



## **PROGRAMACIÓN DE UN ANALIZADOR DE SEÑAL PARA MEDIDAS DE PROPAGACIÓN**

**Javier Álvarez Peñarubia**

**Tutor: Vicent Miquel Rodrigo Peñarrocha**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2016-17

Valencia, 4 de Julio de 2017



# Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor del trabajo Vicent Miquel por su ayuda, dedicación, esfuerzo y tiempo extraído de sus obligaciones para realizar este proyecto. Además, quisiera dar las gracias a los compañeros del laboratorio del GRE Bernardo y Toni por su ayuda y colaboración desinteresada.

También, quisiera agradecer a mi familia y amigos por el apoyo prestado en especial a mi madre que siempre me ha animado en los momentos difíciles.

Gracias

*Va por ti, papá*

# Resumen

En este Trabajo Final de Grado se ha diseñado e implementado un programa para automatizar el proceso de obtención de medidas de propagación. Este programa está basado en un analizador de espectros de la serie EXA Signal Analyzer N9010A de Agilent Technologies y un sistema de posicionamiento XY que serán controlados mediante un programa realizado con la herramienta GUIDE de Matlab que, junto con una antena formarán una Sonda de medidas de propagación en banda estrecha.

Este proyecto permite automatizar el proceso de medida y obtención de datos para posteriormente poder trabajar con ellos caracterizando un canal radio. Para ello, el programa cuenta con una serie de funciones que permite configurar el analizador para así tomar las medidas deseadas. Además, el posicionador XY contará con diversas funciones como barridos en forma rectangular o circular para ir tomando medidas en diferentes posiciones.

Los datos tomados son básicamente medidas de potencia en cada frecuencia para poder caracterizar un canal expuesto a diferentes problemas cómo la selectividad en frecuencia y en tiempo. Para este programa se ha tenido en cuenta que los parámetros más importantes para definir una caracterización correcta son el ancho de banda, número de puntos, ancho de banda de resolución, ancho de banda de resolución de vídeo y tiempo de barrido. Estos tres últimos parámetros serán de gran importancia pues van a afectar al tiempo en el que se toma cada medida.

En esta memoria se comenzará introduciendo el tema a exponer con sus objetivos, seguidamente se tratarán unos aspectos teóricos a tener en cuenta para la caracterización de un canal y explicación de los sistemas de medida presentes. Se continuará con una explicación del desarrollo del trabajo y por último se hará mención a unas conclusiones de este proyecto.

# Resum

En este Treball Final de Grau s'ha dissenyat i implementat un programa per a automatitzar el procés d'obtenció de mesures de propagació. Este programa està basat en un analitzador d'espectres de la serie EXA Signal Analyzer N9010A d'Agilent Technologies i un sistema de posicionament XY que seran controlats mitjançant un programa realitzat en la ferramenta GUIDE de Matlab que, junt en una antena, formaran una sonda de mesures de propagació en banda estreta.

Este projecte permet automatitzar el procés de mesura i obtenció de senyes per a posteriorment poder treballar en ells caracteritzant un canal radio. Per ad això, el programa conta en una sèrie de funcions que permeten configurar l'analitzador per a aixina prendre les mesures desitjades. Ademes, el posicionador XY contarà en diverses funcions com agranats en forma rectangular o circular per a anar prenent mesures en diferents posicions.

Les senyes preses son bàsicament mesures de potencia en cada freqüència per a poder caracteritzar un canal exposat a diferents problemes com la selectivitat en freqüència i en temps. Per ad este programa s'ha tingut en conte que els paràmetres més importants per a definir una caracterització correcta son l'ample de banda, número de punts, ample de banda de resolució, ample de banda de resolució de video i temps d'agranat. Estos tres últims paràmetres seran de gran importancia puix van a afectar al temps en el que se pren cada mesura.

En esta memoria s'escomençarà introduint el tema a expondre en els seus objectius, seguidament se tractaran uns aspectes teorics a tindre en conte per a la caracterisació d'un canal i explicació dels sistemes de mesura presents. Se continuarà en una explicació del desenroll del treball i per últim se farà menció a unes conclusions d'este projecte.

# Abstract

In this final thesis, it has been designed and implemented a program to automate the process of obtaining propagation measures. This program is based on an Spectrum Analyzer Agilent Technologies EXA N9010A and a XY Positioning System that will be controlled by a program developed with the Matlab GUIDE tool that, together with an antenna, will form a narrowband channel sounder propagation.

This project allows to automate the process of measurement and obtaining data to work with them characterizing a radio channel. To do this, the program has a series of functions that allows configure the analyzer to take the desired measurements. In addition, the XY positioner will have many functions such as rectangular or circular sweeping to take measurements in different positions.

The data taken are basically power measurements at each frequency to be able to characterize a channel exposed to different problems such as frequency and time selectivity. For this program it has been taken into account that the most important parameters to define a correct characterization are the bandwidth, number of points, resolution bandwidth, video resolution bandwidth and sweep time. These last three parameters will be of great importance because they will affect the time in which each measure is taken.

In this memory will begin introducing the subject to be presented with its objectives, next will be discussed some theoretical aspects to take into account for the characterization of a channel and explanation of the present measurement systems. It will continue with an explanation of the development of the work and finally will mention some conclusions of this project.

# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción, objetivos del trabajo y estructura de la memoria.....</b>	<b>8</b>
1.1    Introducción.....	8
1.2    Objetivos del trabajo.....	9
1.3    Estructura de la memoria.....	10
<b>Capítulo 2. Aspectos teóricos.....</b>	<b>11</b>
2.1    Propagación de ondas electromagnéticas.....	11
2.1.1 <i>Pérdidas de la señal en el espacio libre.....</i>	<i>12</i>
2.1.2 <i>Modelo de propagación en el espacio libre.....</i>	<i>12</i>
2.1.3 <i>Absorción.....</i>	<i>14</i>
2.1.4 <i>Propagación terrestre de las ondas electromagnéticas.....</i>	<i>15</i>
2.1.5 <i>Propiedades de las ondas de radio.....</i>	<i>18</i>
2.2    Caracterización del Canal Radio.....	21
2.2.1 Parámetros característicos del Canal Radio.....	23
2.3    EXA Signal Analyzer N9010A.....	25
2.4    Sistema de posicionado lineal XY.....	31
2.5    Matlab GUIDE.....	34
<b>Capítulo 3. Metodología.....</b>	<b>37</b>
3.1    Descripción del entorno de trabajo.....	37
3.2    Programación SCPI y COM.....	39
3.3    Estructuración de las tareas.....	40
3.4    Diagrama Temporal.....	41
3.5    Presupuesto.....	41
<b>Capítulo 4. Desarrollo del trabajo.....</b>	<b>42</b>
4.1    Establecimiento de conexión con el analizador.....	42
4.2    Establecimiento de conexión con el posicionador.....	45
4.3    Diseño del programa con MATLAB.....	48
4.3.1 <i>Diseño interfaz para controlar el analizador de señal.....</i>	<i>48</i>
• <i>Panel de frecuencias.....</i>	<i>49</i>
• <i>Panel Nivel de Referencia y Escala.....</i>	<i>52</i>

• <i>Promediado</i> .....	54
• <i>Puntos</i> .....	56
• <i>Atenuador</i> .....	57
• <i>Ancho de Banda del Filtro de Resolución</i> .....	59
• <i>Ancho de Banda del Filtro de Vídeo</i> .....	61
• <i>Sweep Time</i> .....	62
• <i>Single</i> .....	64
• <i>Restart</i> .....	65
• <i>Continuous</i> .....	65
• <i>Preset</i> .....	66
• <i>Guardar Configuración</i> .....	66
• <i>Cargar Configuración</i> .....	67
• <i>Medir</i> .....	68
• <i>Parar</i> .....	73
4.3.2 <i>Diseño interfaz para controlar el posicionador XY</i> .....	74
• <i>Desplazamiento en filas y columnas</i> .....	75
• <i>Tipo de Barrido</i> .....	77
• <i>Sentido del Barrido</i> .....	79
• <i>Desplazamiento en círculo</i> .....	79
• <i>Inicializar</i> .....	81
• <i>Botones Home</i> .....	82
• <i>Mover</i> .....	83
• <i>Parar</i> .....	83
• <i>Mover y Medir</i> .....	84
• <i>Parar Medida</i> .....	85
4.3.3 <i>Mensajes de información del programa</i> .....	86
4.3.4 <i>Anexionado de ambas interfaces</i> .....	87
4.3.5 <i>Problemas y soluciones</i> .....	88

**Capítulo 5. Conclusión y líneas de trabajo futuras.....90**

5.1 *Conclusión*.....90

5.2 *Líneas de trabajo futuras*.....91

**Bibliografía.....92**





# Capítulo 1. Introducción, objetivos del trabajo y estructura de la memoria

## 1.1 Introducción

El estudio de las comunicaciones inalámbricas tiene un amplio rango de posibilidades y recursos de las ondas electromagnéticas, de ahí que sea tan importante conocer las características del canal para el posterior diseño de un sistema de comunicaciones y así minimizar los efectos producidos por la dispersión temporal y frecuencial que hacen que el canal sea tan hostil. Una mención especial tiene el efecto multicamino producido por la dispersión temporal en el cual la frecuencia utilizada y la distancia entre transmisor y receptor serán determinantes en el diseño de un sistema.

El canal utilizado en este proyecto es un canal radio que presenta los inconvenientes anteriormente citados, pero que también posee ciertas ventajas respecto a la transmisión por cable como puede ser el rápido despliegue y la movilidad que permite. Por ello, utilizamos el analizador para que nos proporcione una respuesta en frecuencia en base a las contribuciones multicamino que recibe.

Para ello, se va a utilizar un analizador de señales de la familia Agilent Technologies modelo EXA Signal Analyzer N9010A que nos proporcionará los datos necesarios para caracterizar un canal en banda estrecha. Este equipo nos proporcionará información de potencia en un rango de frecuencia que posteriormente se almacenará en el equipo para su posterior trabajo.

También, se contará con un sistema de posicionado XY que albergará una antena con la que irá tomando diferentes medidas en diferentes puntos creando así un sistema automatizado de medida.

## 1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo de este proyecto es el de realizar un programa que pueda realizar el proceso de captación de medidas de propagación a través de un analizador de espectros que, junto con un sistema de posicionado lineal permita la automatización de este proceso.

Para ello, se trabajará con la herramienta GUIDE de Matlab para realizar la interfaz de ambos programas (uno para el control del analizador y otro para el control del posicionador) que unirá ambos instrumentos para controlar el sistema de medida.

Todo esto se juntará para crear una sonda de canal que será este complejo sistema de medida que permitirá la caracterización de un canal radioeléctrico obteniendo información diversa sobre las condiciones de propagación de la señal electromagnética a partir de medidas realizadas bien en banda estrecha o en banda ancha. A partir de las medidas tomadas con la sonda de canal es posible realizar una caracterización experimental del canal estudiando determinados parámetros que influyen sobre las prestaciones final del sistema o que condicionan el diseño de técnicas para mitigar los efectos que introduce el canal de propagación.

Así, por ejemplo, en la caracterización del canal en banda estrecha se emplea una frecuencia para emitir y recibir. Dentro de esta opción, la más sencilla es emplear un generador para emitir un tono (sinusoide) de frecuencia fija, y un analizador de espectro para medir la señal recibida. En este tipo de medidas existe la posibilidad de que el transmisor y/o el receptor estén en movimiento, o incluso los objetos con los que interactúa el frente de ondas, como por ejemplo cuando se realizan medidas en escenarios para comunicaciones vehiculares.

Una sonda de banda estrecha como la diseñada permite analizar la atenuación introducida por el canal en función de la separación entre el transmisor y el receptor, la selectividad temporal introducida debida al efecto Doppler, o mismamente estudiar el efecto dispersivo en frecuencia a través de la medida directa de la densidad de potencia en la variable de desplazamiento Doppler. A diferencia de otros sistemas donde se analiza el efecto dispersivo en frecuencia a partir de la envolvente recibida, con esta sonda se puede capturar las distintas contribuciones espectrales en recepción permitiendo un mejor análisis del canal en el dominio de la frecuencia.

Por ello, para alcanzar dichos objetivos se deberá conocer exhaustivamente el analizador a utilizar para luego poder realizar una comunicación fluida con el instrumento. También el conocimiento para el uso de la herramienta GUIDE de Matlab será fundamental para hacer la interfaz del programa que se encargue de controlar el analizador. Por último, también se deberá de conocer cómo trabaja el sistema de posicionado lineal XY para poder controlarlo con el programa.

En este trabajo además de estos instrumentos se utilizará una antena para la captación de medidas que irá conectada al analizador y que se montará sobre el posicionador para ir variando su posición. Otro detalle de importancia a tener en cuenta en el trabajo será la conexión de los distintos instrumentos junto con el cableado a utilizar para su correcto funcionamiento.

### **1.3 Estructura de la memoria**

La memoria de este trabajo se divide en varios capítulos bien diferenciados. En el segundo capítulo se tratarán ciertos aspectos teóricos que servirán para mejorar el conocimiento de este proyecto. Por tanto, se tratará el tema de la propagación de las ondas electromagnéticas pues se ha considerado de gran importancia esta explicación pues la base de este proyecto es la captación de este tipo de ondas. Seguidamente se tratará el tema de la caracterización de un Canal Radio junto con los problemas y ventajas que presentan y sus características. También, se explicará el instrumento a utilizar junto con los bloques que componen este instrumento y sus características fundamentales y para cerrar el capítulo 2 se tratará de explicar la herramienta GUIDE de Matlab con las funciones básicas que se utilizan.

El capítulo 3 será un capítulo dedicado a la metodología en el que se explicará el entorno de trabajo además de la programación que se ha utilizado para diseñar el programa y conectar con el analizador. También se añadirá un presupuesto del proyecto y el diagrama temporal con las diversas tareas realizadas en cada mes.

El capítulo 4 será el más importante de este trabajo pues se dedicará a la explicación de la interfaz del programa. Este capítulo se dividirá en dos partes. Por una parte, se explicará la interfaz del programa dedicada al control del analizador y por otra parte, la interfaz del programa dedicada al control del posicionador. Contará además con un apartado de problemas y soluciones ocurridos durante la realización.

Por último, el capítulo 5 tratará de las conclusiones de este trabajo y de unas líneas de trabajo futuras para posteriores proyectos relacionados con este tema.

# Capítulo 2. Aspectos teóricos

## 2.1 Propagación de ondas electromagnéticas

La propagación de ondas se refiere a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre. Aunque el espacio libre realmente implica en el vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre y se puede considerar siempre así. La principal diferencia es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío.

Las ondas electromagnéticas se propagan a través de cualquier material dieléctrico incluyendo el aire, pero no se propagan bien a través de conductores con pérdidas como el agua de mar ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material disipando con rapidez la energía de las ondas.

Las ondas de radio se consideran ondas electromagnéticas como la luz y al igual que ésta, viajan a través del espacio libre en línea recta con una velocidad de 300 000 000 metros por segundo. Otras formas de ondas electromagnéticas son los rayos infrarrojos, los ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

Para este proyecto nos centraremos en las ondas electromagnéticas que el instrumento es capaz de medir que es hasta los 27 GHz, lo que incluye numerosos tipos de ondas como por ejemplo las ondas de radio. Las ondas de radio se propagan por la atmósfera terrestre con energía transmitida por la fuente, posteriormente la energía se recibe del lado de la antena receptora. La radiación y la captura de esta energía son funciones de las antenas y de la distancia entre ellas.

Los conceptos de rayos y frentes de onda son auxiliares para ilustrar los efectos de propagación de las ondas electromagnéticas a través del espacio libre. Un rayo se considera como una línea trazada a lo largo de la dirección de propagación de una onda electromagnética. Estos rayos son utilizados para mostrar la dirección relativa de la

propagación de la onda electromagnética, pero esto no indica que se refiere a la propagación de una sola onda electromagnética.

Un frente de onda representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante. El frente de onda es formado cuando se unen los puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente. Dentro de los tipos de frentes de ondas hay varios como el frente de ondas plano, esférico y producido por una fuente puntual, aunque no se ahondará en la explicación de éstos.

### ***2.1.1 Pérdidas de la señal en el espacio libre***

El espacio libre puede ser considerado como vacío y no se consideran pérdidas. Cuando las ondas electromagnéticas se encuentran en el vacío, se llegan a dispersar y se reduce la densidad de potencia a lo que es llamado atenuación. La atenuación se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre. La atmósfera terrestre no se le considera vacío debido a que contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética y a este tipo de reducción de potencia se le llama pérdidas por absorción la cual no se presenta cuando las ondas viajan fuera de la atmósfera terrestre.

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que describe cómo se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

### ***2.1.2 Modelo de propagación en el espacio libre***

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la señal recibida directa cuando el transmisor y el receptor tienen línea de vista entre ellos. Los sistemas de comunicación vía satélite y los enlaces microondas con línea de vista típicamente son en el espacio libre.

Como la mayoría de los modelos de propagación en el espacio libre, el modelo predice que la potencia recibida decrece a medida que la separación entre las antenas receptora y transmisora aumenta. La energía recibida en el espacio libre es función de la distancia y está dada por:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

Donde:

$P_r(d)$  es la potencia recibida que es función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

$P_t$  es la potencia transmitida.

$G_t$  es la ganancia de la antena transmisora.

$G_r$  es la ganancia de la antena receptora.

$\lambda$  es la longitud de onda en metros.

$d$  es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor en metros.

$L$  es el factor de pérdida del sistema no relacionado con la propagación ( $L \geq 1$ ).

La ganancia de cualquier antena está relacionada con su área efectiva,  $A_e$  y está dada por:

$$P_r(d) = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2)$$

Donde:

$A_e$  está relacionada con la medida física de la antena.

$\lambda$  = longitud de onda y está dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (3)$$

Donde:

$f$  = frecuencia de la portadora en Hz.

$\omega c$  = frecuencia de la portadora en radianes por segundo.

$c$  = velocidad de la luz en metros/s.

Los valores para  $P_t$  y  $P_r$  deben de estar expresados en las mismas unidades.

La ecuación del espacio libre muestra que la potencia recibida decae al cuadrado de la distancia de separación entre las antenas. Esto implica que la potencia recibida decae con la distancia a medida de 20 dB / década.

### **2.1.3 Absorción**

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas.

La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia  $I^2R$ . Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. Así también la absorción de una onda depende del medio en el que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien a la distancia total que la onda se propaga a través de la atmósfera, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el primer kilómetro de propagación son las mismas que en el último kilómetro.



En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la siguiente figura se tiene la absorción en decibelios por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 GHz a 200 GHz cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua.

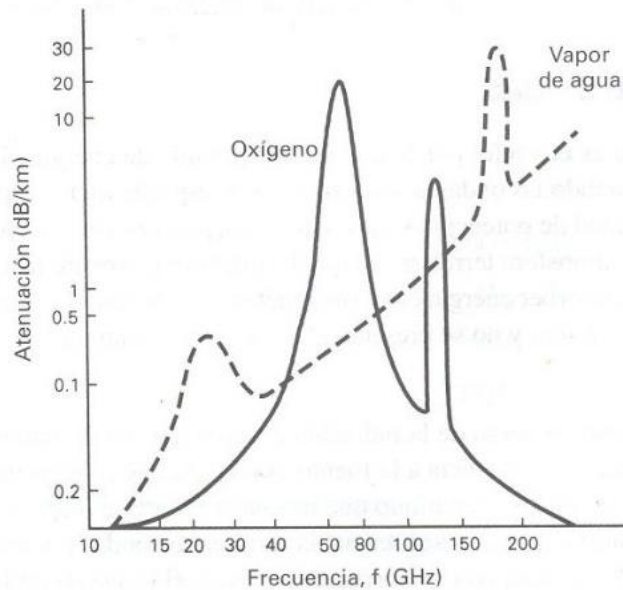


Figura 1 Absorción atmosférica en ondas electromagnéticas

#### 2.1.4 Propagación terrestre de las ondas electromagnéticas

Las ondas terrestres son todas las ondas electromagnéticas que viajan dentro de la atmósfera terrestre, así también, las comunicaciones entre dos o más puntos de la Tierra son llamadas radiocomunicaciones. Las ondas terrestres se ven influidas por la atmósfera y por la Tierra misma.

Las radiocomunicaciones terrestres se pueden propagar de distintas formas y estas formas dependen de la clase de sistema y del ambiente, las ondas terrestres tienden a viajar en línea recta, pero tanto la Tierra como la atmósfera pueden alterar su trayectoria.

Existen tres formas de propagación de ondas electromagnéticas dentro de la atmósfera que corresponden a las ondas terrestres, ondas espaciales y ondas celestes o ionosféricas. Cuando las ondas viajan directamente del transmisor al receptor se le llama transmisión de línea de vista (*LOS-Line of Sight*). A continuación, se muestra en la siguiente imagen los tipos de ondas:



Figura 2 Modos normales de propagación de ondas

- **Propagación de ondas terrestres**

Las ondas terrestres son las ondas que viajan por la superficie de la tierra, éstas deben de estar polarizadas verticalmente debido a que el campo eléctrico en una onda polarizada horizontalmente sería paralelo a la superficie de la tierra y se pondría en corto por la conductividad del suelo.

En las ondas terrestres el campo eléctrico variable induce voltajes en la superficie terrestre que hacen circular corrientes muy parecidas a las de una línea de transmisión. La superficie terrestre también tiene pérdidas por resistencia y por dieléctrico. Por consiguiente, las ondas terrestres se atenúan a medida que se propagan haciéndolo mejor sobre una superficie buena conductora como el agua salada y son mal propagadas en superficies como desiertos. La atmósfera terrestre tiene un gradiente de densidad, es decir, la densidad disminuye en forma gradual conforme aumenta la distancia a la superficie terrestre, esto hace que el frente de onda se incline en forma progresiva hacia adelante. Así, la onda terrestre se propaga en torno a la Tierra y queda cerca de su superficie pudiéndose propagar más allá del horizonte o incluso por toda la circunferencia de la Tierra como se muestra en la siguiente figura:

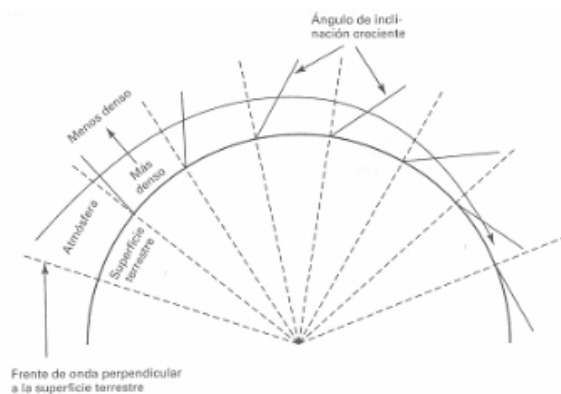


Figura 3 Propagación de ondas terrestres

- **Propagación de ondas espaciales**

Esta clase de propagación corresponde a la energía irradiada que viaja en los kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre. Las ondas espaciales son todas las ondas directas y reflejadas en el suelo como se muestra en la siguiente figura:

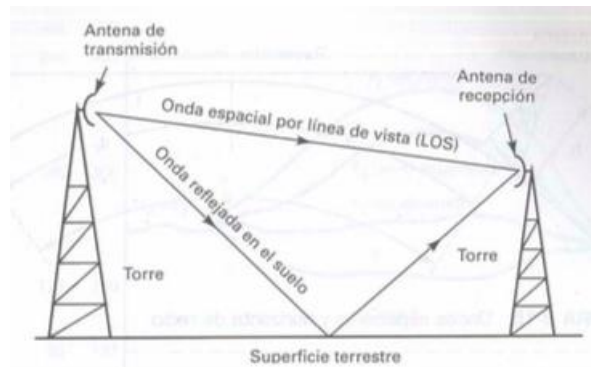


Figura 4 Propagación de ondas espaciales

Las ondas directas viajan esencialmente en línea recta de la antena transmisora a la receptora. Esta transmisión se le llama transmisión de línea de vista o *Line of Sight*. Esta transmisión se encuentra limitada principalmente por la curvatura de la tierra. La curvatura de la Tierra presenta un horizonte en la propagación de las ondas espaciales, que se suele llamar el horizonte de radio. Este horizonte se encuentra más lejano que el horizonte óptico para la atmósfera estándar común.

Aproximadamente, el horizonte de radio se encuentra a cuatro tercios del horizonte óptico como se muestra a continuación:

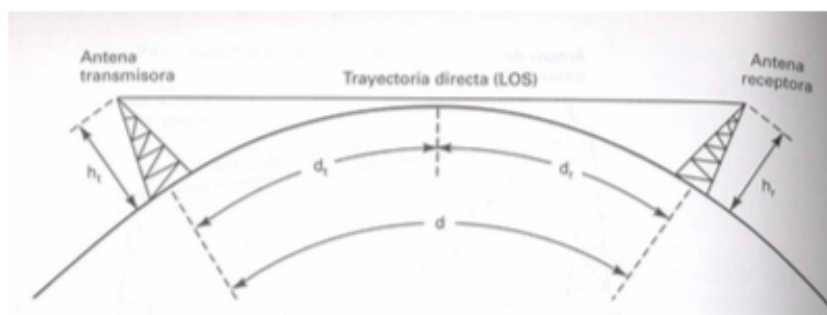


Figura 5 Ondas espaciales y horizonte de radio

### 2.1.5 Propiedades de las ondas de radio

En la atmósfera terrestre, la propagación de frentes de onda y rayos puede diferir del comportamiento en el espacio libre debido a efectos ópticos. Estos efectos ópticos son principalmente clasificados en refracción, reflexión, difracción e interferencia llamándose ópticos debido a que fueron primeramente observados en la ciencia óptica que se encarga de estudiar a las ondas luminosas.

Debido a que las ondas luminosas son ondas electromagnéticas de alta frecuencia también se pueden aplicar los mismos conceptos a las ondas de radio. Por esto se pueden sustituir las ecuaciones de Maxwell por el trazo geométrico de rayos haciendo los cálculos mucho más sencillos.

- **Refracción**

La refracción se refiere al cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por lo tanto, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad como se muestra en la siguiente figura:

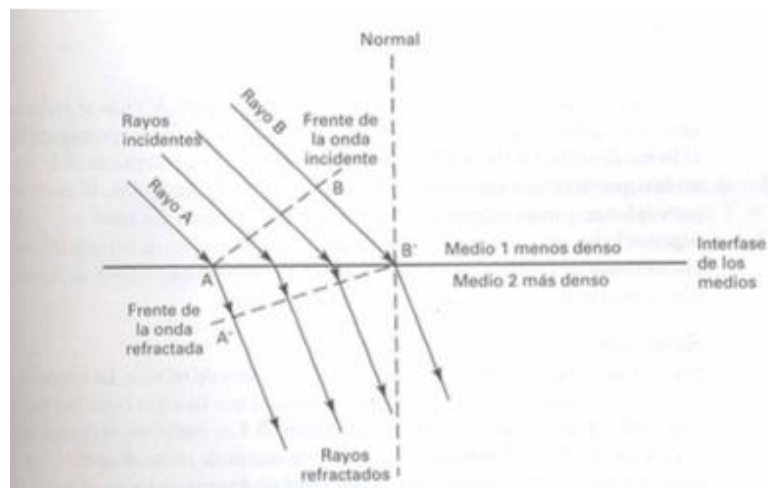


Figura 6 Refracción en una frontera plana entre dos medios

En la figura anterior se muestra cómo el rayo A se propaga del medio 1 al medio 2 siendo el medio 1 menos denso que el 2. El rayo A proveniente del medio 1 con menos densidad experimenta un cambio de dirección al propagarse dentro del medio 2.

El ángulo de incidencia es llamado al ángulo que forma la onda incidente y la normal y el ángulo de refracción es el formado por la onda propagada en el medio y la normal, así, el índice de refracción no es más que la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío y la velocidad de propagación de la luz en determinado material.

- **Reflexión**

La reflexión se refiere al choque de la onda electromagnética con la frontera entre dos medios y parte o toda la potencia de la onda no se propaga en el medio si no que es reflejada en dirección opuesta al segundo medio como se muestra en la siguiente figura dónde el frente de onda incidente choca con el medio 2 con un ángulo de incidencia  $\theta_i$ ; Este frente de onda es reflejado en su totalidad con un cambio de dirección llamado  $\theta_r$ .

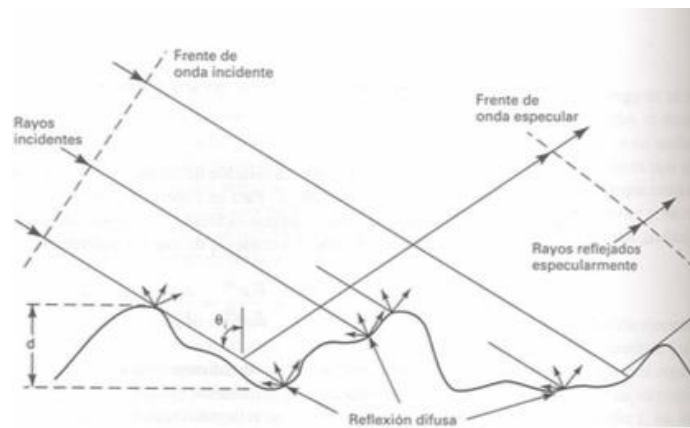


Figura 7 Reflexión

- **Difracción**

La difracción se refiere a la modulación o redistribución de la energía dentro de un frente de onda al pasar cerca de la orilla de un objeto opaco. La difracción es el fenómeno que permite que las ondas luminosas o de radio se propaguen en torno a las esquinas. Cuando un frente de onda pasa cerca de un obstáculo o discontinuidad cuyas dimensiones sean del tamaño comparable a una longitud de onda, no se puede usar el análisis geométrico como en los casos anteriores. En estos casos se debe de usar el principio de Huygens.

En los casos en el que el frente de onda es considerado plano y finito, es incompleta la anulación en direcciones aleatorias. En consecuencia, el frente de onda se reparte hacia fuera, o se dispersa a lo que en este caso se le llama difracción. Este fenómeno es comúnmente observado cuando se abre la puerta de un cuarto oscuro. Los rayos de luz se difractan en torno a la orilla de la puerta, e iluminan lo que hay detrás de ella.

- **Interferencia**

La interferencia es producida siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas de tal manera que se degrada el funcionamiento del sistema. La interferencia está sujeta al principio de superposición lineal de las ondas electromagnéticas, y se presenta siempre que dos o más ondas ocupan el mismo punto del espacio en forma simultánea. El principio de la superposición lineal establece que la intensidad total de voltaje en un punto dado en el espacio es la suma de los vectores de onda individuales.

En la siguiente figura se muestra la suma lineal de dos vectores de voltaje instantáneo, cuyos ángulos de fase difieren en el ángulo  $\theta$ . Se aprecia que el voltaje total no es tan solo la suma de las dos magnitudes vectoriales, sino más bien la suma fasorial. En la propagación por el espacio libre, puede existir una diferencia de fases solo porque difieran las polarizaciones electromagnéticas de las dos ondas. Según los ángulos de fase de los dos vectores, puede suceder una suma o resta. Esto implica simplemente que el resultado puede ser mayor o menor que cualquiera de los dos vectores, así que las ondas electromagnéticas pueden ser anuladas o reforzadas.

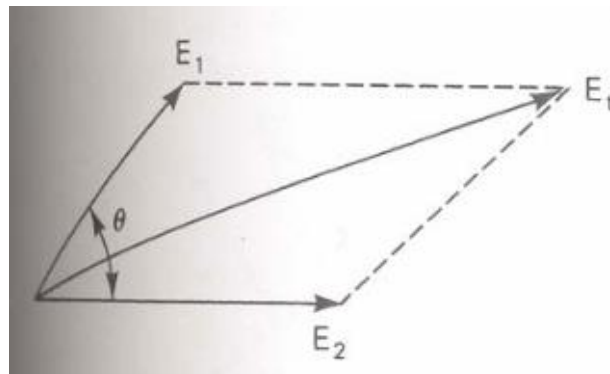


Figura 8 Suma lineal de dos vectores con distintos ángulos de fase

## 2.2 Caracterización del canal Radio

El entorno en el que se produce la comunicación mediante señales electromagnéticas actúa de manera fundamental sobre la comunicación, siendo el elemento más importante en los sistemas de transmisión vía radio. El canal radio se comporta como un filtro selectivo en frecuencia, y es de suma importancia conocer cómo va a afectar a las comunicaciones de una determinada banda de frecuencias para saber si un sistema puede o no ser implantado en dicho entorno.

Podemos considerar que el canal radio actúa como un sistema que transforma señales a la entrada en señales de salida como un filtro lineal variante en el tiempo. Se puede describir el comportamiento del canal tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo.

Como en cualquier sistema lineal, la descripción del canal se realiza mediante su respuesta al impulso. Como el canal puede ser variante en el tiempo, la respuesta al impulso también lo será. La siguiente función representa la función en el dominio temporal que es función de una serie de réplicas atenuadas, retardadas y desplazadas en fase de las señales transmitidas:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) \exp[j(2\pi f_c \tau_i(t) + \varphi_i(t, \tau))] \delta(\tau - \tau_i) \quad (4)$$

Cuando se pasa al dominio frecuencial, la función pasa a ser  $H(f, \nu)$  y es la denominada función de ensanchamiento Doppler-Spread a la salida que determina el espectro del canal a la salida en función del espectro a la entrada.

También, para caracterizar un canal se cuenta con la función de transferencia variable con el tiempo  $T(f, \tau)$  que relaciona la señal temporal a la salida con el espectro de la señal a la entrada y la función de transferencia Doppler/retardo  $S(\tau, \nu)$  que representa de forma conjunta tanto el ensanchamiento temporal (de retardo) como el frecuencia, también llamado Doppler.

Estas cuatro funciones bidimensionales sirven para caracterizar canales tanto deterministas como aleatorios y pueden relacionarse mediante una transformada de Fourier directa o inversa como se muestra a continuación:

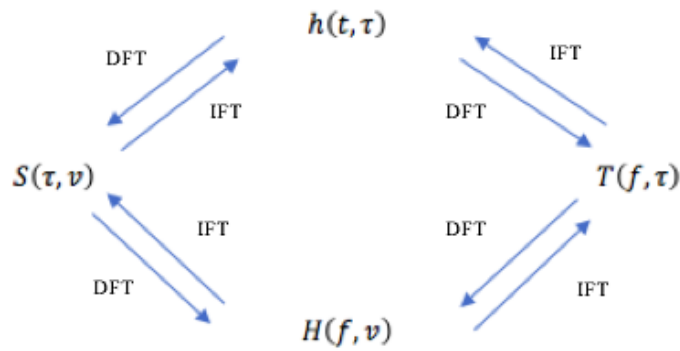


Figura 9 Relación entre las funciones de canal

En la realidad, las características de los canales varían de forma aleatoria, por lo que las funciones anteriores pueden explicarse mediante procesos estocásticos. La aproximación más simple para analizar estas funciones se basa en obtener las funciones de correlación que se muestran a continuación:

$$E[h(t, \tau)h^*(s, \eta)] = R_h(t, s; \tau, \eta) \quad (5)$$

$$E[H(f, \nu)H^*(m, \mu)] = R_H(f, m; \nu, \mu) \quad (6)$$

$$E[T(f, t)T^*(m, s)] = R_T(f, m; t, s) \quad (7)$$

$$E[S(\tau, \nu)S^*(\eta, \mu)] = R_S(\tau, \eta; \nu, \mu) \quad (8)$$

Donde  $t$  y  $s$  son variables de tiempo,  $\tau$  y  $\eta$  variables de retardo temporal,  $f$  y  $m$  variables frecuenciales,  $\nu$  y  $\mu$  variables de desplazamiento frecuencial. Se pueden relacionar las funciones de correlación del canal por medio de transformadas y antitransformadas dobles de Fourier como muestra la siguiente figura:

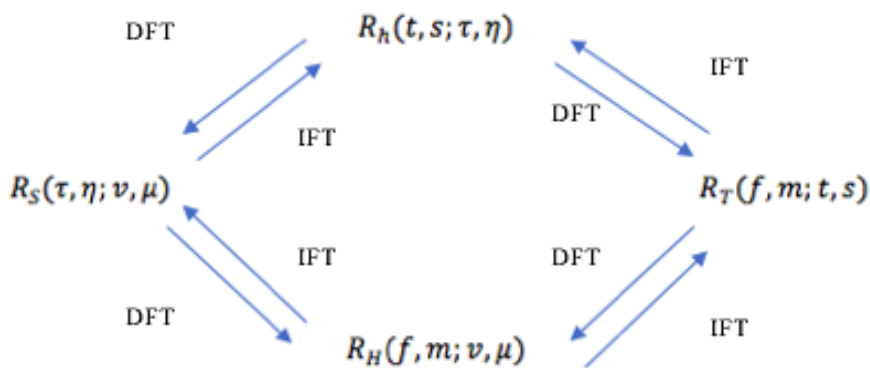


Figura 10 Relación entre las funciones de correlación del canal



### **2.2.1 Parámetros característicos del canal radio**

Para caracterizar un canal radio, hay una serie de parámetros en los que hay que fijarse y que son fundamentales para su correcta caracterización. Los parámetros que se van a describir serán las pérdidas de propagación, el Power Delay Profile (PDP), el RMS Delay Spread y el Ancho de Banda de Coherencia que se obtendrán a partir de la respuesta en frecuencia del canal.

- **Power Delay Profile**

El Power Delay Profile (PDP) nos da la intensidad de las contribuciones multicamino recibidas en un entorno en función del retardo temporal de cada una. Dicho retardo es diferente para cada componente debido a que recorren distancias diferentes, por diferentes caminos. Si bien se puede representar el PDP en función del retardo temporal, también es habitual representar el PDP en función de la distancia recorrida por cada contribución, relacionando los retardos con la velocidad de la luz en el medio.

Del PDP se puede obtener fácilmente la potencia recibida de la máxima contribución, que será generalmente la del rayo directo. La potencia máxima recibida permite analizar en un rango temporal fluctuaciones del rayo directo e identificar posibles cambios en las condiciones del canal.

- **Pérdidas de propagación**

Las pérdidas de propagación son la reducción de densidad de potencia de una onda electromagnética que se produce mientras dicha onda se propaga como se ha explicado en el punto anterior. Estas pérdidas son un aspecto crítico a la hora de analizar la viabilidad de un determinado enlace de un sistema de telecomunicaciones. Las pérdidas de propagación pueden deberse a multitud de efectos, como son las pérdidas en espacio libre, refracciones, difracciones, reflexiones y absorciones, entre otros. Evidentemente influye la distancia del enlace, así como la altura y colocación de las antenas y el entorno. La siguiente ecuación deduce la respuesta al impulso del canal:

$$PL = \frac{1}{\int_{\tau} |h(t,\tau)|^2 dt} \quad (9)$$

- ***Delay Spread***

El Delay Spread es una medida para caracterizar las contribuciones multicamino en un canal de comunicaciones en el dominio temporal. En general, se interpreta como la diferencia entre la llegada de la primera contribución importante (típicamente la del rayo directo) y el tiempo de llegada del resto de componentes significativas.

El delay spread puede ser cuantificado mediante diferentes ecuaciones, siendo la más empleada la RMS (Root Mean Square) Delay Spread. Se obtiene a partir del cálculo previo del PDP y del exceso de retardo medio del canal, como se puede ver en las siguientes ecuaciones:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau \times PDP(\tau)}{\sum PDP(\tau)} \quad (10)$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum (\tau - \bar{\tau})^2 PDP(\tau)}{\sum PDP(\tau)}} \quad (11)$$

La importancia del RMS Delay Spread viene dada por cómo afecta la interferencia entre símbolos (IES/ISI). Si la duración de símbolo es suficientemente grande comparada con el delay spread (unas diez veces más sería suficiente) se puede esperar un canal sin ISI. En el dominio de la frecuencia hay una noción similar, que es el ancho de banda de coherencia, parámetro que veremos a continuación.

- ***Ancho de banda de coherencia***

El ancho de banda de coherencia es empleado para caracterizar el canal en el dominio de la frecuencia. Es una medida estadística del rango de frecuencias en la que el canal puede considerarse plano, esto es, que el canal afecta a las componentes frecuenciales con aproximadamente la misma atenuación y fase lineal. En otras palabras, es el rango de frecuencias en las que dos componentes frecuenciales tienen un gran potencial para correlarse en amplitud. El ancho de banda de coherencia puede calcularse a partir del RMS delay spread como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}} \quad (12)$$

El ancho de banda de coherencia puede deducirse a partir del ancho de banda a -3dB de la autocorrelación de la función de la respuesta en frecuencia.

## 2.3 EXA Signal Analyzer N9010A

El analizador de señales a utilizar será el EXA Signal Analyzer N9010A de la familia de Agilent Technologies. Las X-Series de este modelo de analizador de señal pueden medir y monitorizar RF y señales microondas integrando medidas tradicionales de espectro con el avanzado análisis de señal de vectores que permiten optimizar además de aportar rapidez, precisión y dinamismo.



*Figura 11 Vista del analizador*

El instrumento cuenta con el sistema operativo Windows 7 que amplía su funcionalidad. Cuenta con un amplio conjunto de aplicaciones y capacidades de demodulación, una interfaz de usuario intuitiva, conectividad excepcional y potentes medidas lo que lo hacen ideal para I+D como para ingenieros que trabajan en comunicaciones inalámbricas móviles, aeroespaciales y aplicaciones de defensa.

El analizador utilizado permite visualizar en pantalla las componentes espectrales en un rango de frecuencias. En el eje de ordenadas se presenta en escala logarítmica el nivel en dBm o cualquier otra unidad del contenido espectral de la señal. En el eje de abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y el número de muestras capturadas.

El equipo permite medir valores de potencia o tensión eléctrica configurando el aparato debidamente. El espectro de frecuencias de una señal en el tiempo proporciona una “firma” de la señal y establece una relación biunívoca entre ambos dominios. Por ello, el espectro es otra forma de ver la señal y de gran interés en la electrónica y en particular en el ámbito de las telecomunicaciones.

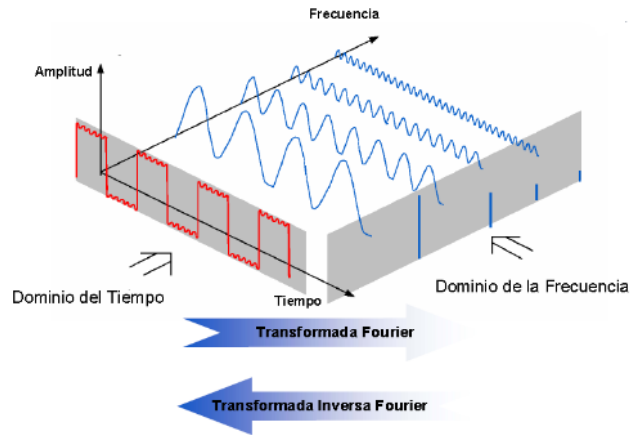


Figura 12 Espectro de frecuencias en el tiempo

#### Características del equipo:

- Frecuencia máxima: 26,5 GHz
- Máximo ancho de banda de análisis: 40 MHz
- DANL (Display Average Noise Level): -163 dBm
- Precisión de amplitud general:  $\pm 0.27$  dB
- Rango de atenuación estándar: 60 dB
- Triggering: RF Burst, Line, External, Periodic, Video
- Aplicaciones-Propósito general: Demodulación analógica, MATLAB, Figura de ruido, Fase de ruido, Pulso, Compatibilidad SCPI
- Aplicaciones-Celulares: 1xEV-DO, cdma2000, cdmaOne, GSM/EDGE/EDGE Evolution, iDEN/WiDEN/MotoTalk, TD-SCDMA with HSDPA/HSUPA/8PSK, LTE/LTE-Advanced, W-CDMA/HSPA/HSPA+
- Aplicaciones- Conectividad Inalámbrica: 802.11a/b/g/p/j/n/ac/ah/ax), Bluetooth® (BR/EDR/LE4.2/5.0)
- Aplicaciones- Vídeo digital: Digital Cable TV, DTM B, ISDB-T/Tmm, DVB-T/H/T2/T2-Lite

Trabajar en el dominio de las frecuencias permite realizar muchas mediciones que están limitadas en el dominio del tiempo. Debido a que en este caso se utilizan circuitos sintonizados (banda estrecha) se reduce considerablemente el ruido presente y se obtienen sensibilidades mucho mayores. Además, en este caso se pueden ver cada una de las componentes de una señal, sean componentes armónicas, no armónicas o espurias, ruido, señales interferentes, etc., por separado en vez de ver todo el conjunto como pasa con un osciloscopio.

Otra gran ventaja es el rango de frecuencias de trabajo: como el osciloscopio es de banda ancha, tiene limitaciones en frecuencia debido al ancho de banda de sus circuitos pudiendo llegar actualmente a algunos GHz. El analizador de espectro al ser de banda estrecha permite llegar a frecuencias de 50 a 100 GHz en otros modelos.

Alguno de los usos más frecuentes del analizador de espectro son los siguientes:

- Distorsión armónica, no armónica y productos de distorsión
- Señales presentes en mezcladores
- Señales moduladas y demoduladas en AM y FM
- Pulsos
- Potencia de ruido
- Radiaciones espurias

Analizando el funcionamiento de este instrumento, el analizador de espectro tiene el mismo principio de operación que una radio. Consta de un mezclador que realiza la convolución entre la señal a medir y una señal proveniente de un oscilador local (LO).

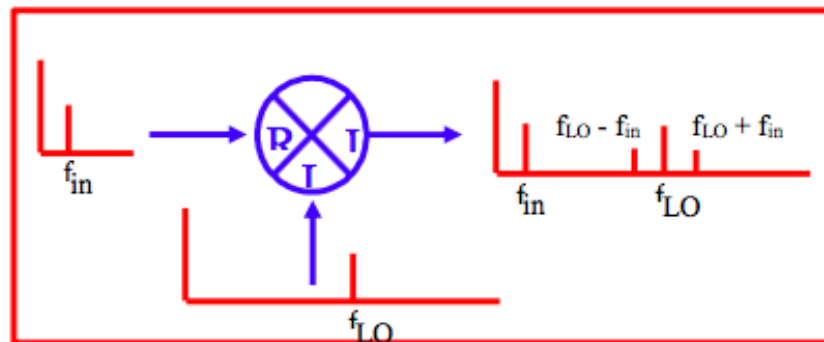


Figura 13 Esquema entrada y salida del analizador

A la salida del mezclador aparecerán las siguientes señales:

$$A1 * \text{sen}(\omega_{in} * t) \quad (13)$$

$$A2 * \text{sen}(\omega_{LO} * t) \quad (14)$$

$$A3 * \text{sen}(\omega_{LO} + \omega_{in})t \quad (15)$$

$$A4 * \text{sen}(\omega_{LO} - \omega_{in})t \quad (16)$$

Todas estas componentes pasan a través de un filtro de FI pasobanda cuya frecuencia es:

$$f_{FI} = f_{LO} - f_{in} \quad (17)$$

Esta frecuencia de FI es fija, por lo tanto, cuando en la entrada del analizador aparezca una señal cuya frecuencia  $f_{in}$  es  $f_{LO} - f_{FI}$ , se detectará una tensión proporcional a la amplitud de dicha señal.

El LO está excitado por un generador de tensión, haciéndolo barrer linealmente en frecuencia desde una frecuencia mínima  $f_{LOmin}$  hasta un valor máximo de  $f_{LOmax}$ . Esta misma tensión se usa para el barrido horizontal de la pantalla. El barrido vertical es proporcional a los valores detectados para cada frecuencia.

Para entender mejor estos conceptos se puede ver con un ejemplo:

Sea un analizador de espectro hasta 1,8 GHz con un filtro de FI en 2 GHz y se quiere medir una señal  $f_{in}$  en 0,5 GHz:

Según la ecuación de sintonía:  $f_{FI} = f_{LO} - f_{in}$

Para ver el espectro de frecuencias de 0 a 1,8 GHz, el LO deberá barrer entre 2 GHz y 3,8 GHz.

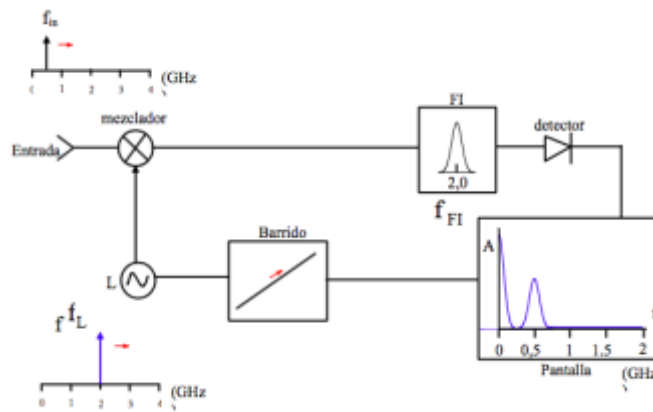


Figura 14 Esquema analizador

En las siguientes figuras se muestra cómo varía el espectro de frecuencia a la salida del mezclador a medida que el LO barre en frecuencia y lo que se va visualizando en pantalla.

En la siguiente figura se produce un batido cero debido a que coincide la frecuencia de FI con la  $f_{LOmin}$  para que el rango de frecuencias del analizador parta de un valor cercano a cero.

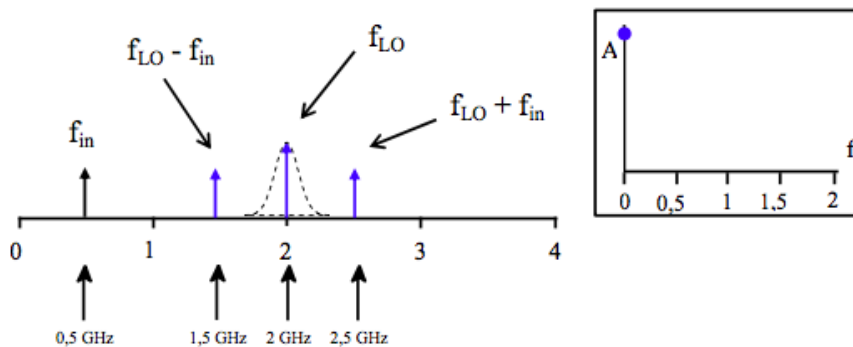


Figura 15 Imagen resultante con batido cero

En la siguiente figura la componente  $f_{LO}$  está prácticamente fuera de la banda de paso del filtro de FI, por lo que casi no se detecta tensión.

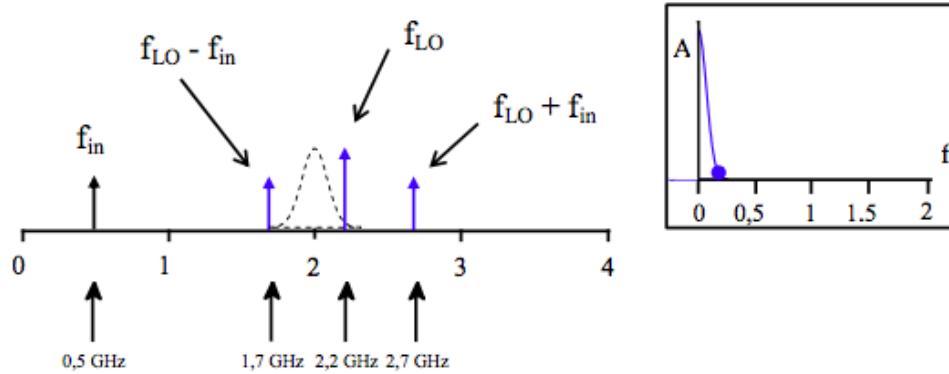


Figura 16 Imagen resultante con frecuencia oscilador fuera de la banda de paso

En la siguiente figura la componente  $f_{LO} - f_{in}$  cae dentro del filtro. Se detecta esta componente y se va mostrando en la pantalla. Nótese que la forma de la componente que se muestra en pantalla coincide con la forma del filtro pasobanda, por lo tanto, al variar el ancho de banda de esta, cambiará la forma de la componente en pantalla.

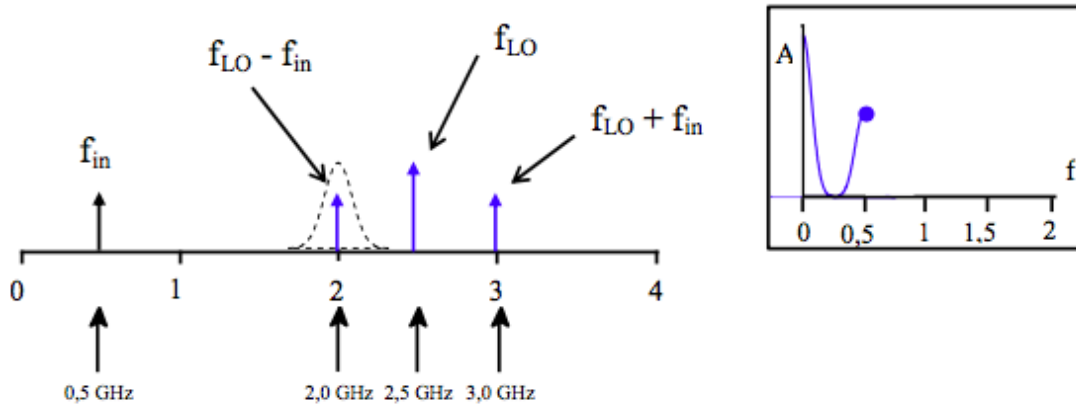


Figura 17 Imagen resultante con frecuencia oscilador dentro de la banda de paso

En la última figura el LO alcanzó su valor máximo en frecuencia y como no pasó ninguna otra componente por el filtro, en la pantalla solamente aparecerá el ruido interno del equipo.

Una vez efectuado un barrido completo, el LO vuelve a su valor mínimo y se repite un nuevo barrido. La velocidad con que se hace este barrido depende de la pendiente de la rampa de tensión.

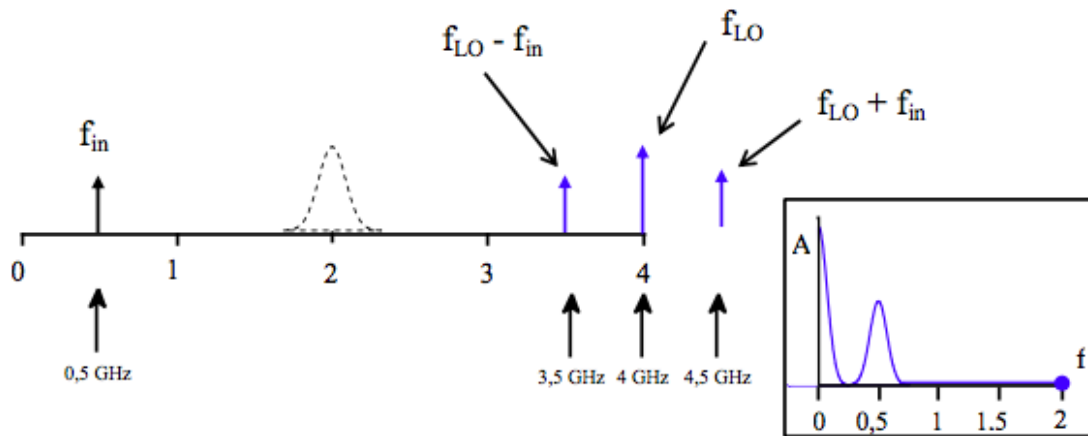


Figura 18 Imagen resultante tras alcanzar el oscilador el valor máximo de frecuencia

Por último, se muestra el diagrama de bloques de un analizador de espectro básico que podría ser como la siguiente figura:

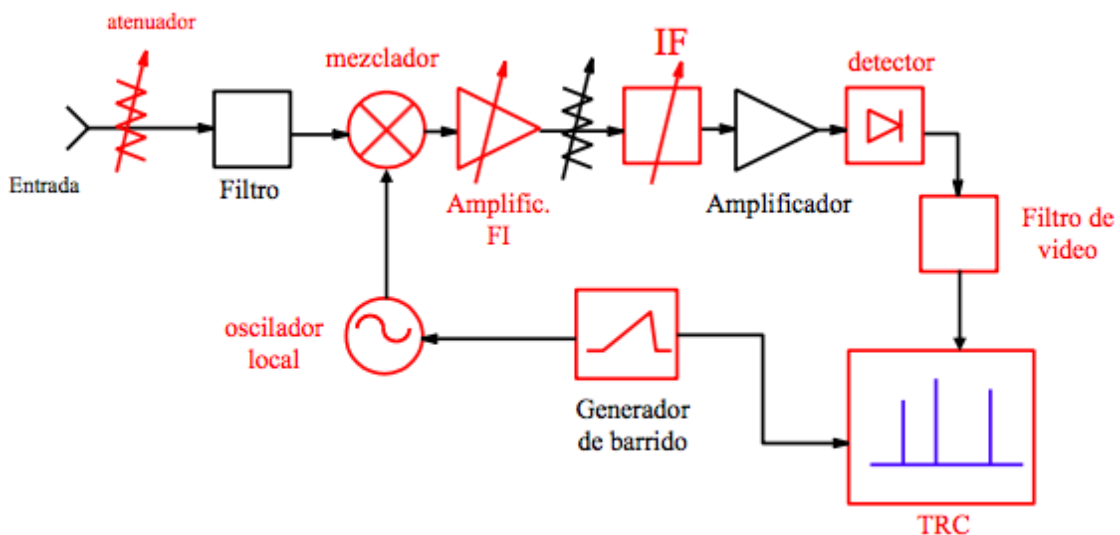


Figura 19 Diagrama de bloques del analizador

Este diagrama de bloques no es exclusivo del analizador que se está trabajando, pero el concepto se extiende a cualquier analizador de espectro pues todos ellos comparten estos bloques que se han representado.

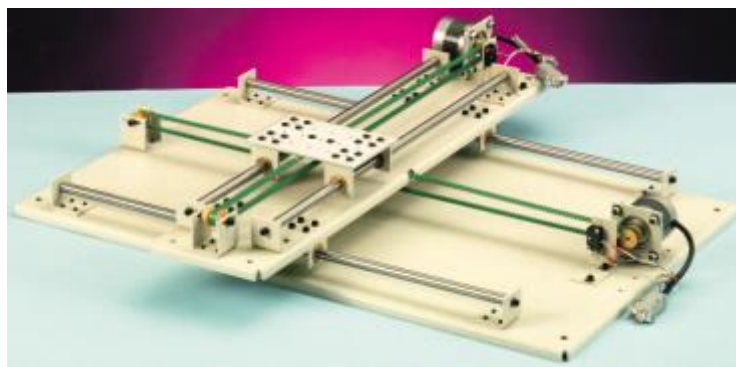


## 2.4 Sistema de posicionado lineal XY

Muchas labores de manipulación se pueden automatizar de forma sencilla con módulos lineales, accionados por motores. Tanto el posicionamiento como el perfil de movimiento de los módulos lineales se pueden controlar con exactitud para adaptarlo a las diferentes necesidades.

La combinación de dos o tres módulos lineales en dirección "y", "x" y/o "z" permite un movimiento libre en el plano vertical y horizontal o en el espacio. Esto hace posible, múltiples soluciones de robótica. Las herramientas de trabajo tales como herramientas de agarre, soldadura o pegado (dependiendo de la aplicación o el proceso donde se utilice) se pueden adaptar de manera sencilla y se pueden gobernar a través de los drivers.

Para este proyecto se va a utilizar un sistema de posicionado lineal XY de la marca Arrick Robotics que consta de varias partes: Mesa, ejes, motores, controlador, cableado y software para su utilización. A continuación, se muestran imágenes de las diferentes partes:



*Figura 20 Mesa y ejes del posicionador*



*Figura 21 Controladores y motores del posicionador*



Figura 22 Detalle de los controladores del motor



Figura 23 Detalle de los motores y cableado

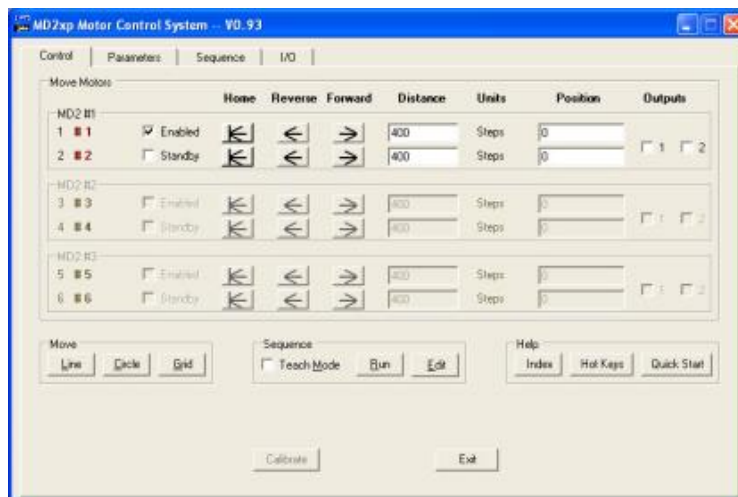
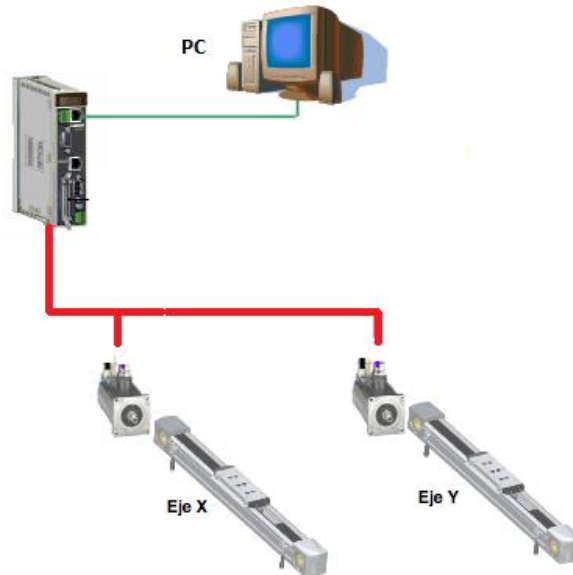


Figura 24 Software MD2xp para el control del posicionador

El posicionador utilizado es un sistema de posicionamiento sobre un plano X-Y, basado en dos ejes de portal accionados por dos motores. El control de la potencia de los motores se realiza a través de los controladores (Drivers). La programación de las tareas de

posicionamiento se realiza a través de una interpoladora de ejes que realizará el control de todo el sistema, con la posibilidad de definir las trayectorias. La siguiente imagen describe la conexión realizada con el ordenador para poder enviar órdenes:



*Figura 25 Esquema conexión con el ordenador*

En apartados posteriores se explicará cómo se ha realizado la conexión en este proyecto junto con la interfaz del programa para manejarlo de manera remota.

## 2.5 Matlab GUIDE

GUIDE es un entorno de programación visual de Matlab que permite realizar y ejecutar programas mediante una interfaz gráfica e ingresar datos de forma continuada. Posee las características básicas de otros programas visuales como puedan ser Visual Basic o Visual C++.

Para ejecutar la herramienta se puede escribir en la ventana de comandos la instrucción *guide* o también en file/New/GUI. Una vez ejecutada la herramienta abriremos un nuevo archivo GUI en blanco, aunque existe la posibilidad de abrir uno ya existente. Una vez realizados estos pasos se abrirá la ventana de trabajo GUIDE.

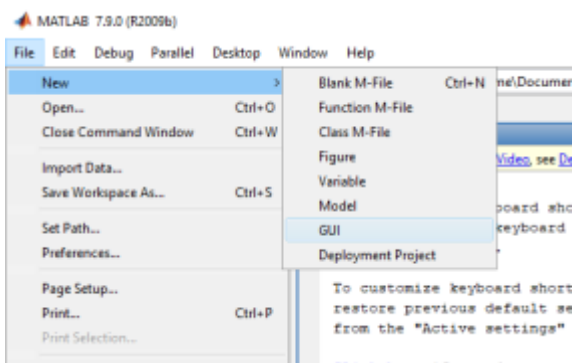


Figura 27 Inicialización herramienta GUI

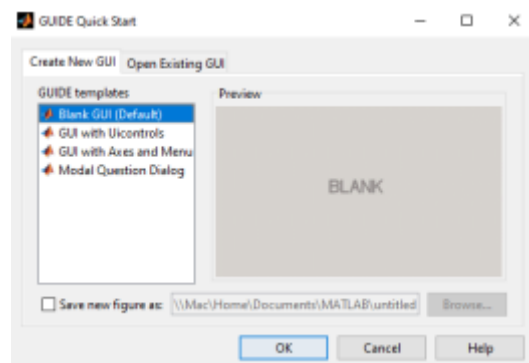


Figura 26 Ventana para abrir un archivo GUI

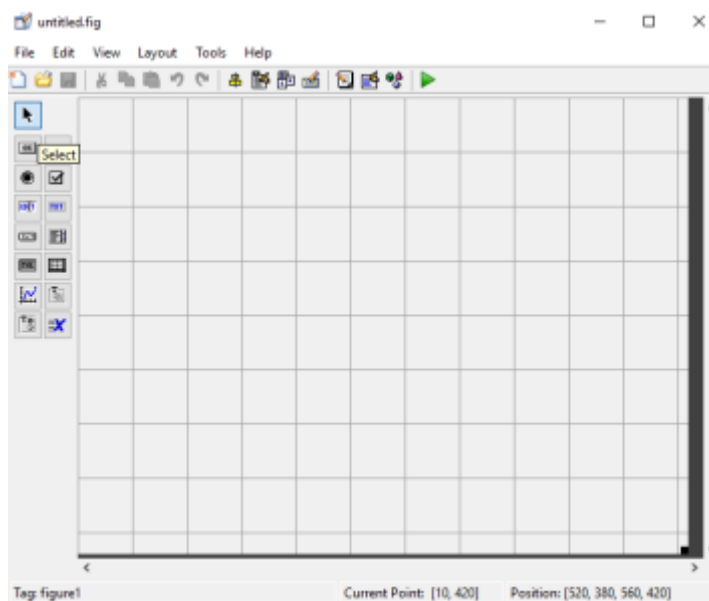


Figura 28 Aspecto ventana de diseño GUIDE

Cómo se observa en la imagen anterior se dispone de una lista de elementos en la parte de la izquierda con los que se puede trabajar. Estos elementos son los siguientes:

<b>Control</b>	<b>Valor de estilo</b>	<b>Descripción</b>
Check box	'checkbox'	Indica el estado de una opción o atributo
Editable Text	'edit'	Caja para editar texto
Pop-up menu	'popupmenu'	Provee una lista de opciones
List Box	'listbox'	Muestra una lista deslizable
Push Button	'pushbutton'	Invoca un evento inmediatamente
Radio Button	'radio'	Indica una opción que puede ser seleccionada
Toggle Button	'togglebutton'	Solo dos estados, "on" o "off"
Slider	'slider'	Usado para representar un rango de valores
Static Text	'text'	Muestra un string de texto en una caja
Panel button		Agrupar botones como un grupo
Button Group		Permite exclusividad de selección con los radio button

Tabla 1 Descripción de cada elemento de GUIDE

Con el empleo de esta herramienta se generarán dos tipos de archivo. Por una parte, se creará un archivo de formato *.fig* que se empleará para mostrar por pantalla la interfaz diseñada y los resultados requeridos. Paralelamente, se genera también un archivo *.m* con el mismo nombre que el anterior en el que se encontrará todo el código relativo al diseño. Por cada elemento que se va colocando en el diseño, Matlab genera una o dos funciones en base al tipo de elemento del que se trate. Estas funciones serán *Callback CreateFcn*:

- **Callback:** función que es llamada cada vez que se modifica cualquier elemento de los que se han colocado en el diseño. En estas funciones será en las cuales se implementará todo el código correspondiente a cada uno de los elementos para que se vayan ejecutando al hacer una llamada a ellos.
- **CreateFcn:** función encargada de definir las condiciones iniciales del objeto al que representa (por lo general estas funciones no se modifican en ningún momento de modo manual).

Los valores de todas las propiedades de los elementos, así como las variables transitorias, son almacenados en una estructura, a la cual se accederá por medio de un único identificador común para todos ellos:

```
handles.output = hObject;
```

Existe una estructura (*handles*) en la cual se van almacenando todas las variables que se crean y sus valores. De este modo se pueden usar las variables que se deseen en cualquier función del programa. Sin embargo, si se quiere que se apliquen los cambios que se han hecho al final de la función, se tendrá que ejecutar la siguiente instrucción:

```
guidata(hObject, handles);
```

Para modificar las propiedades de los elementos utilizados en el diseño se hará doble *click* en ellos y se abrirá una ventana llamada *Property Inspector* a través de la cual se podrán modificar todas las propiedades de la función.

Por último, es importante conocer el modo en el que realizamos la asignación y obtención de valores de los componentes. Para esto se emplea las sentencias *set* y *get* respectivamente. *Set* establecerá el valor de la propiedad del elemento indicado y *get* obtiene el valor de la propiedad del elemento indicado. Su implementación es la siguiente:

```
set(handles.TagDelElemento, 'NombrePropiedad', 'Valor');
```

```
get(handles.TagDelElemento, 'NombrePropiedad');
```

# Capítulo 3. Metodología

## 3.1 Descripción del entorno de trabajo

Este proyecto guarda similitudes con otros proyectos realizados en años anteriores en los cuales también se habían realizado sistemas automatizados de medida con distintos tipos de analizadores y para otros rangos de frecuencia. De entre las dos partes que se divide el trabajo (diseñar el interfaz que controla el analizador y diseñar la interfaz que controla el posicionador) la parte del posicionador es bastante similar a las ya realizadas previamente pues el sistema de posicionado utilizado ha sido el mismo, sin embargo, la parte del control del analizador es completamente nueva, ya que es un instrumento bastante distinto a los de los demás proyectos. Entre los diversos trabajos realizados se han utilizado diferentes tipos de programación. En este caso, se ha empleado el método de programación SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) que ha sido el más utilizado en los anteriores trabajos por su facilidad y alto contenido de información que posteriormente se explicará. También está la opción de programación COM (Component Object Model) mediante objetos que también se explicará en que consiste este tipo de programación.

Para realizar este proyecto se utilizará un ordenador del GRE (Grupo de Radiación Electromagnética) cuyo sistema operativo es Windows 7 con 32 bits. Cabe destacar que el ordenador no debe ser excesivamente rápido pues al trabajar con el instrumento, el que va a determinar la rapidez del sistema de medida será este último. Una aclaración para proyectos posteriores es que, si se trabaja con la programación COM, se debe utilizar el sistema de 32 bits obligatoriamente para evitar problemas con los objetos.

El programa para desarrollar este proyecto es Matlab cuya versión será la 2009b. Se ha decidido trabajar en esta versión porque Matlab no ofrece retrocompatibilidad, es decir, si se trabaja en una versión posterior a ésta luego no se podrá trabajar en esta versión, sin embargo, al contrario, no hay ningún problema pues las versiones posteriores cuentan con todas las actualizaciones y librerías anteriores.

La conexión de los diferentes instrumentos que componen esta Sonda para la realización de medidas se muestra en el siguiente esquema:

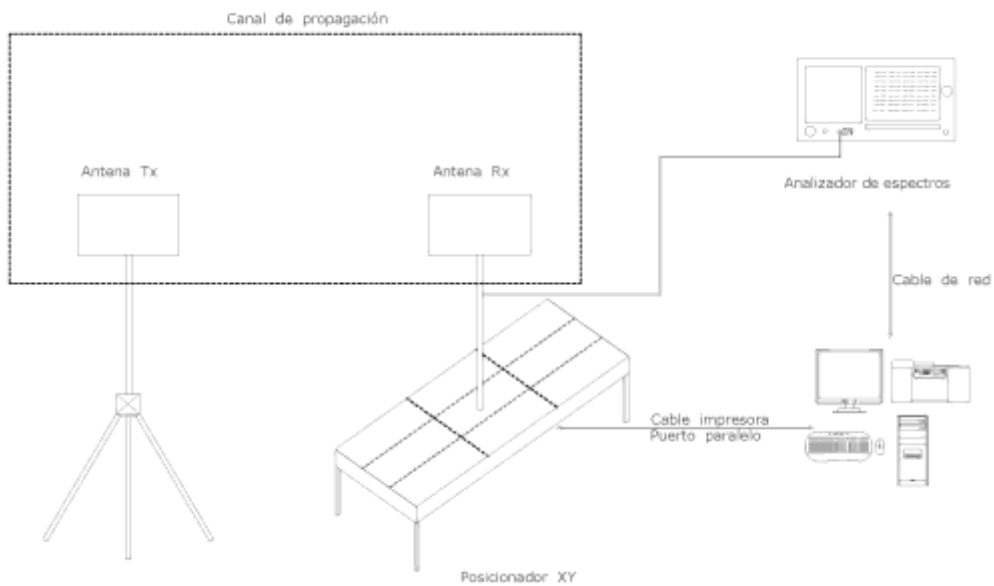


Figura 29 Esquema de la Sonda implementada

Como se ve en la imagen anterior, una antena receptora situada sobre la mesa de posicionado irá captando medidas y éstas se mostrarán en el analizador que está conectado a esta antena. Además, el analizador se conectará con un ordenador que realizará el proceso de automatización de las medidas y control del analizador y posicionador. En la siguiente imagen se muestra la imagen real de esta Sonda:





## 3.2 Programación SCPI y COM

Cómo se ha comentado anteriormente, este analizador permite trabajar con varios tipos de programación entre los que destacan SCPI y COM que son los más utilizados. A continuación, se procede a explicar resumidamente cada tipo de programación.

- **SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)**

Este tipo de programación define un estándar para sintaxis y comandos para usar en el control de dispositivos de prueba y medición programables tales como equipos de prueba automáticos y equipos de prueba electrónicos.

Los comandos SCPI pueden realizar operaciones de conjunto como encender una fuente de alimentación o una operación de consulta como por ejemplo leer un voltaje. Las consultas se emiten a un instrumento añadiendo un signo de interrogación al final de un comando. Algunos comandos se pueden utilizar para configurar y consultar un instrumento y otros puedes configurar y consultar al instrumento a la vez. Los comandos similares se agrupan en una estructura jerárquica o “árbol”. Por ejemplo, cualquier instrucción para leer una medición de un instrumento comenzará con “MEASure”. Los subcomandos específicos dentro de la jerarquía están anidados con un carácter de dos puntos (:). Por ejemplo el comando de medir una tensión continua tomaría la forma *MEASure:VOLTage:DC?*, y el comando de medir una corriente AC tomaría la forma de *MEASure:CURRent:AC?*.

El hecho de tratarse de un sistema estándar para todos los dispositivos es lo que hace muy sencillo su uso y facilita encontrar todos los comandos necesarios para realizar cualquier tipo de acción. Además, aunque originalmente fue creado para GPIB (IEEE-488), permite otros tipos de comunicaciones físicas: RS-232, Ethernet, USB, VXIbus, HiSLIP.

- **COM (Component Object Model)**

Component Object Model (COM) es una plataforma de Microsoft para componentes de software, introducida en 1993. Esta plataforma es utilizada para permitir la comunicación entre procesos y la creación dinámica de objetos, en cualquier lenguaje de programación que soporte dicha tecnología. El término COM es a menudo usado en el mundo del desarrollo de software como un término que abarca las tecnologías OLE, OLE Automation, ActiveX, COM+ y DCOM.

COM permite la comunicación en cualquier lenguaje de programación que permita la creación y empleo de objetos. Emplea protocolo binario en la conexión, lo cual permite invocar directamente cualquier característica del analizador.

Aunque estas tecnologías han sido implementadas en muchas plataformas, son principalmente usadas con un programa Microsoft Windows. Se espera que COM sea sustituido, al menos en un cierto grado, por Microsoft.NET, y soporte para Web Services a través de Windows Communication Foundation (WCF). DCOM en red usa formatos binarios propietarios, mientras que WCF usa mensajes SOAP basados en XML. COM también compite con CORBA y JavaBeans como sistema de componentes de software.

Para este proyecto se ha decidido utilizar SCPI, aunque también se podría haber utilizado COM y hubiese dado el mismo resultado. La desventaja de utilizar SCPI respecto a COM es que al utilizar COM el protocolo binario los tiempos de espera de instrucciones serán ligeramente menores, aunque SCPI posee unos tiempos adecuados para la finalidad de este proyecto, por lo que debido a su facilidad y alto contenido de información se trabaja en SCPI.

### **3.3 Estructuración de las tareas**

Para el desarrollo de este trabajo, se ha dividido en una serie de tareas diferenciadas y relacionadas entre sí. Las tareas son las siguientes:

1. Búsqueda de información y documentación necesaria.
  - 1.1. Documentación acerca del uso de la herramienta de diseño gráfico MATLAB GUIDE (Enero 2017).
  - 1.2. Documentación acerca del analizador de espectros Agilent N9010A (Enero 2017).
2. Realización interfaz gráfica para controlar el analizador de espectros.
  - 2.1. Conexión ordenador e instrumento (Marzo 2017).
  - 2.2. Diseño interfaz gráfica del analizador (Abril 2017).
3. Realización interfaz gráfica para controla el posicionador XY.
  - 3.1. Conexión ordenador y mesa (Mayo 2017).
  - 3.2. Diseño interfaz gráfica del posicionador XY (Junio 2017).
4. Unión de ambas interfaces e implementación de funciones en común (Junio 2017).
5. Redacción de la memoria del trabajo (Junio 2017).

### 3.4 Diagrama temporal

Tarea	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
1	X	X				
2			X	X	X	
3					X	X
4						X
5						X

Tabla 2. Diagrama Temporal

### 3.5 Presupuesto

**Material:**

- Analizador de espectros Agilent N9010A: 21 175.24 €
- Mesa posicionador Arrick Robotics y sistema MD-2 Arrick Robotics: 2683.3 €
- Antenas: 1794.79 € (cada una)
- Soportes de antenas, transiciones, cable de red: 250 €
- Ordenador: 600 €
- Mano de obra: 3500 €

**TOTAL:** 31 798.12 €

# Capítulo 4. Desarrollo del trabajo

En este capítulo de la memoria se explicará el desarrollo del trabajo desde las diferentes partes en las que se ha desarrollado. En un primer punto se establecerá conexión con el analizador, seguidamente se establecerá conexión con el posicionador y por último se diseñará la interfaz gráfica que controlará ambos instrumentos.

Por último, se tratará de un apartado de problemas y soluciones ocurridos en el trabajo que pretenden ayudar en futuros proyectos de este tema.

## 4.1 Establecimiento de conexión con el analizador

Cómo se ha citado anteriormente, se opta por utilizar el tipo de programación SCPI por lo que no hará falta crear e importar un driver para interactuar con el analizador como en trabajos anteriores con la programación COM. Al utilizar SCPI, lo primero que tenemos que asegurar que está en el ordenador son las librerías IO de entrada y salida que permitirán la conexión con el instrumento.

Por tanto, y por problemas que posteriormente se explicarán en el apartado de problemas y soluciones, se instala la librería IO de Agilent 2015 para conectar con el analizador. El programa *Connection Expert* que ofrece esta librería permite enviar comandos interactivamente al analizador además de verificar que la conexión está realizada.

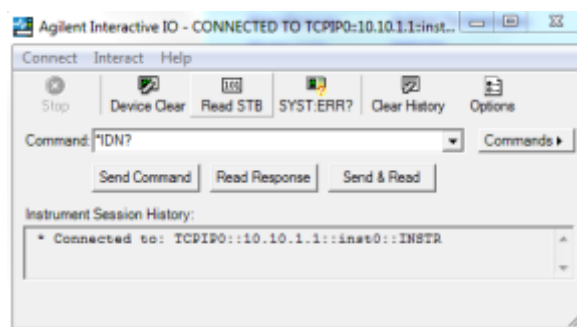


Figura 30 Agilent Interactive IO

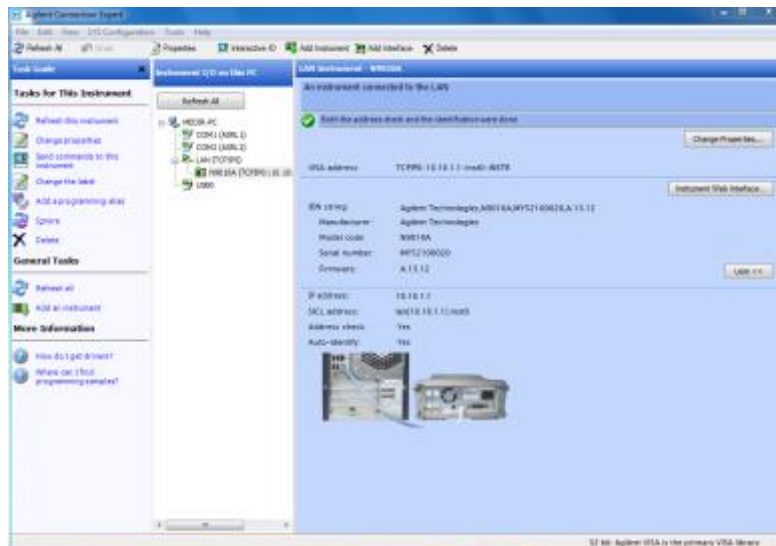


Figura 31 Agilent Connection Expert

La conexión con el analizador se hará mediante un cable de red vía LAN. Como novedad en este trabajo, no se ha utilizado un cable de red cruzado como en proyectos anteriores, pues tras leer la documentación se ha visto que no es necesario un cable de este tipo ya que las tarjetas de red detectan el tipo de conexión y se reconfiguran automáticamente.

Para configurar la conexión, se accede al menú de Centro de redes y recursos compartidos en el que al conectar el cable entre el ordenador y el analizador detectará una conexión que posteriormente se configurará. En este caso la red creada es la *Red 2*.



Figura 32 Centro de Redes y Recursos Compartidos

Al hacer *click* en propiedades, se abrirá un menú en el que nos aparecerá las propiedades de conexión de esta red. En concreto vamos a asignar una dirección IPv4 exclusiva para el analizador y para el ordenador.

En este caso la dirección del ordenador será la 10.10.1.5 y la del analizador la 10.10.1.1 poniendo como puerta de enlace predeterminada la del otro instrumento. Las direcciones que se escogen no tienen por qué ser estas siempre, simplemente se debe escoger una dirección IP fija en cada uno de los instrumentos y asignar como puerta de enlace la del

instrumento con el que vamos a conectar. A continuación, se muestra las capturas para la asignación de la dirección IP.

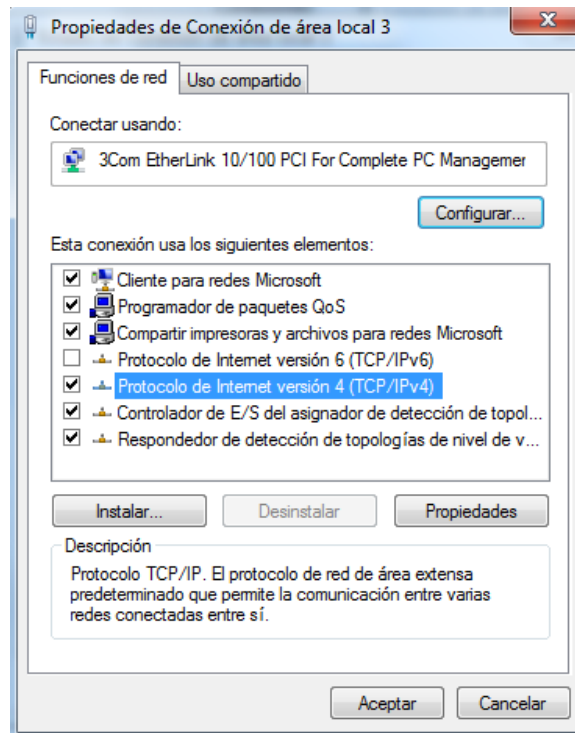


Figura 33 Propiedades de Conexión de LAN

La máscara de subred en ambos casos será la misma y no se pondrá ningún servidor DNS preferido:

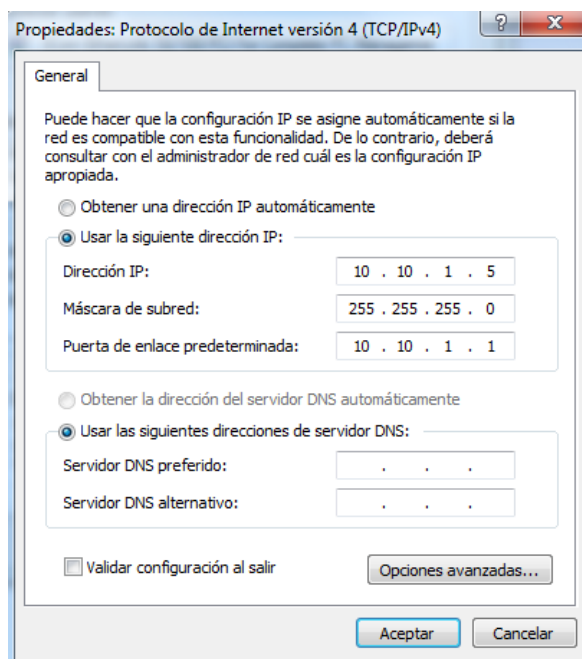


Figura 34 Propiedades de Conexión IPv4 en el PC

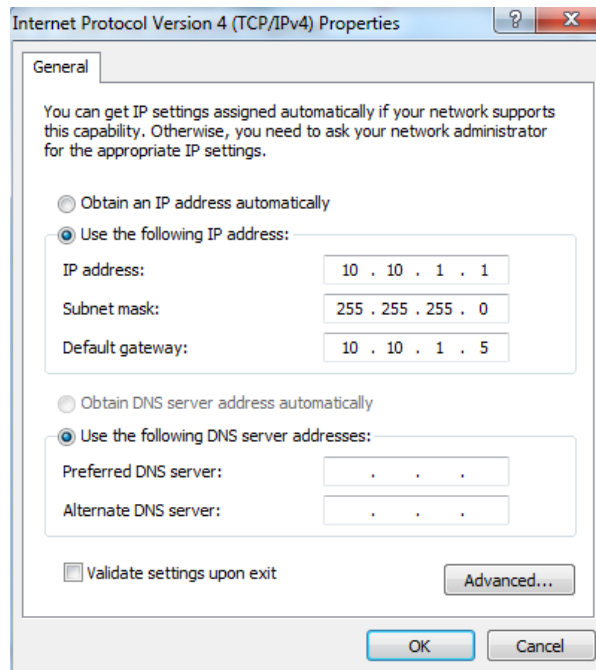


Figura 35 Propiedades de Conexión IPv4 en el analizador

Una vez realizados estos pasos el analizador está conectado con el ordenador para el envío de órdenes.

## 4.2 Establecimiento de conexión con el posicionador

Para poder controlar el posicionador desde el ordenador se deberá conectar por el puerto paralelo además de tener el software MD2xp que ofrece el fabricante. El esquema de conexión con el PC será el siguiente:

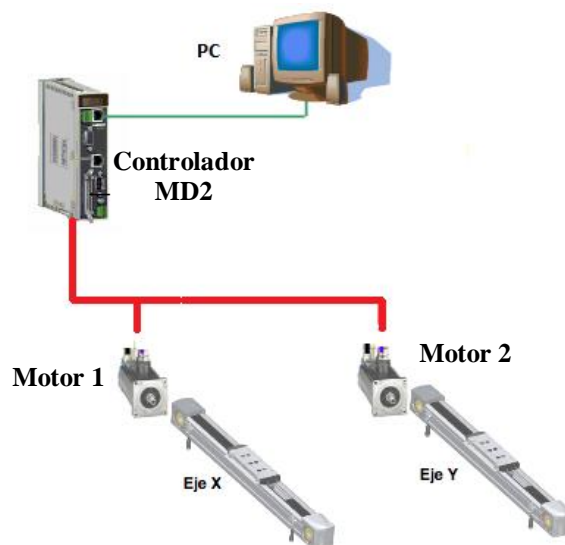


Figura 36 Esquema conexión del posicionador con el PC

Una vez realizada la conexión del cableado lo que se debe hacer es comprobar que el puerto paralelo del PC se encuentra con la configuración adecuada. Para comprobarlo, se accederá al menú de Administrador de Dispositivos del ordenador.

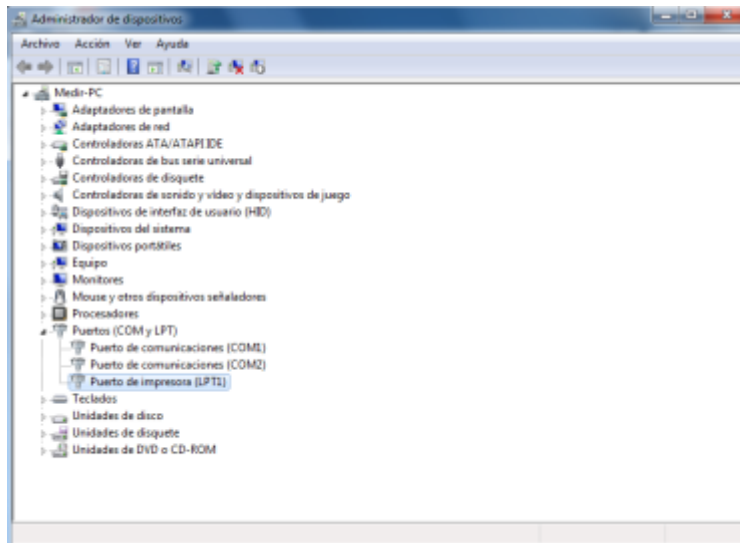


Figura 37 Administrador de dispositivos

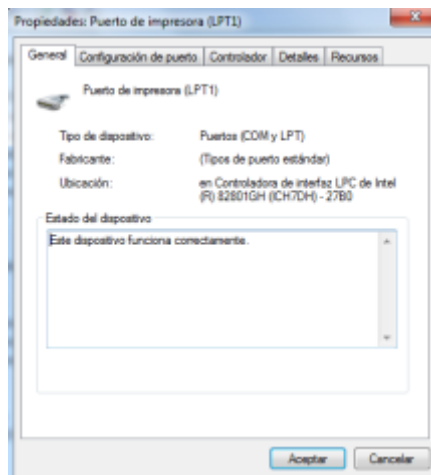


Figura 38 Propiedades del puerto paralelo I

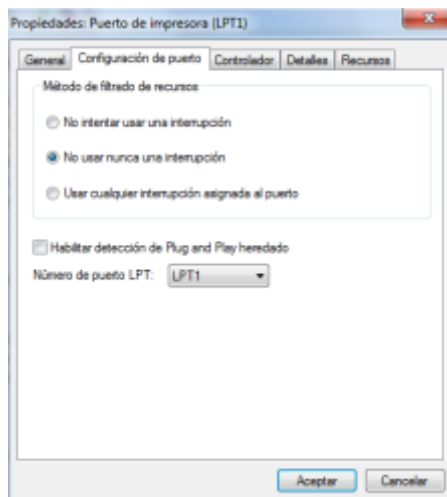


Figura 39 Propiedades del puerto paralelo II



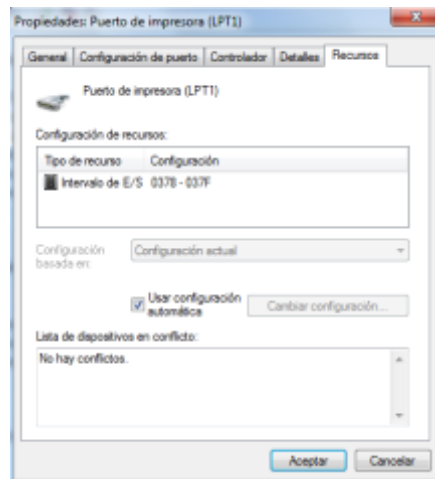


Figura 40 Propiedades del puerto paralelo III

Posteriormente lo único que se debe hacer es comprobar que se ha configurado todo correctamente. Con el software de Arrick Robotics se envían ordenes de movimiento una vez se ha habilitado el *Enabled* del motor para su comprobación.

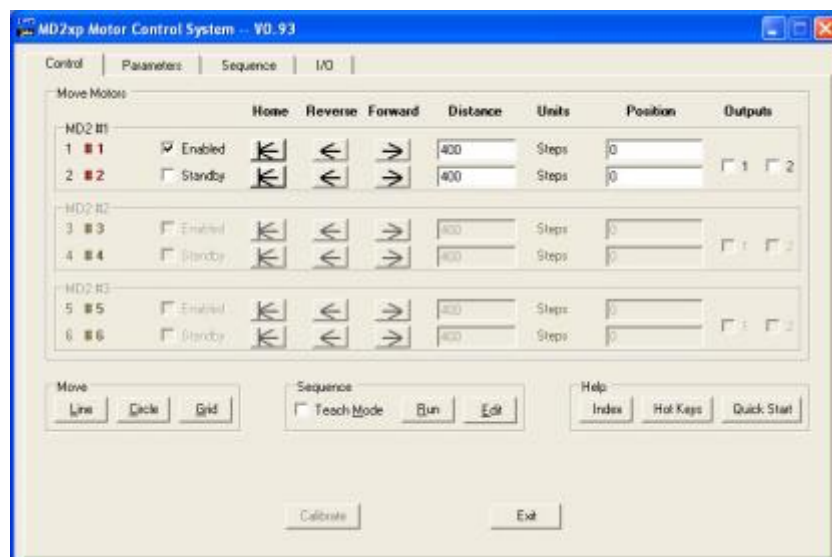


Figura 41 Software MD2xp Motor Control System

## 4.3 Diseño del programa con MATLAB

El diseño del programa que interactúa con el analizador y con el posicionador se dividirá en dos partes. La razón principal de esta medida es el fácil manejo de este programa en el caso de no estar utilizando el posicionador, es decir, utilizar solo el analizador de señales. Por ello, la primera parte consistirá en el diseño de la interfaz capaz de controlar el instrumento y la segunda parte consistirá en el diseño de la interfaz que controlará el posicionador XY y que también pueda tener integrada alguna función de la parte de control del instrumento. De esta forma se dota al programa de mayor versatilidad al poder utilizar el programa sin el posicionador. Un ejemplo de esta característica es que podríamos llevar al exterior el analizador en un vehículo para ir tomando medidas sin necesidad de llevar el posicionador y funcionaría sin ningún problema.

### 4.3.1 Diseño interfaz para controlar el analizador de señal

La siguiente imagen muestra la parte de la interfaz que controla el instrumento:

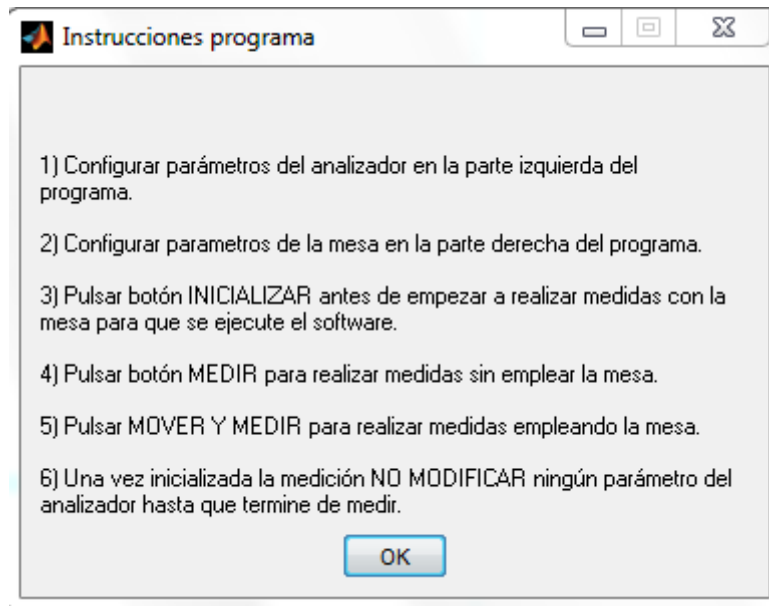
The image shows a software interface for an Agilent N9010A Spectrum Analyzer. The interface is titled "Analizador de Espectros Agilent N9010A" and is organized into several control panels:

- Frecuencia:** Includes fields for "Frec. Inicial" (10 MHz), "Frec. Final" (26 GHz), "FrecCentral/SPAN" (checkbox), "F. Central" (5 GHz), and "SPAN" (5 GHz).
- Ancho Banda Filtro Resolucion:** Includes "Valor Ancho Banda Filtro Resolucion Actual" (3000 kHz), a "Modo Manual" checkbox, and a dropdown menu (3 MHz).
- Ancho Banda Filtro Video:** Includes "Valor Ancho Banda Filtro Video Actual" (3000 kHz), a "Modo Manual" checkbox, and a dropdown menu (3 MHz).
- Nivel Referencia / Escala:** Includes "Nivel de referencia" (0 dBm) and "Escala / Div" (10 dB).
- Sweep Time:** Includes "Valor Sweep Time Actual" (66 ms), a "Modo Manual" checkbox, and a dropdown menu (66 ms).
- Promediado:** Includes a "Promediado" checkbox and "Factor Promediado" (100).
- Puntos:** Includes "Numero Puntos" (1001).
- Atenuador:** Includes an "Atenuador" checkbox and a value field (0 dB).

At the bottom, there are several control buttons: "SINGLE", "RESTART", "CONT", "PRESET", "GUARDAR CONFIG", "CARGAR CONFIG", "MEDIR", "PARAR", and "Sincronismo" (checkbox). Additionally, there are radio buttons for "Minutos" (1), "Hasta Parar" (selected), and "Numero Trazas" (1).

Figura 42 Aspecto interfaz gráfica del analizador

Al ejecutar el programa saldrá un cuadro de inicio con una explicación breve de los pasos que se deben de seguir para su correcto funcionamiento.



*Figura 43 Mensaje inicial del programa*

A continuación, se procede a explicar cada una de las funciones que presenta esta interfaz.

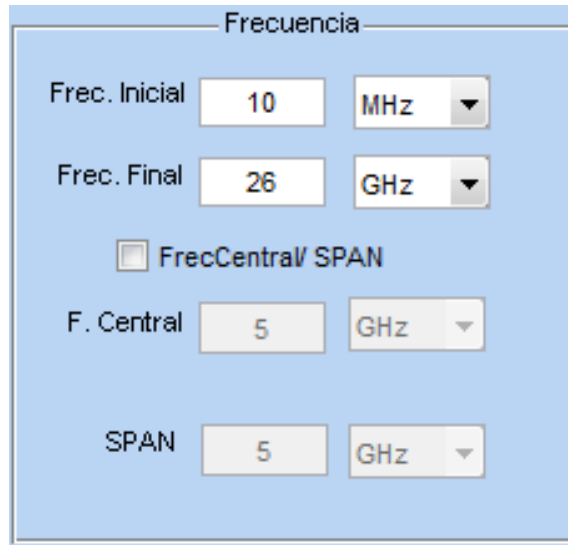
- **PANEL DE FRECUENCIAS**

Para la selección de la frecuencia en el analizador se plantean dos posibilidades igual de válidas para poder configurar correctamente el espectro que se va a medir.

Por una parte, se pueden utilizar la frecuencia inicial y la frecuencia final para determinar que rango de frecuencias se observan, y por otra parte se puede utilizar la frecuencia central y un margen de frecuencia (SPAN) que determinará la frecuencia inicial y final siendo la frecuencia inicial el valor de la frecuencia central menos la mitad del SPAN y la frecuencia final será el valor de la frecuencia central más la mitad del valor del SPAN.

Estas dos formas resultan interesantes de implementar según el tipo de medida que se vaya a hacer. Por ejemplo, si queremos fijarnos en una frecuencia determinada y no se tiene muy claro dónde empezar y dónde terminar se emplea la opción de frecuencia central y SPAN. El otro caso sería en el que se sabe exactamente la frecuencia inicial y la frecuencia final en la que se quiere empezar a medir por tanto se utiliza la opción de frecuencia inicial y frecuencia final.

A continuación, se ve con más detalle el cuadro de selección de frecuencias:



The image shows a dialog box titled "Frecuencia" with a light blue background. It contains several input fields and a checkbox. The "Frec. Inicial" field has the value "10" and a unit dropdown menu set to "MHz". The "Frec. Final" field has the value "26" and a unit dropdown menu set to "GHz". Below these is a checkbox labeled "FrecCentral/ SPAN" which is checked. Underneath the checkbox is the "F. Central" field with the value "5" and a unit dropdown menu set to "GHz". At the bottom is the "SPAN" field with the value "5" and a unit dropdown menu set to "GHz".

Figura 44 Selección de frecuencia

El programa por defecto habilita la forma de frecuencia inicial y frecuencia final, pero al pulsar el *Checkbox* FrecCentral/SPAN se habilita esta forma y se deshabilita la frecuencia inicial y final (en ningún momento se trabaja con las dos a la vez).

En ambos casos se cuenta con un cuadro *Edit* en el que se introducirá el valor de la frecuencia a utilizar y un cuadro *PopUpMenu* en el que podremos configurar la unidad de frecuencia a utilizar pudiéndose elegir Hz, kHz, MHz y GHz.

También, se han implementado una serie de restricciones a la hora de introducir los valores al analizador. Según el catálogo, el instrumento es capaz de trabajar desde 0 Hz hasta 27 GHz, por lo que las restricciones implementadas se basan en avisos en aquellos casos que se esté fuera de este rango. Este programa cuenta con la opción de *Zero Span* que no es más que cuando el Span se ajusta a 0 Hz y el oscilador local deja de barrer en frecuencia y el analizador se comporta como un receptor superheterodino convencional con una frecuencia central igual a la seleccionada. Además de mostrar el programa un aviso en caso de introducir mal un valor, el programa vuelve a un valor que se ha puesto por defecto. Los avisos que muestra el programa son:

- Error al dejar un campo vacío

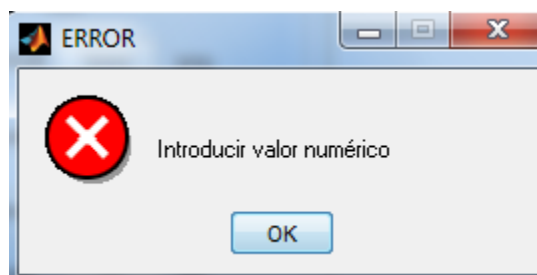
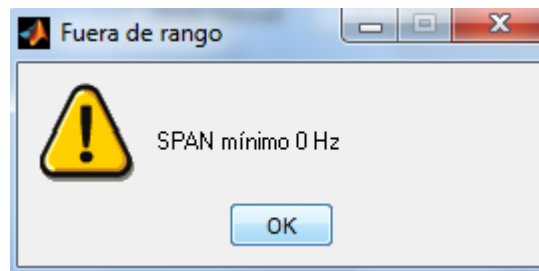


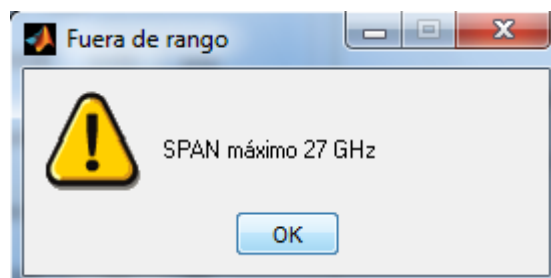
Figura 45 Error 01

- Error al tener un SPAN menor de 0 Hz



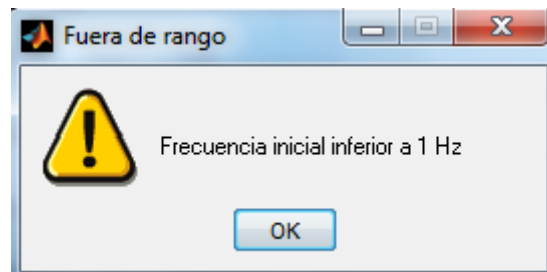
*Figura 46 Error 02*

- Error al tener un SPAN mayor de 27 GHz



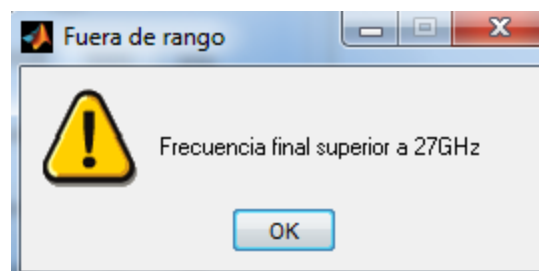
*Figura 47 Error 03*

- Error al tener una frecuencia inicial inferior a 1 Hz



*Figura 48 Error 04*

- Error al tener una frecuencia final superior a 27 GHz



*Figura 49 Error 05*

- Error al tener una frecuencia inicial superior a la frecuencia final

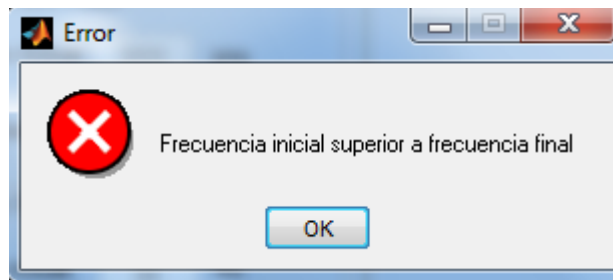


Figura 50 Error 06

- Error al tener una frecuencia final inferior a la frecuencia inicial

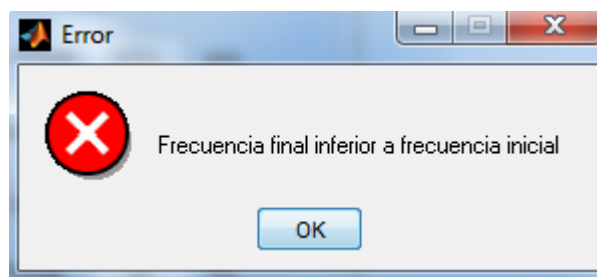


Figura 51 Error 07

- **PANEL NIVEL DE REFERENCIA Y ESCALA**

Este panel será utilizado sobre todo para visualizar de forma más cómoda las medidas que estemos realizando pues, al cambiar frecuencias o anchos de banda podemos perder de vista lo que se está midiendo. Para ello, se implementan las funciones de nivel de referencia y escala. A continuación, se muestra el panel dedicado a estas funciones:

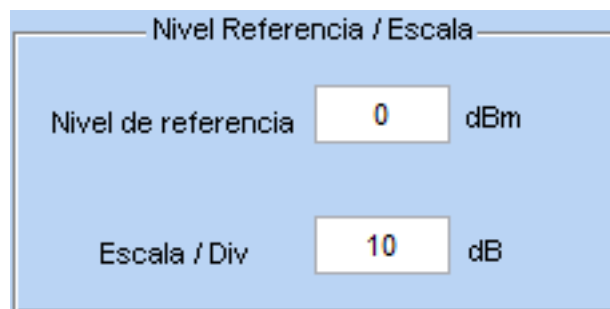


Figura 52 Selección nivel de referencia y escala

Empezando por el nivel de referencia, esta función establece por defecto un nivel de referencia de 0 dBm que pueden cambiarse al introducir un valor en el *edit* de esta función. El nivel de referencia es el valor de potencia correspondiente a una posición determinada de la pantalla. Por lo general, la línea horizontal en la posición más alta de

la pantalla. Las mediciones efectuadas con el nivel de referencia poseen la máxima exactitud, ya que desaparece el error de linealidad o error de subdivisión de escala.

En el nivel de referencia también existen unas restricciones pues no se puede poner un valor de nivel de referencia mayor de 23 dBm y menor de -170 dBm por lo que si se introduce un valor que esté fuera del rango permitido nos aparecerán los siguientes cuadros de error:

- Error al introducir un nivel de referencia menor de -170 dBm

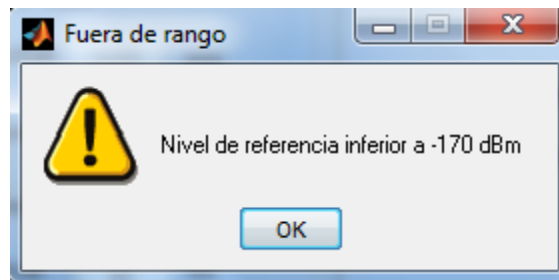


Figura 53 Error 08

- Error al introducir un nivel de referencia mayor de 23 dBm

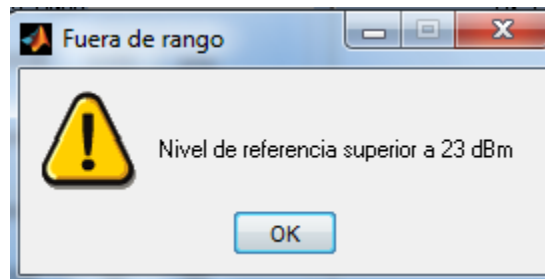


Figura 54 Error 09

En ambos casos, tras pulsar "OK" en el cuadro de error, el nivel de referencia se pondrá en su valor por defecto (0 dBm).

La función de escala, permite introducir los dB por división que queremos en el eje de ordenadas mediante un *edit*. Esta función será muy útil también para visualizar el espectro de manera que el usuario pueda trabajar más fácilmente.

En cuanto a las restricciones de esta función, el analizador no podrá trabajar con un nivel de escala menor de 0,1 dB Y mayor de 20 dB por lo que si nos encontramos en esta situación el programa insertará un cuadro de error.

- Error al introducir una escala menor de 0,1 dB

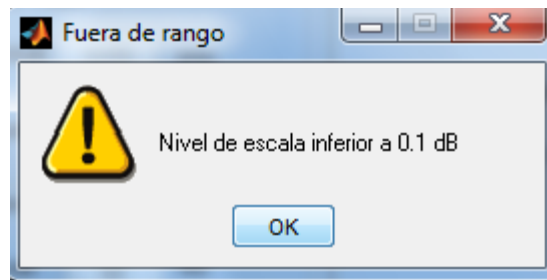


Figura 55 Error 10

- Error al introducir una escala mayor de 20 dB

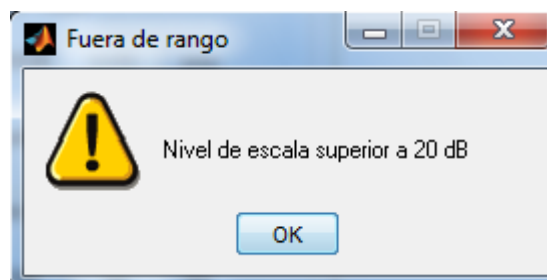


Figura 56 Error 11

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el nivel de escala se pondrá en su valor por defecto (10 dB).

- **PROMEDIADO**

La función *Promediado* nos permite la posibilidad de presentar en pantalla no el espectro calculado después de una medida, sino el espectro promediado de múltiples medidas. De esta manera no se reduce el ruido generado por el instrumento, pero sí es posible reducir la amplitud de las fluctuaciones en la línea de base, lo que permite detectar señales débiles que en otro caso no podrían observarse. Con el factor de promediado (Averaging Factor) se especifican el número total de medidas a promediar. Para evitar que el proceso de representación de la traza sea excesivamente lento, el analizador representa los promedios parciales, según se van haciendo las medidas. En términos matemáticos, el nuevo valor a representar vendrá dado por la expresión:

$$A_{total\ nuevo} = \frac{k-1}{k} A_{total\ anterior} + \frac{A_{nuevo}}{k} \quad (18)$$

Donde k es el orden de la medida (k=1...N, siendo N el número total de medidas a promediar),  $A_{total\ nuevo}$  es el nuevo valor a representar,  $A_{total\ anterior}$  es el valor



representado después de realizar la medida previa (es decir, el promedio de todas las medidas anteriores) y  $A_{nuevo}$  es la nueva medida.

El número de promedio es una parte integral de cómo se calcula cada traza, es decir al aumentar N resultará una traza más “suave”. Esta función viene desactivada por defecto y se activará en el momento que activemos el *checkbox*. El valor por defecto de promedios es 100 y se podrá implementar un número mínimo de 1 promedio y máximo de 10 000 que podremos cambiar en el *edit* dedicado a esta función. En el siguiente cuadro se puede visualizar cómo queda implementada esta función en el programa:

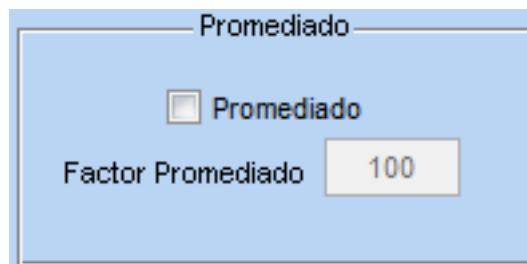


Figura 57 Cuadro selección de promediado

En cuanto a las restricciones, el programa mostrará un cuadro de error en el momento en el que pongamos un factor de promediado menor de 1 o mayor de 10 000.

- Error al introducir un factor de promediado menor de 1

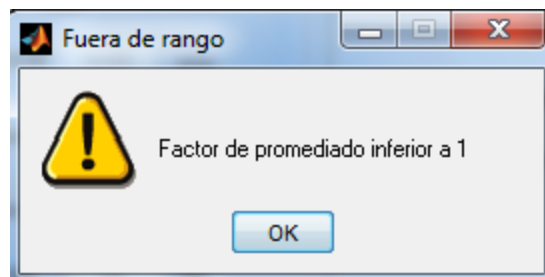


Figura 58 Error 12

- Error al introducir un factor de promediado mayor de 10 000

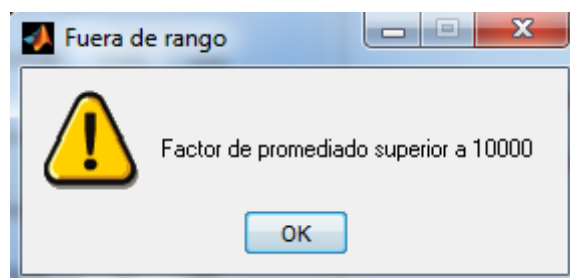


Figura 59 Error 13

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el factor de promediado volverá a su estado por defecto (100).

Una nota importante a la hora de guardar medidas es que cuando se utiliza la función promediado el programa calcula un Timeout para así en caso de tener un gran número de promedios no venza este temporizador que por defecto está en 10 segundos.

- **PUNTOS**

La función puntos sirve para ver el espectro seleccionado en el analizador con mayor o menor resolución, por tanto, cuántos más puntos haya, mejor será la resolución. El inconveniente de añadir un número excesivo de puntos es que el tiempo de barrido será más lento, por tanto, existe un valor por defecto de 1001 puntos en el que no hay un gran cambio significativo de calidad al aumentar el número de puntos. El mínimo número de puntos será 1 mientras que el máximo es 10 000. En el siguiente cuadro se puede visualizar cómo queda implementada esta función en el programa:

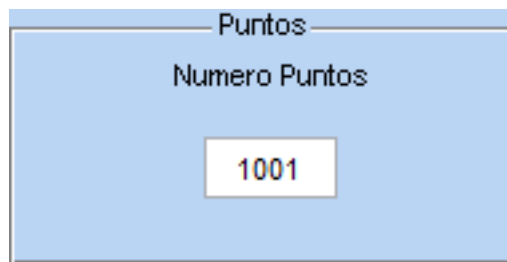


Figura 60 Selección del número de puntos

En cuanto a las restricciones, el programa mostrará un cuadro de error en el momento en el que pongamos un número de puntos menor de 1 o mayor de 10 000.

- Error al introducir un número de puntos menor de 1

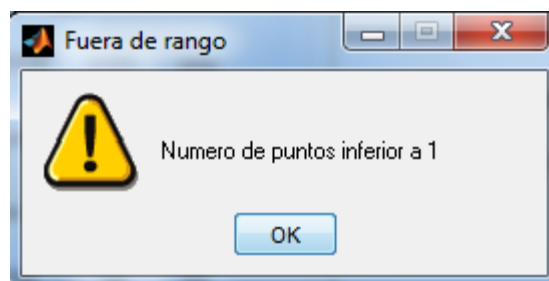


Figura 61 Error 14

- Error al introducir un número de puntos mayor de 10 000

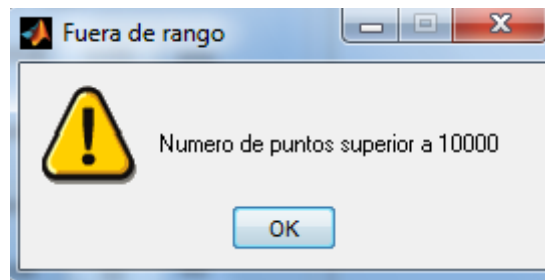


Figura 62 Error 15

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el factor de promediado volverá a su estado por defecto (1001).

- **ATENUADOR**

Este menú controla las funciones del atenuador y las interacciones entre los componentes del sistema de atenuación. Hay dos configuraciones de atenuador en la serie X. Una es la configuración de doble atenuador que consiste en un atenuador mecánico y un atenuador electrónico opcional y la otra configuración utiliza un único atenuador con secciones mecánicas y electrónicas combinadas que controla todas las funciones de atenuación. Para este programa se implementará el atenuador único.

En la configuración de atenuador único, el analizador controla la atenuación con un solo control, ya que la etapa fija tiene sólo dos estados.

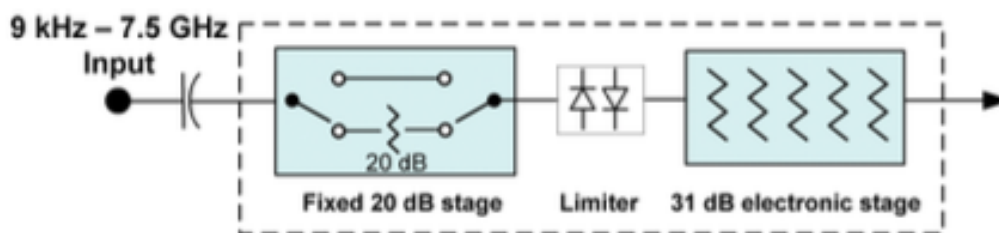


Figura 63 Detalle atenuador del analizador

El control de atenuación permite regular la sensibilidad del instrumento, también permite mejorar el acoplo del instrumento en una amplia banda de frecuencias. En la práctica, la posibilidad de modificar la atenuación permite, asimismo, medir señales con amplitudes muy dispares, buscando en cada momento el compromiso más adecuado entre sensibilidad de la medida y riesgo de generar armónicos espurios por problemas de no linealidad.

Esta función viene desactivada por defecto, es decir se introduce una atenuación de 0 dB, para activarla se pulsará el *checkbox* de esta función y posteriormente introducir el valor de atenuación en dB deseado. El valor mínimo de atenuación es 0 dB mientras que el máximo son 60 dB.

En el siguiente cuadro se puede visualizar cómo queda implementada esta función en el programa:

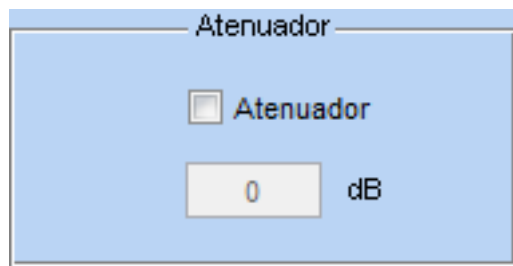


Figura 64 Cuadro de selección de atenuación

En cuanto a las restricciones, el programa mostrará un cuadro de error en el momento en el que pongamos una atenuación menor de 0 dB y mayor de 60 dB que son los valores mínimo y máximo de atenuación que permite el analizador según el fabricante.

- Error al introducir una atenuación menor de 0 dB

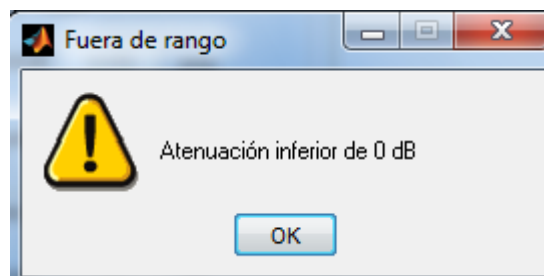


Figura 65 Error 16

- Error al introducir una atenuación mayor de 60 dB

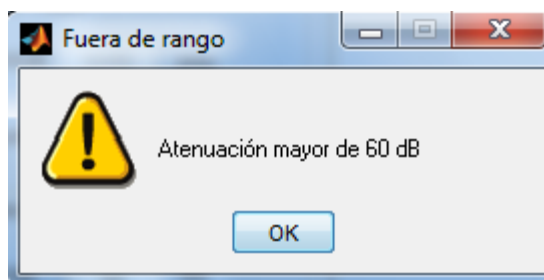


Figura 66 Error 17

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el valor de atenuación volverá a su estado por defecto (0 dB).

- **ANCHO DE BANDA DEL FILTRO DE RESOLUCIÓN**

Una función muy importante a la hora de configurar el analizador y realizar medidas y que está implementada en este programa es la del ancho de banda del filtro de resolución. Esta función cuenta con un indicador del valor actual de este parámetro en kHz para saber en todo momento el valor del ancho de banda de filtro de resolución que tiene. Además, cuenta con un modo manual en el cuál mediante la activación de un *checkbox* se puede pasar el valor deseado al programa.

A continuación, se muestra el cuadro dedicado a esta función en la interfaz del analizador:

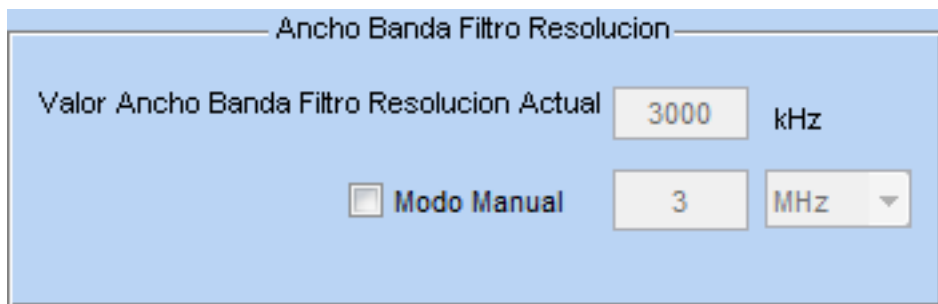


Figura 67 Cuadro selección RBW

El ancho de banda de resolución o RBW define la selectividad de un analizador para señales de idéntica amplitud. Es decir, que no se puede medir dos componentes de la misma amplitud separadas en frecuencia menos que el valor de RBW como se muestra en la figura:

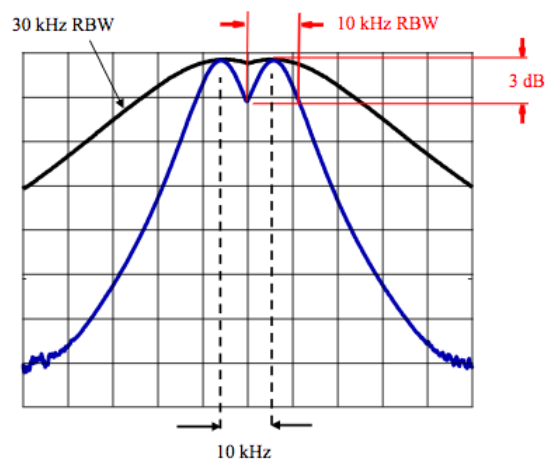


Figura 68 Ejemplo de diferentes RBW

Como se puede ver, para medir señales con escasa separación de frecuencias se emplean filtros con bandas muy estrechas, sin embargo, para analizar señales de banda ancha se emplean filtros con bandas mucho mayores.

La función en su defecto está activada en modo automático, es decir, el analizador pone un valor de 3 MHz en su defecto, sin embargo, al pasar al modo manual podemos seleccionar el valor que se quiera a través del cuadro *edit* y *popupmenu* destinado a pasar el valor de RBW que se quiera.

El valor del RBW en este analizador se extiende entre 1 Hz y 8 MHz, es por tanto que las restricciones implementadas en este programa van a ir por este lado. A continuación, se muestran los cuadros de error al poner valores fuera del rango permitido por el analizador de señal:

- Error al introducir un ancho de banda de filtro de resolución menor de 1 Hz

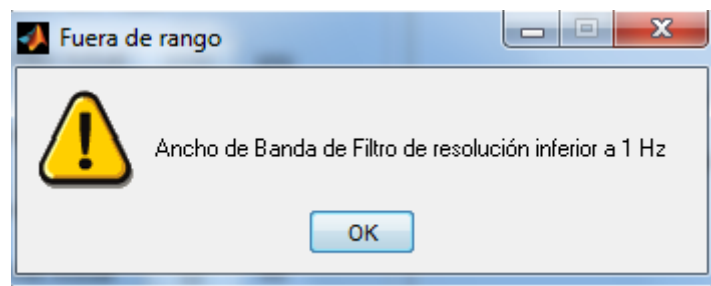


Figura 69 Error 18

- Error al introducir un ancho de banda de filtro de resolución mayor de 8 MHz

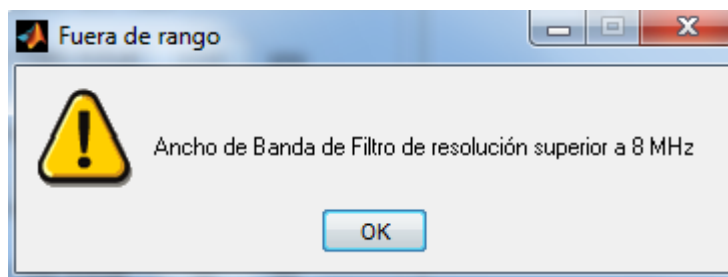


Figura 70 Error 19

En ambos casos, tras pulsar "OK" en el cuadro de error, el valor de RBW volverá a su estado por defecto de 3 MHz.

La función implementada para visualizar el valor actual de este ancho de banda consiste en ir pidiendo al analizador este valor. No solo está implementada en esta función, si no que aparece además en funciones en las que el parámetro depende de este ancho de banda por lo que al situarlo al final de la función actualiza este valor. Algunas de las funciones que llevan la actualización del valor de RBW son el panel de frecuencias, el filtro de resolución de vídeo, Sweep Time, etc.

- **ANCHO DE BANDA DEL FILTRO DE VÍDEO**

El control del ancho de banda del filtro de vídeo o VBW también está implementado en este programa de manera muy similar como se ha implementado el ancho de banda de filtro de resolución, es decir, con un cuadro de valor actual de VBW y un modo manual que se inicia a través de un *checkbox* y que con unos cuadros *edit* y *popupmenu* se introduce el valor que se desee.

A continuación, se muestra el cuadro dedicado a esta función en la interfaz del programa:

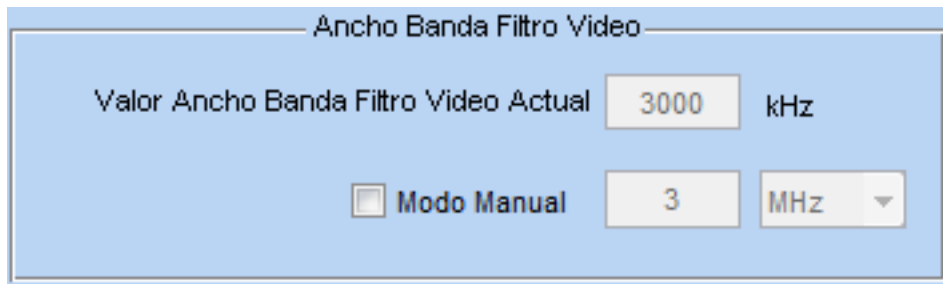


Figura 71 Cuadro selección VBW

El ancho de banda del filtro de vídeo no debe confundirse con el ancho de banda de resolución. El filtro de vídeo permite eliminar la potencia de ruido en las frecuencias altas, gracias a lo cual se puede mejorar la sensibilidad. Este analizador dispone no solo de un filtro sino de un banco de filtros que pueden seleccionarse en función de la velocidad de barrido elegida. Cuando se elige un filtro de banda muy estrecho con velocidades de barrido muy elevadas, entonces se produce una infravaloración de la amplitud de la señal.

La función del VBW está activada en modo automático por defecto, de manera que al pasar al modo manual se puede cambiar dicho valor. Según datos del manual de este analizador, el VBW mínimo que puede soportar es 1 Hz y el máximo 50 MHz. Por tanto, el programa cuenta con una serie de restricciones encaminadas a mostrar un cuadro de error en el caso en que estemos fuera del rango de funcionamiento de este filtro. A continuación, se muestran dichos cuadros:

- Error al introducir un ancho de banda de filtro de vídeo menor de 1 Hz

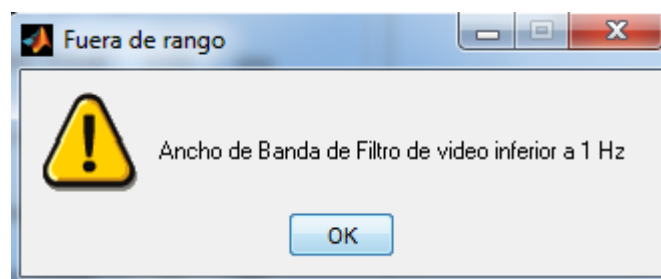


Figura 72 Error 20

- Error al introducir un ancho de banda de filtro de vídeo mayor de 50 MHz

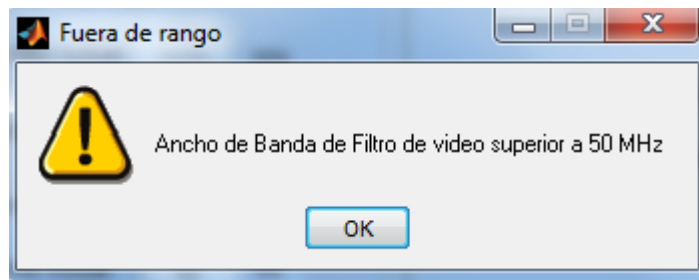


Figura 73 Error 21

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el valor de VBW volverá a un estado por defecto de 3 MHz.

Al igual que sucedía con el RBW, la función que devuelve el valor actual del ancho de banda del filtro de vídeo no solo estará implementada en esta función, sino que también aparece en aquellas funciones en las que dependa este valor como es el caso del RBW, Sweep Time o el panel de frecuencias.

- **SWEEP TIME**

La función *Sweep Time* o tiempo de barrido está implementada en el programa con un modelo similar a los anchos de filtro en el que se cuenta con un cuadro que proporciona el valor actual del tiempo de barrido y un *checkbox* para activar el modo manual y así poner el valor de tiempo de barrido que se desee.

A continuación, se muestra el cuadro de Sweep Time empleado en la interfaz del programa:

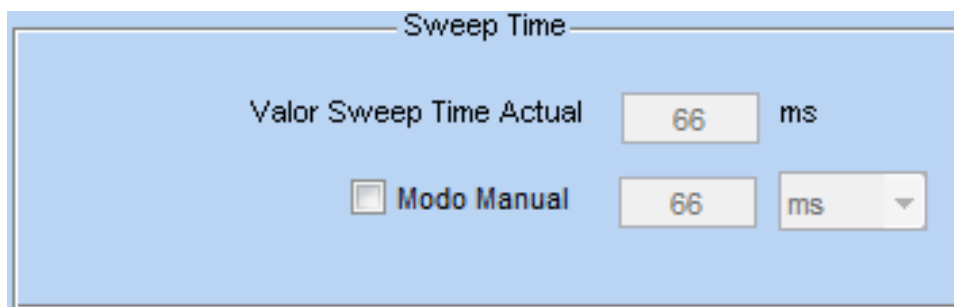


Figura 74 Cuadro de selección del tiempo de barrido

Cuando se coloca una señal de un filtro, la salida pasa por un periodo transitorio hasta que finalmente se estabiliza al valor en régimen permanente.



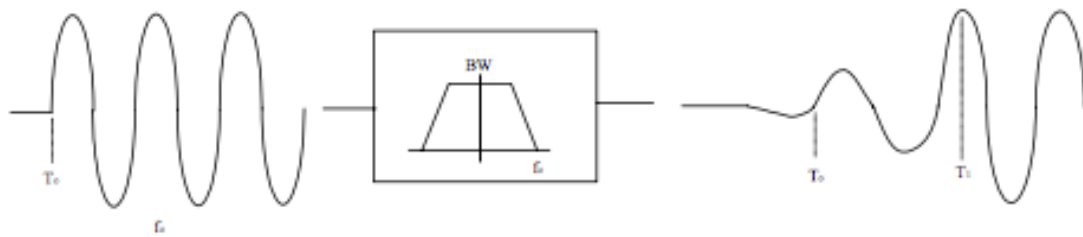


Figura 75 Entrada y salida del filtro en el analizador

El tiempo entre T0 y T1 se denomina a veces tiempo de integración del filtro y es, aproximadamente, el inverso de su ancho de banda. Por ello, al efectuar el barrido del filtro en el analizador, éste deberá hacerse de manera suficientemente lenta para permitir que el filtro permanezca sintonizado a cada frecuencia durante, al menos, el tiempo de integración.

Lo anterior se traduce en que, a menos anchura del filtro (mejor resolución), el tiempo de barrido deberá hacerse mayor especialmente, si se analiza una porción ancha del espectro. Es posible entonces que el seleccionar un filtro demasiado estrecho lleve a un tiempo prohibitivo para hacer la medida.

Se define el tiempo de barrido como el tiempo que tarda el analizador en barrer el margen de frecuencias seleccionado. Para evitar problemas con el transitorio del filtro puede estimarse el mínimo tiempo de barrido necesario a través de la siguiente expresión aproximada:

$$\text{Tiempo de barrido} \approx \frac{\text{Margen total de frecuencias}}{(BW)^2} \quad (19)$$

La relación entre el ancho de banda de resolución y el tiempo de barrido es controlado automáticamente por el analizador de espectros, siendo posible inhibir esta acción automática con solo seleccionar uno de estos dos parámetros.

La función de Sweep Time está activada en modo automático por defecto, de manera que al pasar al modo manual se puede cambiar dicho valor.

El tiempo de barrido mínimo que puede introducirse en el analizador es de 1 ms y el máximo 4000 s. Por tanto, el programa cuenta con una serie de restricciones encaminadas a mostrar un cuadro de error en el caso en que estemos fuera del rango de tiempo dicho.

A continuación, se muestran dichos cuadros:

- Error al introducir un valor de sweep time menor de 1 ms

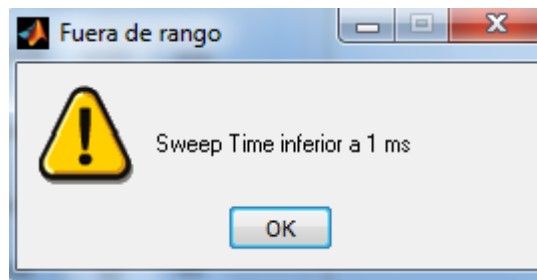


Figura 76 Error 22

- Error al introducir un valor de sweep time mayor de 4000 s

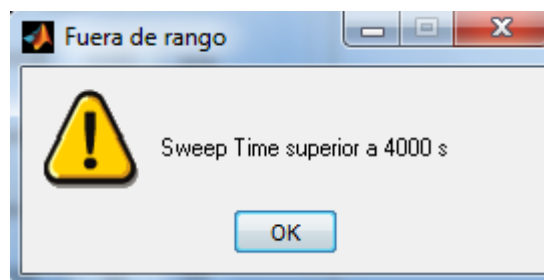


Figura 77 Error 23

En ambos casos, tras pulsar “OK” en el cuadro de error, el valor de tiempo de barrido volverá a un estado por defecto de 66 ms.

Al igual que sucedía con el RBW y el VBW, la función que devuelve el valor actual del tiempo de barrido no solo estará implementada en esta función, sino que también aparece en aquellas funciones en las que dependa este valor como es el caso del RBW, VBW o el panel de frecuencias.

- **SINGLE**

La función single diseñada en este programa realiza la función de pausar el barrido continuo. Cabe destacar que en el instrumento el botón single no realiza la misma función que si se hace por control remoto. En el primer caso cada vez que se pulsa el botón single el instrumento realiza un nuevo barrido mientras que por control remoto simplemente pausa el barrido y habría que dar al botón *Restart* para actualizar el barrido. Si se pulsa este botón por segunda vez no va a realizar ninguna tarea ya que tan solo pausa el barrido.

En el programa se ha representado mediante un *pushbutton* que se puede apreciar en la interfaz del programa de la siguiente manera:



Figura 78 Botón función Single

El hecho de que no haga un barrido nuevo cada vez que se pulse single es porque el instrumento no cuenta con una función single como tal, sino que se le transmite al analizador que ponga el modo continuo en off.

- **RESTART**

La función *Restart* que presenta este programa realiza el proceso de reinicio de barrido ya sea en modo single o continuo. En este caso sí que el analizador presenta una instrucción dedicada a esta tarea y cuya implementación se puede dar de dos formas, las dos igual de válidas que son:

```
:INIT:IMMediate  
:INIT:REStArt
```

En la interfaz del programa la función *Restart* está diseñada mediante un *pushbutton* como se muestra en la siguiente figura:

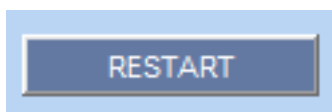


Figura 79 Botón función Restart

Esta orden será muy importante a la hora de capturar medidas pues en cada medida se hará un barrido, se guardará la medida y se reiniciará mediante esta orden el barrido.

- **CONT (Continuous Measurement/Sweep)**

La función *Cont* (Continuous) implementada en este programa realiza la acción de poner el barrido en modo continuo. Al iniciar el programa el barrido está en modo continuo por defecto por lo que la función solo servirá en el caso en el que el barrido esté en modo single ya que si está en modo continuo y se presiona de nuevo este botón no realizará nada. En la interfaz del programa está representada mediante la función *pushbutton* como se muestra a continuación en la siguiente figura:



Figura 80 Botón función Continuous

Aunque el analizador está preparado para realizar medidas en modo continuo, en este programa se ha centrado el caso de medir en modo single pues son de mayor importancia que medir en el modo continuo.

- **PRESET**

La función *Preset* vuelve a unos valores por defecto del instrumento en el momento en el que se pulsa este botón. Además, el modo preset aborta una medida que esté en proceso, activa la medida por defecto, limpia los buffers de entrada y salida y pone el Status Byte a 0. En el programa está implementado mediante un *pushbutton* como se muestra en la siguiente figura:



Figura 81 Botón función Preset

Cabe destacar que cuando se está midiendo con este programa el botón preset se desactiva para no causar un error a la hora de medir.

- **GUARDAR CONFIGURACIÓN**

En lo referente a guardar la configuración de parámetros con los que se están trabajando se plantean dos posibilidades: guardar en el PC o guardar en el propio analizador. En este caso el programa guarda la configuración en el PC en el sitio que se desee pues al ejecutar la función *Guardar Config* mediante un *pushbutton* nos muestra un cuadro de aviso y posteriormente se elige el sitio dónde se quiere guardar con el nombre que se desee. A continuación, se muestran las imágenes de la implementación en la interfaz del programa y los cuadros aparecidos al pulsar esta función.

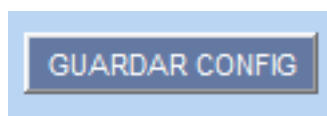


Figura 82 Botón Función Guardar Configuración

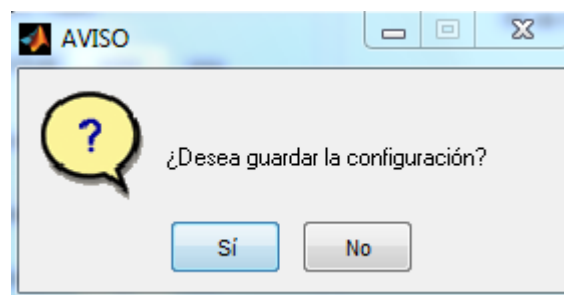


Figura 83 Cuadro de aviso para guardar configuración

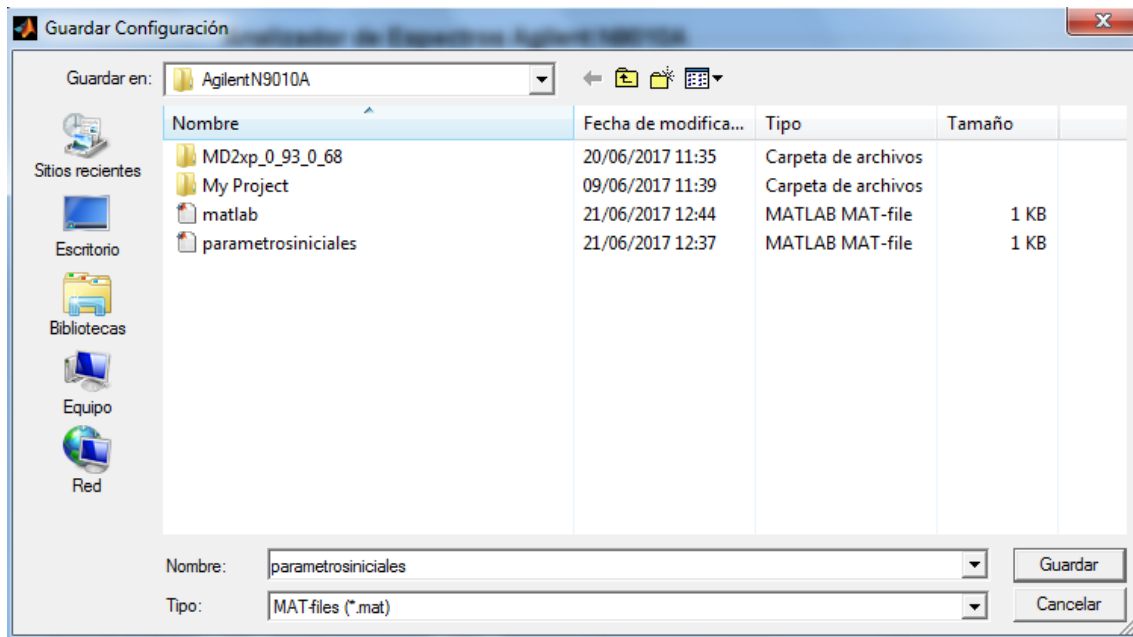


Figura 84 Cuadro para elegir ubicación del archivo a guardar

El archivo que se guarda es de tipo *.mat* y en el contiene una variable de tipo estructura (struct) en la cual se van almacenando todos los parámetros de dicha estructura, y de este modo desde el propio Matlab sin necesidad de tener el analizador presente se puede cargar esta variable y ver su contenido.

- **CARGAR CONFIGURACIÓN**

Para poder utilizar el archivo guardado con los parámetros almacenados se utiliza la función cargar configuración implementada en el programa mediante un *pushbutton* como se muestra a continuación:

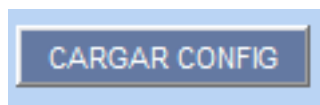


Figura 85 Botón función Cargar Configuración

Una vez se ha pulsado este botón, el programa cargará una ventana de búsqueda del archivo para buscar el archivo *.mat* con la configuración guardada. Como se ha explicado anteriormente el disponer de estos archivos en el ordenador hace que se puedan consultar estos parámetros sin necesidad de disponer del instrumento.

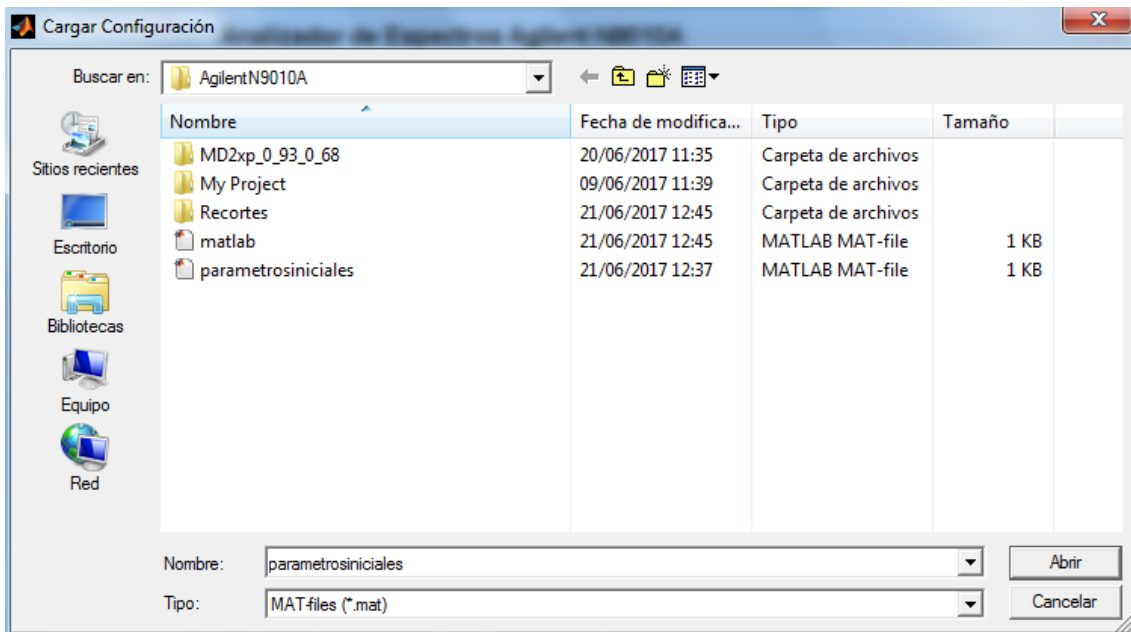


Figura 86 Cuadro de selección del archivo a cargar

La carga de la configuración se realizará en dos pasos: por un lado, se cargará los parámetros en la interfaz del programa y en un segundo paso se ejecutarán las instrucciones para cargar los valores en el analizador.

- **MEDIR**

La función Medir es, sin duda, una de las funciones más complejas implementadas en este programa. El cuadro de medición estará compuesto por un *pushbutton* llamado *Medir*, tres opciones de medición con *radiobutton* en los cuales se han puesto cuadros de *edit* para modificar parámetros de medición y un *checkbox* de sincronismo que posteriormente se explicará su función. Esta función está situada en la parte inferior del programa. A continuación, se muestra cómo queda implementada en la interfaz del programa:

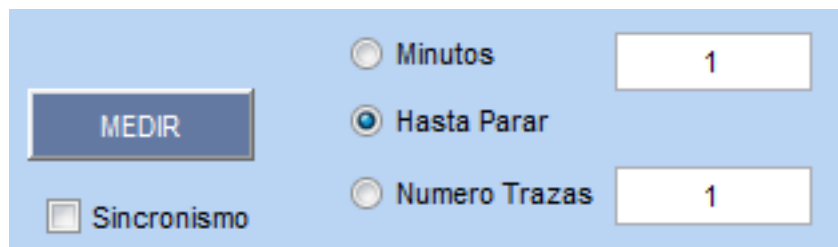


Figura 87 Cuadro de la función Medir

Lo primero que hay que indicar de esta función es que las medidas que se toman con el analizador se guardan en el propio analizador. Se podría cambiar a que las medidas se guardasen en el ordenador, pero esto implicaría un tiempo adicional de trabajo al analizador para enviar las medidas al pc lo que rebajaría la eficiencia de medición. Por tanto, y como el analizador cuenta con sistema operativo Windows 7 con suficiente disco duro y tiene entradas de puertos USB no se considera necesario el paso de las mediciones al ordenador.

Cómo se ha comentado anteriormente existen tres tipos de mediciones que se pueden guardar que son la medición durante un tiempo determinado, medición hasta pulsar el botón de parar y la medición de un número determinado de trazas. Por defecto está el modo de medición *Hasta Parar* y a continuación se explica detalladamente cada uno de los tipos de medida:

- ***Medida durante un tiempo determinado***

Para este tipo de medida tan solo hay que marcar la opción de *Minutos*, poner el tiempo en minutos que se desee estar midiendo en el cuadro dedicado a ello y por último pulsar el botón *Medir*. Para implementar esta función se coge el valor del tiempo actual que sería el instante en el que se le da al botón medir y un valor final compuesto por la suma del valor inicial más los minutos que se desea estar midiendo. Mediante un comparador, cuando el tiempo supera al valor de tiempo final se para la función y por tanto el analizador deja de medir. Además de esto, la medición se podría parar a pesar de no haber llegado al final del tiempo al pulsar el botón *Parar*.

- ***Medida hasta pulsar botón de parar***

Para este tipo de medida tan solo hay que marcar la opción *Hasta Parar* y posteriormente pulsar el botón *Medir*. Para implementar esta función se utiliza un bucle *while* que no parará hasta que se pulse el botón *Parar*. La estructura de este tipo de medición es la base para los demás tipos de mediciones pues en todos los tipos de medidas se puede parar la función al pulsar este botón.

- ***Medida de un número determinado de trazas***

En este tipo de medida se marcará la opción *Número Trazas*, a continuación, se ponen el número de trazas que se desea tomar y por último se pulsará el botón *Medir*. Este tipo de medida se ha implementado con un bucle *for* que irá desde uno hasta el número de trazas que se ha indicado. Además, dentro de este bucle cuenta con la opción de parar la función con un *break* en caso de que se pulse el botón *Parar*.

El archivo de medida es de tipo .csv con un tamaño aproximado de 31 kbytes. Este tamaño hace que se puedan guardar numerosas medidas sin saturar la memoria, de ahí que se opte por guardar las medidas en el instrumento. El directorio de guardado corresponde al D:\Users\Instrument\Documents\SA\data\traces.

Una vez pulsado el botón *Medir* aparecerá un cuadro para escoger el nombre del conjunto de medidas que se quieren guardar al que posteriormente se le añadirá un número empezando por 0 para ordenar las medidas y evitar así que se sobrescriban.

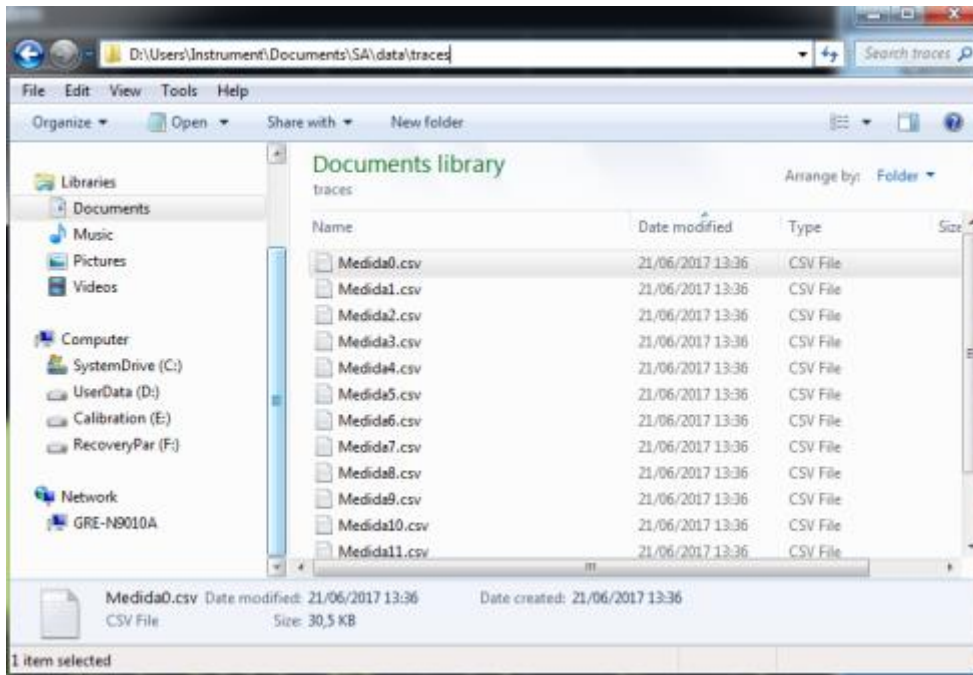


Figura 88 Carpeta del analizador dónde se guardan los archivos de medida

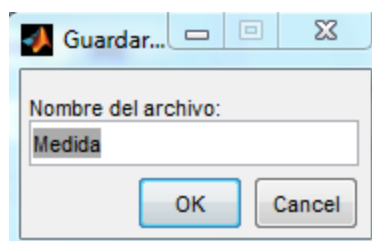


Figura 89 Cuadro para seleccionar el nombre de medida

Una nota importante acerca del instrumento es que al medir los tiempos que tarda el analizador en hacer cada barrido se encuentra un tiempo adicional de unos 150 ms. Es decir, para medidas de unos 60 ms el analizador tarda aproximadamente unos 210 ms en hacer el barrido. Esto es así porque el instrumento además de hacer el barrido está haciendo a la vez otras operaciones que le llevan otro tiempo adicional de hacerlas. La información que se guarda en cada archivo de medida se muestra a continuación:



Trace
Swept SA
A.13.12,N9010A
526 B25 ,01
Segment,0
Number of Points,1001
Sweep Time,1
Start Frequency,10000000
Stop Frequency,26500000000
Average Count,0
Average Type,LogPower(Video)
RBW,3000000
RBW Filter,Gaussian
RBW Filter BW,3dB
VBW,3000000
Sweep Type,Swept
X Axis Scale,Lin
PreAmp State,Off
PreAmp Band,Low
Trigger Source,Free
Trigger Level,1,2
Trigger Slope,Positive
Trigger Delay,0
Phase Noise Optimization,Fast
Swept If Gain,Low
FFT If Gain,Autorange
RF Coupling,AC
FFT Width,411900
Ext Ref,10000000
Input,RF
RF Calibrator,Off
Attenuation,10
Ref Level Offset,0
External Gain,0
Trace Type,Clearwrite
Detector,Normal
Trace Math,Off
Trace Math Oper1,Trace5
Trace Math Oper2,Trace6
Trace Math Offset,0
Trace Name,Trace1

X Axis Units,Hz
Y Axis Units,dBm
DATA
10000000,-7,71378421783447
36490000,-106,445983886719
62980000,-64,3678207397461
89470000,-133,446975708008
115960000,-62,7775039672852

Para que el dispositivo no se sature, la orden de barrido y guardado de la medida se harán de forma que Matlab no avanzará hasta la siguiente línea hasta que no haya acabado esa orden. Esto es así ya que el ordenador lleva una velocidad muy superior al del instrumento y por tanto daría lugar a saturación por colapsar el buffer de instrucciones.

Otra de las opciones implementadas en esta función es la de medición con sincronía. La orden de sincronía se hace mediante la activación del *checkbox* llamado *Sincronía* y que no es más que una función que crea un archivo *.txt* en el que va anotando el nombre de la medida guardada junto con la hora en la que se produce esta medición. Este instante guardado corresponde con el inicio del barrido de cada medida. El archivo creado se guarda una vez terminado la medición en la carpeta raíz del programa y llevará el nombre de “*Archivo Sincronismo\_HoradeMedición.txt*”. A continuación, se muestra un ejemplo de archivo de sincronismo:

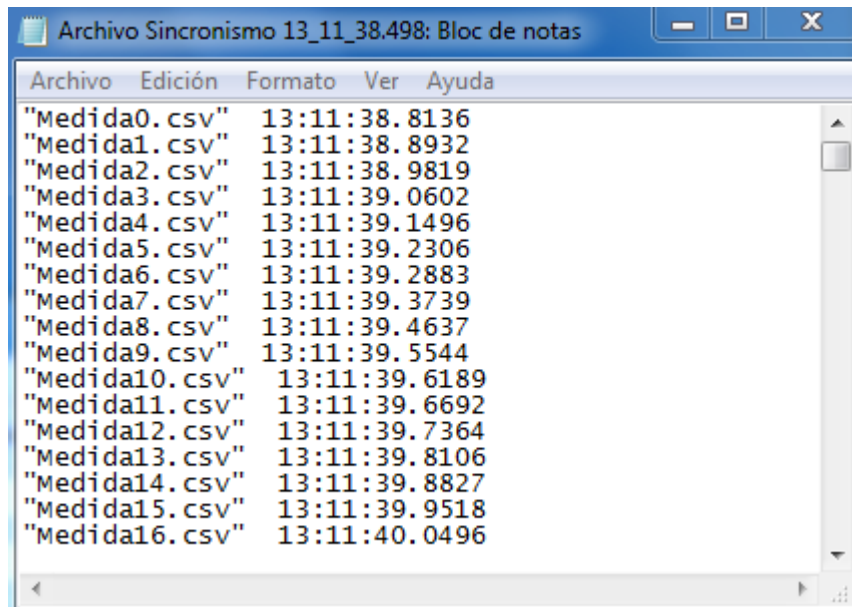


Figura 90 Archivo de sincronismo

Esta función es muy útil para cuando se toman numerosas medidas en diferentes puntos. Con el dato de la hora de medición se puede asociar a la posición en la que se midió la traza o simplemente conocer el tiempo que ha tardado el programa en realizar cada barrido.

- **PARAR**

La función *Parar* está implementada en este programa para detener el proceso de medición sea cual sea el modo que se haya elegido. Está diseñado mediante un *pushbutton* que al pulsarlo se detiene el proceso de medida. A continuación, se muestra cómo queda implementado en la interfaz del programa:



*Figura 91 Botón función Parar*

Como se ha citado anteriormente, esta función es aplicable con cualquiera de los tres modos de medición. El parado no es instantáneo, sino que deja terminar la medición de la traza y posteriormente finaliza. Esto se puede comprobar en que al pulsar el botón de parado puede que todavía los botones de preset, single, cont... que se deshabilitan al medir, no se deshabiliten de forma instantánea pues el programa continúa midiendo.

### 4.3.2 Diseño interfaz para controlar el posicionador XY

La segunda parte de este trabajo consiste en desarrollar otra interfaz con la herramienta GUIDE de Matlab a partir de la cual se pueda controlar el funcionamiento del posicionador XY de la marca Arrick Robotics.

En la siguiente figura se muestra la interfaz principal con distintas funciones configuradas para controlar el posicionador.

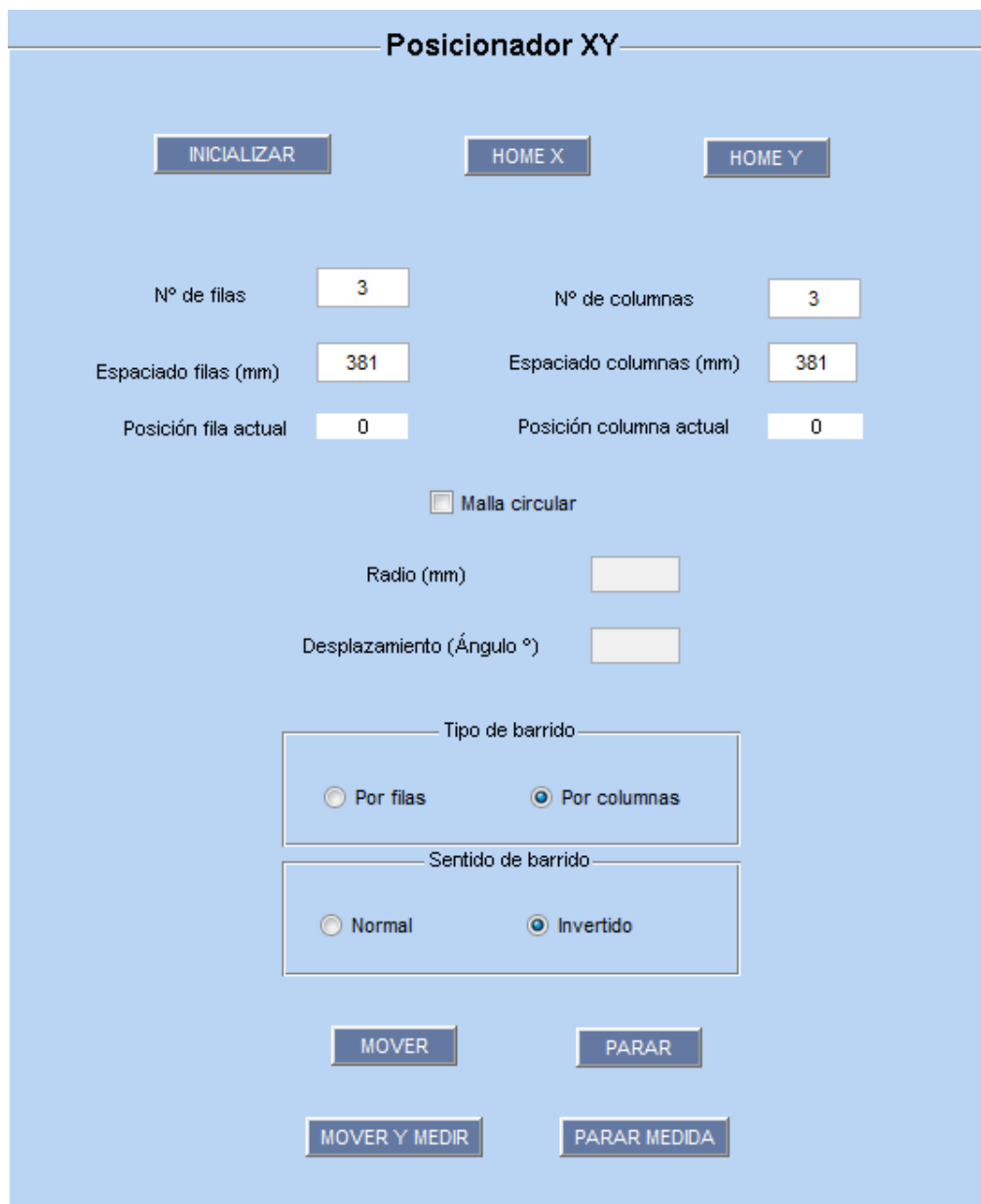


Figura 92 Aspecto interfaz gráfica del posicionador

El diseño de la interfaz de este programa se basará en aplicar restricciones de movimiento a la mesa correspondiente con las dimensiones de la misma y el desplazamiento de los dos motores que lleva, por ello el trabajo de este diseño será más fácil de implementar.

- **DESPLAZAMIENTO EN FILAS Y COLUMNAS**

En primer lugar, para poder hacer los barridos de medida, se dividirá la mesa en filas y columnas según unas dimensiones. Posteriormente, se podrán introducir en el programa el número de filas y columnas que se quieren con su espaciado para poder realizar el barrido correspondiente.

La siguiente imagen muestra el detalle de la introducción del número de filas y columnas además de su espaciado con el método *edit* proporcionado por Matlab GUIDE.

Nº de filas	3	Nº de columnas	3
Espaciado filas (mm)	381	Espaciado columnas (mm)	381
Posición fila actual	0	Posición columna actual	0

Figura 93 Cuadro selección filas, columnas y espaciado

Para implementar las medidas en un rectángulo, dividiremos éste en una rejilla rectangular o lo que sería lo mismo, en una matriz. Para ello, se sabe el dato de que los motores pueden moverse hasta 760 pasos desde la posición inicial en cada eje, por lo tanto, se puede configurar una matriz que puede ir variando dependiendo del número filas y columnas que se introduzcan siempre y cuando se respete este número de pasos que da cada motor. La mesa, al ser rectangular se puede identificar el lado corto como el eje x que corresponde con las filas y el eje y que es el eje más largo de la mesa representará las columnas del posicionador.

Por tanto, el programa permite introducir el número de filas y columnas a medir, o lo que es lo mismo, las dimensiones de la matriz que se formará que también está relacionado con los puntos de medida que habrá. También se permite introducir el espaciado de cada punto de medida.

Si se rebasan los límites anteriormente indicados aparecerá un mensaje de aviso y automáticamente se pondrá el número máximo que puede tener sin rebasar los límites de la mesa.

Para la creación esta matriz se sitúa el punto (1,1) en la esquina inferior izquierda, siendo ésta el origen de ambos ejes. A partir de este punto tan sólo hay que indicar a que fila y columna se quiere avanzar para medir. La siguiente captura muestra el esquema de la división en rejilla de la mesa.

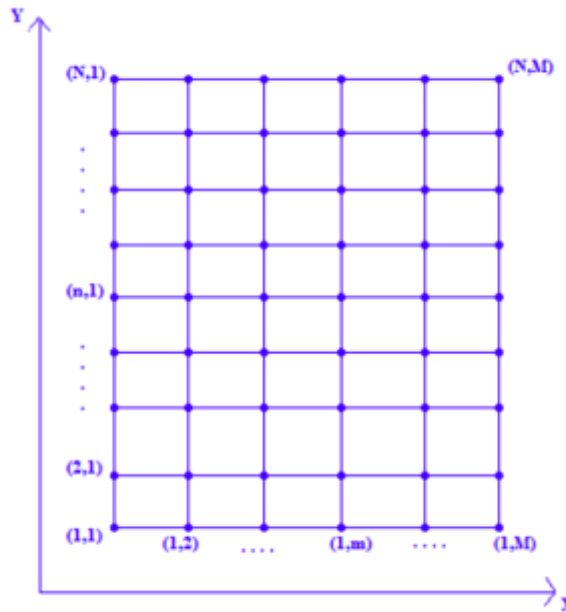


Figura 94 Detalle de la matriz generada

Es importante señalar que de la forma que se ha programado este controlador de posición, el centro de la matriz que se forme corresponderá con el centro de la mesa independientemente de la matriz que se introduzca, lo que hace trabajar de forma más fácil al usuario.

Cabe destacar que los cuadros de posición fila actual y posición columna actual indican en qué posición de la matriz se encuentra en cada momento, por ello estos valores van actualizándose a medida que se van moviendo los motores para así confirmar que el movimiento se está realizando correctamente.

Por último, señalar que, en este programa, además de las funciones respectivas a los botones que aparecen en la interfaz, se han añadido algunas funciones de cálculo interno que facilitan la estructuración del código y agilizan la ejecución.

Un ejemplo de esto es el caso de la función encargada de calcular los parámetros de la matriz que se han definido con los valores de filas, columnas y separación entre ellas. Por tanto, esta función calcula los cuatro parámetros básicos para moverse que son las posiciones iniciales y finales en ambos ejes.

El usuario indica los valores de espaciado en milímetros teniendo en cuenta que la distancia máxima es de 762 mm en cada eje, tras esto esta función realiza la conversión a los pasos correspondientes realizando un redondeo pues los pasos serán un número entero y se obtienen los parámetros de posición inicial y final en ambos ejes de tal modo que, con los datos facilitados por el usuario ya se dispone de toda la información necesaria para poder realizar el movimiento.

Los cálculos que realiza el programa para calcular las posiciones iniciales y finales son los siguientes:

$$x_{inicial} = \frac{760 - (M - 1)\Delta x}{2} \quad (20)$$

$$x_{final} = x_{inicial} + (M - 1)\Delta x \quad (21)$$

$$y_{inicial} = \frac{760 - (N - 1)\Delta y}{2} \quad (22)$$

$$y_{final} = y_{inicial} + (N - 1)\Delta y \quad (23)$$

- **TIPO DE BARRIDO**

La función tipo de barrido permite al usuario escoger la manera en la que vamos a hacer el movimiento para medir pudiendo elegir entre un barrido por filas o por columnas. En la interfaz aparece de la siguiente forma:

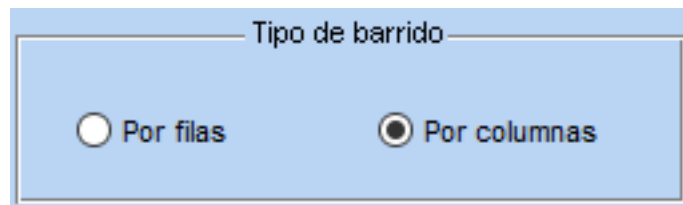


Figura 95 Cuadro de selección del tipo de barrido

El tipo de barrido se elegirá en el *radiobutton* correspondiente.

Empezando por el barrido en filas, se empieza desde el punto inicial (1,1) y se avanza hasta completar la fila, es decir, hasta el punto (1,M), posteriormente se pasa al siguiente punto en el eje x, es decir el 2, por lo que avanzará desde el punto (2,M) hasta el punto (2,1) y así va avanzando hasta llegar a la última fila. En caso de que el número de filas sea impar la posición final será el punto (N,M), mientras que si el número de filas es par se acaba en el punto (N,1). La siguiente imagen muestra la descripción gráfica del barrido por filas:

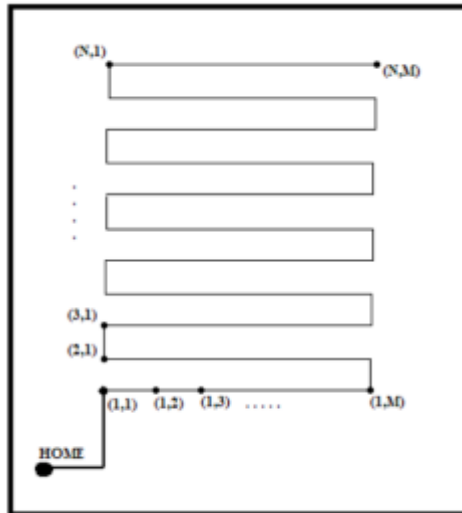


Figura 96 Barrido en filas

En el caso del barrido por columnas, se parte también desde el punto inicial (1,1) y se va avanzando hasta el final de la columna que es el punto (N,1), posteriormente pasaría a la siguiente fila que sería el punto (1,2) y así seguiría hasta completar la columna correspondiente hasta llegar a la última columna. En caso de que el número de columnas sea impar se terminará en la posición (N,M), mientras que si el número de filas es par se terminará en el punto (1,M). La siguiente imagen muestra la descripción gráfica del barrido por columnas:

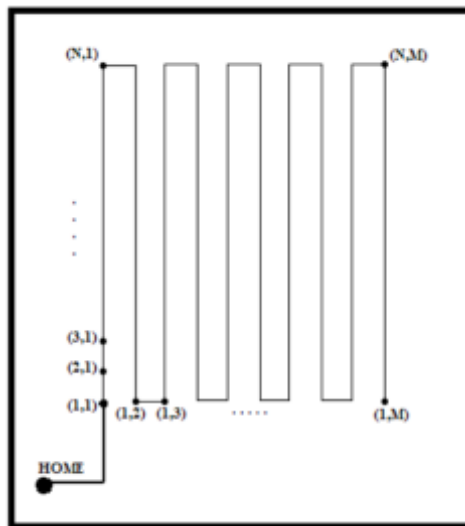


Figura 97 Barrido en columnas

Cómo se observa, ya se emplee un barrido por filas o por columnas, el desplazamiento se realiza en modo de zigzag, ya que de este modo se consigue ahorrar tiempo a la hora de ir tomando las medidas.



- **SENTIDO DEL BARRIDO**

Esta función se implementa en el programa a través de un *radiobutton* en el que el usuario tiene la opción de escoger entre dos formas de barrido que son una llamada normal y la otra en sentido inverso. La siguiente imagen muestra cómo está implementada esta función en el programa.

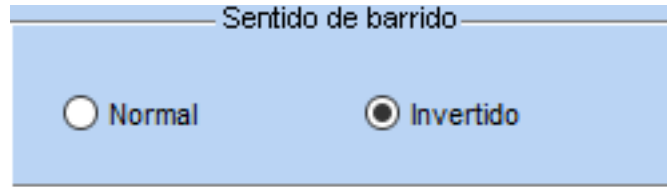


Figura 98 Cuadro de selección del sentido de barrido

Esta función no tiene una especial importancia, pero puede ser de ayuda en algunos casos como realizar el camino inverso al realizado una vez se ha hecho el primero, ya sea por filas o por columnas.

Normal: Origen (Home) → Fin

Invertido: Fin → Origen (Home)

Por defecto la función está activada en el sentido normal. A nivel de programación se emplean unos flags como indicadores del sentido de movimiento que está siguiendo, ya que esta es la manera más sencilla de trabajar e indicar a los motores si deben moverse en una u otra dirección.

- **DESPLAZAMIENTO EN CÍRCULO**

Esta función permite al posicionador desplazarse en círculos. Por defecto está desactivada pues los desplazamientos los hace en filas y columnas, pero al pulsar el *radiobutton* “Malla circular” activamos esta función en la que habrá dos cuadros *edit* en el que se insertará el radio del círculo en milímetros y el ángulo de desplazamiento en grados. La siguiente imagen muestra la implementación de esta función en el programa.

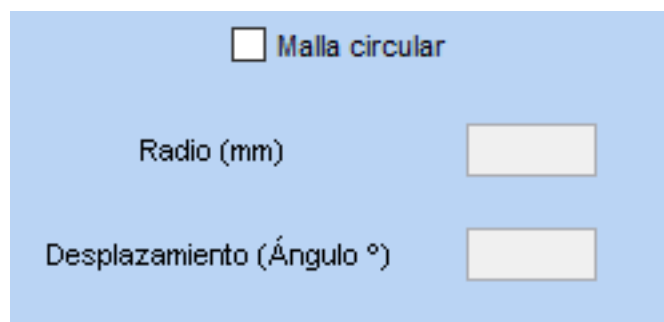


Figura 99 Cuadro para el desplazamiento en círculo

Como se comentó anteriormente, hay funciones en el programa que no se ven en la interfaz, pero sirven para calcular otros parámetros, en este caso, el programa cuenta con una función para calcular los parámetros necesarios para desplazarse en círculo.

El usuario proporciona los datos de radio (r) y desplazamiento en grados ( $\Delta\alpha$ ). Con esto se puede obtener un vector con todos los ángulos en los que se realizarán medidas.

Al igual que en el desplazamiento en filas y columnas, al introducir el usuario el radio en milímetros se realiza una conversión de tal forma que se obtienen un número de pasos redondeados en número entero. El radio máximo que se podrá poner será de 381 mm al ser la mesa de diámetro 762 mm. Las funciones definidas en el programa se muestran a continuación:

$$\text{angulo} = \text{angulo} * 2 * \pi / 360; \quad (24)$$

$$\text{alpha} = 0 : \text{angulo} : 2 * \pi; \quad (25)$$

Al tomar como referencia la división por cuadrantes de la circunferencia se puede averiguar cuál será el incremento o decremento tanto en X como en Y entre cada posición.

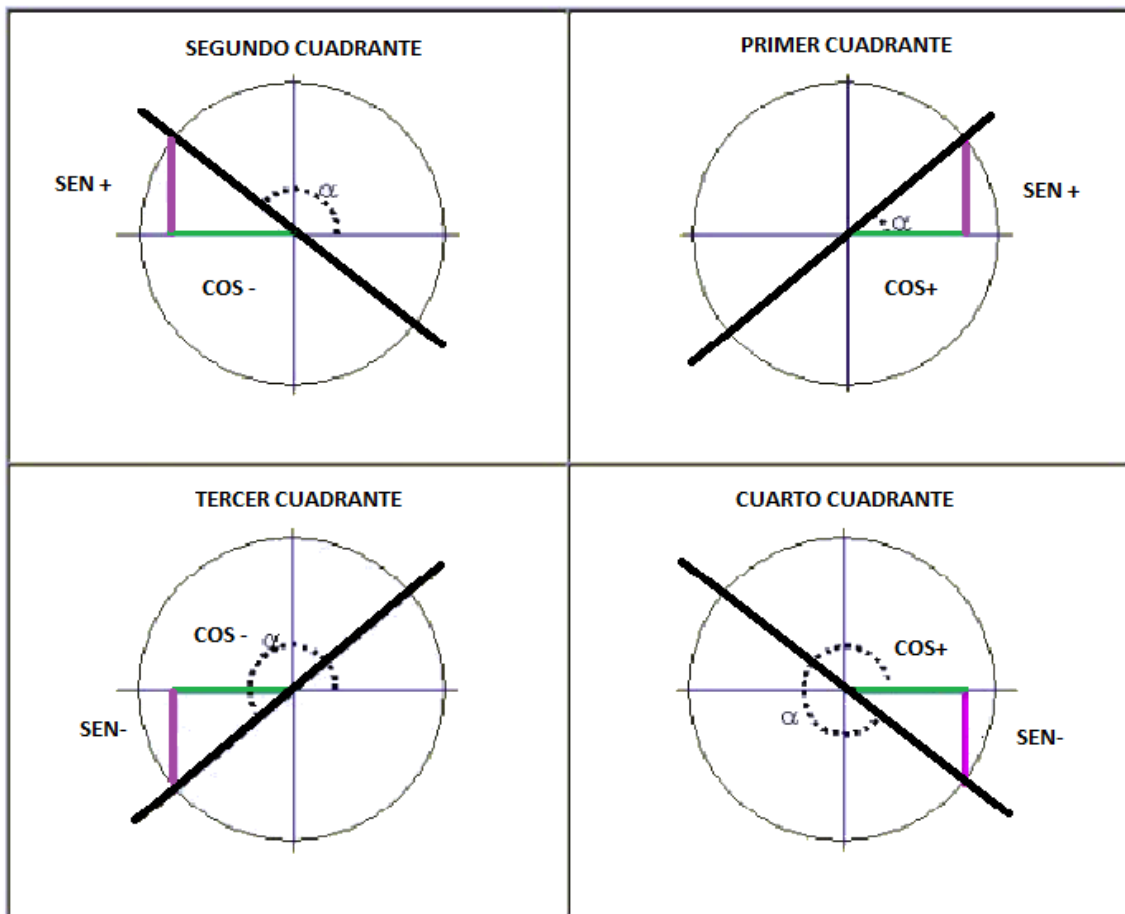


Figura 100 Cuadrantes de una circunferencia

Con estos datos se obtienen otros dos vectores con los valores correspondientes para las variaciones en cada eje en cada uno de los movimientos realizados

Siendo:

$$\Delta x = r * \cos(\alpha) \quad (26)$$

$$\Delta y = r * \text{sen}(\alpha) \quad (27)$$

También, la función toma un punto como referencia en la mesa para situar el centro de la circunferencia. Por el simple hecho de poder realizar circunferencias en el mayor rango posible de valores para el radio, la función situará el centro de la circunferencia en el centro de la mesa cuyo punto es el (380,380). Por lo tanto, la posición inicial a partir de la cual se empieza a construir la circunferencia es:

$$x = 380 + r * \cos(0) = 380 + r \quad (28)$$

$$y = 380 + r * \text{sen}(0) = 380 \quad (29)$$

De tal modo que la posición relativa en cada momento será:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i \quad (30)$$

$$y_i = y_{i-1} + \Delta y_i \quad (31)$$

- **INICIALIZAR**

La función inicializar está diseñada para hacer una llamada al archivo .exe que ejecuta el software de Arrick Robotics para iniciar el programa e iniciar una calibración. Antes de ejecutar esta función es preciso haber ejecutado el programa fuera de este programa para poder mover los motores del sistema MD-2.

El botón inicializar se implementa en Matlab mediante un *pushbutton* cómo se muestra a continuación:



Figura 101 Botón función inicializar

Previamente, antes de iniciar el software el programa comprueba que no haya ningún archivo de calibración ya que, si no, no se consigue inicializar. En caso de haber este tipo de archivo el programa lo elimina para evitar problemas posteriores. Una vez que el programa ha realizado la calibración, es necesario habilitar la casilla de enable del software que proporciona el posicionador para que permita el movimiento de los motores.

- **BOTONES HOME**

Los botones *Home* implementados en el programa sirven para devolver al posicionador a la ubicación inicial. En la interfaz del programa los podemos ver implementado mediante dos funciones *pushbutton* como se muestra a continuación:



Figura 102 Botones de las funciones Home X y Home Y

Las funciones de la mesa toman como referencia el punto inicial de la mesa, de manera que es importante contar con esta serie de botones que permiten al posicionador volver a esta posición.

En dicha posición hay colocados en cada uno de los ejes hay un final de carrera que al ser pulsado permite saber al programa que ha llegado a la posición inicial. Por tanto, mediante la lectura de los pines 12 y 13 para los ejes X e Y respectivamente se puede saber cuándo se han pulsado estos interruptores.

- **MOVER**

La función mover es la parte más complicada de la programación de la interfaz que controla el movimiento de la mesa ya que incorpora todos los métodos descritos anteriormente.

El botón mover está implementado mediante la función *pushbutton* en la interfaz del programa como se muestra a continuación:



*Figura 103 Botón función Mover*

La funcionalidad de este botón se divide en cuatro pasos:

1. Se calculan los parámetros correspondientes a la rejilla con la que se va a trabajar ya sea rectangular o circular.
2. Si el posicionador no se encuentra en la posición inicial el programa llama a las funciones encargadas de devolver a la posición inicial que son “home x” y “home y”.
3. El posicionador se desplaza a la posición inicial de medida con los parámetros calculados en el punto 1.
4. Comienza el movimiento por la rejilla establecida por el usuario.

Con respecto al paso número cuatro, en el caso de que el desplazamiento sea mediante filas y columnas, hay que considerar además de lo anteriormente citado el hecho de que al desplazarse de esta forma no terminará el posicionador en el punto inicial por lo que una vez terminado el movimiento, si se selecciona el modo de desplazamiento en sentido inverso, al pulsar sobre el botón Mover, se pasa directamente al paso número cuatro descartando los tres anteriores.

- **PARAR**

Esta función parar, aunque se llame de igual forma que la de la parte del control del analizador no realiza el mismo proceso. Al igual que la función parar de la otra parte se activa mediante una función *pushbutton* como se representa a continuación:



Figura 104 Botón Función Parar

El funcionamiento de este botón se basa en enviar los comandos para parar el movimiento de los motores, sin embargo, en la función parar de la parte del analizador paraba las medidas. Los comandos que se envían son los siguientes:

```
dio=digitalio('parallel','LPT1');  
data1=addline(dio,0:7,0,'out');  
putvalue(data1,255);
```

Desde la función encargada de controlar el botón mover se realizan comprobaciones de cada paso por los bucles que la componen y en caso de haber pulsado este botón se hace la llamada a la función y se para el movimiento.

- **MOVER Y MEDIR**

Como finalmente se ha procedido a unir ambas interfaces en una sola para así tener un control total del sistema de medida, se ha respetado de manera íntegra la totalidad del código a la hora de juntarlo, sin embargo, se han realizado algunas modificaciones necesarias en ciertas funciones como esta para que no existan posibles confrontaciones entre determinadas funciones.

El botón *Mover y Medir* se encarga de controlar todo, es decir, movimiento de la mesa, parámetros del analizador, medidas a realizar, dónde y cómo guardarlas, en consecuencia, la función que lo controla es la más extensa y compleja de todo el código que compone el programa.

Esta función se activa mediante un *pushbutton* como se muestra a continuación:

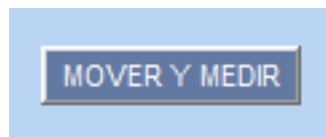


Figura 105 Botón de la función Mover y Medir

La función se compone en gran parte del mismo código que conforma la función Mover, solo que en este caso cada vez que el posicionador va desplazándose y llega a uno de los puntos de medida, se para y en ese momento se llama a la función Medir. La función

Medir ha sido ligeramente modificada ya que se añaden ciertas condiciones como si se está utilizando o no la mesa, ya que se usa el mismo código tanto si está como si no.

La mayor diferencia respecto a la función Medir reside a la hora de establecer el nombre con el que se guardan los ficheros. En el caso de hacerlo sin mesa se realiza una concatenación de strings de la siguiente forma:

*NombreintroducidodelUsuario\_NumeroMedida*

En el caso de emplear el posicionador XY, este modelo de nombre ya no es útil, ya que se necesita saber en qué posición se está midiendo. Por tanto, en el caso de estar midiendo en forma de filas y columnas, el nombre quedaría de la siguiente forma:

*NombreintroducidodelUsuario\_NumeroMedida\_NxM*

Dónde NxM indica en qué posición de la matriz se ha realizado la medida. El valor de N y M se lee de las dos casillas de posición de fila y columna actual del programa, las cuales se van actualizando cada vez que se cambia de posición.

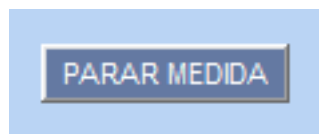
Por otro lado, si el tipo de barrido fuese circular la información que se indica en el nombre del archivo sería el ángulo como se indica a continuación:

*NombreintroducidodelUsuario\_NumeroMedida\_Ángulo*

El ángulo se extrae gracias al vector que hay calculado con todos los ángulos de la circunferencia en los que se realizan las medidas.

- **PARAR MEDIDA**

Al igual que la función Mover y Medir, esta función es una implementación de otros dos botones, además está implementada con un *pushbutton* cómo se muestra a continuación:



*Figura 106 Botón de la función Parar Medida*

En primer lugar, la función realiza una llamada a la función encargada de parar la medida y seguidamente a la que para los motores, de tal modo que al ser el único botón que queda habilitado una vez se ha pulsado el botón *Mover y Medir*, cuando se presiona se interrumpe inmediatamente la ejecución de éste y para el proceso de medida. Por tanto, esta función haciendo una comparación con la función Mover y Medir podría ser llamada “*Parar y Parar Medida*”.

### 4.3.3 Mensajes de información del programa

Al iniciarse el programa se muestra un cuadro de información para el usuario en el que se explica una serie de pasos para el correcto funcionamiento. La siguiente imagen muestra este cuadro:

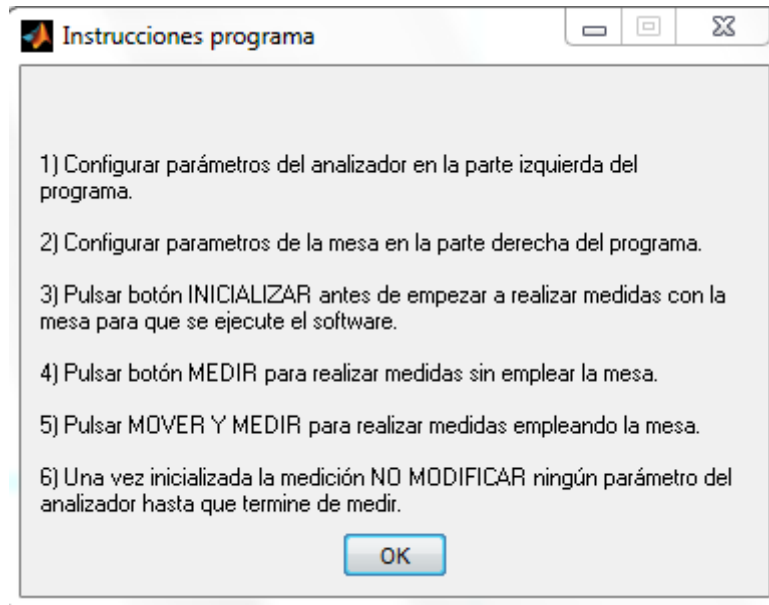


Figura 107 Mensaje información inicial del programa

Además, al iniciar la función de inicializar en el cuadro del posicionador XY aparece el siguiente cuadro:

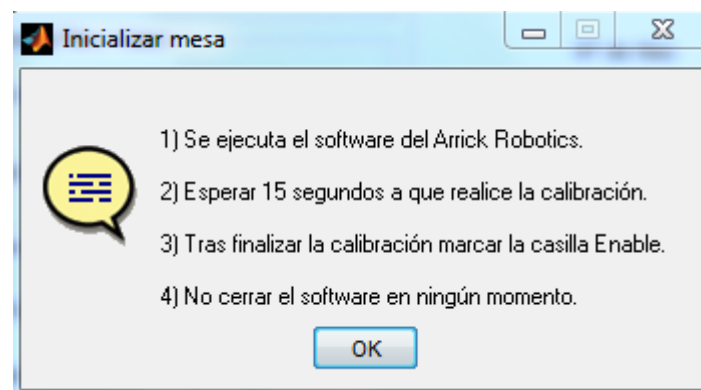


Figura 108 Mensaje de información al inicializar posicionador

Cómo se ha explicado en puntos anteriores es importante seguir los pasos que indican estos cuadros para un correcto funcionamiento del programa y evitar así posteriores problemas que puedan aparecer.



### 4.3.4 Anexión de ambas interfaces

La siguiente imagen muestra la anexión de ambas interfaces para controlar analizador y posicionador:

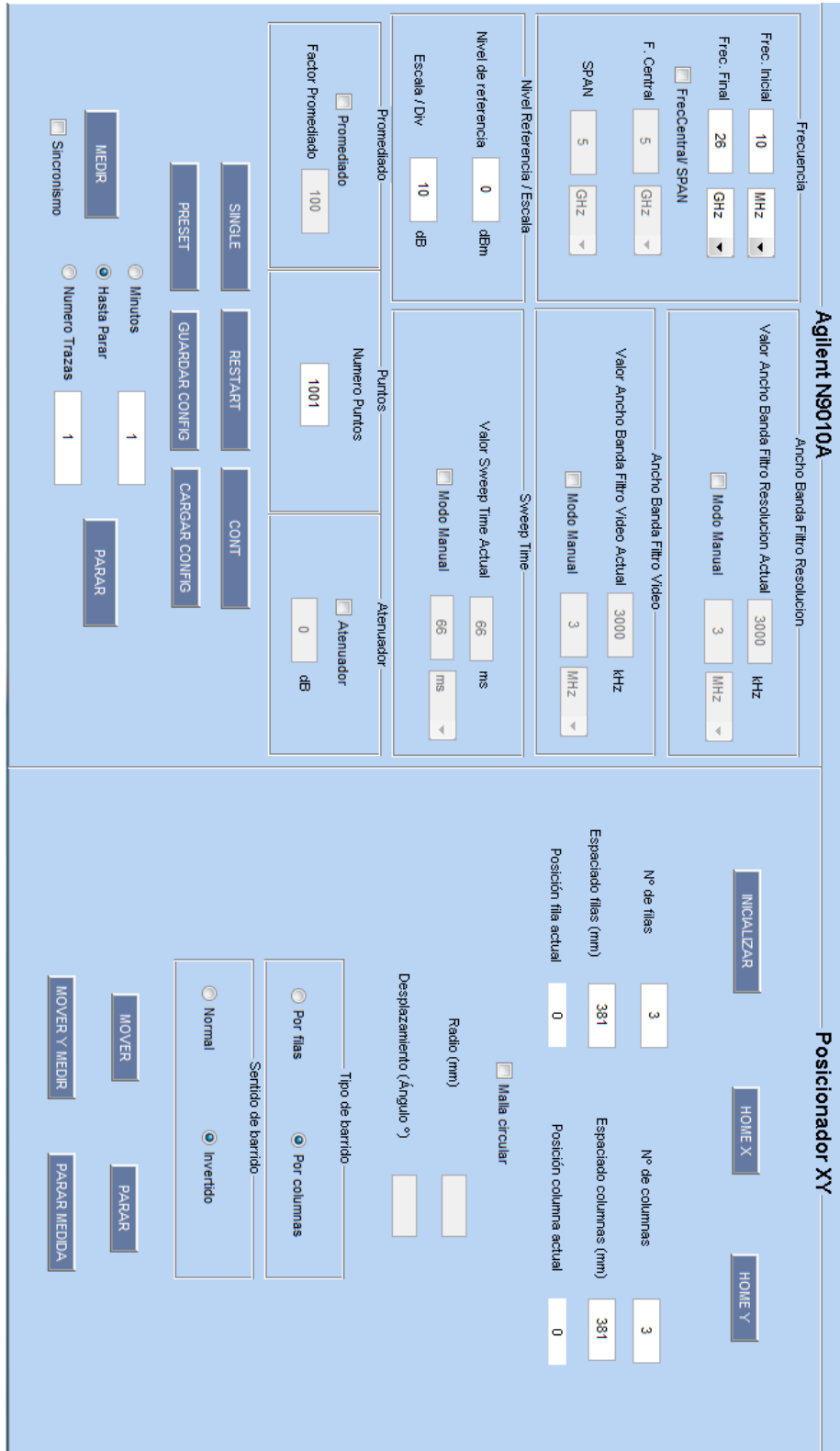


Figura 109 Aspecto de la interfaz con los programas anexionados

### 4.3.5 Problemas y soluciones

En este apartado se procede a explicar los diferentes problemas ocurridos durante la realización de este proyecto y que posteriormente se han solucionado.

- **Conexión con el analizador**

El problema con el establecimiento de la conexión con el analizador ha sido uno de los que más tiempo ha retrasado este proyecto. En un principio, se instaló la librería IO de Agilent 2017 para la conexión con el analizador. Tras verificar que las configuraciones de las direcciones IP eran correctas, se procedía a enviar algún comando como el *IDN?* que sirve para que el analizador se identifique.

Al instalar por primera vez la librería, el analizador realizaba la conexión correctamente, pero una vez se apagaba el ordenador y se volvía a establecer conexión con el instrumento, éste no conseguía conectar mostrando el siguiente error:

```
0xBFFF011 (VI_ERROR_RSRC_NFOUND)
```

Tras probar numerosas configuraciones e intentos se procedió a contactar con la empresa fabricante de esta librería que sugirió no trabajar con cortafuegos y demás factores que limiten el ordenador pero no surtió efecto. Por ello se decidió desinstalar la versión 2017 de la librería e instalar la versión 2015 que estaba funcionando en otro sistema empleado en el laboratorio. Resultó ser la solución pues ya nunca más se tendría el problema de la conexión.

Aunque el error ocurrido no se conoce exactamente, probablemente será un error por algún *bug* en el programa que no permita realizar la conexión correctamente.

- **Función Medir**

Dentro de las funciones realizadas en el programa, ésta ha sido la que más problemas ha presentado. Como se explicó en puntos anteriores, la función medir realiza un barrido de la medida y posteriormente se procede a guardar este barrido.

En un primer momento, al estar implementada sobre un bucle (realiza medidas hasta pulsar el botón de parar) el analizador se saturaba de órdenes pues el ordenador trabaja a una velocidad superior a la del analizador y éste dejaba de funcionar. Una primera solución fue la de implementar unos tiempos de pausa después de la ejecución de cada orden que permita al analizador hacer la instrucción y así no saturar el buffer de entrada. Aunque esta medida funcionaba se decidió cambiar hacia una solución más eficiente pues

poner un tiempo fijo de pausa implica que el analizador puede estar en algunos momentos sin realizar ninguna acción.

La solución consiste en añadir a la instrucción de barrido y de guardado al final de la medida el comando ;*OPC?*. Esto hará que el analizador no avance hasta que haya terminado de completar la orden por lo que se evitan tiempos muertos en el programa. Las órdenes quedan de la siguiente forma:

```
fprintf(handles.mxa, 'INIT:IMM;*OPC?'); %ejecutamos el
barrido
fscanf(handles.mxa); %lee el valor de la orden anterior

fprintf(handles.mxa, 'MMEM:STOR:TRAC:DATA
TRACE1,Medida1.csv;*OPC?'); %se ejecuta la orden de
guardado
fscanf(handles.mxa); %espera a leer la orden anterior
cuando haya acabado
```

Además de solucionar el problema, con esta instrucción se ha podido saber exactamente cuánto tarda en ejecutar estos procesos para posteriormente realizar el archivo de sincronismo y detectar que el analizador tarda un tiempo adicional al tiempo de barrido para realizar la medida.

- ***Función Parar***

Dentro de esta función el problema es que cuando se está dentro de un bucle de medida como el anterior y se quiere parar, el ordenador no permite ya que va a una velocidad elevada y no permite habilitar la función parar. Por ello, al poner un tiempo de pausa muy pequeño de 0,00001 segundos, el programa permite que al pulsar el botón *Parar* realice el parado cosa que no sucede si no está este tiempo de pausa.

# Capítulo 5. Conclusión y líneas de trabajo futuras

## 5.1 Conclusiones

Para concluir este trabajo, se procede a dedicar unas líneas de conclusiones que servirán también para posteriores trabajos relacionados con este tema. En este proyecto se ha implementado un programa capaz de automatizar el proceso de tomas de medida para la caracterización de un canal en banda estrecha. La sonda está implementada por el programa que toma las medidas, la mesa en la que está situada la antena y el analizador que nos da la información que queremos posteriormente utilizar.

La interfaz del programa para controlar el analizador y el posicionador se ha desarrollado con la herramienta GUIDE de Matlab que permite un fácil manejo de los dispositivos. Este programa entre sus muchas funciones permite tomar medidas de los barridos que se están haciendo y que servirán para caracterizar el canal de propagación en el que se está tomando las medidas. También, el programa controlará el posicionador XY con numerosas funciones para diferentes formas de barridos en la mesa, aunque éste último no será necesario para que el programa funcione, pues como se explicó en puntos anteriores el programa se diseñó también para tomar medidas sin necesidad de utilizar el sistema de posicionado.

Respecto a la comunicación entre los instrumentos, se ha realizado una conexión LAN entre el ordenador y el analizador que, mediante una programación SCPI permite la comunicación entre ellos para tomar los datos que el analizador va tomando.

Además, la conexión entre el ordenador y la mesa de posicionado XY se ha hecho a través del puerto paralelo (puerto de impresora) y, mediante un software que proporciona esta mesa se puede controlar los motores para realizar los diferentes barridos en la mesa.

Por último, destacar que los problemas ocasionados en la realización de este proyecto han servido para conocer mejor como trabaja estos dispositivos. En concreto, el programa se ha diseñado para que el analizador no se sature de comandos y pueda trabajar sin ningún

problema. En este caso, el elemento que determina la velocidad de la toma de medidas es el analizador por lo que se diseña centrándose en el instrumento principal de esta Sonda dedicada a tomar medidas para caracterizar un canal en banda estrecha.

## **5.2 Líneas futuras**

Pese a que se ha conseguido el objetivo de implementar esta Sonda, todavía se podría perfeccionar más este programa. Por una parte, se ha utilizado una programación SCPI que es la utilizada comúnmente para este tipo de trabajos, pero para mejorar las prestaciones de esta comunicación con el analizador se podría utilizar la programación COM basada en objetos que, aunque no se dispone de tanta información sobre ella permite unos tiempos de prestaciones algo menores que la programación basada en SCPI que se ha utilizado en este proyecto.

Otro de los aspectos a tener en cuenta para futuros trabajos es la obtención de diferentes modelos de pérdidas de propagación en diferentes situaciones. En este proyecto, aunque se puede utilizar sin la mesa posicionadora que lleva la antena, resulta interesante la obtención de medidas por ejemplo en un vehículo en el cuál se tendría otros aspectos a tener en cuenta como el incremento de la velocidad de avance, altitudes, etc. que permite conocer más los diferentes canales en los que estamos expuestos habitualmente.

Por último, también se presenta la posibilidad de desarrollar una sonda similar a ésta empleando otros posicionadores que permitan la conexión por otro método (USB, LAN,...) comprobando si es más conveniente un método u otro, al igual que la conexión con el analizador que también se podría realizar por otros métodos para comprobar cuál es el más eficiente.

# Bibliografía

- José Miguel Miranda, José Luis Sebastián, Manuel Sierra, José Margineda, “Ingeniería de Microondas: técnicas experimentales”. 2002 Prentice Hall.
- L. Rubio, J. Reig, H. Fernández, V.M. Rodrigo, “Experimental UWB Propagation Channel Path Loss and Time-Dispersion Characterization in a Laboratory Environment”. 2013 (Online).
- L.Rubio, J. Reig, H. Hernández, “Propagation Aspects in Vehicular Networks, Vehicular Technologies”, Miguel Almeida (Ed), InTech, 2011.
- Alejandro Henze, “Medidas electrónicas. Analizador de espectro para microondas”. (Online).
- Carlos Alberto Vila Burguete, “Simulación de Zonas de Fresnel para Enlaces de Microondas”. 2005 (Online).
- J. Costa Quintana, Fernando López Aguilar, “Interacción electromagnética: Teoría Clásica”. 2007 Reverte.
- F.L Peñaranda, M. Baquero, V. Boria, “Apuntes asignatura Microondas, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación”, 2016.
- C. Bachiller, “Apuntes asignatura Radiación y propagación de Ondas, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación”, 2015.
- L. Rubio, “Apuntes asignatura Radiocomunicaciones, Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación”, 2016.

- Keysight Technologies, “Spectrum Analyzer Mode User’s & Programmer’s Reference for Keysight X-Series Signal Analyzer” (Online).
- Keysight Technologies, “Using Matlab to create Keysight Technologies Signal and Spectrum Analyzer Applications” (Online).
- Keysight Technologies, “Instrument Messages for Keysight X-Series Signal Analyzer” (Online).
- Diego Orlando Barragán Guerrero, “Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab Parte I”. 2008 (Online).

