distintos.

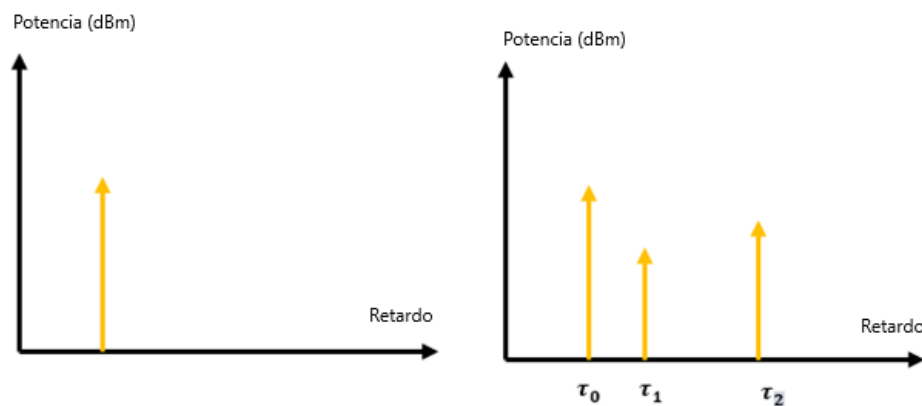


Figura 3: Retardo de señales en recepción.

Podemos tomar  $\bar{\tau}$  como el retardo medio de las contribuciones y expresarlo matemáticamente como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (1)$$

Donde  $P(\tau_k)$  es el nivel de potencia de la señal en dicho retardo. Esta expresión nos permite conocer el retardo medio de las contribuciones que llegan a nuestra antena receptora y, de esta manera, poder calcular el retraso de propagación.

##### 3.3.1.2 RMS (Root Mean Square) Delay Spread

Se define  $\sigma_\tau$  como el cálculo de la raíz cuadrática media de la dispersión del retardo en nuestra señal. Esto nos va a permitir calcular el correcto ancho de banda de coherencia lo cual llevará a un nivel de interferencia entre símbolos adecuado para la recepción de nuestra señal digital [2]. Dicho parámetro se puede calcular a partir del retardo medio con la expresión:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau}} \quad (2)$$

### 3.3.1.3 Ancho de banda de coherencia

El ancho de banda de coherencia se definiría como el rango de frecuencias en el que el canal podría considerarse plano [2], es decir, sin sufrir una variación considerable en su atenuación y desplazamiento en fase.

Existen dos casos a tener en cuenta: En el primero de ellos éste es mucho mayor que el ancho de banda de la señal a transmitir, lo que produciría un desvanecimiento selectivo en frecuencia. Y el segundo caso en el que dicho ancho es menor al ancho de banda de la señal, aquí produciría “*flat fading*” o desvanecimiento plano [2].

El ancho de banda de coherencia tiene relación directa con el RMS, se definiría como el ancho de banda sobre el cual la función de correlación de frecuencia está por encima del 0,9 [2], cuya expresión sería:

$$B_c = \frac{1}{\alpha \sigma_{\tau}} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  sería la constante de proporcionalidad con un valor típico de 50 para una correlación de 0.9 y  $2\pi$  para una correlación de 0.5 [2].

### 3.3.2 Parámetros de dispersión frecuencial

#### 3.3.2.1 Efecto Doppler

En los sistemas de comunicaciones móviles y por satélite muchos de los terminales que intervienen en la comunicación precisan de tener velocidades altas, lo que puede llevar a la influencia del efecto Doppler en las ondas electromagnéticas.

El efecto Doppler se define como los cambios de frecuencias causados en una onda por el movimiento relativo de la fuente respecto a un observador [3]. Estos cambios de frecuencias incrementan con la velocidad del terminal y, en sistemas de telecomunicaciones, esto puede dificultar la sintonización de la señal, sobre todo en modelos a pequeña escala.

El parámetro que nos va a permitir analizar el efecto Doppler en señales multitrayecto se denomina “Dispersión Doppler”, el cual describe el ensanchamiento en frecuencias producido en nuestra señal.

Si se transmite una señal sinusoidal en una frecuencia central  $f_c$ , en recepción, dicha señal en frecuencia presentará una variación entre valores dentro del rango  $(f_c + f_d)$  y  $(f_c - f_d)$ , siendo  $f_d$  el valor máximo de frecuencia en desplazamiento Doppler [4]. Por lo tanto, el ancho de banda del efecto Doppler se podría calcular a partir de la expresión:

$$B_{Doppler} = \sqrt{\frac{\int_{-f_d}^{f_d} (\vartheta - \bar{\vartheta})^2 P_s(\vartheta) d\vartheta}{\int_{-f_d}^{f_d} P_s(\vartheta) d\vartheta}} \quad (4)$$



Donde  $\vartheta$  es la variable de desplazamiento Doppler y  $P_s(\vartheta)$  se define como la densidad de potencia media siendo  $\bar{\vartheta}$  el valor medio calculado como:

$$\bar{\vartheta} = \frac{\int_{-f_d}^{f_d} \vartheta P_s(\vartheta) d\vartheta}{\int_{-f_d}^{f_d} P_s(\vartheta) d\vartheta} \quad (5)$$

Y  $f_d$  se puede calcular mediante la expresión:

$$f_d = \frac{vf_c}{c_0} \quad (6)$$

Donde  $v$  es la velocidad del terminal,  $c_0$  la velocidad de la luz en el vacío y  $f_c$  la frecuencia central con la que se transmite la señal, [2].

Se deduce pues, que a mayor velocidad más dispersión en frecuencia encontrará nuestra señal y más efecto Doppler producirá.

### 3.3.2.2 *Tiempo de coherencia*

Similar al ancho de banda de coherencia, el tiempo de coherencia se define como el tiempo en el cual la fase de nuestra señal puede considerarse constante y, por lo tanto, ser una señal “coherente”.

Para el efecto multicamino, una señal coherente va a ser aquella cuyo tiempo de coherencia será mayor que la duración de la señal. En este caso, se producirá desvanecimiento lento y selectividad en frecuencia y, en los casos en los que la duración de la señal sea mayor que el tiempo de coherencia, tendremos desvanecimiento rápido y dispersión temporal.

El tiempo de coherencia se calculará a partir de la dispersión *Doppler* ( $f_d$ ) y tendrá la expresión siguiente:

$$T_c \approx \frac{1}{f_d} \quad (7)$$

Y en el caso particular de un canal con estadística Rayleigh su expresión matemática será:

$$T_c \approx \sqrt{\frac{9}{16\pi f_d^2}} \quad (8)$$

### 3.4 Caracterización del canal radio

En este apartado se explicarán las distintas técnicas existentes para la caracterización del canal radio, separando el dominio del tiempo del dominio de la frecuencia. En primer lugar se explicarán las ecuaciones necesarias para la parametrización del canal radio conocidas como “Ecuaciones de Bello”.

En segundo lugar se explicará las técnicas de caracterización en el dominio del tiempo por impulsos y espectro ensanchado, mientras que la técnica utilizada para el desarrollo de este trabajo consistirá, dentro del dominio de la frecuencia, en la medida del parámetro PDP (Perfil de Dispersión Temporal o, del inglés, *Power delay profile*).

El comportamiento variable del canal radio puede resultar aleatorio para nuestro estudio. No obstante, este puede ser tratado como un filtro lineal al que le llega nuestra señal, la modifica y es transmitida por su salida.

Si tratamos a nuestra señal como una señal equivalente en paso bajo podemos expresarla como:

$$X(t) = \Re\{z(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (9)$$

Donde  $x(t)$  es la señal transmitida,  $z(t)$  es la envolvente compleja en paso bajo y  $f_c$  la frecuencia central con la que es transmitida [5].

Físicamente podemos expresar el canal como un filtro lineal cuya respuesta compleja en paso bajo donde  $h(t, \tau)$  representa la respuesta del canal en un instante  $t$  con un impulso generado con un retardo  $\tau$ .

La señal en su salida podría calcularse como el resultado de pasar dicha señal por el filtro que representa el canal cuya respuesta se definiría como:

$$w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t - \tau)h(t, \tau) d\tau \quad (10)$$

A partir de esta expresión podremos estudiar la caracterización del canal con las funciones de transferencia.

### 3.4.1 Funciones de Bello

Acudimos a unas funciones de transferencia que nos permitan caracterizar el canal radio con efecto multitrayecto y variable mediante transformaciones de Fourier. Estas funciones son las conocidas como “Ecuaciones de Bello” expresadas en la Figura 4.

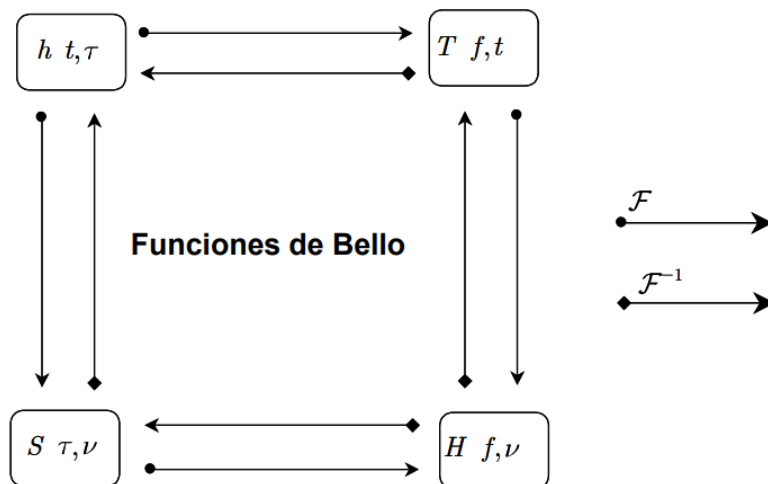


Figura 4: Funciones de Bello o de transferencia. Fuente [1].

Este diagrama nos permite relacionar mediante el uso de transformadas de Fourier directas ( $DFT$ ,  $\mathcal{F}$ ) e indirectas ( $IFT$ ,  $\mathcal{F}^{-1}$ ) las 4 funciones del sistema formadas por:

1.  $h(t, \tau)$ : La función de respuesta impulsiva del canal variable en el tiempo. Siendo el equivalente complejo de la respuesta del canal.
2.  $T(f, t)$ : La función de transferencia variable en el tiempo o cronovariante. La cual relaciona la señal temporal a la salida del canal con el espectro de la señal a la entrada de este.
3.  $S(\tau, \nu)$ : La función de desplazamiento Doppler-retardo. Nos proporciona la variación de la potencia en función de la dispersión Doppler.
4.  $H(f, \nu)$ : La función de transferencia de frecuencia-Desplazamiento Doppler. Relaciona el espectro de la señal de salida con el espectro de la señal de entrada.

La función  $T(f, t)$  desempeña un papel crucial en la caracterización del canal radio pues la información extraída de ésta nos permitirá calcular el PDP [2].

### 3.4.2 Técnicas de medida en el dominio del tiempo

#### 3.4.2.1 Caracterización por impulsos

La medida de caracterización del canal radio en el tiempo por impulsos consiste en la transmisión de una serie de impulsos y medir, en recepción, los ecos producidos por este para así poder estimar la respuesta impulsional del canal [2].

El envío de una serie de pulsos se puede realizar mediante un instrumento generador de pulsos convencional mientras que la recepción de la respuesta se puede medir con un osciloscopio.

El primer pulso enviado debe ser recibido con una traza lo suficientemente prolongada para permitir la medición del retardo máximo de propagación y, de este modo, calcular el resto de ecos. Esta técnica de medida suele precisar de una antena adicional que sirva a modo de disparo o “trigger” para detectar el retardo máximo y así medir la primera contribución de la señal, indicando cuándo se deben de empezar el resto de medidas. En caso contrario se puede utilizar un procesador externo para poder sincronizar las tramas y promediarlas dando paso al cálculo de la respuesta impulsional del canal [2].

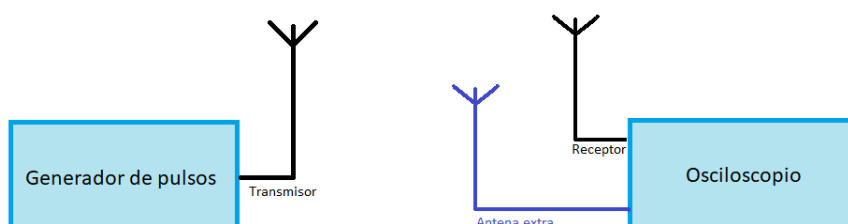


Figura 5: Esquema de caracterización por impulsos.

### 3.4.2.2 Caracterización por espectro ensanchado

La otra técnica para la caracterización del canal en el dominio del tiempo consiste en transmitir una secuencia de señal pseudoaleatoria conocida para, en recepción, correlar dicha secuencia con la señal total recibida. El resultado de correlar ambas señales proporcionará la respuesta impulsional del canal.

Dicha secuencia debe de estar compuesta por una secuencia de  $N$  símbolos a una determinada tasa de chip (Definiendo un chip como un salto en frecuencia). En recepción, la secuencia es procesada por el correlador proporcionando cada valor del retardo introducido por el canal.

Hemos de tener en cuenta que la resolución de esta respuesta impulsional es inversamente proporcional a la tasa de chip utilizada. Por lo que a mayor tasa de chip, menor será resolución temporal, [2].

El máximo retardo detectable sin solapamiento (o *aliasing*) será  $N$  veces el tiempo de chip [2]. Esto nos resulta importante a la hora de escoger la longitud de la secuencia de pseudo-ruido, pues para los canales más dispersivos se exigirá una secuencia de mayor longitud para obtener la resolución temporal adecuada.

Para este tipo de estimaciones y poder correlar la señal correctamente se precisará de un procesador de señal externo, como por ejemplo, el programa de Matlab.

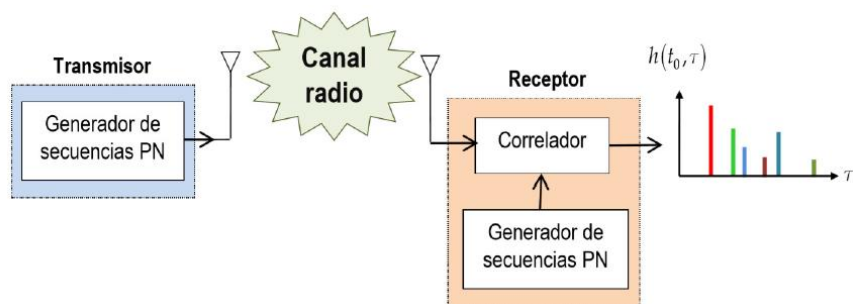


Figura 6: Esquema por espectro ensanchado. Fuente [2].

### 3.4.3 Medida en el dominio de la frecuencia

#### 3.4.3.1 Cálculo del PDP (Power Delay Profile)

El método utilizado en este trabajo para la estimación del canal en el dominio de la frecuencia es la extracción del parámetro PDP. Esta es una medida estadística que nos permite observar las componentes retardadas que llegan a nuestro receptor en términos de la cantidad de energía recibida.

Para obtener el PDP, en nuestro caso, lo calcularemos a partir del parámetro  $S_{21}$  que podemos obtener del analizador de redes. Dicho parámetro se calcula tratando el canal radio como una red de dos accesos donde  $a_1$  representaría la onda saliente del transmisor y  $b_2$  representaría la onda de tensión entrante en el receptor. Por tanto, el parámetro se calcularía como:

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (11)$$

Para calcular el PDP de forma matemática lo estimamos a partir de la función de autocorrelación  $h(t, \tau)$  para un instante de tiempo determinado.

$$PDP(\tau) \cong E[|h(t, \tau)|^2] \quad (12)$$

Donde  $E[\cdot]$  es el cálculo de la esperanza matemática de una variable aleatoria [2].

La función de transferencia cronovariante es aquella que establece la relación entre el espectro de la señal en la entrada del canal y el espectro de la señal en la salida, es decir,  $T(f, t)$ , Figura 4. En el caso de calcularlo a partir de un analizador de redes en un instante  $t_0$  y para una ventana rectangular, se puede representar la respuesta en frecuencia de la banda medida en recepción como:

$$Y(f) \cong kT(f, t) * H_{VENTANA}(f) * X(f) \quad (13)$$

Donde  $Y(f)$  representa la respuesta en frecuencia de la señal medida en recepción,  $X(f)$  en transmisión y  $H_{VENTANA}(f)$  la ventana rectangular que añade el analizador. De este modo se puede relacionar el parámetro  $S_{21}$  en frecuencia con la función de transferencia cronovariante como:

$$S_{21}(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \propto T(f, t_0) \quad (14)$$

Recordando la Figura 4, donde se puede relacionar las funciones de transferencia mediante sus transformadas de Fourier inversas, es sencillo llegar a la conclusión que:

$$h(t, \tau) = F^{-1}(T(f, t_0)) \propto F^{-1}(S_{21}(f)) \quad (15)$$

$$PDP(\tau) \cong E[|h(t, \tau)|^2] \quad (16)$$

De esta forma logramos medir de forma matemática el PDP a partir de los valores que podemos obtener del analizador de redes.

Hay que tener en cuenta que en el analizador de redes se realizan una serie de medidas del PDP individuales a lo largo de una serie de frecuencias. Teniendo en cuenta la frecuencia central y su ancho de banda como se visualiza en la ecuación siguiente.

$$f_0 = \frac{f_2 - f_1}{2} \quad (17)$$

Donde  $f_0$  representa la frecuencia central y  $(f_2 - f_1)$  su ancho de banda.

Cuando dicho ancho de banda sea mayor, la resolución temporal mejorará, y cuándo este disminuya, la resolución temporal empeorará. Esto producirá que los distintos ecos se solapen entre sí y, por lo tanto, debemos de promediar el PDP con los calculados en cada una de las posiciones individuales.

$$PDP(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N PDP(t_i, \tau) \quad (18)$$

Finalmente podemos realizar la transformada inversa de Fourier del parámetro  $S_{21}$  calculado mediante el programa Matlab en nuestro ordenador y visualizar la medida del parámetro PDP obtenida.

## 4. Instrumentos y programas

### 4.1 Entorno de trabajo

#### 4.1.1 Introducción

En este capítulo se proporcionará una explicación detallada sobre los diversos instrumentos y materiales utilizados en el trabajo así como el programa empleado para el diseño de la interfaz gráfica. Se explicará el uso de los posicionadores lineales y el circular así como los controladores y conmutadores necesarios aportando un breve esquema de las conexiones entre ellos. Además, se presentará una breve introducción al programa *Appdesigner* utilizado para el diseño y control de la aplicación.

#### 4.1.2 Analizador de redes

El equipo utilizado para la caracterización del canal radio es un analizador de redes vectorial *Keysight N5227A*. Éste es una potente herramienta de medición diseñada para caracterizar y analizar las propiedades eléctricas de dispositivos y componentes de alta frecuencia. Con una amplia cobertura de frecuencia desde los 10 MHz hasta 67 GHz.

Este analizador de redes es capaz de realizar mediciones de parámetros S, incluyendo S11, S21, S12 y S22 así como parámetros de potencia como: B, R2, a1, a2, b1 y b2 con alta precisión y velocidad. En este caso el analizador dispone de dos puertos como podemos comprobar en la Figura 7.



Figura 7: Analizador de redes Keysight N5227A. Fuente: [6].

#### 4.1.3 Posicionadores lineales

El sistema de posicionadores lineales consta de dos dispositivos: un posicionador lineal ULA (del inglés, *Uniform Linear Array*) de 150 cm para el movimiento en el eje X. Y otro posicionador rectangular URA (del inglés, *Uniform Rectangular Array*) con movilidad en los ejes XY capaz de cubrir una superficie de hasta 5800 cm<sup>2</sup>. Ambos posicionadores son suministrados por la empresa *Arrick Robotics* y los podemos visualizar en la Figura 8 y Figura 9.

El movimiento de estos posicionadores nos permite realizar un barrido en el plano lo que nos permite cubrir un mayor número de posiciones y realizar hasta 4 tipos de mediciones diferentes. Dependiendo de en cuál de los dos posicionadores utilicemos se harán medidas SISO, MISO, SIMO o MIMO.



Figura 8: Posicionador de un eje. Fuente: [2].

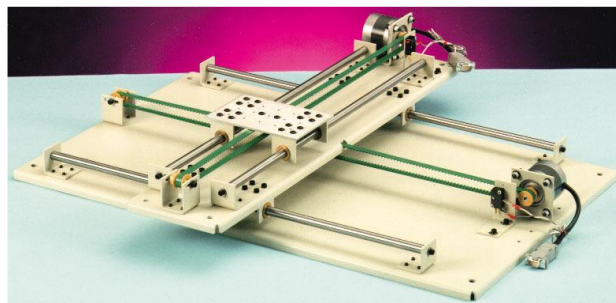


Figura 9: Posicionador en dos ejes. Fuente: [2].

Cada uno de estos posicionadores está equipado con motores e interruptores y ambos están conectados a dos controladores llamados *MD-2 Dual Stepper Motor System* (Figura 10) mediante puertos de 9 pines.

Para facilitar el control simultáneo de ambos posicionadores desde el ordenador dichos controladores se han conectado a un módulo C4 el cual permite el control de hasta dos MD-2, lo que nos brinda un total de 3 motores, uno en el lineal y dos en el rectangular, y 2 interruptores controlables a la par por el ordenador.



Figura 10: MD-2 y módulo C4 Fuente: [2].

#### 4.1.4 Posicionador circular

Como novedad, en este trabajo se ha añadido una mesa de rotación perteneciente a la empresa *Industry*, capaz de hacer un barrido de 360° a distintas velocidades y aceleraciones, controlable desde un cable ethernet o conexión UDP/IP (del inglés, User Datagram Protocol y *Internet Protocol*) con el ordenador. Dicho posicionador consta de dos elementos: la mesa rotatoria y el módulo de control.

Para tener libre un mayor número de puertos y facilitar el uso del equipo sin cableado optamos por el control del posicionador circular mediante una conexión UDP a un enrutador externo al que conectamos el posicionador por vía cable *Ethernet* como se muestra en el esquema de la Figura 11.



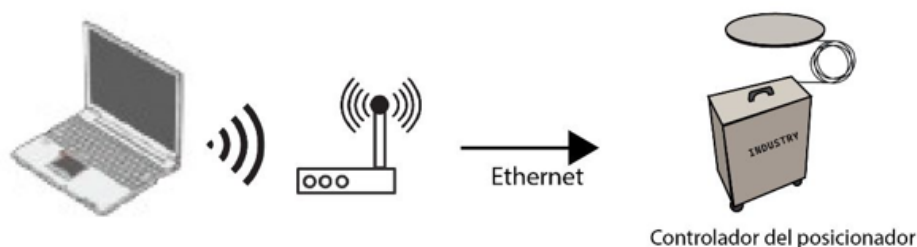


Figura 11: Esquema de conexiones del posicionador circular.

Los parámetros principales de la mesa de rotación los podemos modificar desde una dirección web ubicada en el manual de usuario de la mesa rotatoria [7] donde se muestra un panel como el de la Figura 12.




Axis Control			
Position (deg) :	0.00	Actual Position (deg) :	0.00
Speed (deg/s) :	10.00	Actual Speed (deg/s) :	0.00
Acc (deg/s <sup>2</sup> ) :	50.00	Axis Alarm :	<input checked="" type="checkbox"/>
Dec (deg/s <sup>2</sup> ) :	50.00		<input type="button" value="RESET ALARM"/>
Mov Type :	1	<small>1-Absolute Pos 2-Increment from Pos Ref 3-Increment from Pos Sensor</small>	
<input type="button" value="STOP AXIS"/>			
Axis Parameters			
<input checked="" type="checkbox"/> Enable Axis	<input type="checkbox"/> Enable Trigger (for Speed > 25 deg/s)	Distance Pulses (deg) :	10.00
Max Pos (deg) :	3600.00	Min Pos (deg) :	-3600.00
Max Speed (deg/s) :	200.00	Min Speed (deg/s) :	0.01
Max Acc (deg/s <sup>2</sup> ) :	200.00	Min Acc (deg/s <sup>2</sup> ) :	0.01
Max Dec (deg/s <sup>2</sup> ) :	200.00	Min Dec (deg/s <sup>2</sup> ) :	0.01
UDP Configuration			
<input checked="" type="checkbox"/> Recive UDP Commands 	Listen at Local Port :	4444	
<input checked="" type="checkbox"/> Send UDP Status Msg 	Consumer IP :	172.16.191.255	
	Consumer Port :	5555	

Figura 12: Variables modificables de la mesa de rotación. Fuente: [7].

El panel está dividido en tres secciones distintas donde cada una controla un aspecto del disco.

En la sección de “*Axis parameters*” tenemos la opción de activar o desactivar el movimiento del eje. También podemos activar la generación de pulsos en la salida digital correspondiente al eje y ajustar la separación en grados entre dos flancos. Dentro de esta sección podemos establecer los límites superiores e inferiores de posición, velocidad, aceleración y deceleración.

Una vez que hayamos activado el eje, en la sección de “*Axis Control*” manejaremos el movimiento de dos formas: (1) Movimiento Absoluto, donde el posicionador se moverá al ángulo indicado y (2) Movimiento Relativo, donde el posicionador se moverá tantos grados como indiquemos desde la posición en la que ya se encontraba. Al modificar el valor en la casilla “Posición” el disco realizará un movimiento de acuerdo con la velocidad, aceleración y deceleración que hayamos seleccionado.

Por último, en la sección de “Configuración UDP” configuraremos el envío y recepción de mensajes a través de la comunicación UDP. Aquí podemos habilitar o deshabilitar los dos puertos de comunicación existentes, así como indicar la dirección IP del ordenador que enviará y recibirá los mensajes.

La transmisión y recepción la realizaremos mediante comandos UDPs creados desde un código de Matlab como se detallará en el Capítulo 5. No obstante es importante tener en cuenta que los parámetros máximos y mínimos de la sección “*Axis parameters*” no los podemos controlar desde comandos UDP y, por lo tanto, sólo desde la web señalada.

#### 4.1.5 Controladores y conmutadores

Los conmutadores utilizados para ampliar la sonda son los conmutadores electromecánicos *Keysight U7106F*, que se muestran en la Figura 14.

Estos conmutadores tienen una entrada y 6 salidas (SP6T, *Single Pole 6 Through*) donde les podemos conectar antenas mediante cables coaxiales en cada una de sus salidas. Tienen una capacidad de soportar frecuencias de hasta 67 GHz, al igual que el analizador de redes indicado previamente. La conmutación de las posiciones se realiza mediante pulsos TTL (*Transistor Transistor Logic*).

Se opta por utilizar conmutadores electromecánicos en lugar de electrónicos por su baja atenuación a altas frecuencias, a pesar de su menor longevidad al tener un número limitado de conmutaciones. Es por ello por lo que se ha implementado un contador de conmutaciones para informar al usuario del estado de la vida útil del conmutador.

Para el control de estos conmutadores se utilizan dos controladores *NI USB-6501 E/S Digital* de la empresa *NI (National Instruments)*. Estos controladores están representados en la Figura 13 y se conectan a través de un puerto de 16 pines a cada conmutador. Estos nos permiten enviar pulsos TTL de  $\pm 5$  Voltios a través de sus 16 puertos de salida. Los controladores se conectan al ordenador mediante cables USB y las salidas seleccionadas se conectan a los conmutadores en cada uno de sus respectivos puertos.

Se eligieron estos controladores ya que nos permiten enviar las señales tanto desde el programa instalado en el ordenador, “*NI Device monitor*”, como desde Matlab y *AppDesigner*. Esto nos proporciona flexibilidad en la generación y control de las señales requeridas



Figura 13: Modelo de controlador USB-6501. Fuente: [8].



Figura 14: Modelo de controlador RF U7106F. Fuente: [9].

#### 4.1.6 AppDesigner

*AppDesigner* es una herramienta de desarrollo visual que nos permite crear aplicaciones interactivas con una interfaz de usuario de manera fácil y rápida. La programación en *AppDesigner* se realiza utilizando el lenguaje Matlab incorporada en su versión R2016a. Lo que nos ayudará a realizar cálculos y control de instrumentación.

Debido a que la sonda previa estaba diseñada en dicho programa se escogió seguir con este ya que nos permite llevar a cabo la incorporación de los nuevos instrumentos y conectarlos a los ya existentes usando código.

A lo largo de este apartado se va a realizar una pequeña introducción de los aspectos más importantes de este programa que han sido usados para el desarrollo del trabajo, dando una serie de pasos sencillos para poder familiarizarse con el entorno de trabajo.

##### 4.1.6.1 Inicio

*AppDesigner* lo ejecutamos desde el portal inicial de Matlab al pulsar los botones “HOME”, “New” y “App”. A continuación, se abrirá una ventana que nos permitirá elegir entre crear una nueva aplicación basada en varios modelos, una aplicación en blanco o abrir un archivo .matt de una aplicación previamente creada. Si seleccionamos una aplicación en blanco, llamada “Blank App”, se abrirá una ventana similar a la mostrada en la Figura 15.

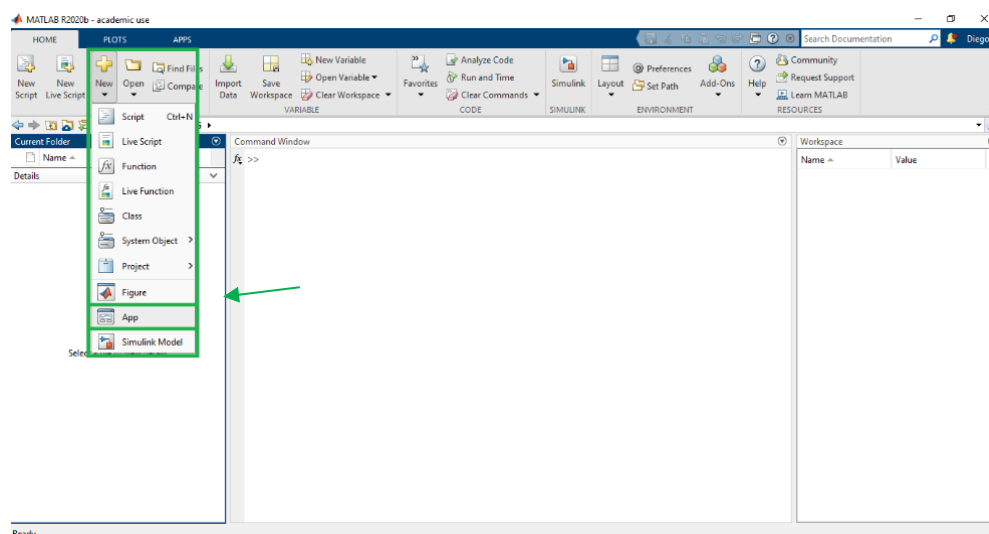
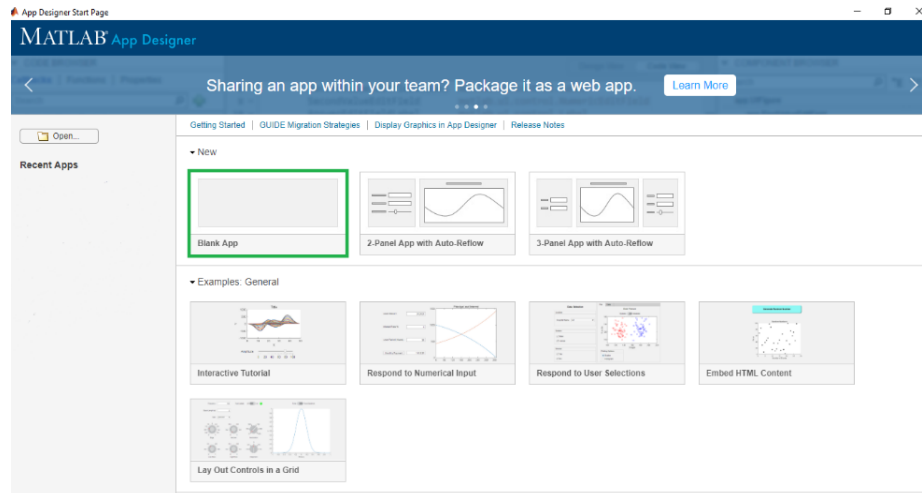
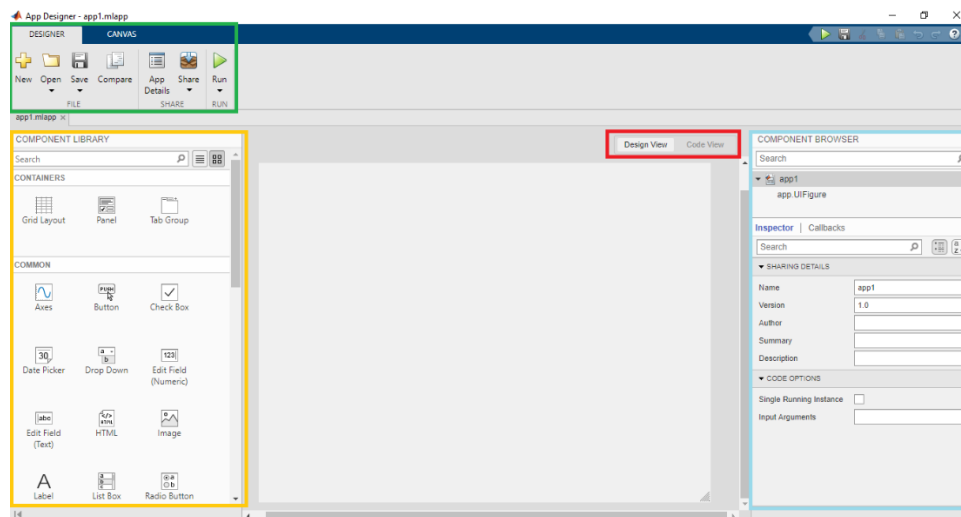


Figura 15: Abrir AppDesigner.



**Figura 16: Pantalla de selección aplicación en blanco.**

Tras seleccionar una nueva aplicación en blanco se nos va a abrir una ventana similar a la de la Figura 17. En ésta podemos diferenciar cuatro partes principales marcadas en la figura por colores.



**Figura 17: Ventana principal AppDesigner.**

En la sección de herramientas de diseñador, marcada en verde, podemos visualizar las opciones disponibles en “*Designer*”. Desde aquí se podrán crear nuevas aplicaciones, guardar las existentes, ejecutarlas y ver más detalles.

El botón destacado en rojo es importante para programar nuestra aplicación, si la vista de diseño, “*Design view*”, está seleccionada (como lo está actualmente en la figura) se mostrará la ventana de la interfaz gráfica de la aplicación. En esta ventana podremos agregar diferentes componentes y diseñar como se visualizarán.

Dentro de “*Design view*”, marcado en amarillo, se encuentra el panel “*Component Library*”. En este panel, añadiremos los distintos componentes de nuestra aplicación, como botones, imágenes, deslizadores e instrumentos. El panel está dividido en cuatro sectores: contenedores, componentes comunes, figuras de herramientas e instrumentación. Más adelante se explicará cada uno de estos sectores con más detalle.

Tanto para el modo “*Design View*” como para el “*Code View*” podemos encontrar el panel llamado “*Component Browser*” marcado en azul en la Figura 17.

Dentro de este panel podemos personalizar el nombre, colores, tipos de letra, tamaños y más para cualquier componente seleccionado. Además, podemos acceder a la función del componente y agregar imágenes según sea necesario.

Es importante tener en cuenta que el panel de “*Component Browser*” mostrará opciones específicas para cada tipo de componente, lo que nos permite modificar diferentes características según el caso. En la Figura 18 se muestra un ejemplo concreto de un botón llamado “Frecuencia”.

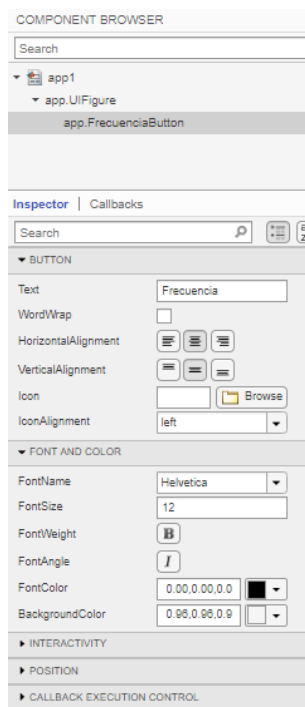


Figura 18: Ejemplo botón en Component Browser.

#### 4.1.6.2 *Component Browser*

El panel de “*Component Browser*” nos va a permitir introducir una serie de componentes para el diseño de nuestra interfaz gráfica. Dichos componentes se añaden arrastrándolos desde el panel hasta nuestra interfaz y están divididos en cuatro bloques distintos.

##### 1. *Containers*

Dentro de este bloque podemos encontrar aquellos componentes que nos permitirán dividir nuestra aplicación en rejillas o ventanas independientes. Dando forma a estructuras en celdas donde iremos poniendo nuevas herramientas.

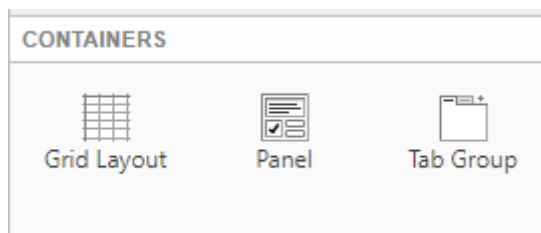


Figura 19: Bloque Containers.

## 2. Common

Dentro del bloque común encontraremos la mayor variedad de componentes, desde botones, añadir imágenes, interruptores hasta crear directorios. Estos componentes son los que en gran mayoría van a formar nuestra aplicación y nos ayudarán a facilitar una mayor interactividad con la interfaz por parte del usuario.

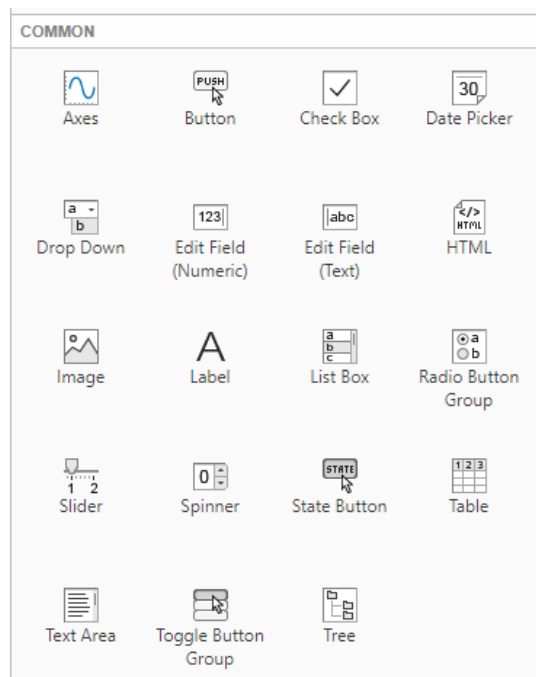


Figura 20: Bloque común.

## 3. Figure Tools

En este bloque se encuentran aquellos componentes de diseño, creación y edición gráfica dentro de nuestra aplicación. Estas herramientas nos permitirán personalizar el aspecto de la interfaz gráfica como, por ejemplo, añadiendo distintos menús y barras.

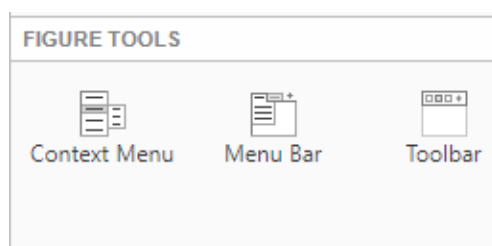


Figura 21: Bloque figure tools.

## 4. Instrumentation

En el último bloque podemos añadir componentes que nos ayudarán a la hora de añadir instrumentos de medidas en la aplicación tales como medidores circulares o semicirculares para indicar, por ejemplo, velocidades o unidades además de encontrar indicadores luminosos y diversos *switches*.

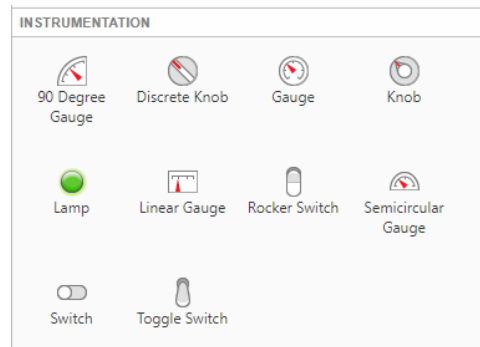


Figura 22: Instrumentation.

Para conocer cada uno de estos elementos en detalle y sus características podemos pulsar el botón “Help” de Matlab dando clic en el botón derecho del ratón donde se muestra una pantalla con información extendida de éste y los elementos que conforman a cada uno. Esto será de gran utilidad a la hora de saber cómo funciona cada uno de los elementos y que parámetros hemos de usar para su correcto funcionamiento.

#### 4.1.6.3 Code View

Una vez seleccionada la ventana de “code view” podremos programar a nivel de código Matlab nuestra aplicación. En dicha ventana podemos apreciar 4 nuevas ventanas marcadas en colores como se muestra en la Figura 23.

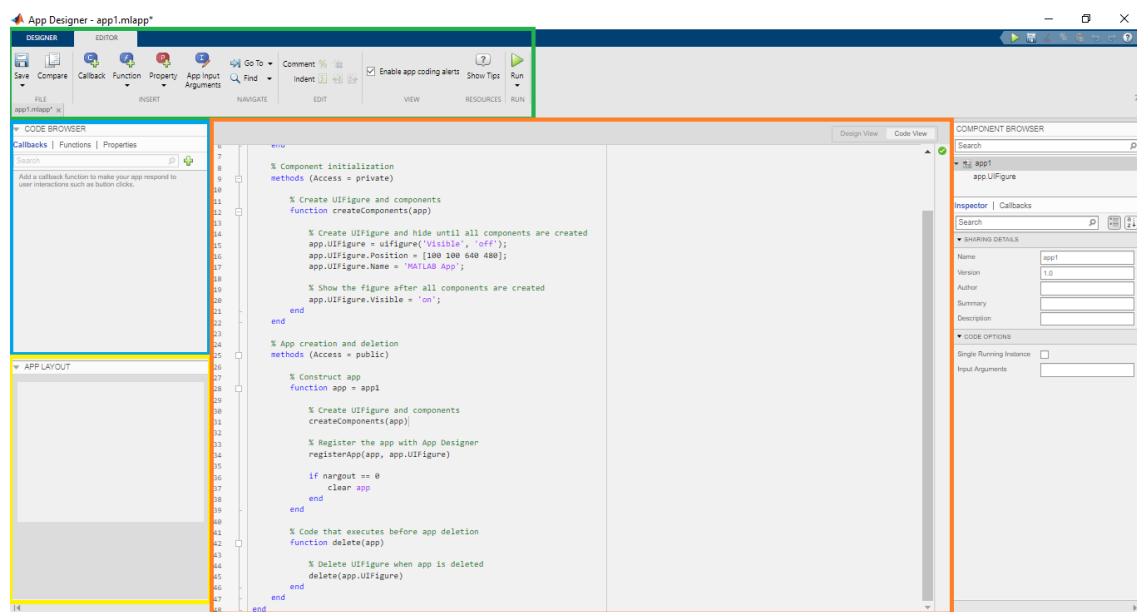


Figura 23: Ventana Code View.

En la Figura 23 podemos observar la sección de “Designer” marcada en verde. En esta sección podemos agregar y modificar *callbacks*, funciones y propiedades. Estos tres elementos van a ser primordiales a la hora de programar cualquier código dentro de la aplicación. Además encontraremos botones que indiquen como guardar y ejecutar nuestra aplicación. También nos brinda la opción de compilar y descargarla como una aplicación de escritorio.

En “AppLayout” se muestra nuestra aplicación en una ventana pequeña y nos permite navegar entre los diferentes componentes que hayamos agregado. Esto resulta útil al buscar un código específico de un botón o panel para realizar modificaciones.

El panel central, marcado en naranja, es la parte más importante y donde trabajaremos nuestro código. En este panel se muestra el código de nuestra aplicación y es donde agregaremos todas las funciones de cada uno de nuestros componentes.

En la barra de desplazamiento se mostrarán las alertas y errores que puedan surgir durante la compilación. Es importante mencionar que el código mostrado en la figura corresponde al código de la creación de la aplicación y sus elementos básicos. Éste se crea de forma automática y no es modificable por el usuario. El código modificable por el usuario se incorpora añadiendo uno de los tres elementos principales: *callbacks*, funciones y propiedades.

Para agregar o crear alguno de estos tres elementos en nuestro código, podemos hacerlo tanto desde el “Code Browser” como desde el panel de “Editor” pulsando en el botón:

El código dentro de la ventana “Code View” va a estar estructurado en tres partes distintas, como se puede observar en la Figura 24.

La primera de ellas, marcada en verde y mencionada previamente, corresponde al código incluido de forma automática al crear una aplicación en blanco. En este código iremos añadiendo características de los componentes que vayamos incluyendo en nuestra aplicación sin necesidad de que escribamos nosotros nada.

Del mismo modo, la tercera parte, marcada en naranja, corresponde al código que crea e inicializa nuestra aplicación así como la destruye en caso de que se cierre. De nuevo, este código no es editable y se crea de forma independiente al usuario.

Por último, la segunda parte es donde nosotros vamos a escribir todo nuestro código, incluyendo las propiedades, funciones y retrollamadas en ese orden. Esto nos permitirá tener un código más estructurado y visualmente reconocible. A continuación se explica cada uno de estos elementos principales:

```
1  classdef app1 < matlab.apps.AppBase
2
3      % Properties that correspond to app components
4      properties (Access = public)
5          UIFigure matlab.ui.Figure
6      end
7
8
9      properties (Access = private)
10         Property % Description
11     end
12
13     methods (Access = private)
14
15         function results = func(app)
16
17         end
18     end
19
20     % Callbacks that handle component events
21     methods (Access = private)
22
23         % Code that executes after component creation
24         function startupFcn(app)
25
26         end
27     end
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58     % Execute the startup function
59     runStartupFcn(app, @startupFcn)
60
61     if nargin == 0
62         clear app
63     end
64 end
65
66 % Code that executes before app deletion
67 function delete(app)
68
69     % Delete UIFigure when app is deleted
70     delete(app.UIFigure)
71 end
72
73 end
```

Figura 24. Estructura de código.



## 1. Propiedades

Las propiedades son variables que se pueden declarar al principio del código y se utilizan de forma continua en el resto del código. Estas variables pueden ser declaradas como públicas o privadas, y siempre es necesario usar el prefijo “app.” antes del nombre de la propiedad al hacer referencia a ella. Por ejemplo, podemos crear una propiedad llamada “Frecuencia”, Figura 25, y posteriormente asignarle un valor de la forma “app.Frecuencia = Y”.

```
properties (Access = public)
    Frecuencia % Description
end
```

Figura 25: Ejemplo propiedad.

Cada vez que creamos y añadimos un nuevo componente a nuestra aplicación automáticamente se generará una propiedad en el código con los valores correspondientes a dicho componente. Estas propiedades no son modificables por el usuario, sin embargo, es posible hacer referencia a éstas y cambiar valores, como por ejemplo, si el componente es visible o no.

## 2. Funciones

Las funciones nos permiten encapsular un bloque de líneas de código en una misma acción ejecutable a lo largo del programa. Existen dos tipos de funciones: públicas y privadas. Al crear una función se genera automáticamente un marco donde elegimos el nombre de dicha función y las variables de entrada y salida. Estas funciones están siempre incluidas dentro de métodos públicos o privados (puede haber varias funciones dentro del mismo método).

Es importante tener en cuenta que al crear una función, la primera variable de entrada en *AppDesigner* ha de ser siempre “app” y al llamar a esta función deberemos de incluirlo. Por ejemplo, si creamos una función llamada “Resultado”, mostrada en la Figura 26, con dos variables de entrada ‘X’ e ‘Y’, al llamarla en otro punto del programa deberíamos de hacerlo de la siguiente forma “Resultados(app,X,Y)”.

Dentro de cada función podemos llamar a los parámetros propios de un componente obteniendo, por ejemplo, el valor de una casilla de texto, cambiando el valor de un interruptor etc. Y operar con estos además, de poder diseñar un código cualquiera de Matlab.

Poniendo un ejemplo, en la Figura 26 podemos observar una función llamada “Calculo”, en dicha función podemos observar que tenemos tres casillas numéricas, dos pertenecientes a cada operador: “Valor1” y “Valor2”, y una tercera donde mostraremos la suma de ambos “Resultado”. También podemos apreciar que existen tres propiedades a la que les asignaremos el valor de cada operando: “num1”, “num2” y “num3”. Esta función, por lo tanto asocia el valor de cada casilla numérica a ambas propiedades, las suma y el resultado se lo asigna a la propiedad “num3” para posteriormente mostrar dicho valor por la casilla de resultado.

```
methods (Access = public)


    function Calculo (app)
        app.num1 = app.Valor1.Value;
        app.num2 = app.Valor2.Value;

        app.num3 = app.num1 + app.num2;
        app.Resultado.Value = app.num3;
    end
end
```

Figura 26: Función Calculo.

Este es un simple ejemplo pero nos servirá para tener cierta idea de la estructura y componentes que van a tener nuestras funciones.

### 3. Retrollamada

Las retrollamadas son funciones que se ejecutan cuando el usuario interactúa con los distintos componentes, por ejemplo al presionar un botón o cambiar un interruptor e incluso escribir texto o números dentro de un editor. Estas funciones las podemos añadir desde la propia interfaz gráfica en “*Design view*” pulsando el botón derecho del ratón encima de un componente y seleccionando “*Callback*”, o desde “*Code View*” presionando de nuevo el botón  dentro del apartado “*Callbacks*”.

Es importante mencionar que la propia interfaz gráfica incorpora una serie de retrollamadas propias. Por ejemplo “*StartupFcn*” que se ejecuta nada más se abre la aplicación. Esta función es importante si queremos inicializar una serie de variables o conexiones inmediatamente al iniciar nuestra aplicación y se puede crear desde la misma ventana al añadir una retrollamada seleccionando en “*Components*” el nombre de nuestra aplicación como se muestra en la Figura 27.

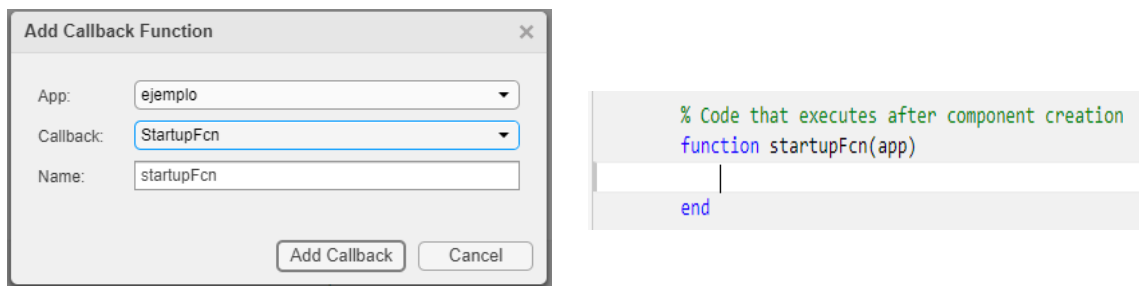


Figura 27: Añadir función StartupFcn.

Si por ejemplo usando nuestra función “*Calculo*”, previamente explicada, queremos añadir un botón llamado “*Sumar*” que ejecute dicha función simplemente añadiríamos su retrollamada y, dentro de ésta, ejecutaríamos la función “*Calculo*” de la siguiente forma.

```
% Button pushed function: Sumar
function SumarPushed(app, event)
    Calculo(app);
end
```

Figura 28: Ejemplo Callback.

## 5. Desarrollo y resultados del trabajo

### 5.1 Introducción

En este capítulo se detallará el trabajo realizado para la incorporación de los conmutadores y el posicionador circular en el marco de este proyecto. Gran parte de este trabajo se ha centrado en el estudio del código en *AppDesigner* así como en el análisis detallado de la aplicación y de la sonda existente junto con todos los instrumentos involucrados, además de un exhaustivo repaso y correcciones en el código previo.

En primer lugar, se detallarán los pasos a seguir para la conexión de los instrumentos con ordenador y así lograr el correcto funcionamiento de la sonda.

En segundo lugar, se detallará el funcionamiento de la sonda junto con la integración y ampliación de los nuevos instrumentos y, además, se abordarán las dificultades encontradas durante este proceso de desarrollo y se proporcionarán las soluciones correspondientes.

En tercer lugar, se incluirán esquemas y gráficos que ilustrarán las conexiones individuales de cada instrumento así como una representación visual de la agrupación general. Asimismo, se presentará un diagrama de flujo que describirá los objetivos de diseño de la aplicación en esta nueva versión.

Por último, se mostrarán las mediciones realizadas con diversas antenas y se dará una explicación de cada una de ellas, resaltando su relevancia en el contexto del proyecto.

### 5.2 Equipamiento

En la Figura 29 se muestra el montaje completo de la sonda, junto con las diversas opciones de conexiones entre los posicionadores. Es importante destacar que el montaje se puede dividir en cuatro bloques distintos.

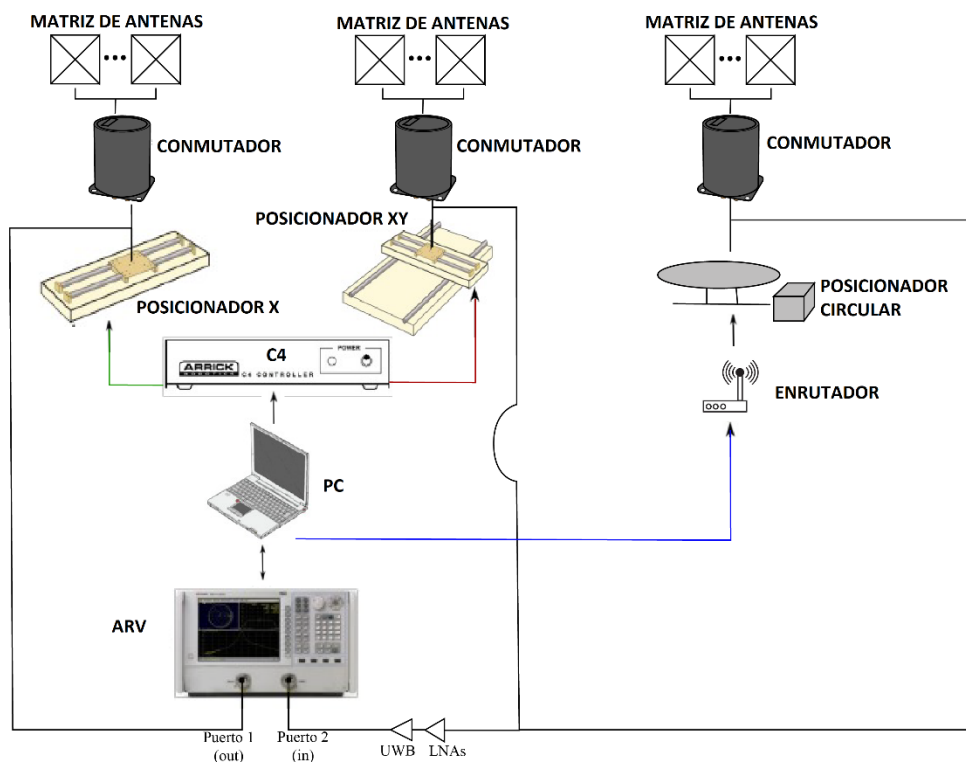


Figura 29: Esquema del montaje de los instrumentos

El primer bloque lo forma el analizador de redes vectorial el cual se conecta mediante un cable Ethernet directamente al ordenador de control.

El segundo bloque está compuesto por los posicionadores lineales, cada uno de los cuales se conecta a un controlador MD-2 mediante un cable paralelo (antiguamente usado por impresoras) terminado un lado en hembra de 40 pines y el otro en macho de 36 pines que se conecta al módulo C4. A su vez, este módulo se conecta al ordenador mediante un cable USB RS-232.

El tercer bloque está constituido por el posicionador circular, cuyo controlador se conecta al ordenador mediante un cable RS-232 y un conversor USB-RS-232.

El último bloque está formado por los conmutadores de radiofrecuencia de una entrada y 6 salidas (SP6T hasta 67 GHz. Controlado por señales TTL mediante dispositivos de E/S (Entrada, salida) digitales conectados por USB al ordenador principal. Cada uno de ellos se conecta a un conmutador mediante un cable de 16 pines. A su vez, cada salida del conmutador se conecta a una antena mediante un cable coaxial y por la entrada se conecta al ARV.

### 5.3 Manual de conexiones del equipamiento para el usuario

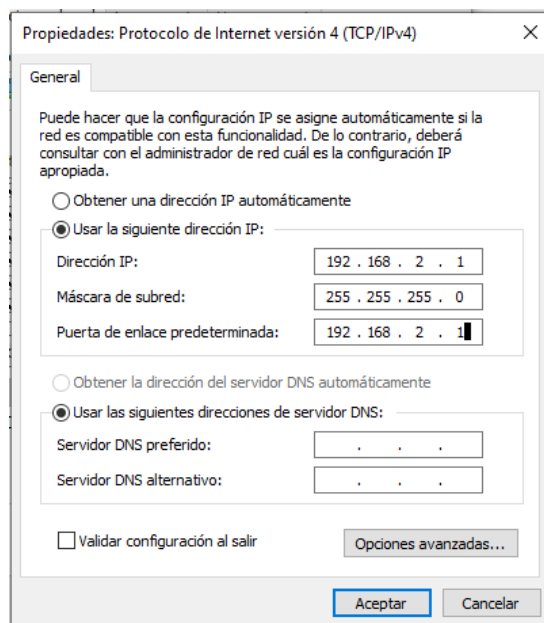
En este apartado se va a detallar los pasos que debe de realizar el usuario para poder conectar y configurar los distintos componentes de la sonda para poder iniciar la aplicación. En primer lugar se explicará la conexión con el analizador de redes y posteriormente con los distintos posicionadores y controladores.

#### 5.3.1 Conexión del ordenador de control con el analizador de redes

Para establecer la conexión con el analizador se realiza mediante el programa *IO Library Suite* de la empresa *Keysight*, el cual nos permite establecer una conexión y control mediante comandos SCPI.

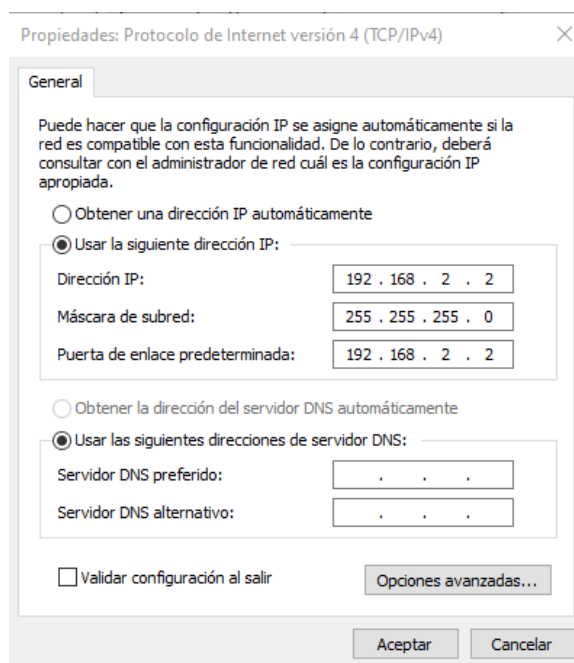
Antes de establecer la conexión con el analizador, es fundamental configurar la red LAN (del inglés, *Local Area Network*) y asegurarse de que las direcciones IP estén correctamente asignadas. Para lograr esto se deben seguir los siguientes pasos [2]:

1. Conectar el ARV a nuestro ordenador mediante cable *Ethernet*. En caso de no tener dicho puerto usar un adaptador *Ethernet-USB*.
2. Desde nuestro ordenador acceder al Panel de control, Redes e Internet, Conexiones de Red.
3. Dentro hacemos clic derecho en “Conexión de Área local” (comprobando que esa conexión es la que corresponde a la utilizada para conectar el ordenador de control al ARV).
4. Clicamos en “Propiedades” y buscamos el apartado “Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IP)”.
5. Clicamos de nuevo en “Propiedades” y se nos abrirá un panel similar al de la Figura 30, pulsando en “Usar la siguiente dirección IP” se añaden las direcciones indicadas en la figura.



**Figura 30: Configuración LAN del ordenador.**

Seguiremos estos mismos pasos de nuevo, pero desde el analizador, e introduciremos la dirección IP indicada en la Figura 31. Para ambos casos la dirección IP y la puerta de enlace deben de ser las mismas.



**Figura 31: Configuración LAN del analizador.**

Una vez establecidas las direcciones en ambos dispositivos podemos comprobar la conexión desde el programa de *Keysight connection expert* añadiendo la identificación del analizador: "TCPIP0::192.168.2.2::hislip0::INSTR", visualizado en la Figura 32.

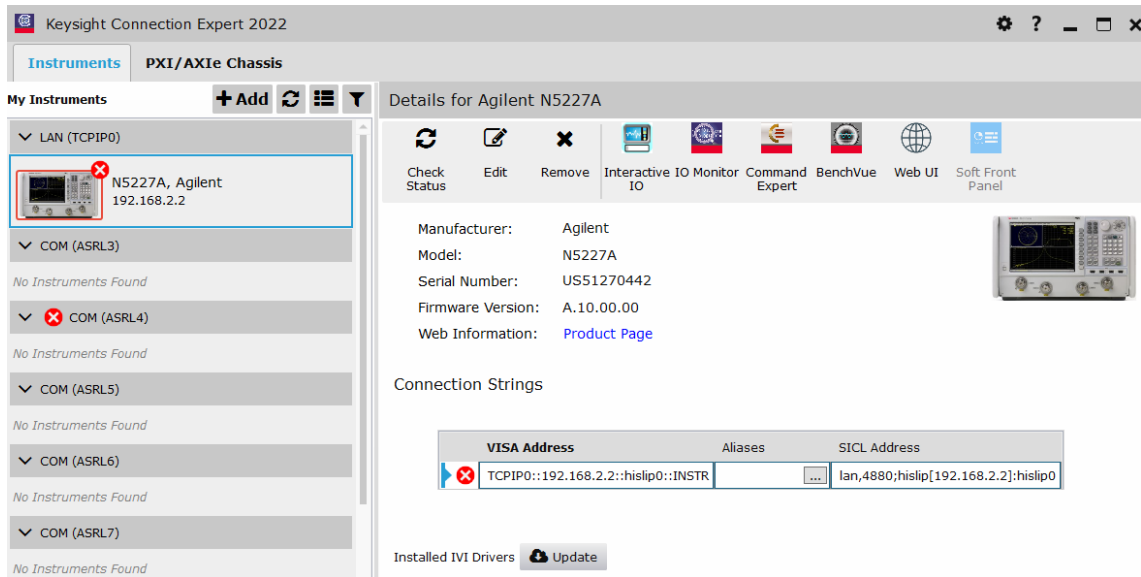


Figura 32: Conexión Keysight connection expert.

Desde este mismo panel pulsando “Check Status” comprobaremos que la conexión es correcta y podremos enviar los comandos SCPI correspondientes pulsando en el botón “Interactive IO”.

### 5.3.2 Conexión del ordenador de control con los posicionadores lineales

La conexión con el sistema de posicionadores lineales se compone, como se ha explicado anteriormente, de dos controladores MD-2 y un módulo C4 que controla ambos dispositivos. Este módulo, conectado al ordenador mediante un convertor USBRS-232 éste nos permite establecer la conexión con ambos posicionadores. En la Figura 33 se ilustra un esquema de conexión entre estos dispositivos.

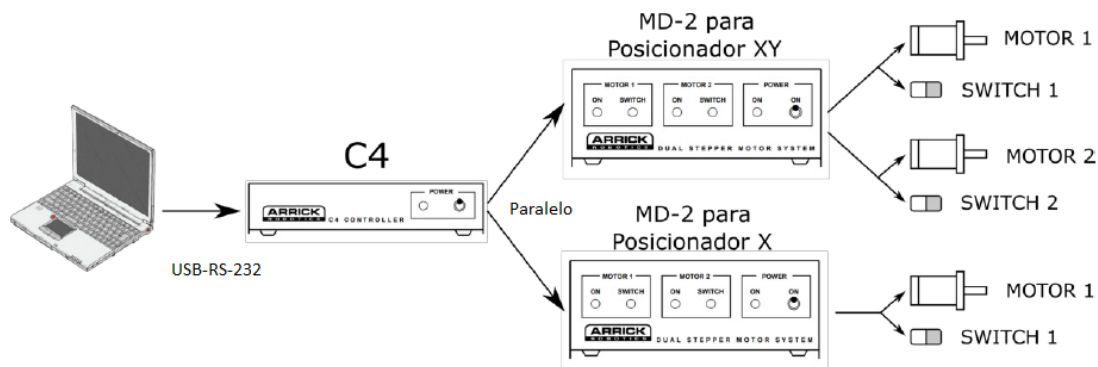


Figura 33: Conexión posicionadores lineales. Fuente [2].

El programa que nos permite controlar el módulo C4 se llama *MD2xp Motor Control System*. Tras instalar su última versión y ser ejecutado se nos mostrará el siguiente menú:

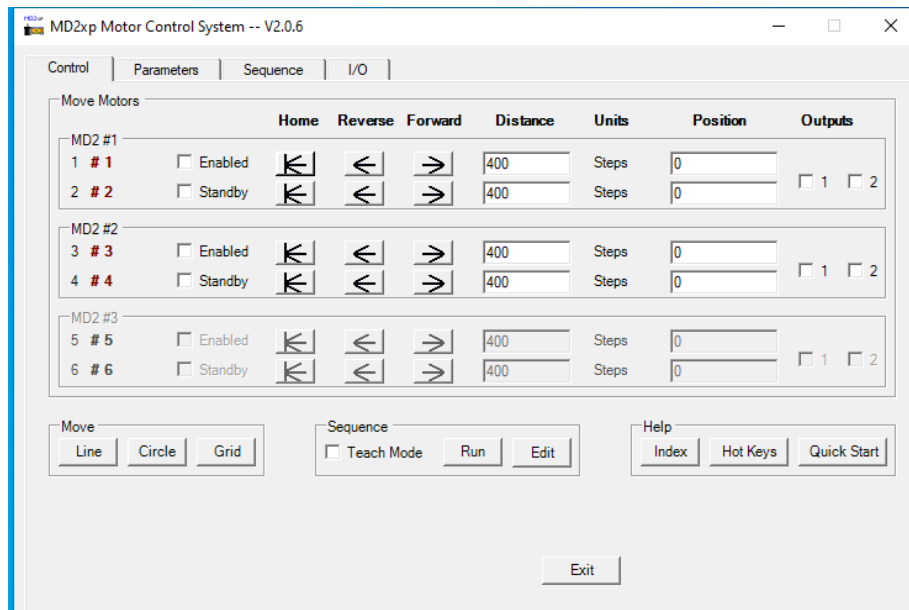


Figura 34: Panel principal MD2xp Control System.

Desde este panel controlaremos los tres motores, pero previo a esto, necesitamos establecer la conexión con cada uno de los motores. Para ello pulsaremos en “Parameters” y se nos abrirá el panel siguiente:

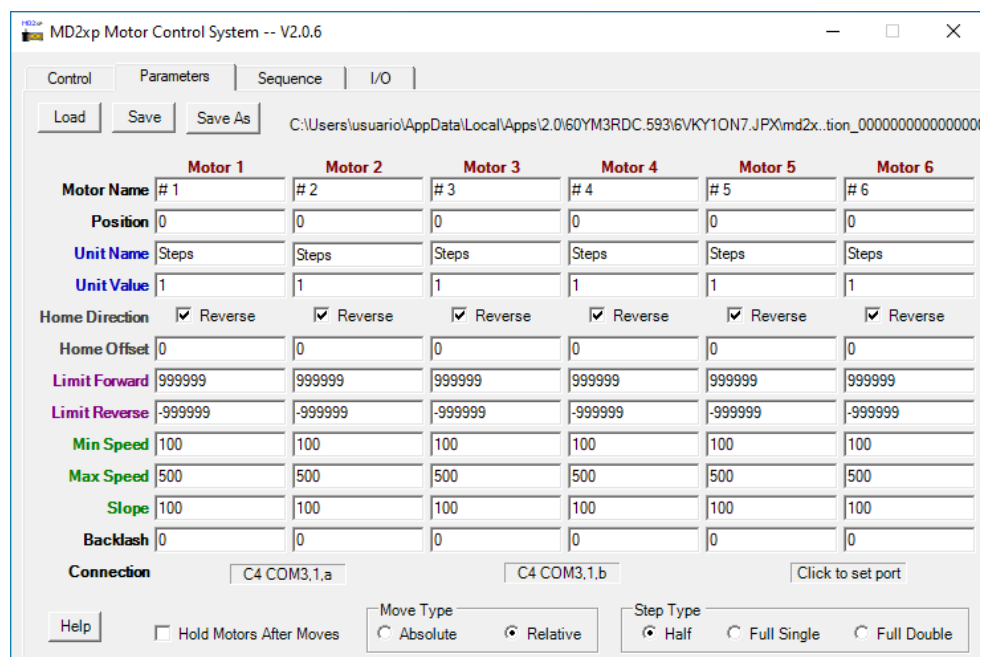


Figura 35: Ventana Parameters.

Desde dicha ventana debemos de pulsar en el botón “Click to set port” y una vez pulsado se nos abrirá la siguiente ventana:

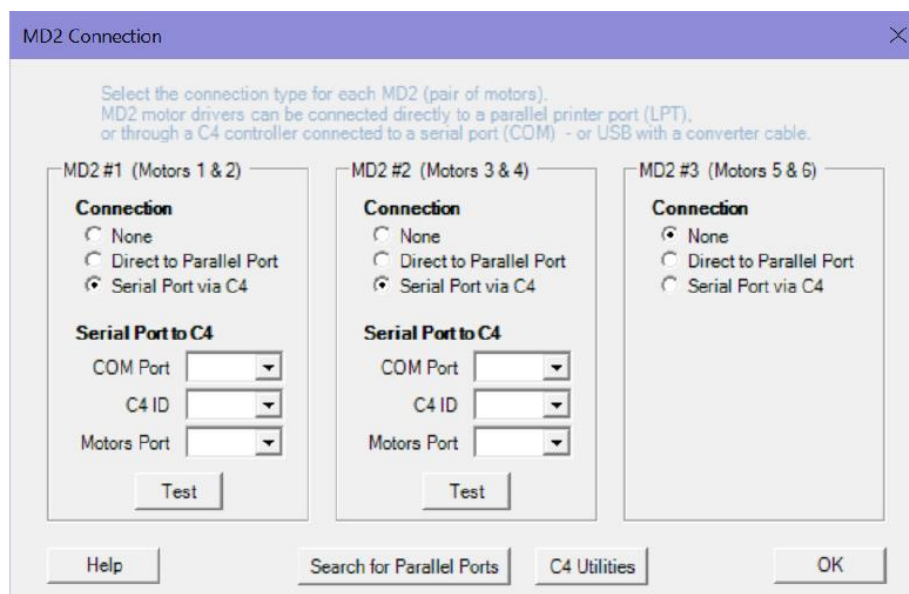


Figura 36: MD2 Connection.

Para ambos MD2 (MD2 #1 para Motores 1 y 2, y MD2 #2 para Motores 3 y 4, al que únicamente está conectado el motor 3) procederemos pulsando el botón “Serial Port via C4”. Desde esta opción debemos indicar el puerto COM (del adaptador USB-RS-232) al que está conectado nuestro módulo C4. En caso de desconocer dicho puerto podemos localizarlo en “Administrador de dispositivos” de Windows o utilizar la función “serialportlist” en Matlab.

Una vez conectado y tras pulsar el botón “Test” la conexión con ambos posicionadores se establecerá. Estos se pueden controlar desde el panel principal, como se muestra en la Figura 34, clicando en la casilla “Enable” de cada motor.

Es imprescindible que la aplicación permanezca abierta en todo momento. Si se desea, se puede minimizar la ventana, pero nunca cerrar.

### 5.3.3 Conexión del ordenador de control con los conmutadores

La conexión con cada uno de los conmutadores se realizará utilizando dos controladores USB-6501. Este sistema de conexión se muestra en la Figura 37.

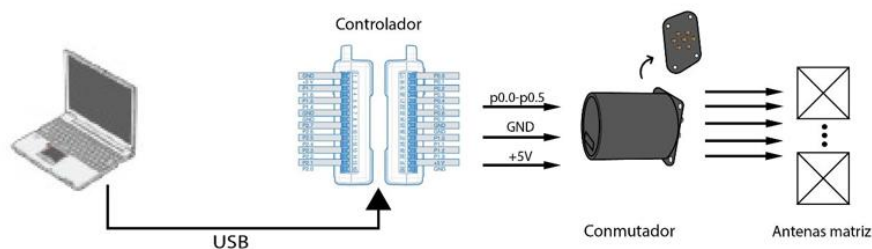


Figura 37: Esquema de conexiones de los conmutadores.

Para establecer la conexión con el controlador es necesario instalar la última versión del programa “NI Device Monitor”.

Una vez el programa está instalado y es ejecutado detectará automáticamente el controlador conectado a través del puerto USB de nuestro ordenador. Aparecerá una ventana similar a la mostrada en la Figura 38.



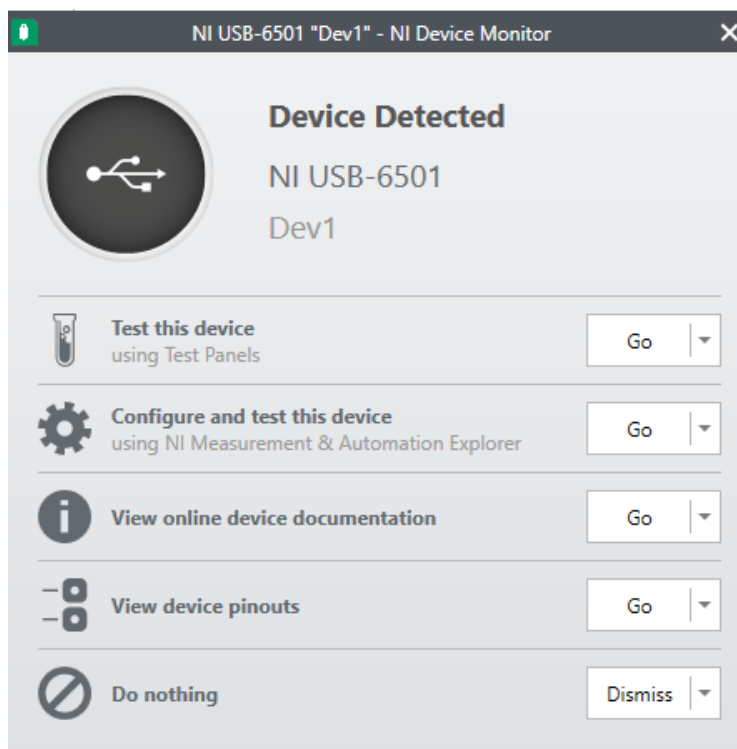


Figura 38: Ventana emergente *NI Device Monitor*.

Desde esta ventana podemos observar el dispositivo conectado y su identificador, que en nuestro caso es Dev1, y una vez se le conecta el segundo controlador, Dev2.

Al hacer clic en el botón "Go" de la sección "Test this device" podemos acceder al panel de control del dispositivo (Figura 39). En dicho panel podemos acceder al control de los puertos 0, 1 y 2. Cada uno de estos puertos tiene 6 salidas digitales y podemos cambiar su estado a 1 o 0. Un pulso en 1 corresponde a una salida en tensión de +5 Voltios mientras que un pulso en 0 corresponde a -5 Voltios.

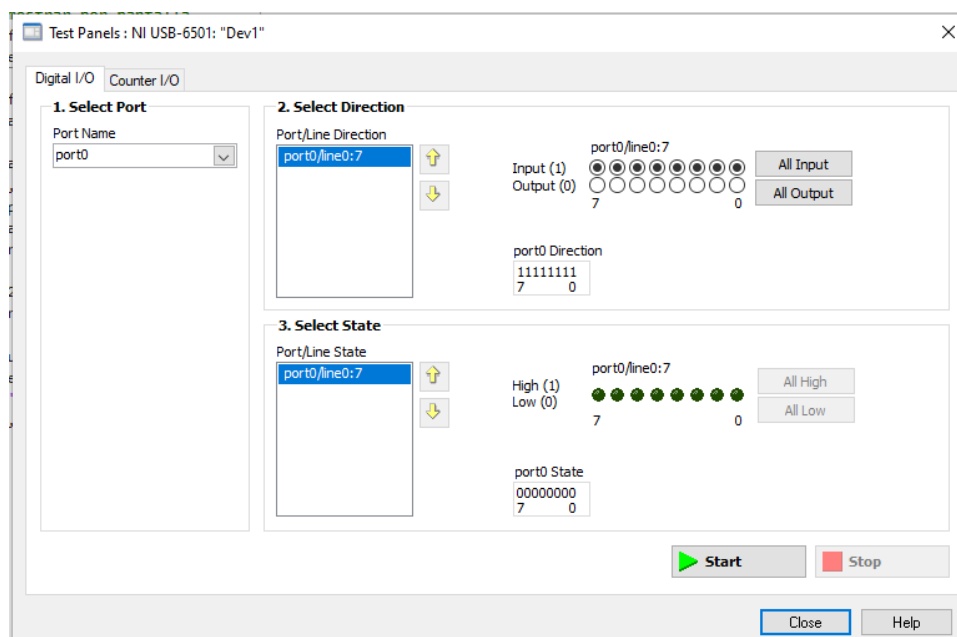


Figura 39: Panel de control *NI Device Monitor*.

Para la conexión física de las salidas del controlador al conmutador seguimos el esquema mostrado en la Figura 40.

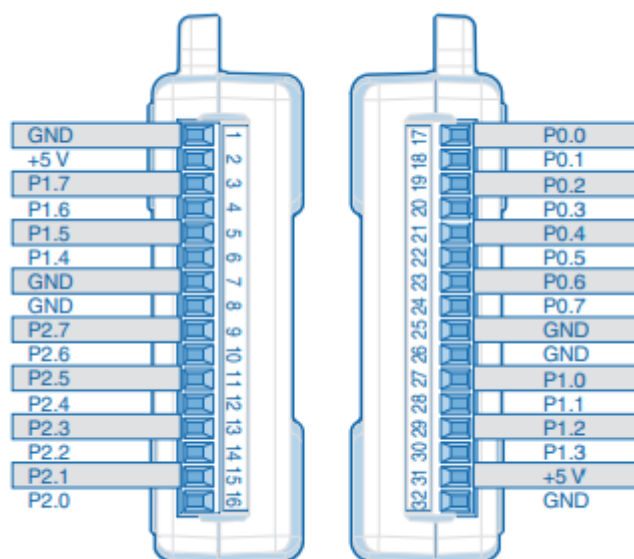


Figura 40: Esquema de conexiones físicas del USB-6501.

En esta figura podemos observar el esquema de salidas físicas del USB-6501 y podemos escoger los puertos y salidas que más nos convengan a la hora de montar la conexión. Siempre teniendo en cuenta que el puerto de alimentación “+5 V” y tierra “GND” deben de estar conectados para el correcto funcionamiento. Cada una de las seis salidas se conectará al respectivo puerto en el conmutador.

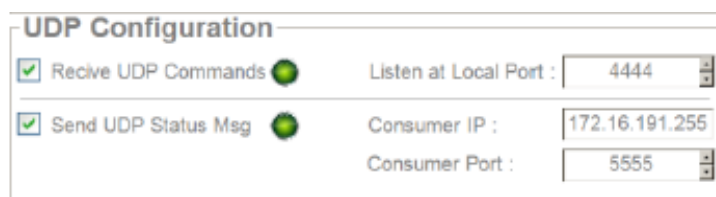
#### 5.3.4 Conexión del ordenador de control con el posicionador Circular

Para conectar el posicionador circular precisaremos de un enrutador intermedio. Nuestro ordenador puede conectarse de forma inalámbrica al enrutador o mediante un cable *Ethernet*. Dado que el puerto *Ethernet* ya está en uso por el analizador se ha decidido establecer una conexión remota. El esquema de dicha conexión se muestra en la Figura 11.

La conexión establecida con la mesa rotatoria es una conexión UDP, ya que venía de esta forma configurado de fábrica pues es más veloz que la opción de conexión TCP (del inglés, *Transmission Control Protocol*).

Para establecer la conexión con el posicionador, en primer lugar, debemos conectar nuestro ordenador a la red WIFI del enrutador fijando la dirección IP del ordenador con el valor que se indicará en el panel de control, ya que será necesaria para el correcto acceso a su control. Una vez conectados al enrutador, podemos acceder al panel de control de la mesa (Figura 12) mediante la siguiente dirección de red: “<http://172.16.191.50:8080/iteam.htm>”.

Una vez nos encontremos en el panel de control debemos indicar el valor de la dirección IP de nuestro ordenador y los puertos tanto del ordenador como de la mesa por donde se establecerán las conexiones como se muestra en la siguiente figura.





UDP Configuration	
<input checked="" type="checkbox"/> Recive UDP Commands 	Listen at Local Port : <input type="text" value="4444"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Send UDP Status Msg 	Consumer IP : <input type="text" value="172.16.191.255"/>
	Consumer Port : <input type="text" value="5555"/>

Figura 41: Direcciones mesa de rotación.

En la sección “*Receive UDP Commands*” podemos mantener o cambiar el puerto de acceso al posicionador. En la sección “*Send UDP status Msg*”, agregaremos la dirección IP de nuestro ordenador que debe de ser previamente fijada y el puerto que desee el usuario. En el primer panel se activará o desactivará la recepción de comandos UDP para mover el posicionador, mientras que en el segundo panel, se activará el envío de comandos UDP con información de estado.

Una vez conectado se podrá controlar la mesa rotatoria desde ese mismo panel de control.

## 5.4 Manual de conexiones del equipamiento mediante programación en Matlab

En este apartado se detallarán los códigos de Matlab necesarios para crear las conexiones con los diversos instrumentos de la sonda. Esto nos permitirá entender con mayor detalle el funcionamiento de la sonda a nivel de programador y su uso en *AppDesigner*.

### 5.4.1 Conexión con el analizador de redes por código en Matlab

Para conectar el analizador de redes mediante el programa de Matlab debemos, primero, tener la herramienta *tmtool* instalada y, una vez la tengamos, la abrimos pulsando en *Instrument control*. Una vez hecho seleccionando Hardware, VISA, TCPIP se nos abrirá un panel como el de la Figura 42.

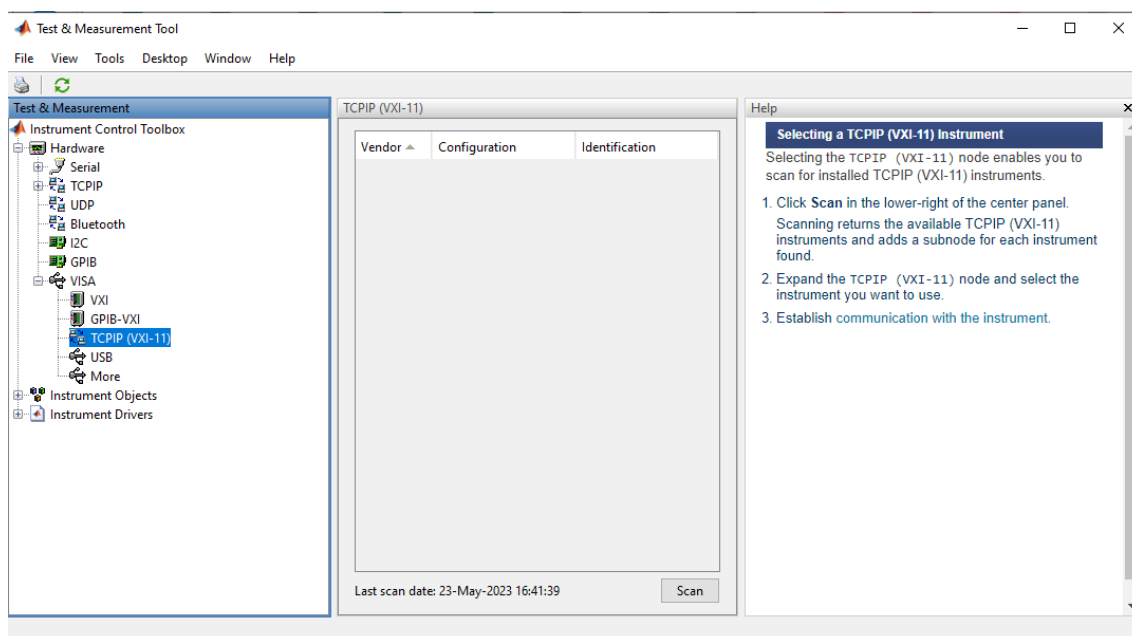


Figura 42: Ventana *Instrument control*.

Desde esta misma ventana podemos presionar el botón “Scan” para explorar y nos aparecerá el instrumento deseado. No obstante, en nuestra aplicación, el proceso de creación y búsqueda de un instrumento VISA se realizará mediante código en *AppDesigner*. Dicho código se muestra a continuación:

```

%% Instrument Connection
% Find a VISA-TCPIP object.
app.ARV = instrfind('Type', 'visa-tcpip', 'SrcName', 'TCPIP0::192.168.2.2::hislip0::INSTR', 'Tag', '');

% Create the VISA-TCPIP object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(app.ARV)
    app.ARV = visa('KEYSIGHT', 'TCPIP0::192.168.2.2::hislip0::INSTR');
else
    fclose(app.ARV);
    app.ARV = app.ARV(1);
end

```

Figura 43: El código de conexión con el analizador.

En el código mencionado se realiza una línea de búsqueda de instrumentos VISA utilizando la ID previamente indicada. Luego se genera un bucle para verificar si este objeto ya ha sido creado previamente y en caso de no existir, se crea una conexión nueva.

#### 5.4.2 Conexión con los posicionadores lineales mediante código en Matlab

El código necesario para la conexión con el módulo C4 de los posicionadores lineales desde Matlab se muestra en la Figura 44.

```
app.c4 = instrfind('Type', 'serial');

% Create the serial port object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(app.c4)
    app.PUERTOPOS = app.PuertosPos.Value;
    port = serialportlist;
    app.c4 = serial(app.PUERTOPOS); %#ok<*SERIAL>
else
    fclose(app.c4);
    app.PUERTOPOS = app.PuertosPos.Value;
    port = serialportlist;
    app.c4 = serial(app.PUERTOPOS);
    disp(app.c4)
end
```

Figura 44: Código de conexión con los posicionadores lineales

En dicho código se crea un instrumento de tipo “Serial” llamado “c4” al que se le indica qué número de puerto “COM” es al que están conectados, indicado en la variable llamada “PUERTOSPOS”. Se crea un bucle “if/else” que comprueba si ya existía dicho instrumento previamente y, en ese caso, se cierra la conexión y se crea de nuevo.

Una vez es ejecutado este código estará establecida la conexión y podremos enviar las señales oportunas mediante funciones “fprintf” al instrumento “C4” para su control.

#### 5.4.3 Conexión con los conmutadores mediante código en Matlab

Para programar el envío de señales TTL al controlador desde Matlab es necesario tener instalada la herramienta “Data Acquisition Interface”. Esta herramienta nos permitirá buscar y controlar dispositivos de entrada y salida digitales. El código para conectar y crear dichas salidas se muestra en la Figura 45.

```
daqlist;
dev = daq('ni');

addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line0', 'Digital');
addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line1', 'Digital');
addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line2', 'Digital');
addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line3', 'Digital');
addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line4', 'Digital');
addoutput(dev, "Dev1", 'port0/line5', 'Digital');

write(dev, vect);
removechannel(dev, 1:12);
```

Figura 45: Código de conexión al controlador.

En las dos primeras líneas de la Figura 45 se busca y crea el dispositivo conectado, asignándole el nombre “dev” en nuestro caso. A continuación, se agregan 6 salidas digitales donde se especifica el nombre del dispositivo, el puerto y el tipo de señal que se enviará. En este caso se ha seleccionado el puerto 0 y las líneas de la 0 a la 5, correspondiendo cada una de éstas a salidas físicas que se conectarán al conmutador. No obstante, es posible agregar tantas salidas como tenga nuestro dispositivo.

Una vez generadas las salidas podemos enviar las señales utilizando la función “write()”, especificando el dispositivo al que deseamos enviar, la señal y un vector de dígitos binarios, uno por salida escribiendo un 1 o un 0. Por último, es posible eliminar estos canales una vez se haya finalizado la conexión mediante la función “removechannel()”.

#### 5.4.4 Conexión con el posicionador Circular mediante código en Matlab

Para establecer la conexión con la mesa circular mediante el programa de Matlab se debe de escribir y ejecutar el código mostrado en la Figura 46.

```
%Creación del servidor udp

udpServer = udp('172.16.191.50',4444);
udpLocalComm = udp('','LocalHost','','LocalPort',5555);

udpServer.Timeout = 5;
udpLocalComm.Timeout = 5;

if strcmp(udpServer.Status,'open') ~= 1
    fopen(udpServer);
end
if strcmp(udpLocalComm.Status,'open') ~= 1
    fopen(udpLocalComm);
end
```

Figura 46: Conexión UDP mediante Matlab.

En este código se crea un servidor UDP donde se indica tanto dirección IP como puerto de nuestro ordenador y del posicionador. Una vez indicados estos parámetros se crea un temporizador para iniciar la conexión y se abre el servidor.

Una vez establecida dicha conexión ya se pueden enviar los comandos con los parámetros de movimiento al servidor de igual forma que ya se pueden recibir los parámetros de estado del posicionador.

## 5.5 Interfaz gráfica

### 5.5.1 Diagrama de flujo

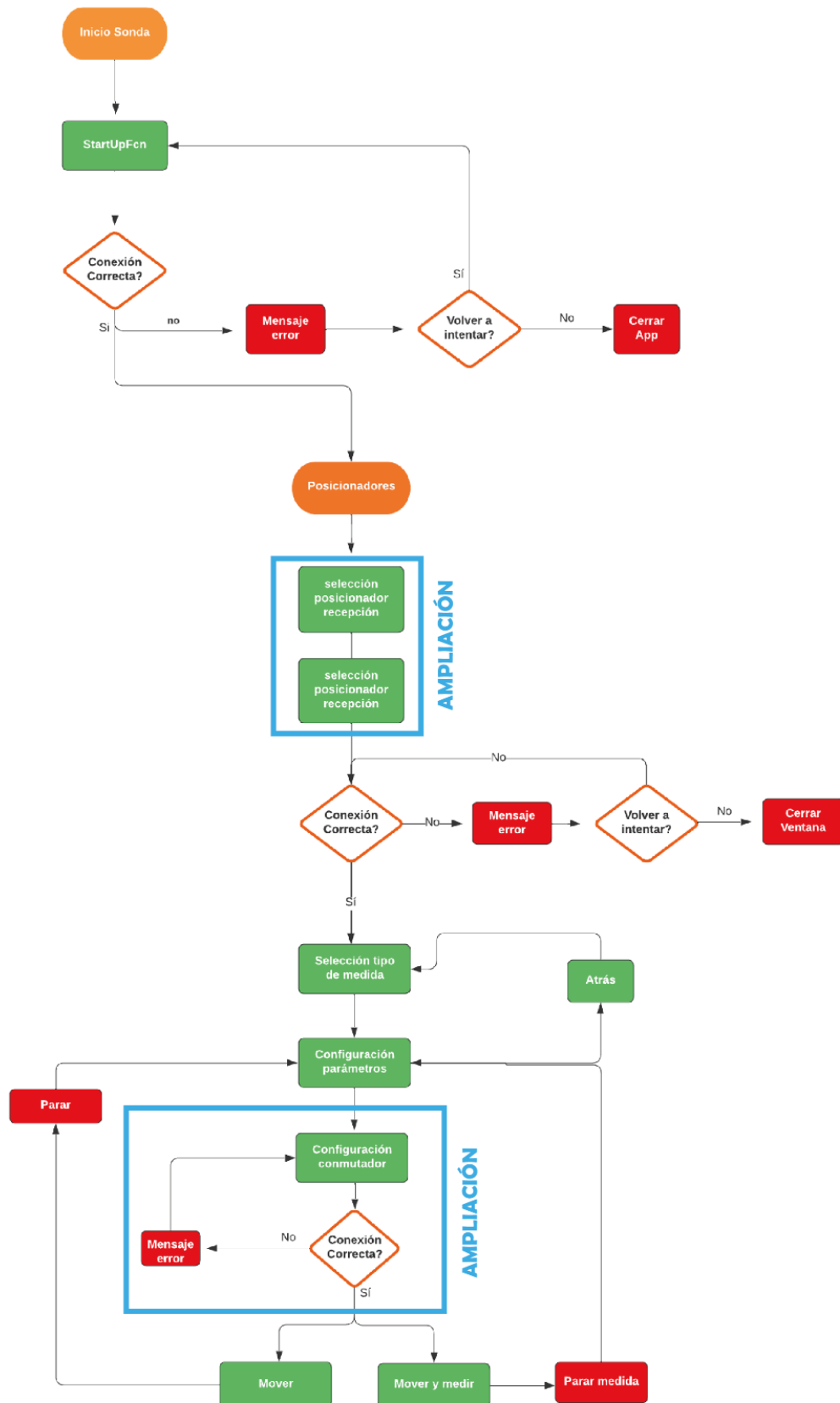


Figura 47: Diagrama de flujo de la aplicación.

En la Figura 47 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación, en dicho diagrama están indicadas las ampliaciones a la sonda previa marcadas en azul. A continuación se explicarán los distintos pasos de este diagrama y, posteriormente, se mostrarán y detallarán cada una de las ventanas de la aplicación.

Dicho diagrama comienza con la función “StartUpfcn”, explicada en el Capítulo 4. Esta función inicializa la aplicación y la conexión con el analizador de redes. Ya que dicha conexión es fundamental para el funcionamiento de la aplicación ésta es la primera en ser ejecutada. En caso de que la conexión no sea correcta se muestra el siguiente mensaje de error:

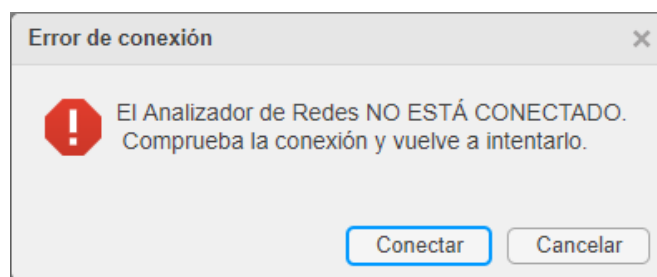


Figura 48: Error de conexión con el analizador.

En caso de pulsar “Cancelar”, la aplicación se cerrará y si se selecciona “Conectar” se realizará una nueva comprobación de la conexión. Una vez establecida la conexión se abrirá automáticamente la ventana de control del analizador, desde donde podemos seleccionar la ventana de control de los posicionadores o mantenernos en la del analizador.

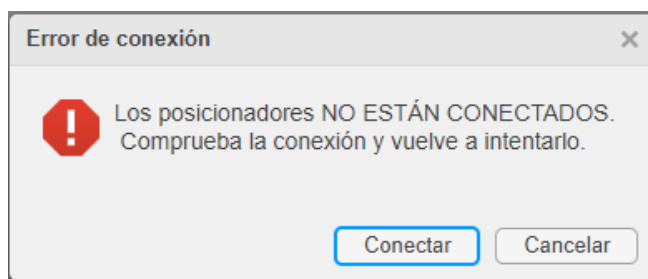
Si permanecemos en la ventana del analizador podemos acceder a la configuración de los parámetros deseados para nuestras medidas. Una vez seleccionados, existen dos botones disponibles. Al pulsar “Preset”, la configuración de los parámetros volverá a su estado inicial, y al pulsar “Medir”, se iniciará la medida. Dicha medida se puede detener en cualquier momento pulsando el botón “Parar”. Más adelante se explicará con detalle cada uno de los parámetros de la ventana.

Si seleccionamos la ventana de “Posicionadores”, se llevarán a cabo diferentes pasos. En primer lugar se verificará la conexión con los posicionadores lineales y se abrirá la ventana de configuración correspondiente. El objetivo de ampliar esta interfaz es permitir la selección de qué posicionador queremos utilizar como transmisor y cuál como receptor. Se abriría una ventana donde el usuario podría elegir entre los tres posicionadores, dos lineales y uno circular, tanto para el transmisor como para el receptor.

Sin embargo, debido al diseño del código en *AppDesigner* realizado en el TFM de Cristina Català [1] y, como se explicará más adelante, este cambio no se ha podido realizar y se propone como una mejora futura. Omitiéndose por tanto el primer marco de ampliación. Esta propuesta se detallará más adelante.

Tras seleccionar la ventana de posicionadores se abre una ventana de selección entre cuatro modos (SISO, MISO, SIMO y MIMO). Esta selección determinará cuáles de los posicionadores lineales será usado dándole la opción al usuario de usar uno, dos o ninguno de los posicionadores.

Una vez seleccionado el modo de uso se verificará la conexión con los posicionadores y, en caso de producirse un error, se mostrará una ventana de error como se muestra en la Figura 49.



**Figura 49: Error de conexión con los posicionadores.**

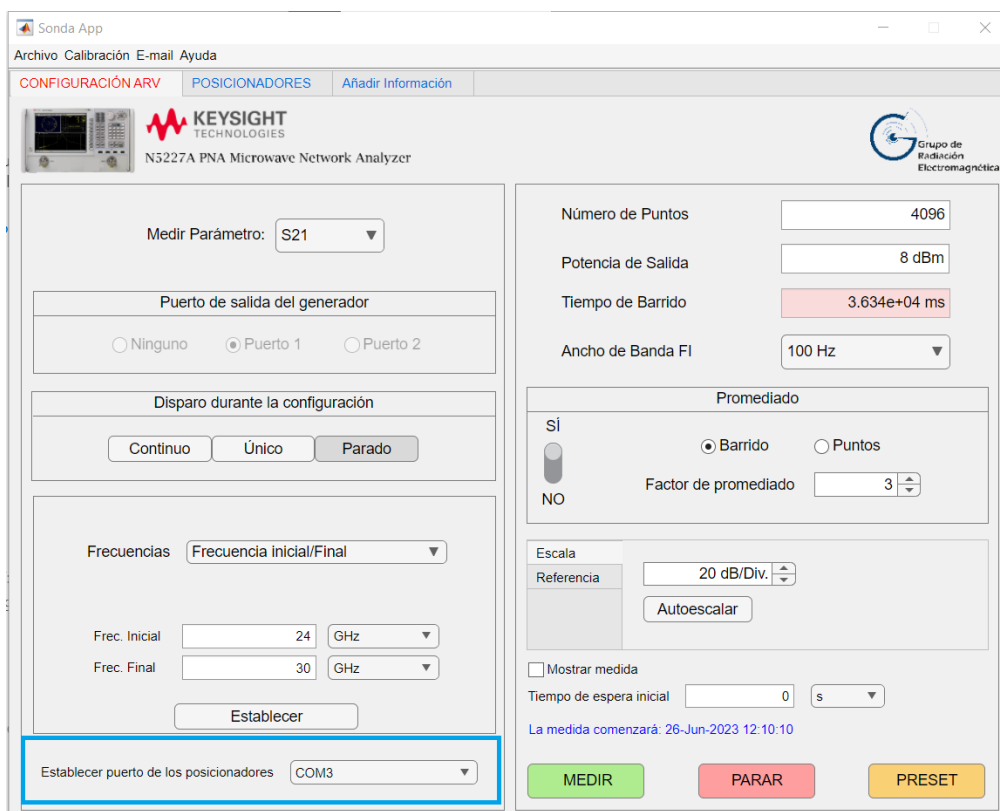
En caso de pulsar “Cancelar” se regresará a la ventana del analizador y, si se selecciona “Conectar”, se verificará nuevamente la conexión. Una vez que los posicionadores estén conectados se accederá a la ventana de configuración de los parámetros de dichos posicionadores. Esta ventana se detallará más adelante.

En esta ampliación se ha agregado la opción de elegir entre los dos conmutadores cuál de ellos se utilizará y qué posiciones se recorrerá una vez comenzada la medida.

Una vez que todos los parámetros estén configurados, incluidos los conmutadores, el usuario tiene la opción de mover y detener los posicionadores seleccionados o pulsar “Mover y medir”. Al pulsar este botón el usuario indicará la carpeta y nombre donde guardar las medidas y se iniciará la medida. Durante este proceso se podrá pausar la medida en cualquier momento pulsando “Pausar medida” y nos devolverá a la ventana además de que se enviarán correos a los destinatarios indicando el comienzo y finalización de la medida.

### 5.5.2 Ventana de configuración del ARV

Dentro de la ventana “Configuración ARV” se encuentran todos los parámetros personalizables para establecer la medida de nuestra señal. Dichos parámetros se encuentran en la Figura 50 donde, marcado en azul, se indica una ampliación realizada para indicar el puerto de conexión de los posicionadores.



**Figura 50: Ventana de configuración ARV.**



Esta ventana está dividida en dos paneles verticales, en el primero de ellos, se encuentran cinco paneles independientes donde se pueden seleccionar el parámetro de medida, el puerto de salida, el tipo de disparo, el rango de frecuencias y el puerto de los posicionadores.

El primer botón, “Medir parámetros”, se muestra un deslizador que permite indicar qué parámetro de potencia o señal se desea medir. Las opciones disponibles son: S11, S12, S21, S22, R1, R2, a1, a2, b1 y b2. Después de seleccionar el parámetro se elige el puerto de salida del generador con opciones de puerto 1, 2 o ninguno (visible sólo cuando se selecciona un parámetro de potencia distinto de los parámetros S).

En la sección “Disparo durante la configuración” esta opción nos permitirá ver los cambios en el analizador ya que si elegimos “Único” o “Parado” se visualizará en la ventana del analizador la medida escogida y si elegimos “Continuo” la veremos en tiempo real.

En la sección “Frecuencia” se pueden seleccionar tres tipos de medidas de frecuencia: “Frecuencia única”, “Frecuencia Inicial/Final” y “Frecuencia Central/Ancho”.

Cada opción muestra paneles de texto diferentes. En el caso de “Frecuencia Inicial/Final” se pueden seleccionar las frecuencias iniciales y finales, mientras que en “Central/Ancho” se selecciona la frecuencia central y su ancho de banda deseado. Finalmente, en caso de desear tomar la medida con una única frecuencia seleccionaremos “Frecuencia única” donde indicaremos dicha frecuencia junto al número de trazas deseadas.

De este modo, podremos indicar qué frecuencias queremos que barra nuestra medida siempre pulsando en “Establecer” una vez seleccionadas. La Figura 51 muestra todos estos casos.

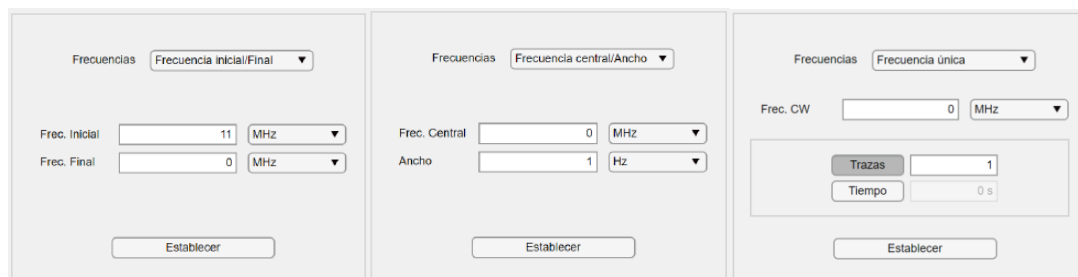


Figura 51: Modelos de frecuencias.

Finalmente, en el apartado de “Establecer puerto de los posicionadores” el usuario tiene la opción de escoger el nombre del puerto COM al que ha conectado los posicionadores para poder establecer la conexión adecuadamente. Los valores varían de “COM1” a “COM12” como se muestra en la Figura 52. Este cambio se ha añadido para automatizar la conexión en caso de usar un ordenador distinto al que estaba programado inicialmente.

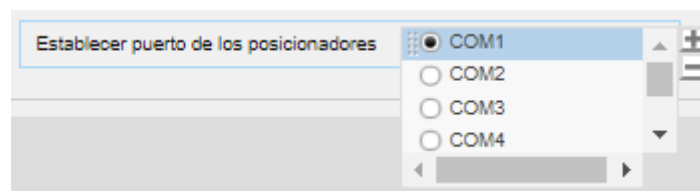


Figura 52: Puertos de los posicionadores

El segundo panel vertical está dividido en cuatro secciones. En su primera sección se indicarán cuatro parámetros.

En primer lugar, el número de puntos que se mostrarán en la ventana del analizador, a mayor número de puntos mayor será la resolución de nuestra medida.

En segundo lugar, la potencia de salida, con un rango entre -30 dBm y 30 dBm.

En tercer lugar, el tiempo de barrido de la medida, una vez es indicado el número de puntos este tiempo aparecerá de forma automática.

Finalmente, se puede seleccionar el ancho de banda de frecuencia intermedia desplegando una serie de valores predeterminados que van desde 1 Hz hasta los 15 MHz como se ve en la Figura 53.

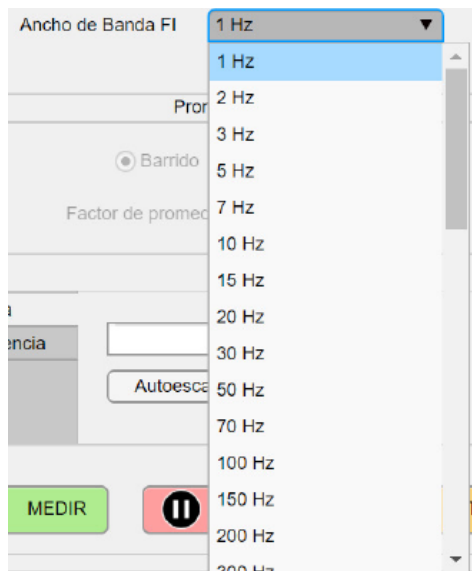


Figura 53: Despliegue de ancho de banda.

En la siguiente sección “Promediado”, se puede elegir realizar un promediado por barrido o puntos. Lo cual ayudará a reducir el ruido NF (en inglés, *Noise Figure*) de las medidas mediante el promediado de múltiples medidas previas. Se activa el promediado mediante un interruptor y luego se elige si se desea hacer el promediado por puntos o por barridos. En el caso de seleccionar el promediado por barridos los puntos se formarán a partir de las medidas anteriores y el promedio seguirá la siguiente ecuación donde  $n$  es el factor de promediado [2].

$$\text{Nueva medida} = \frac{\text{Nuevo dato}}{n} + \text{Antigua medida} * \left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (19)$$

En la tercera sección encontramos un subpanel donde podemos escoger entre “Escala” y “Referencia”.

Si marcamos “Escala” (Figura 54) podemos pulsar el botón “Autoescalar” y en ese caso el propio analizador nos centrará la medida en su ventana de forma automática. Pero si el usuario quiere escoger una escala en específico el analizador nos da la opción de escoger entre los valores de -3000 dB/Div (Decibelios por división) hasta 3000 dB/Div.

Si pulsamos la pestaña de “Referencia”, Figura 55, podemos cambiar el nivel de referencia y su posición que varía entre los valores de 0 a 10 divisiones.

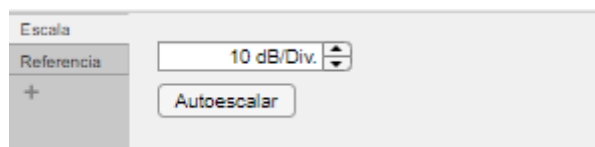


Figura 54: Pestaña “Escala”.

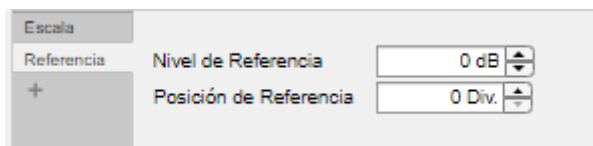


Figura 55: Pestaña “Referencia”.

Finalmente, en la pestaña “Tiempo de espera inicial” podemos añadir un retardo previo a la toma de medida en ms (milisegundos) y escoger si queremos visualizar la primera medida o no.

### 5.5.3 Ventana de los posicionadores

Al seleccionar la ventana de “Posicionadores” previo a la visualización de ésta se nos muestra la siguiente ventana emergente:

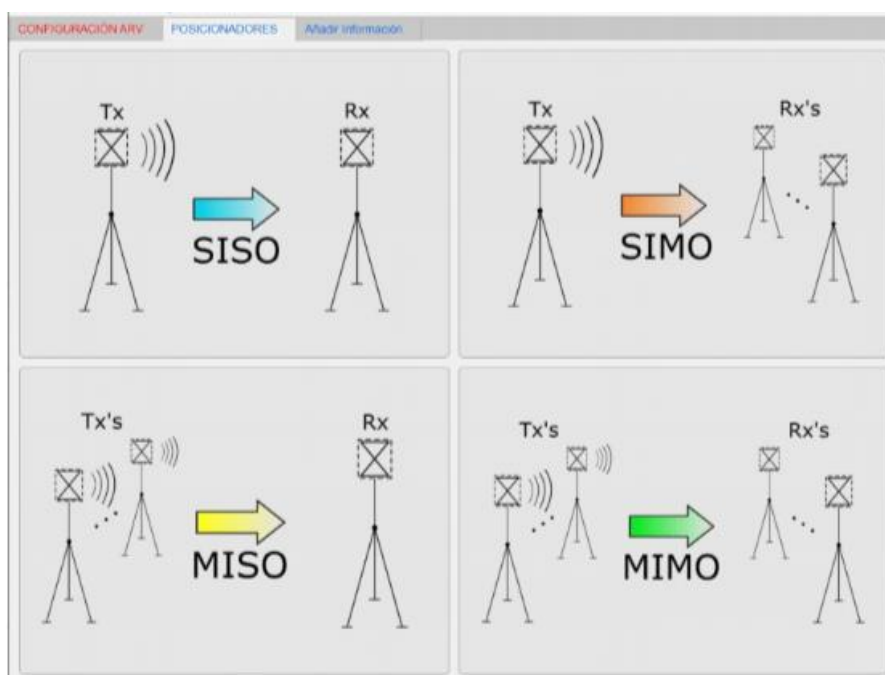


Figura 56: Ventana selección posicionadores.

En la ventana mencionada tenemos la opción de seleccionar entre 4 modelos de movimiento. El primero es el caso en el que ninguno de los posicionadores se mueva (SISO). El segundo es el caso en el que únicamente se mueve el posicionador XY (SIMO). El tercer caso es solo el movimiento del posicionador X (MISO) y el último caso es cuando se utilizan ambos posicionadores en la medida (MIMO). Después de seleccionar una de estas cuatro opciones se muestra la ventana de configuración correspondiente la cual se puede ver en la Figura 57.

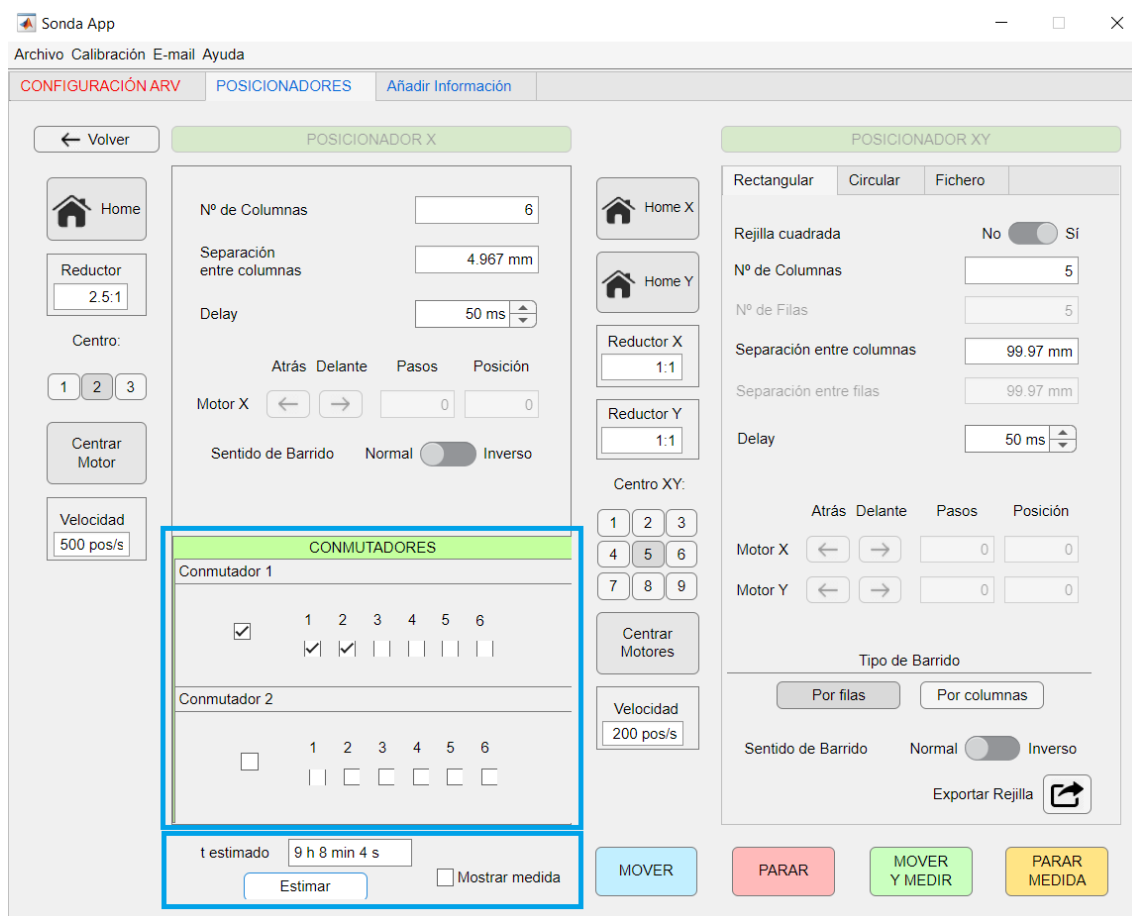


Figura 57: Ventana de configuración de los posicionadores.

En esta ventana podemos distinguir el diseño de control de los conmutadores, que se explicará posteriormente y el resto de la interfaz diseñada por Cristina Català en su TFM [2], además de una adición que se ha realizado para estimar el tiempo que le tomará completar la medida.

En los casos en los que no se vaya a utilizar uno de los dos posicionadores el título de este quedará marcado en rojo; mientras que si se va a utilizar se mostrará en verde. En la Figura 57 estamos en la situación (MISO) donde está únicamente activado el posicionador X.

Para ambos posicionadores podemos diferenciar dos secciones: una columna vertical a la izquierda y un panel de configuración de parámetros para cada posicionador.

En las columnas verticales, tenemos la opción de devolver los posicionadores a su posición de origen pulsando en "Home". También podemos escoger el centro de cada motor pulsando "Centrar motores" además de cambiar la velocidad de movimiento indicada en pos/s (posiciones por segundo).

Además, es posible indicar un factor de reducción para cada motor (indicado en "Reductor", debido a la inclusión de un nuevo eje rotatorio de otro diámetro) en nuestro montaje el motor del posicionador X incluye un reductor 2.5:1.

El posicionador lineal o X tiene un vector de 11760 posiciones y el posicionador XY tiene una matriz de 6000x6000 posiciones. En ambos casos la separación mínima entre cada posición es de 0,1267 mm sin reductor.

En los paneles de configuración de ambos posicionadores podemos seleccionar la separación entre sus filas y columnas, añadir un retardo o *delay* (entre el movimiento del posicionador y la toma de la medida) y hacer una estimación previa de la duración que tomará hacer la medida.

Para el posicionador XY disponemos de dos ventanas distintas dependiendo del tipo de movimiento que pretendamos realizar: rectangular o circular. La ventana de movimiento circular se muestra en la Figura 58.

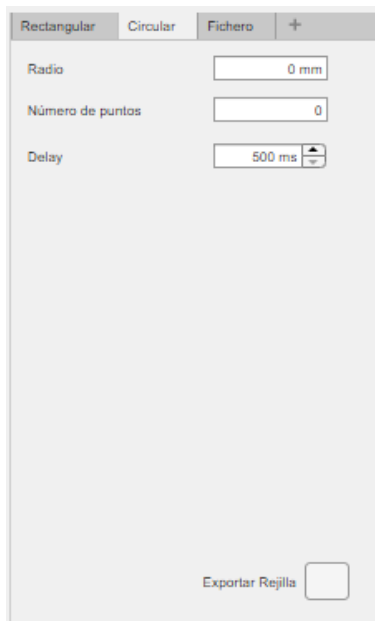


Figura 58: Ventana circular.

En esta situación se puede escoger una medida circular indicando el radio y número de puntos. No obstante este apartado quedaría descartado una vez se añada la mesa rotatoria. En esta misma sección el usuario puede pulsar en “Fichero” donde se da la posibilidad de cargar un fichero con una configuración de los posicionadores.

## 5.6 Diseño de la interfaz del posicionador circular

El diseño de la interfaz gráfica del posicionador circular se creó en una aplicación a parte para luego ser incorporado dentro de la interfaz gráfica de la sonda. Se puede visualizar el diseño de esta aplicación la Figura 59.

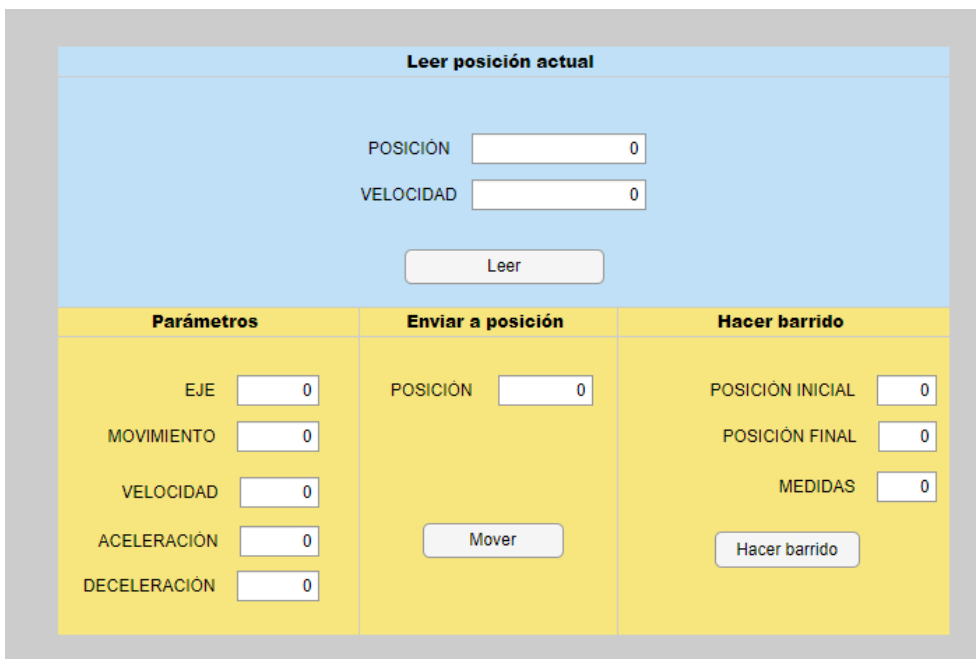


Figura 59: Diseño de la interfaz de la aplicación del posicionador circular.

En dicha figura se pueden distinguir 4 paneles diferentes para el control del posicionador

En el primer panel se ha diseñado una función para leer la posición y la velocidad actual del posicionador al presionar el botón “Leer”. Esta función envía un comando UDP al posicionador y este devuelve los datos actuales de posición y velocidad. Para luego ser extraídos y mostrados en sus respectivas casillas de texto.

El comando UDP está conformado por 14 bytes y se puede ver su estructura en la Figura 60. Esta función resulta útil para tener un conocimiento sincrónico del estado del posicionador.

249	Eje	248	Tipo de Movimiento	247	Posición	246	Velocidad
1	1	1	1	1	4	1	4

Figura 60: Comando UDP de envío de estado. Fuente: [7].

En cuanto a la configuración de los parámetros del posicionador se encuentran en el segundo y tercer panel. El usuario introduce una serie de valores para el movimiento del posicionador y, en caso de salirse del rango de trabajo, se muestra un mensaje de error para cada uno de ellos.

1. Eje: Se trata de un número entero sin signo indicando el eje sobre el que se tienen que aplicar los parámetros. Su valor debe de estar entre 0 y 3.

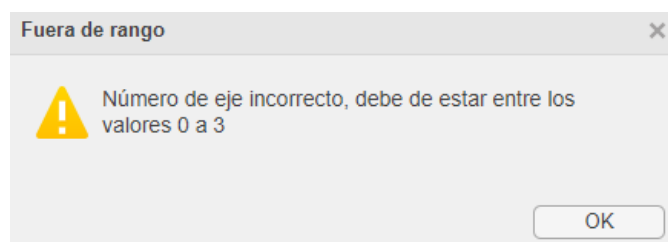


Figura 61: Mensaje de error del eje.

1. Movimiento: Número entero sin signo que indica si se trata de un movimiento absoluto o relativo, sus valores deben de ser 1, 2 o 3.

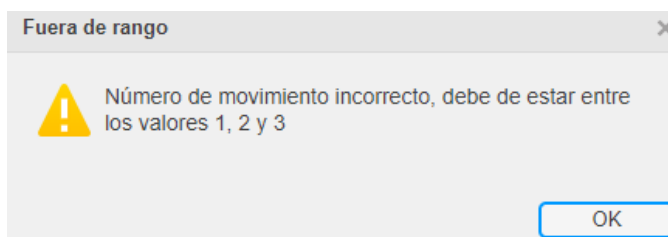


Figura 62: Mensaje de error de movimiento.

2. Velocidad: Número de precisión simple en coma flotante con la velocidad de cruce del movimiento, su valor máximo vendrá definido por el valor máximo introducido en “Axis parameters” dentro de la web de control. No obstante esta tiene un límite de 200 grados por segundo. Por otro lado, se ha observado que en la práctica esta velocidad no es alcanzable.

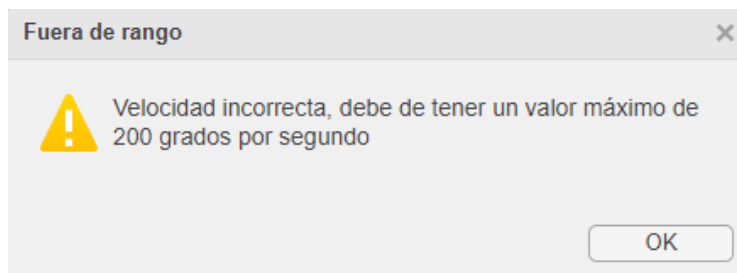


Figura 63: Mensaje de error de velocidad.

3. Aceleración/Deceleración: Ambos valores son números de precisión simple en coma flotante e indican la aceleración inicial de movimiento y la deceleración final de movimiento en grados/segundo<sup>2</sup>. Ambos valores se limitan en el panel de “*Axis Parameters*” y tienen un valor máximo de 200 grados/segundo<sup>2</sup>.

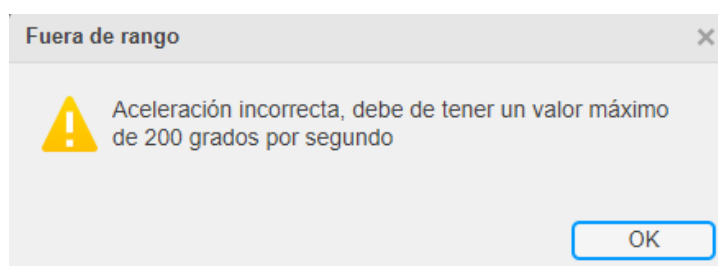


Figura 64: Mensaje de error de aceleración.

4. Posición: Número de precisión simple en coma flotante que indica la posición de destino del movimiento. Dicha posición debe de tener un valor de entre 0 y 365 grados.

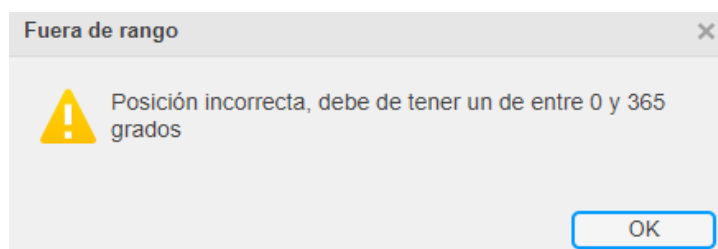


Figura 65: Mensaje de error de posición.

Una vez se han indicado todos estos parámetros pulsaremos el botón “Enviar” y se ejecutará una función diseñada para recoger dichos parámetros y enviar un comando UDP con todos los valores empezando así el movimiento. El comando UDP tiene una longitud de 26 Bytes y está compuesto de la siguiente forma:

255	ID Comando	254	Eje	253	Tipo de Movimiento	252	Pos.	251	Vel.	250	Acel.	249	Decel.
1	1	1	1	1	1	1	4	1	4	1	4	1	4

Figura 66: Comando UDP envío de parámetros. Fuente: [7]

En la sección “Hacer barrido” se ha diseñado un bucle donde se indica una posición inicial y una posición final así como el número de medidas deseadas.

De esta manera, el posicionador se mueve desde la posición inicial y, calculando las pausas necesarias, se desplaza hasta la posición final haciendo pausas según el número de medidas indicadas. Durante estas pausas es cuando el analizador debe tomar la medida. El bucle se realiza con un paso que se calcula de la siguiente manera:

$$paso = \frac{PosicionFinal - PosicionInicial}{N^{\circ}Medidas - 1} \quad (20)$$

## 5.7 Incorporación del posicionador circular en la sonda

Durante el estudio del código diseñado en el TFM se llegó a la conclusión de que no era óptimo incorporar una interfaz que permitiera seleccionar individualmente entre los tres posicionadores.

Esto se debe a que la ventana de “Posicionadores” diseñada no estaba enfocada a una programación por objetos, ya que no era necesario para su versión. El código trata a ambos posicionadores como un bloque común por lo que sería necesario dividir este bloque y rehacer el código desde cero para poder independizar el control de cada posicionador lineal.

Dado este problema y la falta de tiempo se llegó a la conclusión de proponer esta incorporación y modificación de la interfaz gráfica como un trabajo futuro donde se optimizaría todo el código diseñado por Cristina Català para simplificarlo en la mayor cantidad de funciones independientes. Y, de esta manera, poder dividir el código de la sonda en bloques individuales añadiendo así la posibilidad de que el usuario escoja entre las distintas opciones qué posicionador debe de ser el transmisor y cuál el receptor.

Por lo tanto, se ha incluido el control y toma de medidas del posicionador circular como una ventana independiente a la configuración del analizador y de los posicionadores lineales. Añadiendo el control de los conmutadores y la posibilidad de tomar medidas con el posicionador circular de forma independiente al resto. Esta nueva ventana se muestra en la Figura 67.

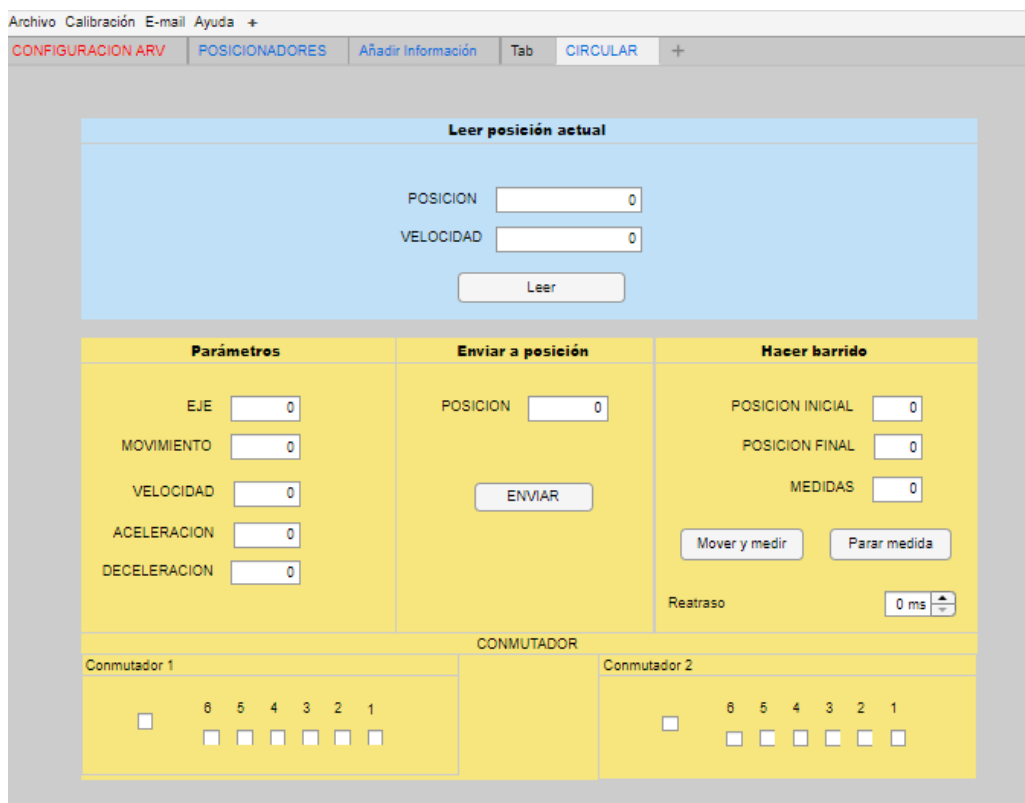


Figura 67: Diseño de la interfaz para el posicionador circular en la sonda.

Donde se ha reutilizado el código de control de los conmutadores y de toma de medidas para incluirlo en este nuevo posicionador añadiendo los botones de “Mover y medir”, “Parar medida” y “Retraso”.



Adicionalmente, se ha ideado una posible propuesta de interfaz gráfica para facilitar el trabajo futuro. Esta propuesta de uso de la interfaz gráfica sería la siguiente: una vez que el usuario haga clic en la ventana de “Posicionadores” se mostrará una ventana que permitirá seleccionar qué posicionador desea usar como transmisor y, después de esto, otra ventana similar para seleccionar el receptor con los restantes posicionadores. Esta ventana tendría un diseño similar al que se muestra en la Figura 68.

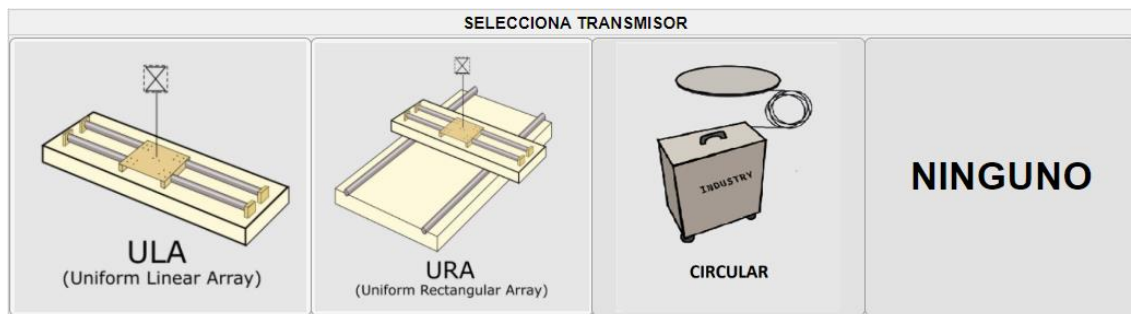


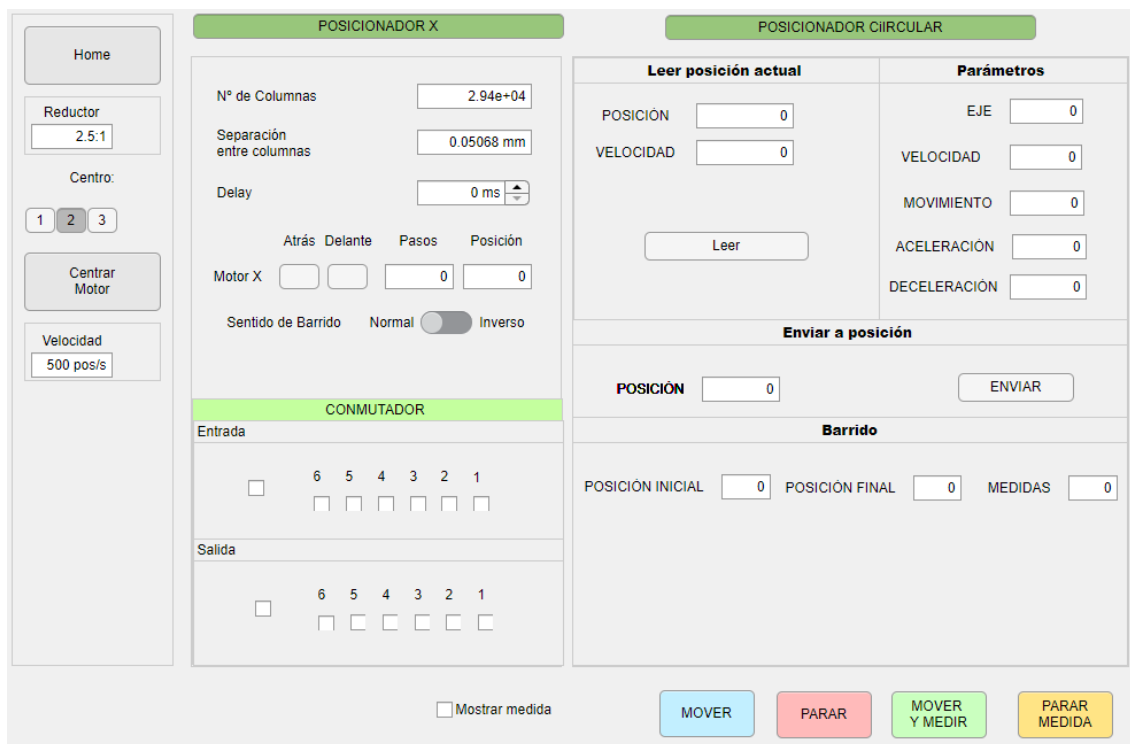
Figura 68: Selección posicionador transmisor.



Figura 69: Selección posicionador receptor habiendo tomado el circular como transmisor.

Una vez seleccionados el posicionador transmisor y el receptor se abriría una ventana adicional que mostraría las configuraciones de ambos posicionadores elegidos. Esta ventana sería similar a la existente y permitiría visualizar y ajustar los parámetros de cada posicionador por lo que habría un total de 12 combinaciones.

Como ejemplo, si el usuario selecciona el posicionador X y el posicionador circular la ventana se mostraría de la siguiente manera:

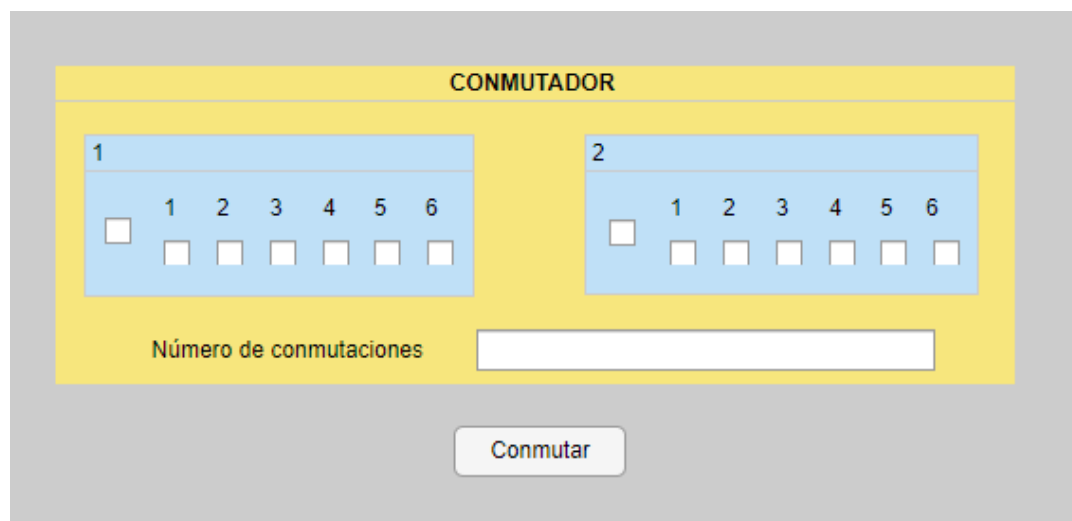


**Figura 70: Propuesta de selección posicionador X y circular.**

En este nuevo diseño se ha integrado la aplicación de control del posicionador circular en la interfaz original de la sonda permitiendo seleccionar los parámetros para ambos posicionadores y comenzar la medida. Esta propuesta representa una idea para el diseño de la nueva interfaz que podría ser desarrollada en un trabajo futuro ya sea como un TFM o bien por otro estudiante como TFG.

## 5.8 Diseño de la interfaz para control de los conmutadores

Para el control de los conmutadores usando dos USB-6501 se ha realizado el diseño de una interfaz gráfica mostrada en la Figura 71.



**Figura 71: Interfaz gráfica aplicación de los conmutadores.**

En este nuevo diseño la interfaz consta de dos paneles, uno por cada conmutador, con 7 casillas de marcación en cada uno. Cada panel incluye 6 casillas correspondientes a las posiciones del conmutador y una casilla para habilitar o deshabilitar dicho conmutador.

Al pulsar el botón “Conmutar” se ejecuta un código compuesto por dos funciones: “EnviarPos” y “EnviarConn”. La función “EnviarPos” realiza lo siguiente:

1. Verifica qué conmutadores están activados: ninguno, uno de los dos o ambos.
2. Crea un vector de 12 dígitos con los valores de posiciones marcados en la aplicación. Una casilla marcada se representa con un 1 y una casilla no marcada con un 0.
3. En función de los conmutadores habilitados, se consideran cuatro casos:
  - Caso 1: Ningún conmutador habilitado. El vector consiste en 12 dígitos, todos ellos igual a 0.
  - Caso 2: Solo el conmutador 1 está habilitado. El vector tiene los primeros 6 dígitos con los valores marcados de posición por el usuario y los últimos 6 dígitos igual a 0.
  - Caso 3: Solo el conmutador 2 está habilitado. El vector tiene los primeros 6 dígitos iguales a 0 y los últimos 6 dígitos con los valores marcados por el usuario.
  - Caso 4: Ambos conmutadores están habilitados. El vector tiene todos los valores indicados por el usuario.

La función “EnviarConn” se encarga de recibir el vector generado, crear los canales de salida digital para cada conmutador y enviar los valores correspondientes a través de dichos canales.

Al pulsar el botón “Conmutar” se genera un bucle que recorre todas las posiciones indicadas por el usuario realizando una pausa en cada posición donde se tomaría la medida correspondiente. Si ambos conmutadores están habilitados, el bucle recorrerá, por cada posición indicada en el conmutador 1, todas las posiciones marcadas en el conmutador 2.

Por ejemplo, si se han marcado las posiciones 1 y 2 del conmutador 1. Y las posiciones 3 y 4 del conmutador 2. El bucle conmutará primero a la posición 1 del conmutador 1 y recorrerá las posiciones 3 y 4 del conmutador 2, para luego cambiar a la posición 2 del primero y realizar el mismo recorrido.

Una vez se ha finalizado la conmutación se muestra por pantalla el número de conmutaciones totales para cada uno de los conmutadores.

Este diseño permite seleccionar un sistema de salidas flexible para la toma de medidas en la sonda, permitiendo añadir hasta 6 antenas por conmutador y realizar mediciones en aquellas antenas deseadas.

## 5.9 Incorporación de los conmutadores en la sonda

El diseño realizado para la incorporación de estos controles se muestra en la Figura 57. No obstante, al añadir este control a la sonda se han realizado una serie de modificaciones.

Al pulsar el botón “Mover y Medir” el código de conmutación se ejecuta después de que los posicionadores se hayan movido a las posiciones indicadas. A continuación, se inicia el bucle de conmutación que recorre cada una de las posiciones indicadas por el usuario y en cada una se realiza la medida correspondiente.

Se ha realizado una ligera adaptación del código de guardado de la medida para tener en cuenta el número de medidas asociadas a las posiciones de los conmutadores. Anteriormente, los archivos se guardaban utilizando el formato “nombre de la medida\_posición del conmutador”. Por ejemplo, si la medida se llamaba “medida1” y se recorrían dos posiciones se generaban los archivos “medida1\_1x1” y “medida1\_1x2”.

Actualmente, se ha añadido el número de posiciones de los conmutadores al final del nombre de archivo, por lo tanto, si la medida pasa por las posiciones 3 y 4 del segundo conmutador, se generarán cuatro archivos en total: “medida1\_1x1\_1x3”, “medida1\_1x2\_1x4”, “medida1\_1x2\_1x2” y “medida1\_1x1\_1x4”.

Además, se ha incluido un contador que registra el número total de conmutaciones realizadas por cada uno de los conmutadores. Este contador permite estimar la vida útil de los conmutadores al mantener un registro de sus conmutaciones individuales.

La función “Contador” se encarga de almacenar el número de conmutaciones en un archivo .matt, y luego accede a este archivo para actualizar las variables que contienen el recuento. Estos valores se guardan en un archivo .txt generado al finalizar la medida donde se muestran características de las mediciones realizadas. Un ejemplo de este archivo se puede ver en la Figura 72.

```
Nombre de las medidas: PruebaContadorCinco
Tipo de medida: MISO
Tiempo de duración de la medida: 0 h 3 min 48 s
Fecha y hora de finalización: 29-May-2023 11:28:54
Configuración del ARV:
- Frecuencia: 10 MHz - 20 MHz
- Ancho de banda FI: 1 MHz
- Número de puntos: 201
- Potencia de salida: 1 dBm
- Promediado: NO
- Factor de promediado: 0
- Tipo de promediado: -
- Tiempo de barrido: 0.14472 ms
- Veces totales de conmutación conmutador 1: 33
- Veces totales de conmutación conmutador 2: 34
Configuración de los posicionadores:
- URA: 2x2
- Separación entre columnas: 99.9663 mm
- Separación entre filas: 99.9663 mm
Características de las medidas:
- SPAN: 10 MHz
- Resolución en frecuencia: 50 kHz
- Resolución temporal: 1e-07 s
- Resolución temporal máxima: 2e-05 s
- Resolución espacial: 30000 mm
- Resolución espacial máxima: 6000 m
Información adicional:
```

Figura 72: Archivo .txt del contador.

En este documento se presentan diversas características, destacando la realización de una medida que muestra el uso total de cada uno de los conmutadores. En este caso particular, el conmutador 1 ha sido conmutado un total de 33 veces mientras que el conmutador 2 ha sido conmutado un total de 34 veces. Este documento nos brinda información detallada sobre las características generales de nuestras medidas de manera sencilla y accesible.

## 5.10 Medidas

La toma de medidas se ha llevado a cabo en el laboratorio de APL del iTeam. El montaje ha consistido en el uso de una antena en recepción situada en el posicionador XY, estando éste anclado al techo y hacia abajo. Y dos antenas en transmisión, una anclada al posicionador lineal y otra a su lado fija en un trípode.

Se ha utilizado únicamente un conmutador ya que para el periodo en el que se realizó la medida no se había recibido aún el segundo controlador USB-6501. Adicionalmente tanto a la salida del conmutador como a la entrada del ARV se han usado unos conversores de radiofrecuencia a fibra óptica.

Se utilizaron tres antenas omnidireccionales de banda ultra ancha del modelo QOM-SL-0.8-40-K-SG-L fabricadas por la empresa *Steatite Ltd*. Estas antenas operan en un rango de frecuencia que abarca desde los 800 MHz hasta los 40 GHz y poseen una polarización vertical.

En la Figura 74 se muestran fotografías del montaje tanto para las antenas transmisoras como receptoras.

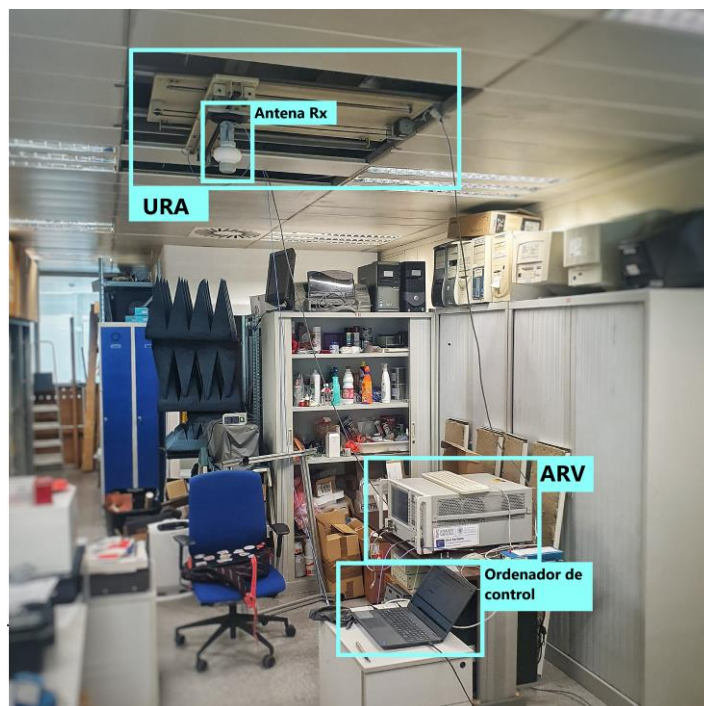


Figura 73: Fotografía antena Rx.

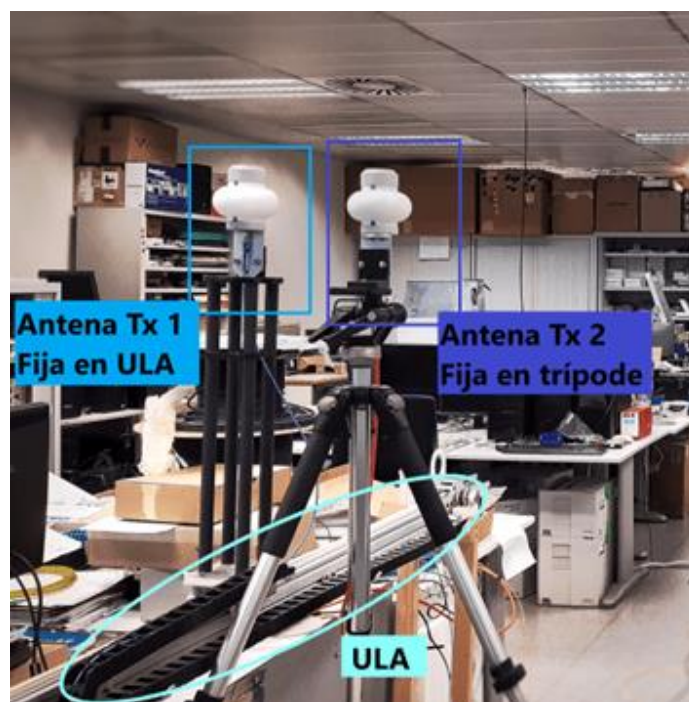


Figura 74: Fotografía antenas Tx.

Las medidas realizadas han sido de 7x7 posiciones en el posicionador XY con una separación de 5 mm y 7 posiciones en el posicionador X con una separación de 10 cm.

Los parámetros de medidas en el analizador vectorial han sido los siguientes:

- Frecuencia inicial de 24 GHz y final de 30 GHz.
- Ancho de banda de frecuencia intermedia de 100 Hz.
- Número de puntos de 4096.
- Promediado por barrido de 3 trazas.
- Potencia de salida de 8 dBm.

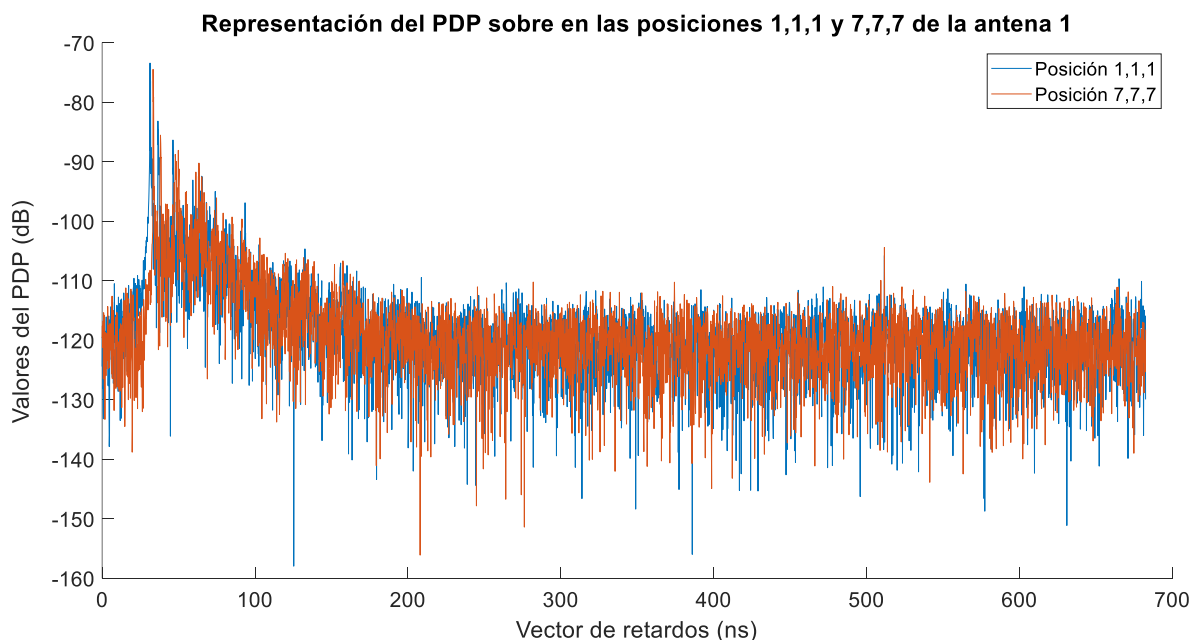
La medida se realizó durante un periodo de 21 horas y 5 minutos con un total de 343 medidas para cada una de las antenas.

### 5.10.1 Procesado de medidas

El procesamiento de los datos obtenidos en las medidas se ha llevado a cabo mediante el uso de Matlab. Extrayendo los valores del parámetro S21 de cada una de las medidas y juntándolas en un archivo .matt de cuatro dimensiones (Columnas del URA, Filas del URA, N° de puntos, Columnas del ULA) por cada una de las antenas transmisoras (Antena 1 corresponde a la situada en el posicionador X y la Antena 2 a la fija en un trípode).

Una vez obtenido el parámetro S21 en Matlab se ha llevado a cabo el cálculo de los parámetros de PDP y *Delay Spread* (3) para cada antena.

En primer lugar se ha realizado el cálculo y representación del PDP para cada una de las antenas comparando la posición 1,1,1 y 1,1,7.



**Figura 75: Representación del PDP para la Antena 1.**

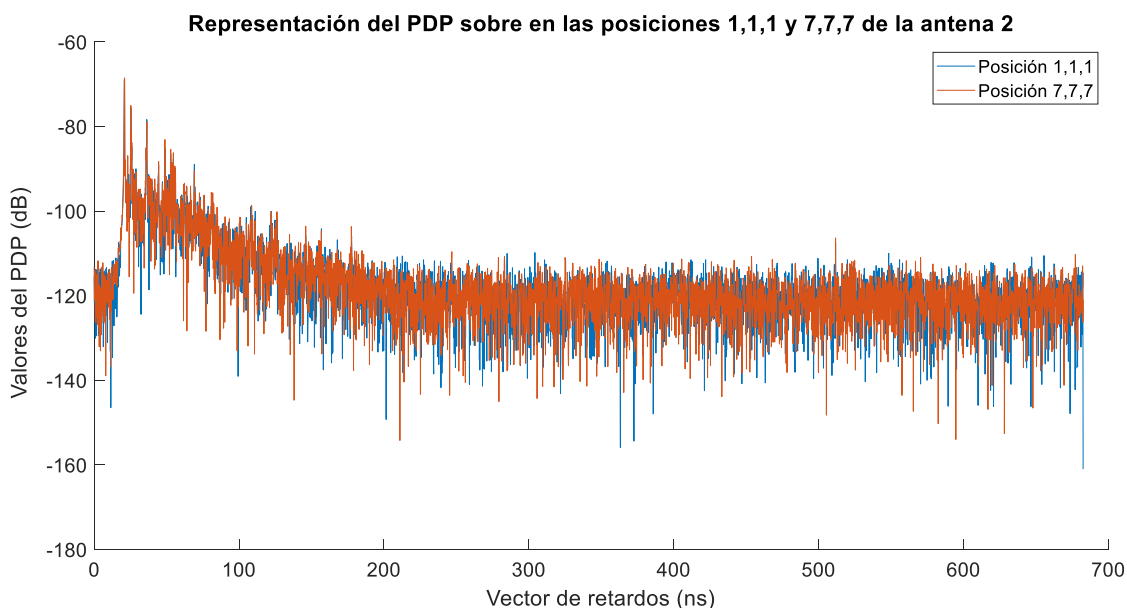


Figura 76: Representación del PDP para la Antena 2.

En ambas figuras se puede apreciar la componente principal de la señal junto al ruido producido. Se puede observar como en la posición 7 del ULA en la antena 1 su componente principal está desplazada ligeramente con respecto a la posición 1 debido a la separación espacial. En cambio, en la antena 2 ambas componentes están en la misma posición ya que la antena permanece fija en el mismo lugar.

Para el cálculo del *Delay Spread* se ha aplicado un *Threshold* de tanto 20 dB como de 30 dB. Este valor elimina toda la señal que esté por debajo del umbral indicado lo que nos va a permitir calcular dichos parámetros sin tener en cuenta el ruido introducido y únicamente la componente principal.

Para la representación del *Delay Spread* se han generado dos gráficas donde, en la primera, se representan las medianas del 25%, 50% y 75% de los valores por cada una de las 7 posiciones del ULA, esto da un total de 49 valores por cada posición. Y una segunda gráfica donde se visualizan los valores máximos y mínimos por posición del ULA para cada antena.

1. Valores de *Delay Spread* con un *Threshold* de 30dB.

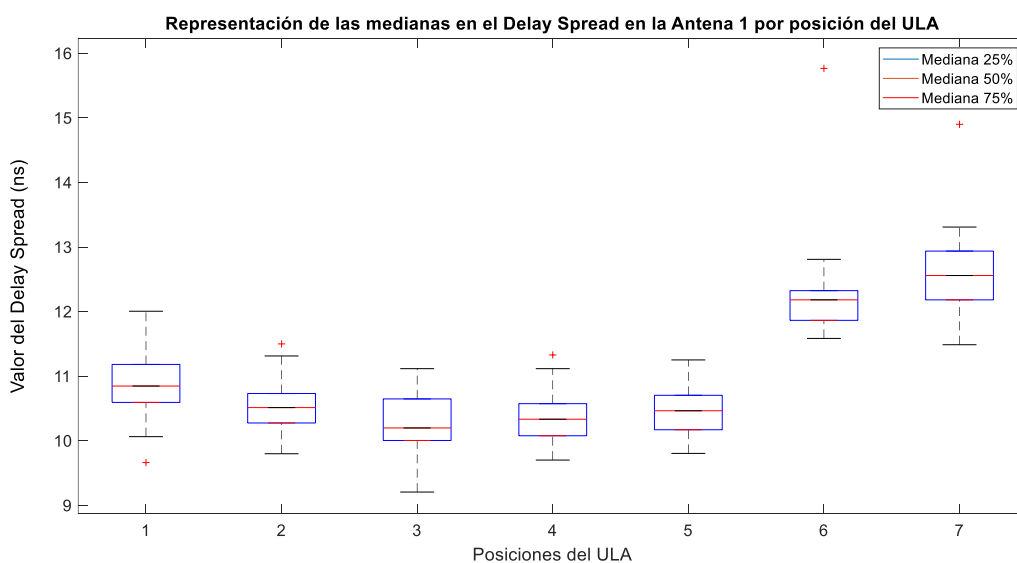
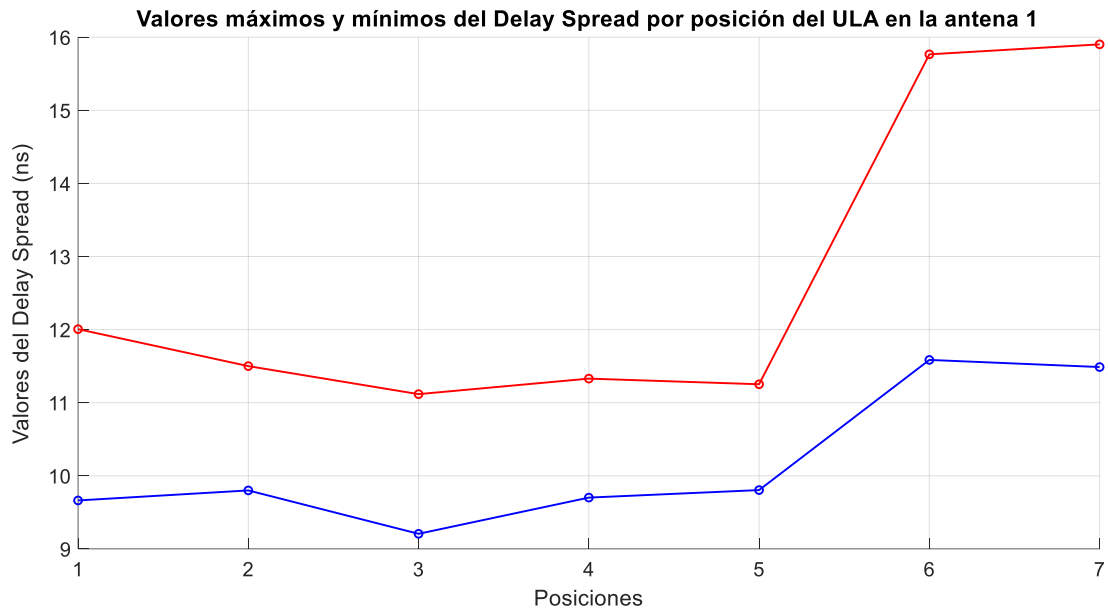
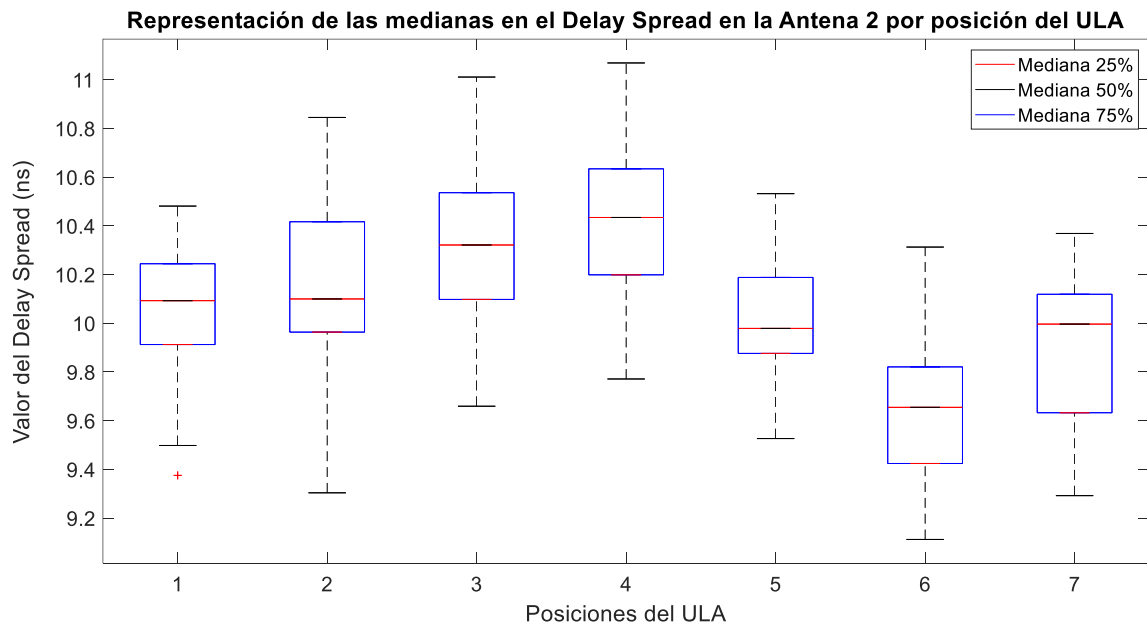


Figura 77: Medianas del Delay Spread para la antena 1 con un TH de 30 dB



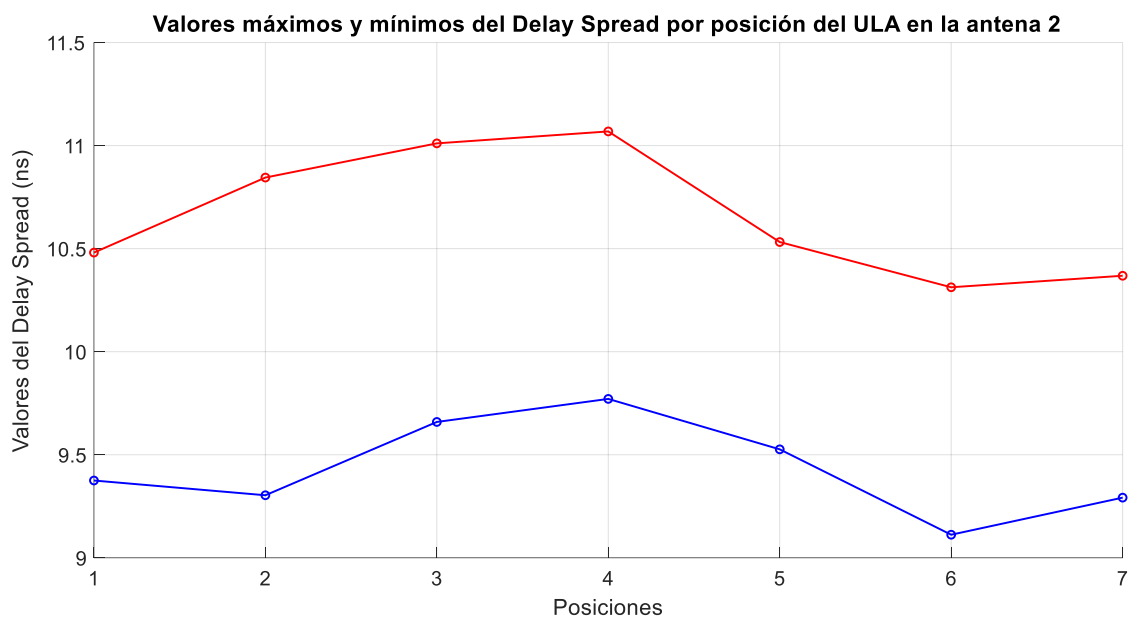
**Figura 78: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 1 con un TH de 30 dB**

Para ambas graficas el *Delay Spread* se representa en nanosegundos y se pueden observar los valores máximos y mínimos de cada posición, llegando a un máximo de aproximadamente 16 ns en la posición 7 y un mínimo de aproximadamente 9 ns en la posición 3. Los resultados obtenidos en la segunda antena se muestran a continuación:



**Figura 79: Medianas del Delay Spread para la antena 2 con un TH de 30 dB.**



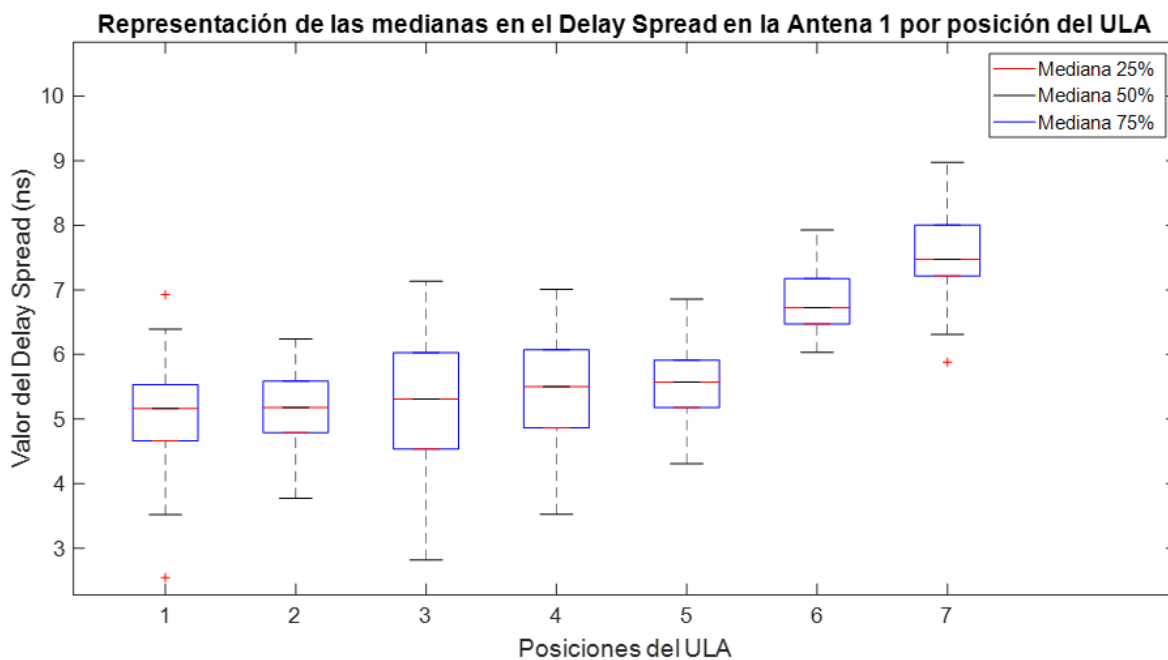


**Figura 80: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 2 con un TH de 30 dB.**

Para esta situación, al estar la antena 2 fija, se puede observar unas variaciones menores en la dispersión del retardo llegando a un valor máximo de aproximadamente 11 ns en la posición 4 y un valor mínimo de aproximadamente 9 ns en la posición 6.

Las variaciones entre los *Delay Spread* de cada posición pueden deberse al cambio en el diagrama de radiación de la antena receptora producido al haberla puesto inversamente de forma que colgase del techo. No obstante estas variaciones son mínimas y se puede calcular el Delay Spread medio en ambas antenas.

2. Valores de *Delay Spread* con un *Threshold* de 20dB.



**Figura 81: Medianas del Delay Spread para la antena 1 con un TH de 20 dB.**

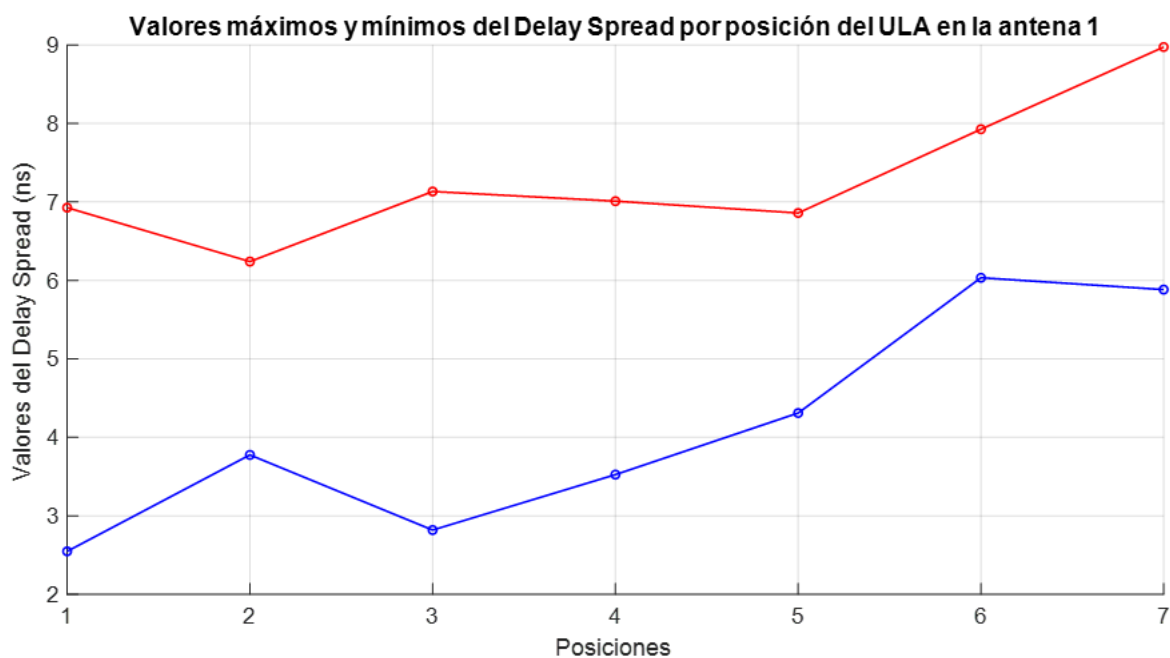


Figura 82: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 1 con un TH de 20 dB.

Para el caso de la antena 1 se puede observar cómo al disminuir el valor *Threshold* y, por lo tanto disminuir el ruido, los valores del *Delay Spread* se han reducido al rango de entre 2.5 y 9 ns. Teniendo un máximo en la posición 7 y un mínimo en la primera posición.

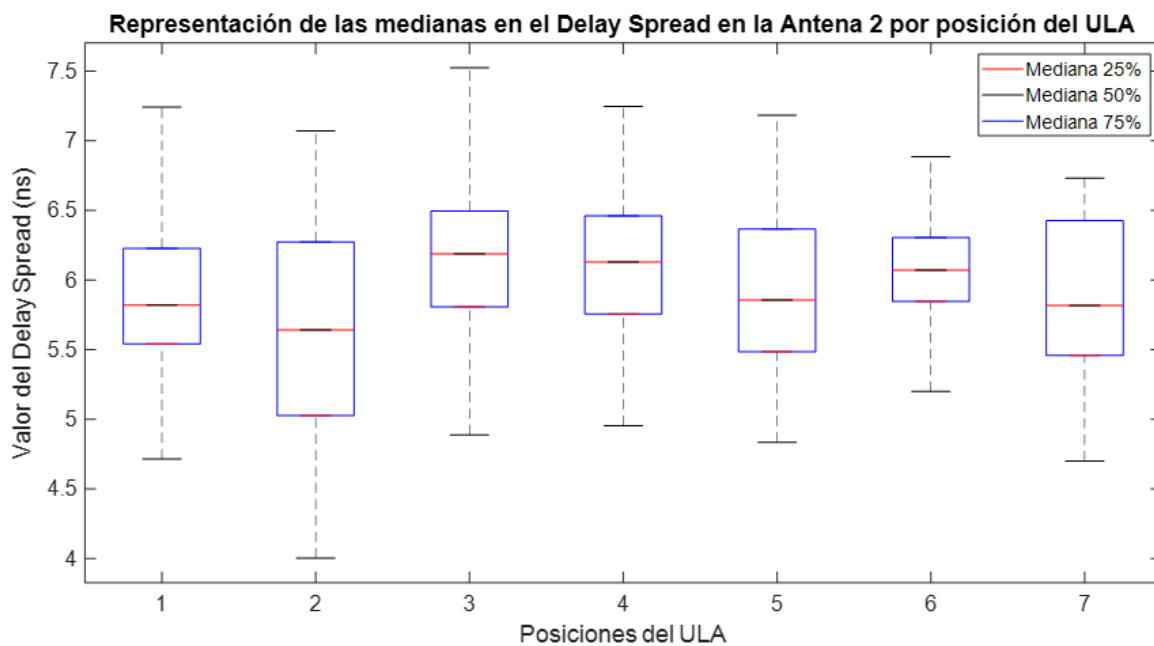


Figura 83: Medianas del Delay Spread para la antena 2 con un TH de 20 dB.

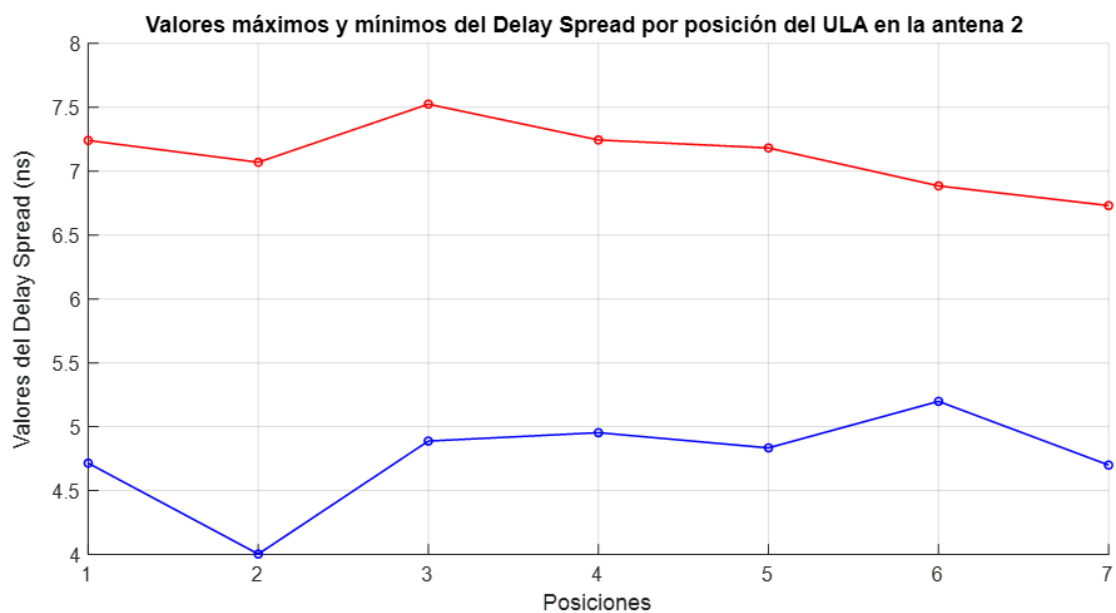


Figura 84: Valores máximos y mínimos del Delay Spread en la antena 2 con un TH de 20 dB.

Los cálculos en la antena 2 habiendo reducido el *Threshold* se puede observar, de nuevo, como los máximos y mínimos se han reducido hasta el rango de entre 4 y 7.5 ns. Teniendo un máximo en la posición 3 y un mínimo en la posición 2.

## 6. Valoración económica

En este capítulo se realiza una valoración económica de los componentes necesarios para la ampliación de la sonda y el coste total sumándole el presupuesto realizado para la sonda original. Se debe de tener en cuenta que todos los precios que listan ya incluyen el IVA.

### COSTE DEL MATERIAL Y EQUIPOS DE LA AMPLIACIÓN

Elemento	Unidades	Coste por unidad	Total
Posicionador circular	1	4.600,00 €	4.600,00 €
Conmutador RF	2	14.222,20 €	28.444,40 €
Controlador USB-6501	2	169,00 €	338,00 €
Sistema extensor USB	1	211,49 €	211,49 €
<b>Total</b>			<b>33.593,89 €</b>

### COSTE DE LA SONDA COMPLETA

Elemento	Unidades	Coste por unidad	Total
Sonda previa	1	209.166,70 €	209.166,70 €
Ampliación	1	33.593,89 €	33.593,89 €
<b>Total</b>			<b>242.760,59 €</b>

Tabla 1: Presupuesto de la ampliación de la sonda.

## 7. Conclusiones y propuestas de trabajo futuro

### 7.1 Conclusiones

El objetivo del TFG era ampliar la sonda existente añadiendo un posicionador circular y el uso de dos conmutadores de RF además de poner a prueba la nueva sonda mediante la toma y procesado de medidas.

Se ha llevado a cabo con éxito el diseño del programa de control del posicionador circular así como de los conmutadores y la incorporación de dichos conmutadores en la interfaz gráfica de la sonda dando la opción al usuario de escoger entre un máximo de 12 antenas adicionales para la toma de medidas.

Se ha cumplido con el diseño de una aplicación de control del posicionador circular a pesar de no haberse podido lograr el objetivo de rediseñar la interfaz gráfica del usuario para dar la opción de escoger entre los tres posicionadores.

Se han añadido una serie de complementos extras a la sonda para mejorar la interacción y control de la sonda con el usuario tales como un contador de conmutaciones, la opción de escoger el puerto de los posicionadores y una estimación previa de la medida a tomar.

Se ha llevado a cabo un estudio riguroso del código de la sonda previa, así como se ha realizado una campaña de pruebas para la revisión y corrección de errores existentes en el código y, de esta forma, asegurarse que la sonda nueva funcionase correctamente.

Por último, se ha logrado exitosamente llevar a cabo una serie de medidas y extracción de datos a partir de la nueva versión de la sonda creada.

### 7.2 Propuestas de trabajo futuro

La propuesta más importante es el diseño de una nueva interfaz gráfica de la sonda a partir de la ya existente para poder dar la opción al usuario de escoger entre los tres posicionadores. Este nuevo diseño ha de ser implementado optimizando el código en el mayor número de funciones independientes para maximizar el rendimiento de la aplicación.

Se ha propuesto una idea de visualización de esta nueva interfaz y este trabajo podrá formar parte de un nuevo TFG o como continuación un TFM junto a la realización de una campaña de medidas exhaustiva con los tres posicionadores y las diversas opciones que éstos presentan.



## 8. Referencias

- [1] C. C. Laoz, “Diseño e implementación eficiente de una sonda de medida para la cracterización del canal radio en milimétricas.” Universitat Politècnica de València, València, 2021.
- [2] C. C. Laóz, “Diseño y automatización de una sonda de medida canal radio en el dominio de la frecuencia,” Universitat Politècnica València , València, 2020.
- [3] J. D. Parsons, The mobile radio propagation channel, Wiley, 2000.
- [4] H. C. E. y. R. F. L. Rolando Bettancourt O., “Medición de ancho de banda de coherencia y dispersión temporal,” *Revista de la Facultad de ingeniería, Universidad Tarpacá*, 2005.
- [5] S. P. López, “Caracterización experimental de la dispersión temporal y angular del canal radio a 60 GHz,” Universitat Politècnica València , València , 2017.
- [6] K. Technologies, “PNA Series Network Analyzers. N5227A PNA Microwave Network Analyzer, 67 GHz,” [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/product/N5227A/pna-microwave-network-analyzer-67-ghz.html>.. [Último acceso: Junio 2023].
- [7] “Manual Usuario mesa de rotación iTeam,” Industry, 2021.
- [8] NI Devices Suport Model USB-6501, “ni.com,” [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-es/support/model.usb-6501.html>.. [Último acceso: Junio 2023].
- [9] K. technologies, “Keysight Technologies,PNA Series Network switches. U7106F Multiport Electromechanical Coaxial Switch,” [En línea]. [Último acceso: Junio 2023].