

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



**Proyecto Fin de Carrera**

## **Software para la automatización de medidas de un sistema MIMO de banda ancha**



AUTOR: Rafael Antonio Lucas Ávila  
DIRECTOR: José María Molina García-Pardo

Diciembre / 2005



<b>Autor</b>	Rafael Antonio Lucas Ávila
<b>E-mail del Autor</b>	ralucas@telefonica.net
<b>Director</b>	José María Molina García-Pardo
<b>E-mail del Director</b>	Josemaria.molina@upct.es
<b>Título del PFC</b>	Software para la automatización de medidas de un sistema MIMO de banda ancha
<b>Resumen</b>	
<p>Los sistemas de comunicaciones móviles celulares de tercera generación o los sistemas futuros requieren de gran capacidad de transmisión de datos en la interfaz radio. Por tanto, resulta necesario analizar el canal de radiocomunicaciones no sólo para estimar las pérdidas por propagación sino para evaluar la dispersión de la señal en el tiempo y en el espacio. Además, recientemente se ha descubierto que mediante el uso de múltiples antenas en transmisión y múltiples antenas en recepción (MIMO) se pueden alcanzar grandes tasas de transferencia de información comparado con los sistemas tradicionales. Por todo lo anterior, resulta de gran interés el analizar el uso de estos novedosos sistemas en entornos micro-celulares comunes. Una forma de conocer el canal de radiocomunicaciones es proponiendo modelos de propagación basados en trazado de rayos y teorías electromagnéticas de óptica geométrica, cuyos resultados deben ser validados con medidas experimentales.</p> <p>El objetivo del proyecto es la continuación y mejora de un software dedicado a la automatización de medidas para canales MIMO basado en el uso de un analizador de redes.</p>	
<b>Titulación</b>	Ingeniero de Telecomunicación
<b>Intensificación</b>	Sistemas y Redes de Telecomunicación
<b>Departamento</b>	Tecnología de la Información y de las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Diciembre de 2005

## Índice general

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. Presentación	7
1.2. Objetivos del proyecto	7
1.3. Fases del proyecto	8
<b>Capítulo 2. Canales MIMO y Sistemas de Medidas</b>	<b>10</b>
2.1. Introducción	10
2.2. Canales MIMO	10
2.3. Sistemas de medidas	14
2.3.1. <i>Direct RF Pulse System</i>	15
2.3.2. <i>Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding</i>	16
2.3.3. <i>Frequency Domain Channel Sounding</i>	18
2.4. Instrumentación para medidas de radiofrecuencia	20
2.5. Aplicaciones	22
<b>Capítulo 3. Punto de partida del PFC</b>	<b>24</b>
3.1. Introducción	24
3.2. Sistema de medidas anterior	24
3.3. Software anterior	25
3.4. Debilidades de este sistema	28
<b>Capítulo 4. Descripción del equipo de medidas</b>	<b>30</b>
4.1. Introducción	30
4.2. Descripción de los elementos que forman el sistema	30
4.3. Explicación de este sistema	34
4.4. Comparación con el sistema anterior	35
<b>Capítulo 5. Descripción del software de medidas</b>	<b>36</b>
5.1. Introducción	36
5.2. Instalaciones previas	36
5.2.1. <i>Instalación del controlador GPIB</i>	36
5.2.2. <i>Instalación de los drivers de las tarjetas de red inalámbricas (WLAN)</i>	36

<b>5.3. Puesta en marcha del programa</b>	<b>38</b>
<b>5.4. Descripción y funcionamiento de las diferentes partes del programa</b>	<b>38</b>
5.4.1. <i>Ventana de presentación</i>	38
5.4.2. <i>Ventana principal de medidas</i>	39
5.4.3. <i>Ventana de configuración</i>	41
5.4.3.1. <i>Cambiar configuración</i>	42
5.4.3.2. <i>Cargar configuración</i>	44
5.4.3.3. <i>Guardar configuración</i>	44
<b>5.5. Ayuda</b>	<b>45</b>
<b>5.6. Mejoras respecto al software anterior</b>	<b>46</b>
<b>Capítulo 6. Campañas de medidas</b>	<b>51</b>
<b>6.1. Metodología para realizar una medida</b>	<b>51</b>
6.1.1. <i>Calibración</i>	52
<b>6.2. Algunos ejemplos de utilización del programa</b>	<b>53</b>
6.2.1. <i>Ejemplo 1. Como configurar el sistema</i>	53
6.2.2. <i>Ejemplo 2. Como iniciar un ciclo de medidas</i>	57
6.2.3. <i>Ejemplo 3. Como guardar una configuración</i>	59
6.2.4. <i>Ejemplo 4. Como cargar una configuración</i>	61
6.2.5. <i>Ejemplo práctico</i>	62
<b>6.3. Precauciones</b>	<b>65</b>
<b>Capítulo 7. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>66</b>
<b>7.1. Conclusiones</b>	<b>66</b>
<b>7.2. Líneas futuras</b>	<b>67</b>
<b>Anexos</b>	
<b>Funciones utilizadas más importantes</b>	<b>68</b>
<i>Medidas</i>	68
<i>Configurar</i>	71
<i>Preset</i>	75
<i>Autoescale</i>	75
<i>miCalibracion</i>	76
<i>GuardCalib</i>	77

## Índice general

---

<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>80</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1. Esquema de un sistema SISO</b>	<b>10</b>
<b>Figura 2.2. Esquema de un sistema SIMO</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2.3. Esquema de un sistema MISO</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2.4. Esquema de un sistema MIMO</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2.5. Esquema de un sistema Direct RF Pulse System [Rap02]</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2.6. Esquema de un sistema Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding [Rap02]</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2.7. Esquema de un sistema Frecuency Domain Channel Sounding [Rap02]</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.8. Contador universal de frecuencia de Agilent 53131A [Agile]</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.9. Generador de formas de ondas arbitrarias 33220A de Agilent [Agile]</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.10. Medidor de potencia N1912A de Agilent [Agile]</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.11. Analizador de espectros 8530EC de Agilent [Agile]</b>	<b>22</b>
<b>Figura 3.1. Esquema del sistema de medidas [ProCe]</b>	<b>25</b>
<b>Figura 3.2. Hoja de cálculo de Excel con los parámetros de configuración</b>	<b>26</b>
<b>Figura 3.3. Pantalla del programa en ejecución</b>	<b>27</b>
<b>Figura 4.1. Visión general del equipo de medidas</b>	<b>30</b>
<b>Figura 4.2. Pantalla general del analizador de redes</b>	<b>31</b>
<b>Figura 4.3. Analizador de redes ENA y el multipuerto</b>	<b>31</b>
<b>Figura 4.4. Conmutador y controlador</b>	<b>32</b>
<b>Figura 4.5. Antenas</b>	<b>33</b>
<b>Figura 4.6. Tarjetas de red inalámbrica</b>	<b>33</b>
<b>Figura 4.7. Ordenador portátil</b>	<b>34</b>
<b>Figura 4.8. Diagrama de tiempos del sistema</b>	<b>35</b>
<b>Figura 5.1. Ventana de presentación</b>	<b>39</b>
<b>Figura 5.2. Ventana principal de medidas</b>	<b>39</b>
<b>Figura 5.3. Ventana de configuración</b>	<b>41</b>
<b>Figura 5.4. Ventana de cambio de configuración</b>	<b>42</b>
<b>Figura 5.5. Ventana de cargar configuración</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5.6. Ventana de guardar configuración</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5.7. Ventana de ayuda del programa</b>	<b>46</b>
<b>Figura 6.1. Esquema de la realización de una campaña de medidas</b>	<b>52</b>

<b>Figura 6.2. Botón preset</b>	<b>54</b>
<b>Figura 6.3. Botón configurar</b>	<b>54</b>
<b>Figura 6.4. Cambiar configuración</b>	<b>55</b>
<b>Figura 6.5. Introducimos los parámetros que deseamos</b>	<b>55</b>
<b>Figura 6.6. Confirmamos la configuración</b>	<b>56</b>
<b>Figura 6.7. Imagen del analizador de redes</b>	<b>56</b>
<b>Figura 6.8. Introducción de las condiciones de medida</b>	<b>57</b>
<b>Figura 6.9. El directorio no existe</b>	<b>57</b>
<b>Figura 6.10. Iniciar los ciclos de medidas</b>	<b>58</b>
<b>Figura 6.11. Comenzando la medida número 1</b>	<b>58</b>
<b>Figura 6.12. Fin del ciclo de medidas</b>	<b>59</b>
<b>Figura 6.13. Botón configurar</b>	<b>59</b>
<b>Figura 6.14. Botón Guardar configuración</b>	<b>60</b>
<b>Figura 6.15. Guardar configuración</b>	<b>60</b>
<b>Figura 6.16. Crear directorio</b>	<b>61</b>
<b>Figura 6.17. Confirmamos guardar la configuración</b>	<b>61</b>
<b>Figura 6.18. Botón Cargar configuración</b>	<b>62</b>
<b>Figura 6.19. Confirmar Cargar configuración</b>	<b>62</b>
<b>Figura 6.20. Estructura del túnel</b>	<b>63</b>
<b>Figura 6.21. Magnitud de las medidas tomadas</b>	<b>64</b>
<b>Figura 6.22. Fase de las medidas tomadas</b>	<b>64</b>

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

### **1.1. Presentación**

Debido al continuo avance que se produce en el campo de las telecomunicaciones y especialmente al desarrollo que en los últimos años se está produciendo con la aparición de los sistemas de telefonía móvil de tercera generación y la previsión de la aparición de nuevos sistemas en el futuro, los cuales poseen unas prestaciones y unos servicios que superan ampliamente a los que poseían los anteriores sistemas de telefonía móvil, implica la necesidad de utilizar una mayor capacidad de transmisión para poder soportar la gran tasa de datos que se debe transmitir [Digit].

Por este motivo se están realizando estudios con el objetivo de desarrollar nuevas técnicas que nos permitan una utilización más eficiente del canal radio. Una de estas técnicas está basada en la utilización de varias antenas en transmisión y varias antenas en recepción, también llamada MIMO, la cual ha demostrado que propicia una gran tasa de transferencia de información si lo comparamos con los sistemas de transmisión anteriores [Fos96][Fos98].

Para poder realizar un análisis eficiente de las nuevas técnicas de transmisión de datos, con el objetivo de crear nuevos dispositivos que dispongan de esta tecnología, es necesario realizar un estudio del canal radio, especialmente en micro-celdas comunes, realizando el estudio tanto en tiempo como en frecuencia.

Para realizar esta caracterización del canal radio es necesario la realización de campañas de medidas que nos representen de manera fiable dicho canal radio en diferentes entornos. Para realizar estas medidas es necesaria la utilización de sistemas capaces de realizar dichas medidas de manera eficiente y eficaz.

### **1.2. Objetivos del proyecto**

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un software capaz de automatizar la realización de medidas de los sistemas anteriormente nombrados. Este tipo de software es fundamental ya que además de propiciar un gran ahorro de tiempo debido a la automatización a la hora de la toma de medidas, asegura la sincronización entre los distintos aparatos que componen el sistema de medidas, lo cual es del todo fundamental si se desea que las medidas obtenidas sean correctas.



El primer software desarrollado con este objetivo fue creado en un proyecto anterior [ProCe], el cual fue diseñado para tomar medidas en banda estrecha. Debido a las necesidades que iban apareciendo a la hora de realizar las campañas de medidas y que este programa no cubría, como por ejemplo la posibilidad de realizar medidas en banda ancha, se llegó a la necesidad de crear un nuevo software mucho más flexible. En este proyecto además de mejorar este software para que fuese capaz de realizar medidas en banda ancha, se desarrollaron todo tipo de mejoras al programa tales como realizar una optimización en el tiempo en la toma de medidas o la posibilidad de configurar el sistema en tiempo de ejecución, entre otras muchas mejoras que veremos en los apartados posteriores.

Este nuevo programa ha sido probado de manera práctica con éxito a la hora de realizar dos proyectos fin de carrera [ProGZ][ProGF], cuyo objetivo era la realización de campañas de medidas en diferentes entornos, y cuyos resultados han sido del todo satisfactorios.

En este informe vamos a presentar en primer lugar una pequeña introducción teórica sobre los canales MIMO. Después veremos un resumen del sistema y del software utilizado hasta ahora y las debilidades que poseían dichos sistemas. Posteriormente vamos a describir en profundidad el nuevo sistema utilizado y el nuevo software creado para realizar las campañas de medidas. Finalmente nos despediremos explicando la metodología que se debe seguir para realizar una medida y mostraremos algunos ejemplos de utilización.

### 1.3. Fases del proyecto

Noviembre 2004: Búsqueda de información sobre sistemas de medida del canal radio. Búsqueda de los parámetros de interés del canal radio MIMO. Decisión sobre uno de ellos. Adquisición de la instrumentación necesaria.

Diciembre 2004-Febrero 2005: Primera toma de contacto y aprendizaje del lenguaje de programación Visual Basic.

Marzo 2005: Conocimiento de los trabajos hechos anteriormente y creación de las primeras versiones del programa

Abril-Mayo 2005: Optimización y adaptación del programa. Realización de pruebas empíricas

Junio-Julio 2005: Desarrollo de las aplicaciones finales del programa. Realización de pruebas sobre el terreno

## **Capítulo 1. Introducción**

---

Septiembre-Octubre 2005: Desarrollo de la interfaz gráfica. Creación de una aplicación individual del programa. Pruebas finales.

Noviembre-Diciembre 2005: Redacción y presentación del proyecto fin de carrera.

## Capítulo 2

# Canales MIMO y Sistemas de Medidas

### 2.1. Introducción

En este capítulo vamos a tratar de realizar un análisis y comparación entre los sistemas de comunicación tradicionales basados en la utilización de una única antena transmisora y una única antena receptora, y los nuevos sistemas MIMO, los cuales disponen de varias antenas en recepción y varias antenas en transmisión. Para ello vamos a realizar en primer lugar un estudio teórico de cada uno de estos sistemas para poder determinar con precisión los parámetros característicos de cada uno y por tanto conocer las ventajas e inconvenientes de la utilización de más elementos radiantes en transmisión y en recepción.

Posteriormente describiremos las características generales que debe tener un sistema encargado de realizar las campañas de medidas y presentaremos los elementos fundamentales que debe poseer.

### 2.2. Canales MIMO

Como se ha dicho anteriormente, los sistemas tradicionales, llamados SISO, utilizan una única antena para la transmisión de información y una única antena para la recepción de dicha información. En la siguiente figura podemos ver un esquema de como son este tipo de sistemas.

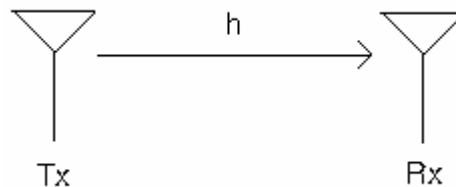


Figura 2.1. Esquema de un sistema SISO

Para este tipo de sistemas SISO la capacidad se calcula utilizando la siguiente expresión de Shannon [Sha48]:

$$C_{SISO} = \log_2 \left( 1 + SNR \cdot |h|^2 \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.1)$$

Donde SNR corresponde con la relación Señal-Ruido en el receptor y  $h$  es la respuesta compleja normalizada del canal.

Si decidimos aumentar el número de antenas en recepción, técnica llamada SIMO, obtendremos diversidad en recepción [Rab97]. El esquema de un sistema SIMO es el de la siguiente figura:

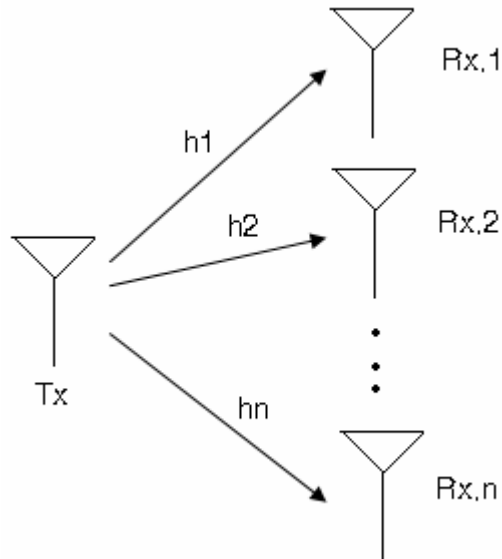


Figura 2.2. Esquema de un sistema SIMO

La máxima capacidad teórica de un sistema de este tipo con varias antenas en recepción viene dada por la siguiente expresión [Ges03]:

$$C_{SIMO} = \log_2 \left( 1 + SNR \cdot \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.2)$$

Donde SNR sigue siendo la relación Señal-Ruido en recepción,  $N$  es el número total de antenas receptoras y  $h_i$  es la respuesta compleja y normalizada del canal cuando recibe la antena  $i$ -ésima.

Si lo que deseamos es tener diversidad en transmisión [Rab97], lo que debemos hacer es aumentar el número de antenas transmisoras. Esta técnica se la conoce como MISO y el esquema que sigue es el siguiente:

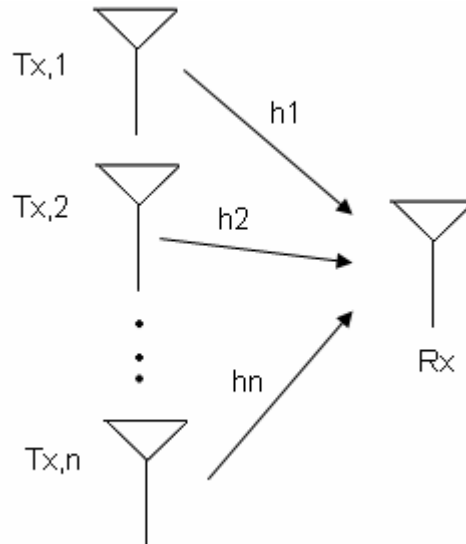


Figura 2.3. Esquema de un sistema MISO

Para sistemas con este tipo de esquema la capacidad máxima teórica que se puede alcanzar la podemos calcular utilizando la siguiente fórmula [Ges03]:

$$C_{MISO} = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.3)$$

Donde SNR sigue siendo la relación señal-ruido de la antena receptora,  $N$  es el número total de antenas transmisoras y  $h_i$  es la respuesta compleja y normalizada del canal cuando transmite la antena  $i$ -ésima. La normalización de la relación señal-ruido con respecto al número de antenas transmisoras se realiza ya que es necesario cumplir la restricción de que la potencia total transmitida debe de ser constante para todos los casos.

Una vez descritos estos sistemas vamos a centrarnos en los sistemas que utilizan múltiples antenas en transmisión y múltiples antenas en recepción, es decir, los sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

La primera persona que se encargó del estudio de estos sistemas fue Jack Winters [Win87] en 1987. J. Winters propuso dos sistemas de comunicación básicos que definían este tipo de sistemas:

1. *Comunicación entre múltiples móviles y una estación base con múltiples antenas*
2. *Comunicación entre dos móviles, cada uno de ellos con múltiples antenas*

Posteriormente Foschini [Fos96] [Fos98] realizó un análisis básico de los sistemas MIMO y propuso dos tipos de arquitectura para implementar este tipo de sistemas, el vertical BLAST y el diagonal BLAST.

El funcionamiento de los sistemas BLAST consistía en dividir el flujo de datos que deseamos transmitir en bloques, los cuales serían transmitidos por las antenas. La diferencia entre vertical BLAST y diagonal BLAST consiste en la forma de distribuir estos bloques de datos entre las antenas. En el sistema vertical BLAST los bloques de datos son distribuidos de manera secuencial entre las antenas consecutivas, mientras que en el sistema diagonal BLAST la secuencia de datos va rotando de manera circular a lo largo de las antenas.

Para ver esto de una manera más clara vamos a proponer un ejemplo en el que se utilizan cuatro antenas, a las que llamaremos '1', '2', '3' y '4'. Con lo cual el flujo de datos lo dividiremos en cuatro bloques, los cuales serán 'a', 'b', 'c' y 'd'. Si utilizásemos el sistema vertical BLAST en todas las ráfagas de transmisión cada antena transmitiría el mismo bloque de datos, como podemos ver en la siguiente tabla:

Bloque de datos asignado				
	Ráfaga 1	Ráfaga 2	Ráfaga 3	Ráfaga 4
Antena 1	a	a	a	a
Antena 2	b	b	b	b
Antena 3	c	c	c	c
Antena 4	d	d	d	d

Tabla 2.1. Distribución de los bloques de los datos con el sistema vertical BLAST

Si el sistema empleado fuese el diagonal BLAST en cada ráfaga se irían cambiando de manera circular las antenas empleadas para transmitir cada uno de los bloques de datos, de la manera que vemos en la siguiente tabla:

Bloque de datos asignado				
	Ráfaga 1	Ráfaga 2	Ráfaga 3	Ráfaga 4
Antena 1	a	d	c	b
Antena 2	b	a	d	c
Antena 3	c	b	a	d
Antena 4	d	c	b	a

Tabla 2.2. Distribución de los bloques de los datos con el sistema diagonal BLAST

Como podemos ver el sistema diagonal BLAST tiene la ventaja de que un mismo bloque de información no se transmite siempre por la misma antena, aunque posee la desventaja de necesitar un mayor poder de procesamiento para poder implementarlo.

El objetivo que persiguió la utilización de estos sistemas fue el de aumentar la tasa de tráfico de datos transmitidos en un ancho de banda estrecho.

Los sistemas MIMO poseen un esquema parecido al que podemos ver a continuación:

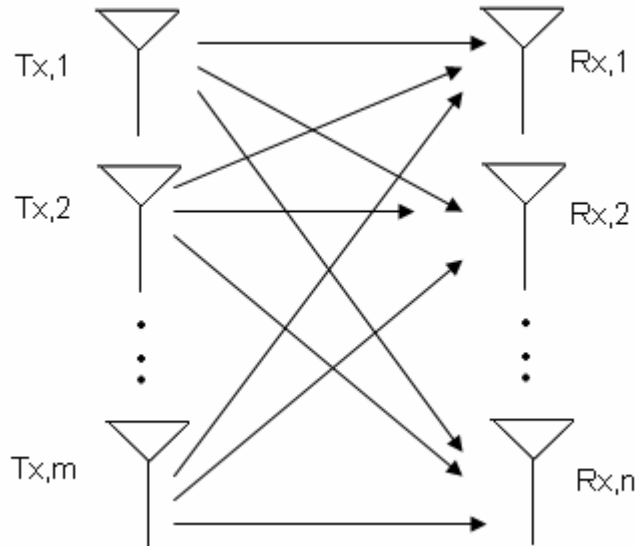


Figura 2.4. Esquema de un sistema MIMO

La capacidad para un sistema MIMO la podemos calcular usando la siguiente expresión [Fos96]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left( I_N + \frac{SNR}{M} HH^H \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.4)$$

Donde  $I_N$  es la matriz identidad,  $(..)^H$  es conjugado transpuesto de la matriz, SNR es la relación señal-ruido,  $M$  es el número total de antenas transmisoras y la matriz  $H$  es la matriz normalizada de la respuesta del canal cuando transmite cada una de las antenas transmisoras y recibe cada una de las antenas receptoras.

En el caso de que las pérdidas por propagación y las ganancias de las antenas no estén incluidas en la matriz  $H$  (en este caso no estaría normalizada), la expresión que deberíamos utilizar es la siguiente [Chr04]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left( \det \left( I_N + \frac{P_T}{\sigma_n^2} HH^H \right) \right) \text{ bps/Hz} \quad (2.5)$$

### 2.3. Sistemas de medidas

Debido a la gran importancia que tiene una correcta caracterización del canal radio a la hora de poder desarrollar con precisión y exactitud los nuevos dispositivos de

comunicaciones, y sobretodo teniendo en cuenta la gran tasa de información que se está transmitiendo con los nuevos terminales de tercera generación y los nuevos sistemas que aparecerán en el futuro, se han desarrollado tres tipos de sistemas que se utilizan para poder medir con exactitud los efectos del canal radio. En los siguientes epígrafes describiremos estos sistemas [Rap02].

### 2.3.1. Direct RF Pulse System

Este sistema simplemente consiste en un transmisor que transmite continuamente pulsos de un ancho de  $T_{bb}$  y un receptor compuesto de un filtro paso banda con una BW de  $2/T_{bb}$  Hz, seguido de un amplificador y detectado mediante un detector de envolvente. Finalmente el resultado es mostrado y almacenado en un osciloscopio de alta velocidad que también se encuentra en el mismo receptor.

El resultado obtenido es directamente la medida del cuadrado de la respuesta al impulso del canal convolucionada con el propio impulso transmitido. El esquema de este sistema es el siguiente:

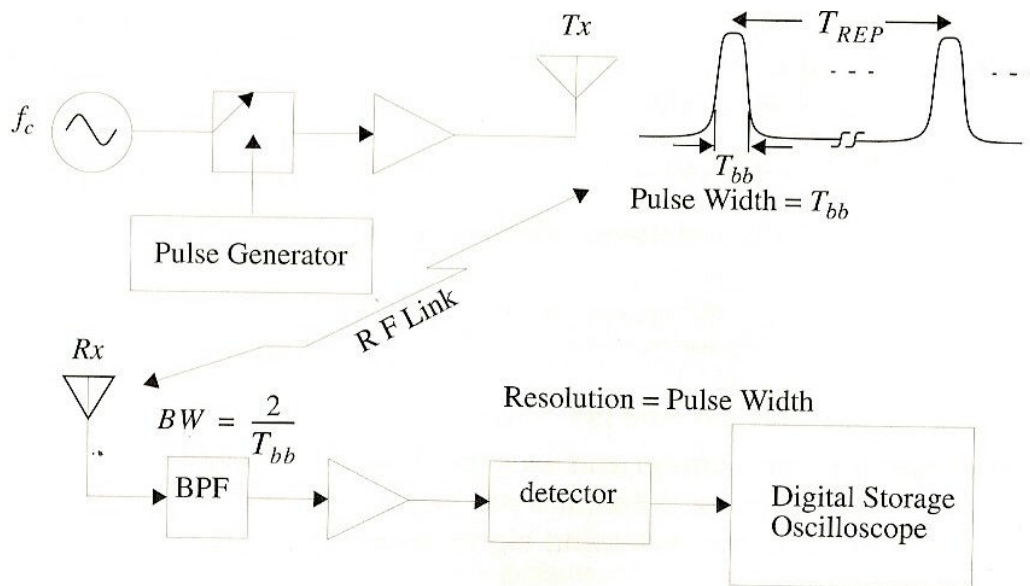


Figura 2.5. Esquema de un sistema Direct RF Pulse System [Rap02]

Como se puede observar la resolución que tiene ese sistema depende del parámetro  $T_{bb}$ , ya que el retraso mínimo que puede medir entre dos componentes multicamino es igual a la anchura del pulso  $T_{bb}$ .

#### Ventajas de este tipo de sistemas

- Es un sistema barato.
- Fácil de implementar.

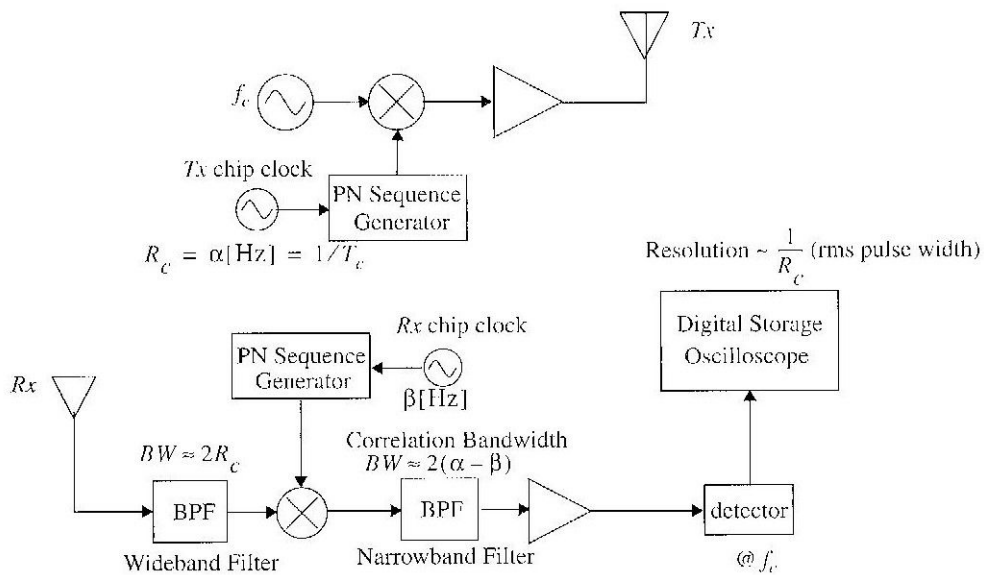


*Inconvenientes de este sistema*

- La primera contribución que se recibe en el sistema debe de ser lo suficientemente grande para disparar el *trigger* del osciloscopio, de lo contrario el sistema no funcionará correctamente.
- Es un sistema muy sensible al ruido, ya que el filtro paso banda utilizado no elimina del todo el ruido y hay parte que se cuelga en el sistema.
- Debido a que se utiliza en recepción un detector de envolvente, este sistema solamente mide amplitudes, es decir, es incapaz de medir la fase de la señal recibida. Sin embargo, si usásemos un detector coherente si que podríamos medir la fase multicamino usando este mismo sistema.

**2.3.2. Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding**

Este tipo de sistemas utilizan para implementar su sistema un esquema como el que aparece en la siguiente figura:



**Figura 2.6.** Esquema de un sistema Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding [Rap02]

La ventaja que posee este sistema radica en que, aunque la señal de prueba transmitida sea en banda ancha, es posible detectar dicha señal utilizando un detector de banda estrecha, con lo cual se mejora el rango dinámico del sistema si lo comparamos con el sistema anterior. Como podemos ver en la figura de este sistema, la señal portadora es “ensanchada” a lo largo del ancho de banda al ser multiplicada por una señal de ruido pseudo-aleatorio, con una duración de bit de  $T_c$  y una tasa de bits de  $R_c$  igual a  $1/T_c$ . La potencia espectral de la envolvente de la señal transmitida viene dada por la siguiente expresión [Dix84]:

$$S(f) = \left[ \frac{\sin \pi(f - f_c)T_c}{\pi(f - f_c)T_c} \right]^2 = Sa^2(\pi(f - f_c)T_c) \quad (2.6)$$

Al modular la señal hay que tener en cuenta también las frecuencias negativas que aparecen, con lo cual el ancho de banda que se obtiene es el doble, es decir:

$$BW = 2R_c \quad (2.7)$$

En recepción la señal es filtrada con un filtro paso banda de banda ancha con una frecuencia de  $2R_c$ . Después esta señal es multiplicada por una secuencia de ruido pseudo-aleatorio igual que la utilizada en transmisión, con lo cual la señal vuelve a ser a una señal de banda estrecha. Realizar un procesado en banda estrecha permite eliminar la mayoría del ruido y de las interferencias. La ganancia de procesado que se obtiene viene dada por la siguiente expresión:

$$PG = \frac{2R_c}{R_{bb}} = \frac{2T_{bb}}{T_c} = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \quad (2.8)$$

Donde  $T_{bb}=1/R_{bb}$  es el periodo de la información en banda base. Esta señal posteriormente es pasada por un filtro paso banda de banda estrecha con un ancho de banda de:

$$BW = 2(\alpha - \beta) \quad (2.9)$$

Donde  $\alpha$  es la tasa de bits del reloj de transmisión que genera la secuencia pseudo-aleatoria en transmisión y  $\beta$  es la tasa de bits del reloj de recepción que genera la secuencia pseudo-aleatoria en recepción.

Otro importante parámetro es el factor de deslizamiento (o *slide factor* en inglés), el cual mide la proporción entre la tasa de bits del reloj de transmisión y la diferencia entre la tasa de bits de los relojes de transmisión y recepción [Dev86]:

$$\gamma = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} \quad (2.10)$$

La resolución de nuestro sistema viene determinada por el tiempo mínimo que es capaz de medir nuestro sistema y que viene determinada por la siguiente expresión:

$$\Delta\tau = 2T_c = \frac{2}{R_c} \quad (2.11)$$

El retardo máximo que voy a ser capaz de medir es:

$$\Delta T = T_c \cdot \gamma \cdot l = \frac{\gamma \cdot l}{R_c} \quad (2.12)$$

Donde  $l$  es la máxima longitud que puede tener la secuencia de ruido pseudo-aleatorio y que viene dada por la siguiente expresión [Dix84]:

$$l = 2^n - 1 \quad (2.13)$$

Con lo cual cuantos más bits utilice la señal estará más correlada, con lo que el resultado que obtendré será mejor. Además la ganancia de procesamiento también será mayor. La correlación obtenida nos da la información de la respuesta del canal.

### ***Ventajas que tiene este sistema***

- Elimina la mayoría del ruido y de las interferencias. Además aparece la ganancia de procesamiento.
- La sincronización de las señales no se consigue por *trigger* sino que se consigue correlando las señales (se desplaza la ventana de correlación hasta que coinciden la señal transmitida y la señal recibida).

### ***Desventajas que tiene este sistema***

- Debido a que en este sistema se utiliza un detector no coherente no es posible medir la fase de la señal, solamente podemos medir el perfil del retardo (PDP).
- El proceso de medidas no se realiza en tiempo real, con lo cual el tiempo empleado aumenta.

### **2.3.3. Frequency Domain Channel Sounding**

En este sistema se aprovecha la relación dual que existe entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. El esquema de este sistema es el siguiente:

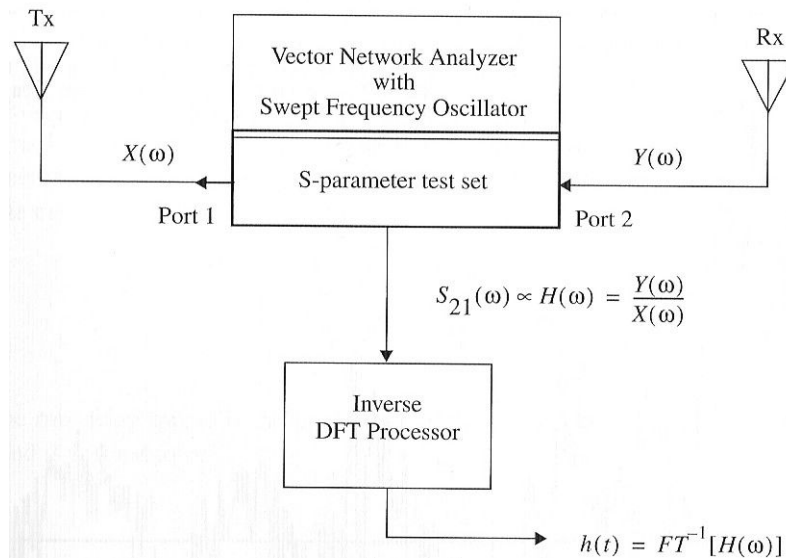


Figura 2.7. Esquema de un sistema Frequency Domain Channel Sounding [Rap02]

El funcionamiento de este sistema consiste en utilizar un analizador de redes para generar una señal. Dicha señal está compuesta de un barrido de frecuencias discretas centradas en la frecuencia de la portadora. La cantidad de estas frecuencias y el espaciado que hay entre cada una de ellas van a determinar la resolución que tendrá nuestro sistema. El nivel de la señal transmitida es conocida. La señal recibida es también analizada con el analizador de redes, con lo cual se puede obtener la respuesta compleja del canal (los parámetros S). Para obtener la respuesta en el dominio del tiempo, lo único que hay que hacer es calcular la transformada de Fourier inversa discreta (IDFT).

La principal ventaja que posee esta técnica es la de proporcionar de una manera indirecta la información fase y amplitud en el dominio del tiempo, y de esta manera calcular la mayoría del resto de parámetros de interés.

La desventaja que posee este sistema consiste en la necesidad de realizar una cuidadosa calibración de los aparatos y una muy precisa sincronización. Otro inconveniente consiste en que la información no se obtiene en tiempo real.

Este tipo de sistemas han sido probados con éxito en dos proyectos fin de carrera, el de Alberto García Zapata [ProGZ] y el de Óscar Gascón Francés [ProGF]. Las pruebas realizadas con nuestro proyecto también han seguido este esquema.

Aplicando este tipo de técnicas a los sistemas MIMO, la matriz de la respuesta compleja del canal que obtendríamos es la siguiente [Fos96] [Fos98]:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & \dots & h_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Estos parámetros se consiguen para dos tipos de objetivos, o bien para conseguir medidas para obtener los parámetros multicamino, los cuales son usados después para obtener la capacidad del canal [Mol02], o bien para obtener la matriz de coeficientes del canal MIMO para obtener la capacidad del canal.

### 2.4. Instrumentación para medidas de radiofrecuencia

En un sistema de medidas como los que hemos estado viendo en los apartados anteriores la utilización de un dispositivo u otro es una elección muy importante. Para poder ver con claridad las diferentes características de algunos de estos aparatos, vamos a describir alguno de estos dispositivos más importantes [Ros96].

#### *Contadores*

Los contadores son dispositivos que se utilizan para medir la frecuencia de una señal contando las veces que esa señal pasa por un determinado estado. Con lo cual este aparato también puede ser utilizado para medir el tiempo transcurrido entre dos instantes determinados. Un ejemplo de un contador es el contador universal de frecuencia 53131A de Agilent y que podemos ver en la siguiente figura:



Figura 2.8. Contador universal de frecuencia de Agilent 53131A [Agile]

### *Generador de señales*

Un generador de señales, como indica su propio nombre, sirven para proporcionarnos una señal que posea unas características determinadas. Dicha señal puede ser utilizada para realizar pruebas en circuitos, con antenas o con cualquier otra utilidad. Es importante que la señal proporcionada sea lo más estable y perfectas posible. Un ejemplo de un generador de funciones es el Generador de formas de ondas arbitrarias 33220A de Agilent, cuya figura podemos ver a continuación:



**Figura 2.9.** Generador de formas de ondas arbitrarias 33220A de Agilent [Agile]

### *Medidor de potencia*

Como indica su propio nombre, estos dispositivos son los encargados de medir la potencia de la señal que reciben. En la siguiente figura podemos ver el medidor de potencia N1912A de Agilent:



**Figura 2.10.** Medidor de potencia N1912A de Agilent [Agile]

### *Analizador de espectros*

Los analizadores de espectros son dispositivos que tienen la función de medir con precisión cada uno de los armónicos en los que se puede dividir una señal. Estos aparatos son capaces de calcular la amplitud y la frecuencia que tienen cada uno de estos armónicos con gran precisión. En la siguiente figura podemos ver el analizador de espectros 8560EC de Agilent:

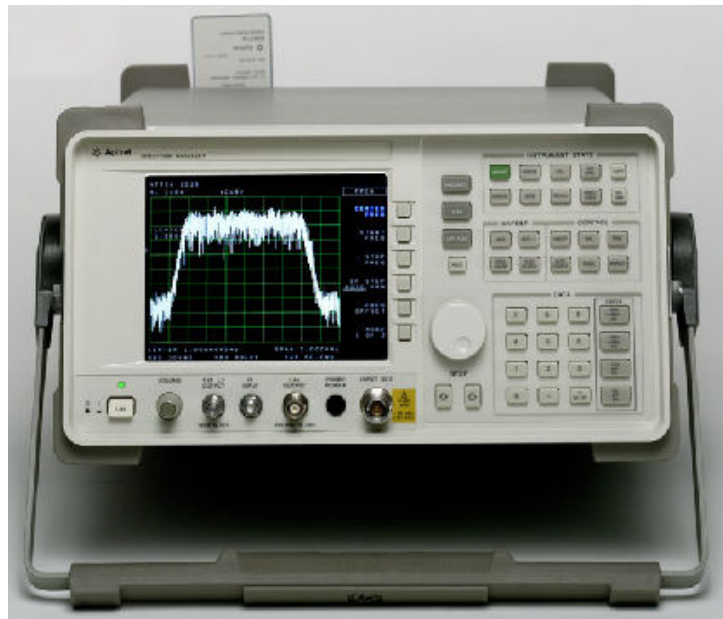


Figura 2.11. Analizador de espectros 8530EC de Agilent [Agile]

### *Analizador de redes*

Estos son unos de los dispositivos más importantes dentro de la instrumentación de radiofrecuencia. Estos equipos están diseñados para trabajar con un amplio margen de frecuencias, principalmente para altas frecuencias. Estos aparatos se emplean tanto para generar como para recibir señales con unas características determinadas, con lo cual puede ser utilizado para medir los parámetros S que caracterizan el canal radio. En la *figura 4.3* podemos ver una foto del analizador de redes ENA de Agilent que hemos utilizado en nuestro proyecto.

## 2.5. Aplicaciones

En un principio las primeras aplicaciones en las que se usó MIMO fueron en redes WLAN interiores, acceso a redes inalámbricas fijas, WLL (Wireless local loop), y comunicaciones inalámbricas entre edificios.

Posteriormente gracias a las características de estos sistemas se han ido ampliando el número de aplicaciones en las que se utiliza esta tecnología: redes metropolitanas inalámbricas de voz y datos (UMTS, EDGE y redes de cuarta generación), redes fijas y móviles inalámbricas de muy alta velocidad (punto-multipunto), comunicaciones acústicas y sistemas broadcast (HDTV) [Digit].



## Capítulo 3

### Punto de partida del PFC

#### 3.1. Introducción

Como hemos podido ver en los apartados anteriores los sistemas que utilizan MIMO tiene grandes ventajas sobre los sistemas tradicionales SISO ya que se puede realizar una mayor tasa de transmisión de información utilizando un espectro de frecuencia mucho más reducido. Pero para poder desarrollar este tipo de sistemas es fundamental conocer la respuesta del canal radio cuando se transmiten datos por muchas antenas y se recibe con muchas antenas a la vez.

Para conocer la respuesta del canal radio de manera real hay que realizar campañas de medidas sobre el terreno. Para que la información obtenida sea lo más precisa posible es necesario la realización de una campaña de medidas extensa, es decir, realizada en diferentes entornos, con diferentes frecuencias, etc.

La realización de dichas campañas de medidas, si se quieren obtener datos precisos, requiere un gran gasto de tiempo, ya que es necesaria la realización de muchas medidas en muchos entornos diferentes y utilizando diferentes parámetros. Con lo cual es imprescindible que a la hora de crear el sistema de medidas que vayamos a utilizar estemos seguros de que el sistema funciona correctamente y que los aparatos están totalmente sincronizados entre sí.

Para conseguir la correcta sincronización de estos aparatos es necesario utilizar un dispositivo que se encargue de controlar los demás aparatos e indicarles el momento en el que deben funcionar. En nuestro caso el dispositivo encargado de realizar esta función es un ordenador portátil. En dicho ordenador tiene que estar instalado un software que se encargue de controlar el sistema y asegurarse que las medidas se realizan de manera correcta.

Como hemos dicho en el apartado de la introducción el objetivo de este proyecto es el de desarrollar un software eficiente capaz de realizar dicha tarea de una manera rápida y eficaz. El punto de partida de nuestro software fue un programa realizado en un proyecto fin de carrera anterior [ProCe], el cual describiremos en el siguiente apartado.

#### 3.2. Sistema de medidas anterior

El software anterior se creó con el objetivo de realizar campañas de medidas en banda estrecha utilizando cuatro antenas en recepción y cuatro antenas en transmisión.

El sistema de medidas utilizado con dicho software fue el siguiente:

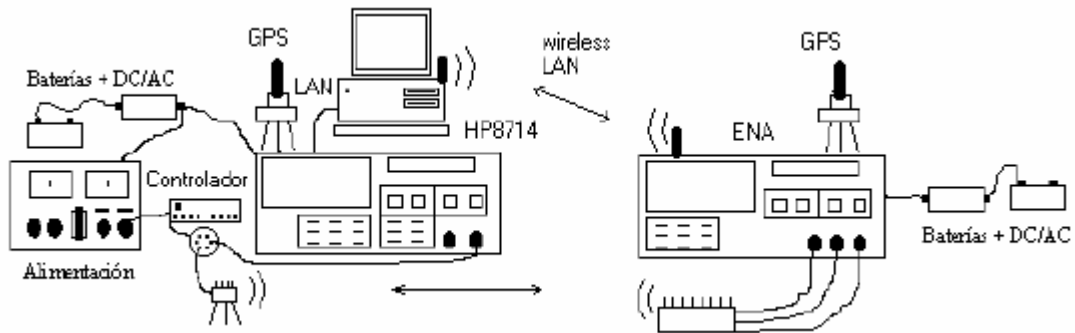


Figura 3.1. Esquema del sistema de medidas [ProCe]

Como puede verse en la figura anterior en este esquema se utilizaban dos analizadores de redes, el analizador de redes HP8714 y el analizador de redes ENA. El analizador de redes AP8714 era el encargado de proporcionar la señal que posteriormente se transmitiría por las antenas transmisoras por medio de un *conmutador* controlado por un *controlador*. El analizador de redes ENA se encargaba, gracias a un multipuerto, de recibir y al almacenar los datos recibidos por las antenas transmisoras. La sincronización de los dos analizadores de redes se realizaba a través de dos antenas GPS, ya que estos nos proporcionan una señal de referencia de 10 MHz muy estable y que es suficiente cuando se realizan sistemas en banda estrecha. El ordenador portátil es donde se encontraba el software que se encargaba de controlar a los demás dispositivos. La comunicación entre el ordenador y el analizador de redes HP8714 se realizaba a través de un cable LAN, mientras que la comunicación entre el ordenador y el analizador de redes ENA se realizaba por medio de tarjetas de redes inalámbricas WLAN.

### 3.3. Software anterior

Este software fue implementado utilizando el editor de Visual Basic que lleva incluido Microsoft Excel. También se dispuso de la ayuda de las bibliotecas y rutinas proporcionadas por Agilent [Agile].

La manera de realizar una medida utilizando este software era la siguiente:

- En primer lugar había que introducir en la hoja de cálculo de Excel los parámetros de la configuración que deseábamos utilizar.

WinSock Version	257	<b>NOTE</b>	
IP Address	15.1.201.237		
IP Address ENA	18.2.202.238	GPIB Address	28
<b>Channel 1</b>			
<b>Stimulus</b>		Preset	Inicio medidas
Set	Query		
Start	9,00E+08	Conf_4*4	Rutina de Medidas 4Tx,4Rx
Stop	9,00E+08		
Number of Points	201		
CONT	HOLD	SING	Conmutar
<b>Trace 1</b>			
Set	Query		
Meas. Parameter	'XFR:S 2,2'		
Data Format	PLIN		
Meas. Parameter	SZ1		
<b>Auto Scale</b>			
antenas TX	antenas RX	MEDIDAS REPETIDAS	
2	4	1	
<b>CALIBRACION</b>			
SWEEP_ENA	2,80E-02		
SWEEP_8714	100		
TIEMPO ESPERA	1,00E+00		

Figura 3.2. Hoja de cálculo de Excel con los parámetros de configuración

- Una vez introducidos estos parámetros debíamos abrir el editor de Visual Basic del Excel, en el cual estaba introducido el código. Posteriormente teníamos que ejecutar el programa. La pantalla del programa era la siguiente:

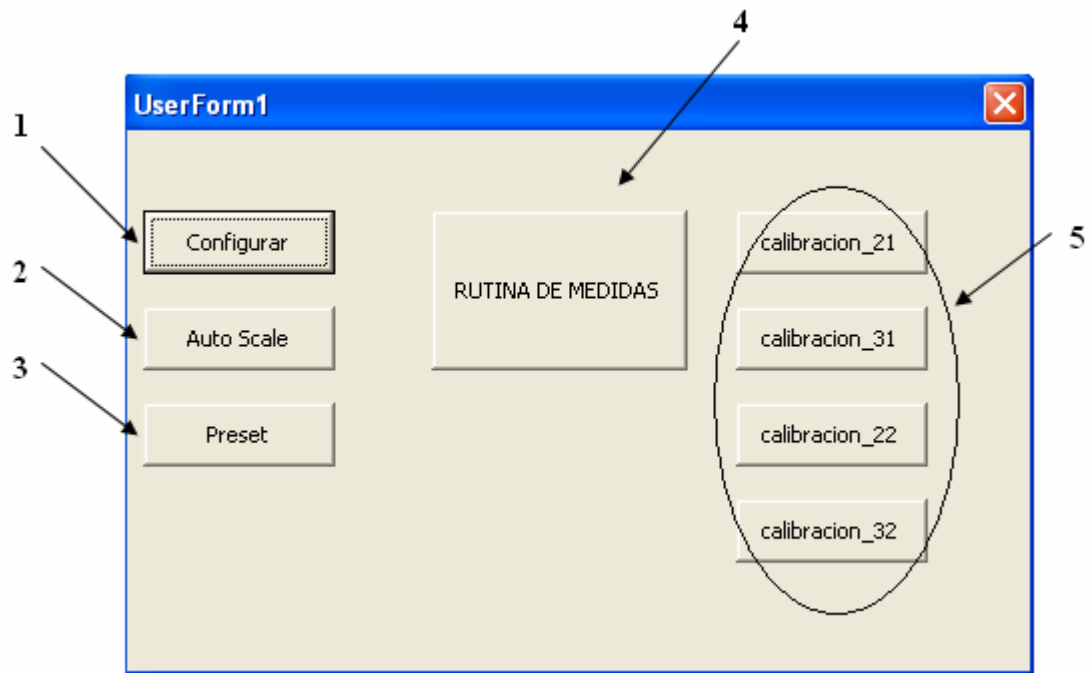


Figura 3.3. Pantalla del programa en ejecución

Los diferentes botones que nos encontramos sirven para las siguientes funciones:

#### **1. Configurar**

Este botón sirve para configurar el sistema con los parámetros indicados en la hoja de cálculo de Excel.

#### **2. Auto Scale**

Este botón sirve para realizar un escalado automático de las ventanas del ENA donde se visualizaban los datos.

#### **3. Preset**

Pulsando este botón el analizador de redes ENA volvía a la configuración inicial que posee cuando se inicia el equipo.

#### **4. RUTINA DE MEDIDAS**

Con este botón se iniciaba la rutina de medidas.

#### **5. Calibración\_xx**

Se utilizaba para indicar al sistema una configuración con unos parámetros predeterminados.

- Una vez ejecutado el programa debemos configurar los analizadores de redes para que trabajen con los parámetros que deseamos. Esto se puede hacer o bien directamente desde los propios analizadores de redes de manera manual o pulsando el botón **configurar** del programa.
- Una vez configurado el analizador es imprescindible realizar la calibración del sistema. La calibración es una tarea que debe de realizarse con mucho cuidado. En apartados posteriores se explicará con detalle la forma de calibrar correctamente.
- Una vez calibrado el sistema pulsamos el botón **RUTINA DE MEDIDAS** y se iniciará el ciclo de medidas.
- Los datos que obtengamos se almacenarán en el directorio USER (D:) del analizador de redes ENA.

#### 3.4. Debilidades de este sistema

El sistema y el software anteriormente expuestos fueron muy útiles a la hora de realizar las medidas de prueba, pero a la hora de realizar una campaña de medidas poseían grandes debilidades que lo hacían del todo ineficiente, algunas de las cuales numeramos a continuación:

- Este software realizaba una comunicación con los analizadores de redes de manera unilateral, es decir, el ordenador le mandaba las órdenes a los analizadores de redes pero no recibía ninguna respuesta de estos.
- Como consecuencia de esta comunicación unilateral con los analizadores de redes, el software tenía que “adivinar” cuando se había terminado de hacer una medida para mandar la orden de empezar a realizar la siguiente. Esto se realizaba a través de un *timer* de una longitud fija que hacía esperar al software un determinado tiempo antes de mandar la orden a los analizadores de redes de que continuasen con la siguiente medida. Esto era un gran desperdicio de tiempo ya que el software no esperaba siempre el tiempo justo para realizar la medida sino que siempre esperaba un tiempo fijo.
- Por el mismo motivo que en el anterior punto, si el tiempo de espera que fijábamos era inferior al tiempo necesario para que se realizase de manera correcta una cierta medida, esta medida no se realizaría de manera adecuada y los datos que obtendríamos serían erróneos. Con lo cual hacía que este sistema no fuese del todo fiable.

- También debido a este motivo, existe el problema de ajustar el tiempo de espera correcto dependiendo de la configuración que utilices, ya que por ejemplo si realizamos medidas con 512 puntos el tiempo de espera tendría que ser menor que si utilizásemos 1024 puntos, ya que a mayor número de puntos más tarda en realizarse una medida
  
- Otra importante debilidad de este software es el hecho de que no es posible cambiar la configuración del sistema en tiempo de ejecución desde el programa, es decir, que en el caso de que deseásemos cambiar la configuración deberíamos parar la ejecución del programa cambiar los parámetros de la hoja de Excel y volver a ejecutar el software.
  
- Si por cualquier circunstancia se produjese una medida errónea (como por ejemplo el paso de viandantes en el momento de tomar una medida), no habría manera de indicarle al programa que sobrescribiese esta medida errónea, con lo cual habría que tomar esta medida con el número de la siguiente medida y posteriormente renombrar todas las medidas posteriores, con lo cual se producía una gran pérdida de tiempo.
  
- Una de las debilidades más importantes de este sistema consiste en la limitación de poder usar solamente medidas en banda estrecha. Esta limitación viene como consecuencia de la señal de referencia utilizada, ya que el GPS nos proporciona una señal con una frecuencia muy estable, pero que tiene una oscilación en la fase, con lo cual no es posible realizar una correcta sincronización entre los dos analizadores de redes lo suficientemente rápida para poder realizar medidas en banda ancha. Este problema no existía en banda estrecha ya que las medidas en banda estrecha son tan rápidas que la variación de la fase que se produce durante ese tiempo es despreciable.
  
- Otra importante limitación de este software consiste en que está preparado para trabajar solamente con cuatro antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras, lo cual es una restricción muy importante ya que no es posible realizar pruebas con otro número de antenas para calcular el número de antenas óptimo en cada entorno.

Debido a todos estos problemas este software se hacía del todo ineficiente a la hora de realizar una campaña de medidas seria. Con lo cual, como ya explicábamos en la introducción, el objetivo de nuestro proyecto consistía en realizar un nuevo software, tomando como punto de partida el programa anterior, que subsanase todas estas debilidades y que además añadiese nuevas funciones que consiguiesen crear un software capaz de realizar una campaña de medidas de una manera fiable y rápida, además de intentar que se realice de la manera más cómoda posible.

## Descripción del equipo de medidas

### 4.1. Introducción

En este apartado vamos a mostrar un sistema de medidas que puede ser utilizado para la caracterización del canal radio. En la siguiente figura podemos ver la estructura básica del sistema que hemos utilizado nosotros para realizar nuestras medidas:

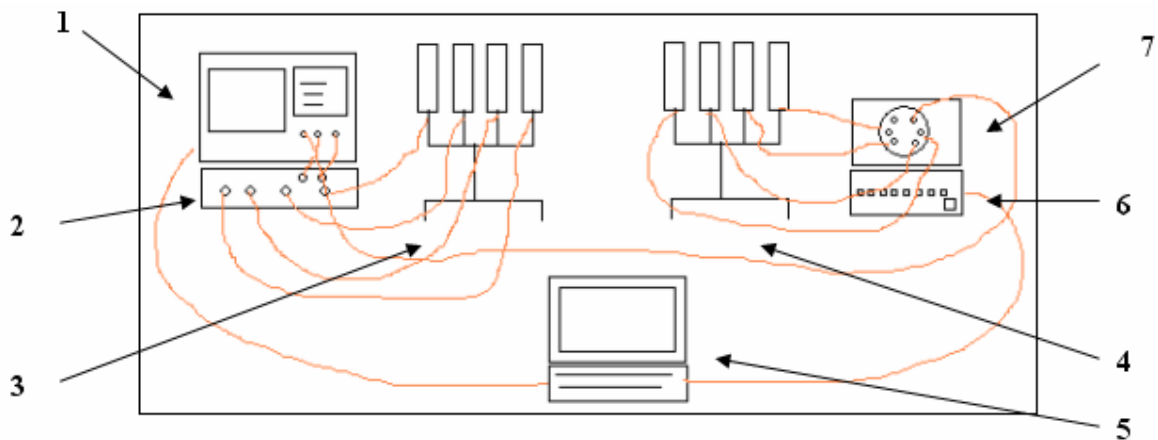


Figura 4.1. Visión general del equipo de medidas

Los diferentes elementos que podemos observar que existen en nuestro sistema son los siguientes:

1. **Analizador de Redes ENA**
2. **Multipuerto**
3. **Antenas Receptoras**
4. **Antenas Transmisoras**
5. **Ordenador Portátil**
6. **Controlador**
7. **Conmutador**

### 4.2. Descripción de los elementos que forman el sistema

A continuación vamos a realizar una pequeña descripción de la función que realiza cada una de las partes de las que está compuesto nuestro sistema:

#### -- *Analizador de Redes ENA:*

Parte principal del sistema, ya que es el aparato encargado de generar la señal que irá al canal de entrada del *conmutador*. También es el encargado de la recepción y almacenamiento de las señales recibidas por las antenas receptoras, las cuales están conectadas a las entradas del multipuerto. La configuración y la automatización del manejo

## Capítulo 4. Descripción del sistema de medidas

de este aparato se realizan por medio de un ordenador portátil utilizando nuestro programa. Una imagen de la ventana del analizador de redes cuando se configura para un sistema de cuatro antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras es el siguiente:

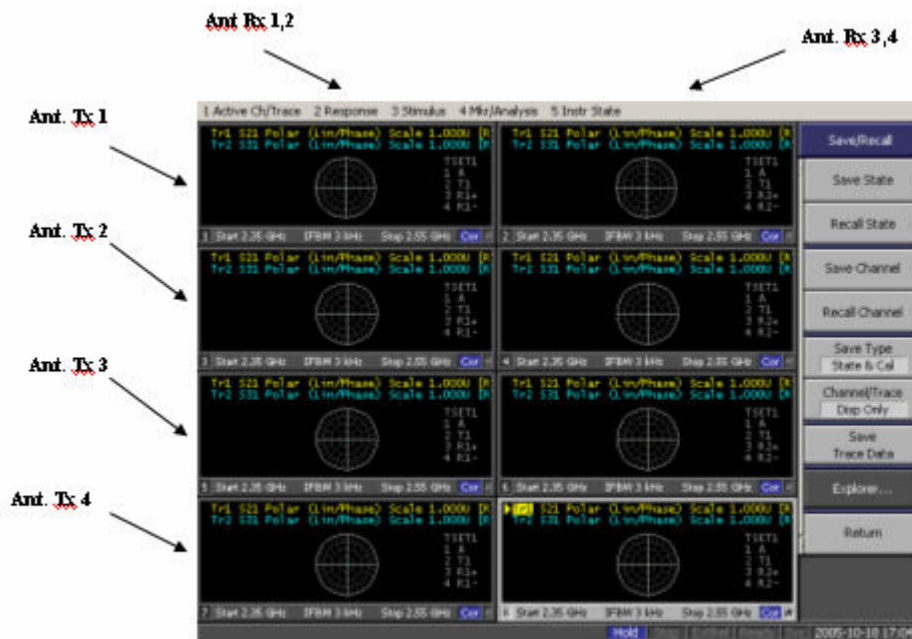


Figura 4.2. Pantalla general del analizador de redes

### -- Multipuerto:

Este aparato sirve para conmutar las señales recibidas por las diferentes antenas receptoras, las cuales están conectadas a los puertos de este aparato, y las conduce hasta los puertos de entrada del analizador de redes.

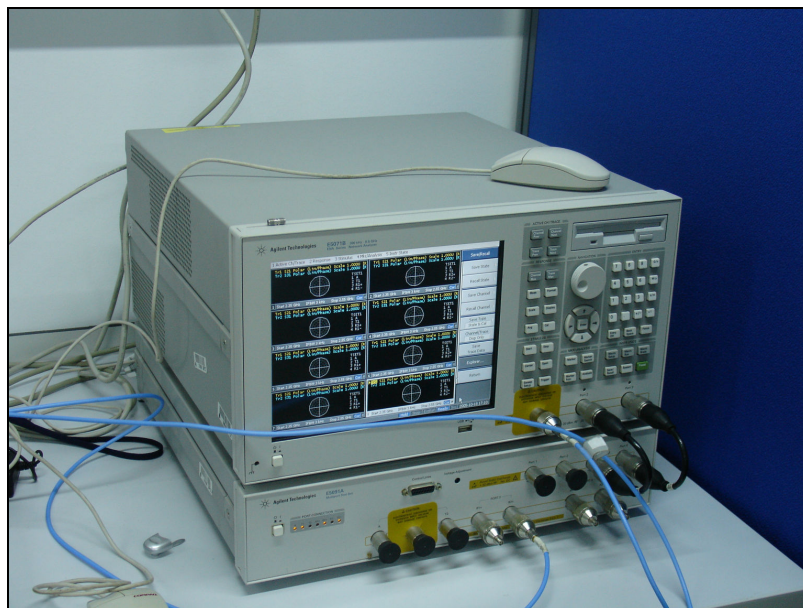


Figura 4.3. Analizador de redes ENA y el multipuerto



### -- *Conmutador:*

El conmutador es el aparato encargado de comunicar la salida de la señal procedente del analizador de redes con cada una de las antenas según proceda en cada caso. La salida del conmutador que es utilizada en cada caso es elegida por el controlador.

### -- *Controlador:*

El controlador es el aparato encargado de indicar al conmutador hacia que antena transmisora debe ir dirigida la señal de salida del analizador de redes. El controlador es manejado por el ordenador portátil a través de nuestro programa. La comunicación del controlador con un dispositivo exterior se hace por medio de su puerto GPIB, con lo cual necesitamos utilizar un aparato capaz de adaptar este puerto al puerto USB del ordenador.

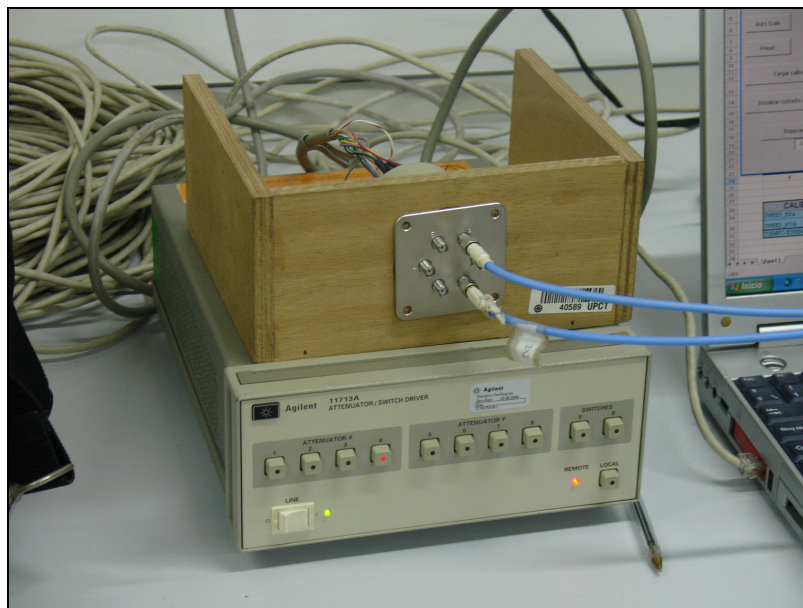


Figura 4.4. Conmutador y controlador

### -- *Antenas transmisoras y receptoras:*

Como es evidente, estos dispositivos son los encargados de transformar la señal eléctrica en una señal electromagnética capaz de viajar por el canal radio y viceversa.



Figura 4.5. Antenas

**-- Tarjetas de red inalámbricas WLAN o cable de red cruzado:**

Estos dispositivos son los encargados de hacer llegar las órdenes procedentes del ordenador portátil al analizador de redes, ya sea por medio del canal radio (WLAN) o por medio de un cable de red cruzado.



Figura 4.6. Tarjetas de red inalámbrica

### *-- Ordenador portátil:*

Es el auténtico cerebro de nuestro sistema, ya que es donde está instalado el software, con lo cual es el aparato encargado de decidir lo que tienen que hacer los demás dispositivos y que funcionen totalmente sincronizados.



**Figura 4.7.** Ordenador portátil

### *-- Otros dispositivos:*

Otros dispositivos importantes que podemos encontrar en nuestro sistema son: fuentes de alimentación, cables y transiciones, amplificadores,...

## 4.3. Explicación de este sistema

Como podemos observar en este sistema se utiliza un único analizador de redes en lugar de utilizar dos como se hacía con el sistema anterior. Nuestro sistema aprovecha la salida de señal del ENA, con lo cual no es necesario de un segundo analizador de redes que se encargue de realizar esta función.

Utilizando un único analizador de redes para transmitir y para recibir la señal eliminamos el problema de la señal de referencia, ya que al ser el mismo aparato la sincronización se realiza de forma interna.

Solucionado este problema estamos en disposición de poder realizar medidas en banda ancha, lo cual es de vital importancia teniendo en cuenta que la mayoría de los sistemas actuales y futuros utilizan banda ancha en sus comunicaciones.

El funcionamiento a nivel de aparatos de este sistema consiste en transmitir la señal procedente del ENA por una de las antenas transmisoras (el controlador por medio del conmutador se encarga de seleccionar esta antena), mientras que se recibe por todas las

antenas receptoras al mismo tiempo. Posteriormente una vez que se ha conseguido toda la información útil de esta antena transmisora deja de transmitir esta antena transmisora y empieza la siguiente y así sucesivamente con todas. Un esquema de este funcionamiento lo podemos ver en el siguiente gráfico:

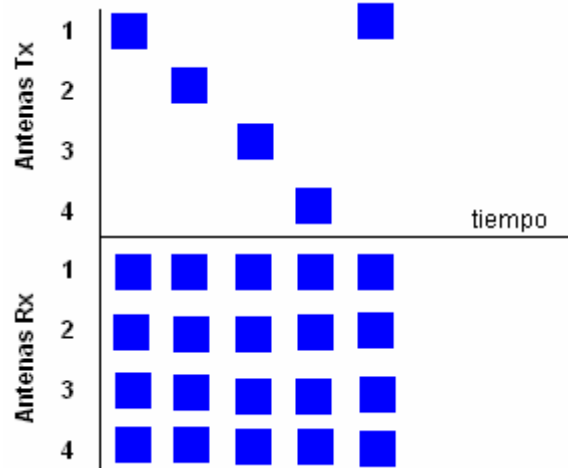


Figura 4.8. Diagrama de tiempos del sistema

### 4.4. Comparación con el sistema anterior

La gran ventaja que posee este nuevo sistema con respecto al anterior radica en la posibilidad de realizar medidas en banda ancha. Esto es debido a que al utilizar el mismo analizador para transmitir y para recibir no es necesaria la utilización de los GPS, los cuales sólo nos permitían realizar medidas en banda estrecha. Otra ventaja de este sistema se encuentra a la hora de trasladar el equipo, ya que al utilizar únicamente un analizador de redes, el peso que hay que transportar es menor.

Pero no todo en este nuevo sistema son ventajas, ya que nos encontramos con el inconveniente de tener que desplegar un cable desde el analizador de redes hasta las antenas transmisoras, con lo cual la parte del sistema que se encarga de transmitir y la parte del sistema que se encarga de recibir no están totalmente independizadas.

## Capítulo 5

# Descripción del software de medidas

### 5.1. Introducción

En el siguiente apartado vamos a explicar en profundidad cada una de las partes que forman nuestro programa y las diferentes opciones que se pueden utilizar en cada una de las ventanas que aparecen.

### 5.2. Instalaciones previas

Para que nuestro programa funcione correctamente debemos instalar previamente en el ordenador algunos *drivers* fundamentales para que el ordenador portátil pueda comunicarse con el resto de aparatos. Estos *drivers* son los siguientes:

#### 5.2.1. Instalación del controlador GPIB

En primer lugar debemos comprobar si están instaladas las bibliotecas de Agilent que nos proporcionan en el CD de instalación. Para ello debemos mirar si aparece el icono IO en azul en la parte inferior derecha de la pantalla. Si aparece debemos comprobar que se trata de la versión L.01.00 o superior y si es así quiere decir que las bibliotecas ya están instaladas. En el caso de no aparecer debemos comprobar en el menú *Inicio, Programas* de Windows XP si ya están instaladas.

En el caso de que no estén instaladas en primer lugar tenemos que asegurarnos que el dispositivo no esté conectado al ordenador. Ahora hay que introducir el CD de instalación y esperar a que se ejecute automáticamente (en caso de no ejecutarse automáticamente debemos ejecutar el archivo *Setup.exe* que se encuentra en el CD). Debemos seguir las instrucciones de la pantalla para realizar una instalación completa (*Full Installation*).

Una vez que hemos instalado las bibliotecas ya podemos conectar el dispositivo para su utilización [CoGPI].

#### 5.2.2. Instalación de los *drivers* de las tarjetas de red inalámbricas (WLAN)

##### *-- Instalar controlador*

Para la instalación del controlador debemos tener en cuenta que en principio la tarjeta de red debe de estar desconectada del ordenador, en caso contrario la instalación no se realizará con éxito.

En primer lugar debemos introducir el CD con el controlador que viene en la misma caja que la tarjeta de red. Esperamos a que se inicie automáticamente la función Autorun del CD. En caso de que no se inicie dicha función debemos ejecutar manualmente el archivo *Setup.exe* que se encuentra dentro del propio CD.

En la pantalla que nos aparece debemos hacer click en *Install drivers* y pulsar *Next* en las siguientes dos pantallas que nos aparecerán. Después debemos marcar la casilla “*no, I will restart my computer later*” y pulsar el botón *Finish*. Una vez hecho esto debemos apagar el ordenador.

Con el ordenador apagado es cuando debemos conectar la tarjeta de red al ordenador y entonces encenderlo.

Una vez encendido, el ordenador te avisará de que ha encontrado un hardware nuevo y nosotros le indicaremos que lo instale de forma automática. Es posible que durante la instalación aparezca un mensaje diciéndonos que la instalación no pasa logotipo de Windows, entonces debemos indicarle que continúe con la instalación de todas formas.

Una vez que se ha realizado la instalación se ejecutará automáticamente la utilidad de configuración *D-Link Air DWL-120+* y el icono de la utilidad aparecerá en la parte inferior derecha de la pantalla del escritorio. Si este icono aparece en verde entonces quiere decir que la instalación ha sido correcta y que la tarjeta se ha conectado a una red inalámbrica.

Para poder utilizar la utilidad *AirXpert* y poder configurar nuestra red inalámbrica debemos hacer doble click en el icono de *XP Networking*, pinchar en *Avanzado*. Entonces desactivar la opción “*Usar Windows para usar mi red de tarjeta inalámbrica*” y pulsar *Aceptar*.

En la utilidad de configuración podemos ver y variar los siguientes parámetros:

*Status*: Muestra la dirección MAC del punto de acceso que se encuentra asociado con la tarjeta de red inalámbrica.

*SSID*: Muestra el identificador de red, es decir, el nombre asignado a la red inalámbrica.

*TxRate*: Tasa de transmisión. Por defecto es 11 Mbps, aunque los parámetros *TxRate* los determina automáticamente la tarjeta de red en función a la distancia al punto de acceso.

*Channel*: Muestra la información sobre el canal.

*Data Rate*: Muestra gráficamente las estadísticas de los datos transmitidos y recibidos.

*Link Quality / Signal Strength*: Muestra el ancho de la señal inalámbrica para la conexión inalámbrica de la tarjeta de red al punto de acceso.

### -- *Configurar la dirección IP:*

Para configurar la dirección IP debemos picar con el botón derecho del ratón encima del icono *Mis sitios de red*, seleccionar *propiedades* y hacer doble click en *conexiones de red*. Entonces debemos picar en *Internet Protocol (TCP/IP)* y hacer click en *propiedades*.

En el caso de tratarse de una dirección IP dinámica (se usa cuando se dispone de un servidor DHCP en la red local), debemos marcar “*Obtener una dirección IP automáticamente*” y “*Obtener una dirección del servidor DNS automáticamente*”

Si la dirección IP es estática debemos marcar “*Usar la siguiente dirección IP*” y poner una dirección del mismo rango que el router o el punto de acceso inalámbrico [CoWLA].

### **5.3. Puesta en marcha del programa**

Una vez que hemos realizado todas las instalaciones de los *drivers* y todos los equipos están correctamente conectados estamos en disposición de ejecutar nuestro programa. La puesta en marcha del programa es muy sencillo, simplemente hay que hacer *doble click* en el archivo ejecutable *ejecutar.exe*. Una vez ejecutado el archivo nos aparecerá la ventana de presentación del programa y estaremos en disposición utilizar nuestro software.

### **5.4. Descripción y funcionamiento de las diferentes partes del programa**

Esta sección una de las partes más importantes del informe del proyecto, ya que en ella es donde se va a desarrollar la descripción y modo de funcionamiento de cada una de las partes de las que está compuesto nuestro programa de medidas.

#### **5.4.1. Ventana de presentación**

Una vez que se inicia el programa la primera ventana que nos aparece es la ventana de presentación, en ella podemos ver el título del programa y versión, el nombre del autor y el año de creación del proyecto. Para iniciar el programa y entrar en la ventana principal de medidas debemos de apretar el botón **Continuar**, mientras que si lo que deseamos es acceder a esta ayuda debemos de apretar el botón **Ayuda**. A continuación mostramos una imagen de la ventana de presentación:





Figura 5.1. Ventana de presentación

### 5.4.2. Ventana principal de medidas

Esta ventana es la parte principal del programa, ya que es en ella donde se encuentran las principales opciones del programa, tales como el comienzo de medidas o indicar el número de repeticiones.

A continuación mostramos la figura de la ventana principal de nuestro programa:

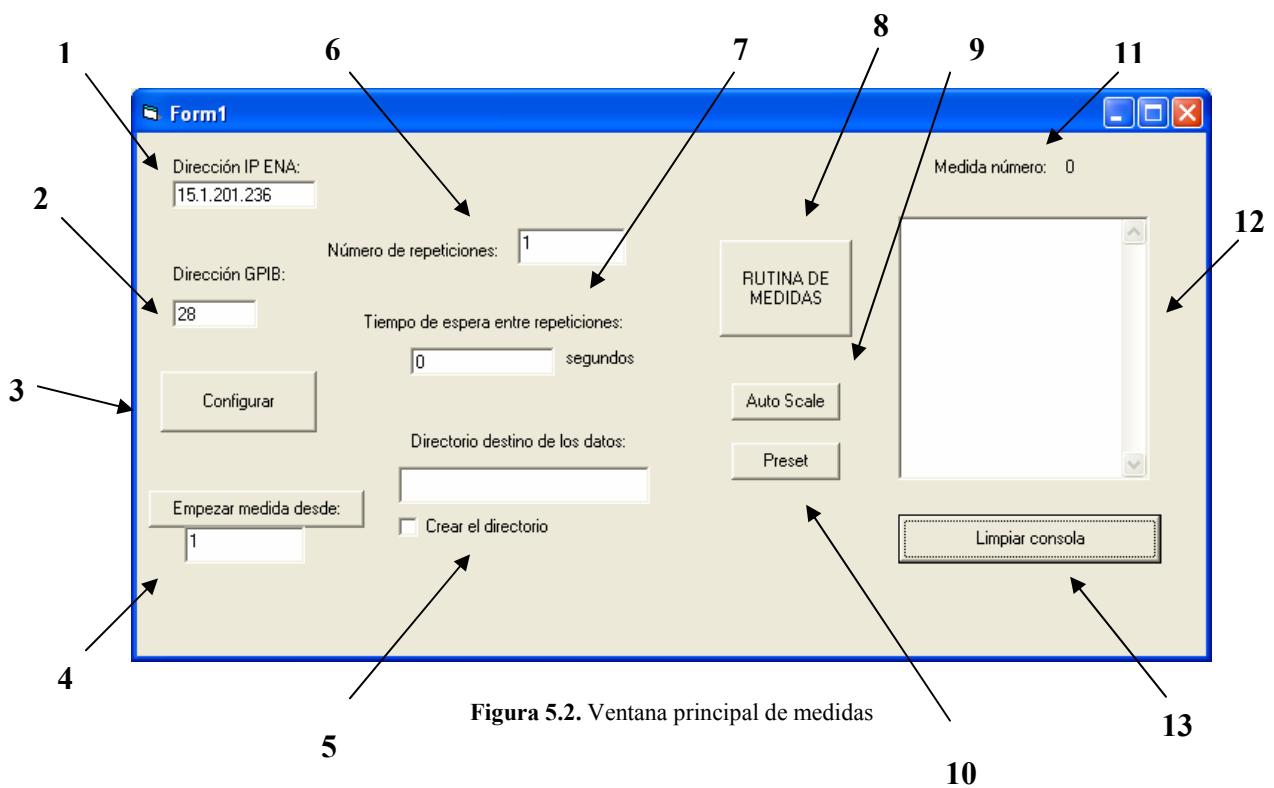


Figura 5.2. Ventana principal de medidas

Ahora vamos a realizar una descripción de cada una de las partes de las que está compuesto este programa:



### ***1. Dirección IP ENA:***

En este sitio se indica la dirección IP del analizador de redes ENA que estamos utilizando en nuestro sistema de medidas.

### ***2. Dirección GPIB:***

Aquí se indica la dirección del GPIB que está conectado al controlador, el cual que maneja al conmutador.

### ***3. Configurar:***

Este botón nos lleva hacia la ventana de configuración, la cual la veremos con detenimiento en el siguiente apartado.

### ***4. Empezar la medida desde:***

Este botón sirve para indicar el número asociado a la medida que vamos a realizar a continuación. Esto es muy útil a la hora de realizar medidas, ya que si por algún imprevisto una de las medidas realizadas debe de ser descartada (por ejemplo presencia de viandantes a la hora de realizar la medida), tenemos la posibilidad de sobrescribir esta medida y volverla a realizar indicando al contador de medidas el número por el cual debe seguir.

### ***5. Directorio destino de los datos:***

Aquí se indica el directorio destino donde se depositarán los datos de las mediciones realizadas. En el caso de que este directorio no existiese debemos marcar la casilla **Crear directorio** para que se cree dicho directorio, en caso contrario se producirá un error y los datos no se guardarán en el sitio correcto. Si no indicásemos directorio alguno los datos serán almacenados por defecto en la unidad USER (D:) del analizador de redes.

### ***6. Número de repeticiones:***

En este recuadro se indica el número de repeticiones de las medidas q deseamos que se realicen una vez que se inicia la rutina de medidas. Esto también es muy útil ya que sirve para automatizar el proceso de medidas sin tener que estar presente en el momento que se comenzar todas las medidas.

### ***7. Tiempo de espera entre repeticiones:***

Si deseamos que entre el final de unas medidas y el comienzo de otras transcurra un tiempo determinado, lo debemos de indicar aquí.

### ***8. Rutina de medidas:***

Botón principal del programa, ya que es el encargado de indicar el comienzo de las medidas del programa.

### 9. *Auto Scale:*

Este botón sirve para realizar un escalado automático de las medidas que aparecen en la pantalla del analizador de redes una vez realizadas las medidas.

### 10. *Preset:*

Este botón sirve para inicializar la configuración que aparece por defecto en el analizador de redes cuando se inicia al conectarlo.

### 11. *Medida número:*

Nos indica el número del contador de medidas asociado a la medida que se está realizando en ese momento. Es muy útil ya que podemos controlar el correcto orden de las medidas que se están realizando en ese preciso momento, y en caso de no ser el correcto o de querer modificarlo por alguna razón podemos utilizar la opción **Empezar la medida desde**.

### 12. *Consola:*

Esta es una de las partes más importantes del programa, ya que en ella podemos controlar la mayoría de las acciones que se realizan: comienzo de mediciones, finalización de las mediciones, cambios en la configuración...

### 13. *Limpiar consola:*

Este botón sirve para limpiar la consola y ponerla en blanco. Esto es útil cuando se han realizado muchas acciones con el programa y deseamos ver en la pantalla las acciones que se realizan en el momento sin tener que desplazar la barra lateral de la consola.

### 5.4.3. Ventana de configuración

Esta ventana aparece cuando pulsamos el botón **Configurar** de la ventana principal de medidas. La apariencia de esta ventana la podemos ver en la siguiente figura:

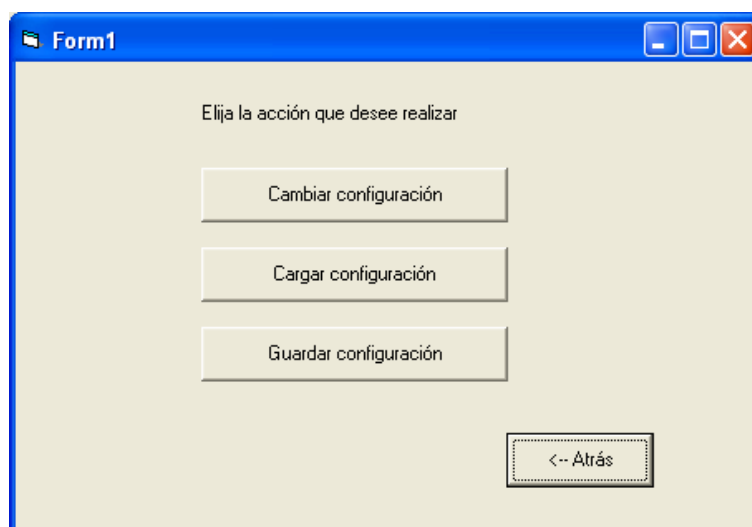


Figura 5.3. Ventana de configuración

Como podemos observar en la *figura 5.3* en esta ventana tenemos tres opciones a elegir: **Cambiar configuración**, **Cargar configuración** y **Guardar configuración**. Además del botón **Atrás** que sirve para volver a la ventana principal de medidas sin realizar ningún cambio en la configuración.

Cada uno de los tres botones principales de esta ventana, propicia que se abra otra nueva, en la cual se pueden realizar las acciones indicadas. A continuación vemos una descripción de lo que ocurre cuando apretamos cada uno de estos botones.

### 5.4.3.1. Cambiar configuración

Esta es una de las principales ventanas de nuestro programa, en ella podemos elegir manualmente la configuración que deseamos. En la siguiente figura podemos ver esta ventana:

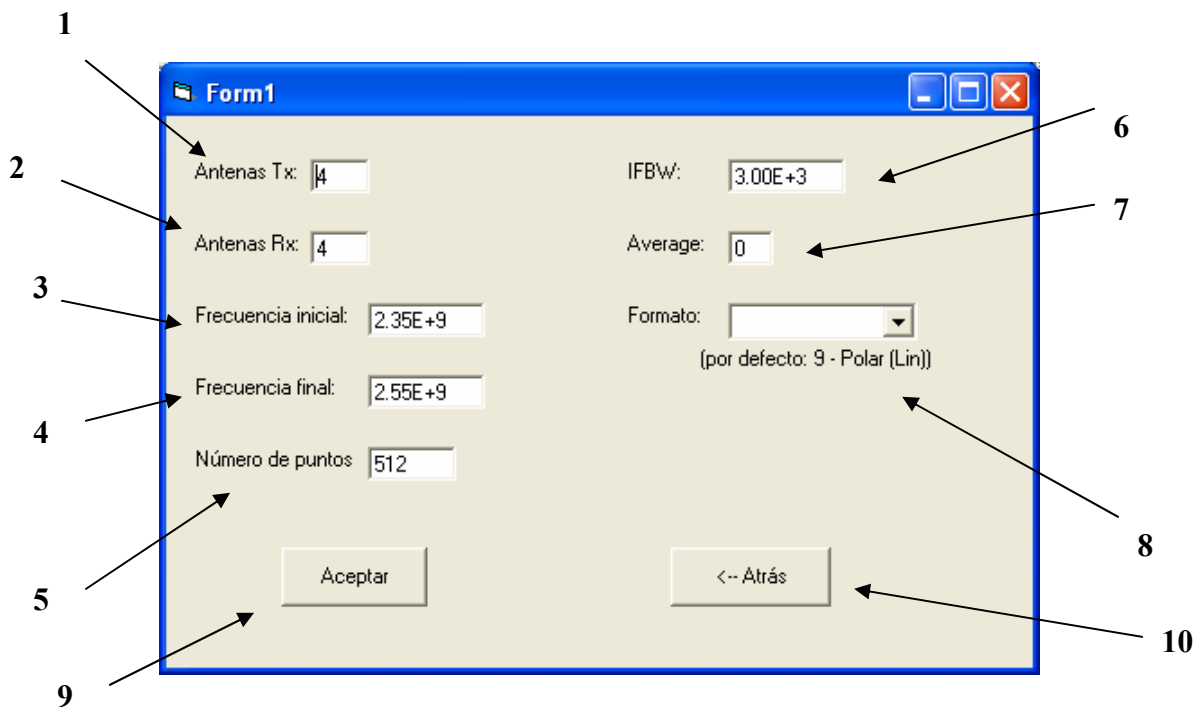


Figura 5.4. Ventana de cambio de configuración

A continuación vamos a hacer una descripción de cada una de las partes de esta ventana:

#### 1 y 2. Antenas Tx y Antenas Rx:

En estos huecos se introducen el número de antenas transmisoras y receptoras que se van a utilizar. El programa indica automáticamente al analizador de redes cual es la configuración más eficiente que debe utilizar si se utiliza el número de antenas que hemos indicado. En el caso de que el número de antenas que indiquemos esté fuera del rango que el analizador de redes es capaz de soportar no se producirá ninguna configuración y en la consola de la pantalla principal saldrá el mensaje: “Configuración no válida”.

### **3 y 4. Frecuencia inicial y frecuencia final:**

Aquí se indica el rango de frecuencias que se van a utilizar a la hora de realizar las medidas, es decir, se indica la frecuencia inicial y la frecuencia final. El span lo calcula automáticamente el ENA restando la frecuencia final a la frecuencia inicial.

### **5. Número de puntos:**

Se indica el número de puntos que va a utilizar el analizador de redes a la hora de hacer las medidas.

### **6. IFBW:**

Indica la frecuencia intermedia que se va a utilizar en las mediciones.

### **7. Average:**

Indica el *average* que se va a utilizar, es decir, indica el número de medidas que se van a tomar para hacer un promedio de todas ellas. En el caso de que el valor del *average* sea 0 se desactiva automáticamente la opción *average* del analizador de redes.

### **8. Formato**

Se indica que formato se va a utilizar a la hora de configurar el aparato. Los posibles formatos que se pueden utilizar son los siguientes:

- 1 - Log Mag
- 2 - Phase
- 3 - Group Delay
- 4 - Smith (Lin)
- 5 - Smith (Log)
- 6 - Smith (Re/Im)
- 7 - Smith (R+jX)
- 8 - Smith (G+jB)
- 9 - Polar (Lin)
- 10 - Polar (Log)
- 11 - Polar (Re/Im)
- 12 - Lin Mag
- 13 - SWR
- 14 - Real
- 15 - Imaginary
- 16 - Expand Phase

### **9. Aceptar:**

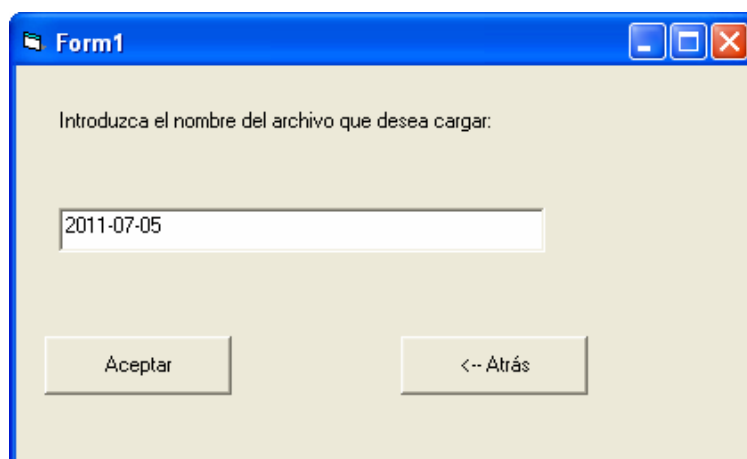
Confirma la configuración que hemos elegido y le manda las instrucciones necesarias al ENA para que se configure correctamente.

### 10. *Atrás:*

Vuelve a la ventana de configuración sin realizar ningún cambio en la configuración.

#### 5.4.3.2 *Cargar configuración*

Esta ventana se utiliza para cargar una configuración que anteriormente haya sido guardada. La ventana que nos aparece es la siguiente:



**Figura 5.5.** Ventana de cargar configuración

El funcionamiento de esta parte del programa es muy sencillo, ya que simplemente hay que introducir el nombre con el que hayamos guardado la configuración y posteriormente darle a **Aceptar**. En el caso de que no haya ninguna configuración guardada con ese nombre se producirá un error. Si le damos al botón **Atrás** el programa volverá a la ventana de configuración.

#### 5.4.3.3. *Guardar configuración*

Esta opción sirve para guardar la configuración que se está utilizando actualmente para poder utilizarla en otro momento con la opción cargar configuración. La ventana de cargar configuración es la siguiente:

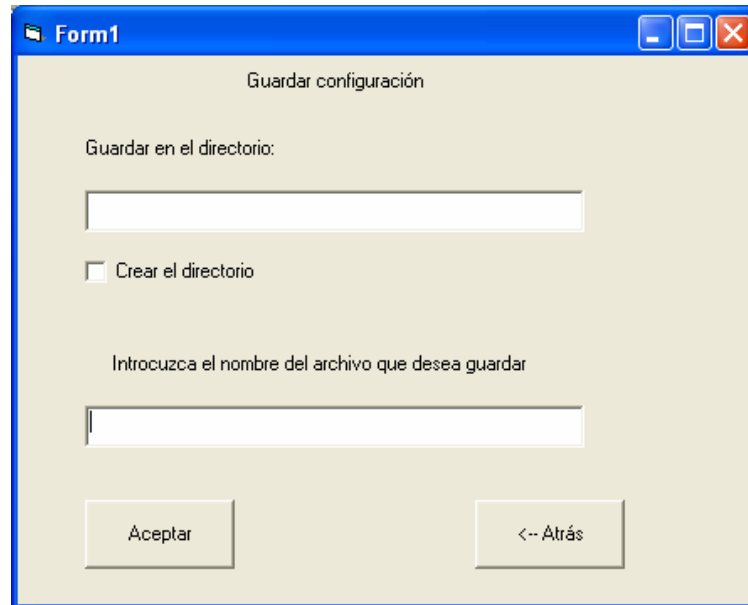


Figura 5.6. Ventana de guardar configuración

El funcionamiento de esta parte del programa también es bastante sencillo, en el espacio de arriba se pone el nombre del directorio donde se quiere guardar la configuración, marcando la casilla **Crear directorio** en el caso de que no exista, y el nombre que le queremos poner a la configuración en el espacio de abajo. Si no marcamos la casilla **Crear directorio** y este no existe se producirá un error y el archivo de configuración no se guardará en el sitio correcto. Si no se indica ningún directorio el archivo se guardará por defecto en la unidad USER (D:) del analizador de redes. Dándole al botón **Aceptar** se guardará la configuración donde hemos indicado y si le damos a **Atrás** se volverá a la ventana de configuración sin guardar la configuración.

### 5.5. Ayuda

Con el objetivo de hacer más fácil el uso de nuestro software y permitir una rápida familiarización con el programa para personas que entran en contacto con este software por primera vez se decidió crear una ayuda que fuese fácil de manejar y que explicase paso a paso el correcto funcionamiento de todo el programa y la adecuada manera de realizar las medidas.

Dicha ayuda fue creada con el programa 'HTML Help Workshop', ya que nos permitía crear una ayuda con un formato intuitivo y fácil de manejar.

Para ejecutar la ayuda debemos apretar el botón **Ayuda** de la *ventana de presentación* o bien haciendo doble click en el archivo de ayuda *ayudaMIMO*.

En la siguiente figura podemos ver una imagen del programa de ayuda:

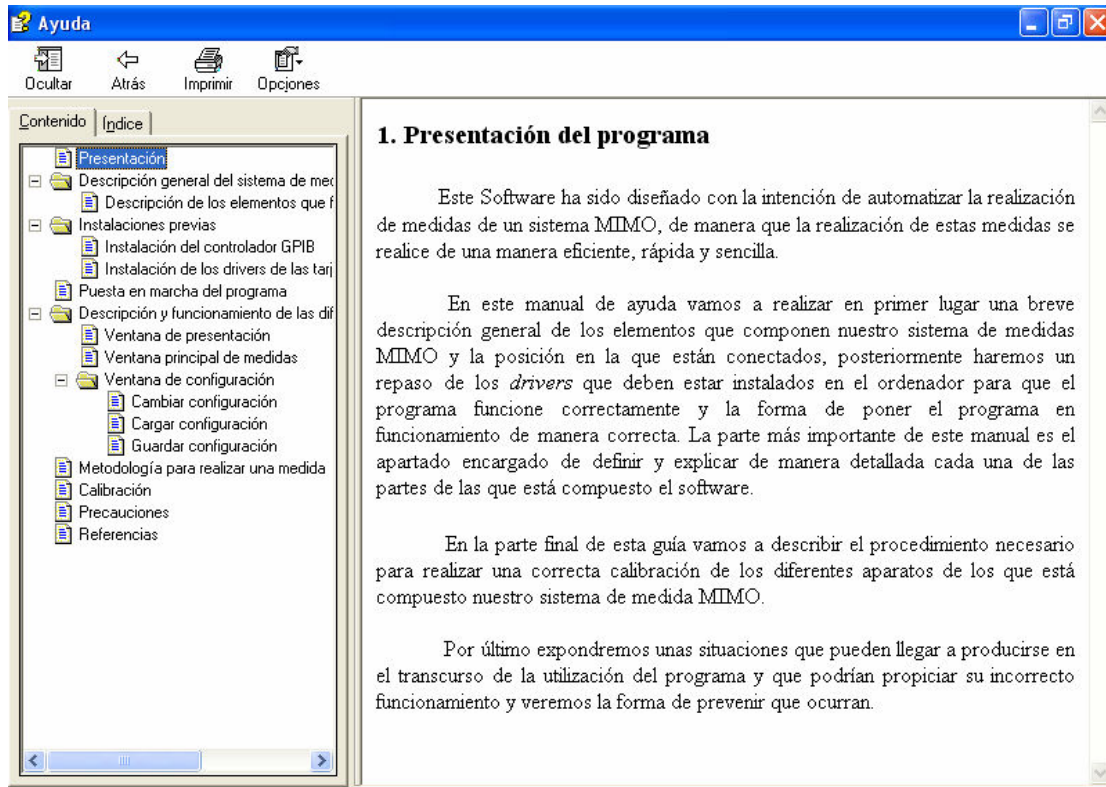


Figura 5.7. Ventana de ayuda del programa

### 5.6. Mejoras respecto al software anterior

Este apartado vamos a enumerar algunas de las mejoras que posee el nuevo software respecto al software anterior:

- Una de las principales diferencias que nos encontramos entre ambos programas reside en la forma que tienen ambos en determinar la finalización de la toma de una medida determinada. Con el anterior programa se utilizaba un *timer* con un tiempo fijo para todas las medidas y se consideraba que la medida había sido realizada cuando expiraba dicho tiempo. El software actual mantiene una comunicación bidireccional con el analizador de redes ENA, lo cual le permite que el propio aparato nos avise que la medida ya ha sido realizada y que por tanto está listo para realizar otra medida en el momento que lo deseemos.
- Debido a la mejora anteriormente nombrada, el tiempo encargado a la hora de realizar las medidas es mucho menor, ya que solamente se utiliza el tiempo necesario para realizar la medida, mientras que con el programa anterior para realizar la siguiente medida hacía falta que expirase en contador para poder seguir con la siguiente.
- Además de hacer más eficiente el tiempo de medidas debido al cambio al que se hace referencia en el primer punto, también se hizo un cambio en la manera de tomar las medidas y guardar los datos. Anteriormente para tomar una serie de medidas el programa ponía en modo *continuos* (tomando medidas) las ventanas correspondientes a un mismo transmisor, posteriormente esperaba un tiempo fijo a que el analizador de redes tomase las medidas; una vez esperado ese tiempo se

ponían esas ventanas en estado *hold* (en espera), entonces el programa va seleccionando las ventanas una a una y grabando los datos, también esperando un tiempo fijo determinado a la hora de guardar los datos para que se realice de modo correcto; una vez hecho esto se pasaba con la siguiente transmisor y de esta manera hasta que terminase con todos. Como podemos ver el ENA tenía que ir constantemente cambiando del estado de medición al de guardar los datos, lo cual hacía aún más ineficiente el anterior software. Sin embargo el programa actual ha cambiado esta forma de medir para hacerla de una manera mucho más eficiente. Esta manera consiste en poner en *continuous* todas las ventanas que correspondan a una misma antena transmisora, entonces se espera a que el analizador de redes nos informe que la medida se ha realizado y entonces estas ventanas se ponen a *hold* y se pasa a las ventanas que corresponde a la siguiente antena transmisora y se ponen en *continuous*. Esta operación se repite con todas las antenas transmisoras y después el programa va de ventana en ventana grabando los datos que se hayan obtenido, esperando el tiempo entre grabación y grabación necesario ya que es el propio analizador de redes el que nos informa que los datos han sido correctamente guardados. Este cambio propicia que el ENA sólo tenga que ponerse en estado de grabar una vez sin tener que ir cambiando constantemente de estado de medir a grabar lo que propiciaba que se desperdiciase mucho tiempo.

- Para poder entender de manera práctica lo importante de esta mejora vamos a mostrar el siguiente ejemplo: Se ha utilizado un sistema con cuatro antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras, con una frecuencia inicial de 850 MHz y una frecuencia final de 950 MHz, una frecuencia intermedia de 3 KHz y se usan 512 puntos para las medidas. Usando el programa anterior para hacer una serie de medidas se tarde unos 30 segundos en hacerse, mientras que con el programa actual el tiempo que necesitamos no llega a 10 segundos, lo que quiere decir que se tarda tres veces menos en realizar una serie de medias, y teniendo en cuenta que en una campaña de medidas en una sola tarde se realizan cientos de estas series de medidas, este tiempo se puede considerar totalmente crítico.
- Una utilidad importantísima que tiene utilizar una comunicación bidireccional con el analizador de redes, a parte de la optimización de la velocidad de la toma de medidas, es el de la fiabilidad. Esto se debe a que como en el programa anterior se utilizaba un tiempo fijo para esperar que el programa tomase la medida de manera correcta, si este tiempo de espera no lo elegíamos de manera correcta y no era suficiente para que se tomase del todo la medida, los datos que obtendríamos no serían los correctos. De igual manera si a la hora de almacenar los datos que estamos midiendo no se elige el tiempo adecuado los datos tampoco se guardarán de manera correcta. Con nuestro programa actual este problema no existe, ya que es el propio ENA el que nos informa que la medida se ha terminado de hacer de manera correcta con lo cual no existe el riesgo de parar la medida antes de que se realice de manera satisfactoria. Lo mismo ocurre a la hora de guardar los datos.
- Una limitación fundamental que poseía el otro programa y que hemos descrito un uno de los apartados anteriores es el hecho de que si poníamos un determinado número de puntos o una frecuencia intermedia determinada, entre otros parámetros, el tiempo de espera necesario para realizar de manera correcta una medida podía variar, con lo cual había que ir cambiando este tiempo de espera para que se realizase de manera correcta, con la imprecisión y pérdida de tiempo que suponía



esto. Este problema ya no existe con el nuevo software ya que, gracias a la comunicación bidireccional, siempre espera el tiempo necesario.

- Otra cualidad muy importante que tiene el nuevo software y de la que carecía el anterior programa es que el programa está preparado para poder trabajar con un número variable de antenas transmisoras y receptoras. Mientras que con el anterior programa solamente podíamos trabajar utilizando cuatro antenas en recepción y cuatro antenas en transmisión, lo cual resultaba una gran limitación ya que no podíamos trabajar con otro número de antenas, con el programa actual podemos trabajar con el número de antenas que deseemos (siempre que esté dentro del rango que soporta el analizador de redes), e incluso configura el ENA de la manera más eficiente para poder trabajar con este número de antenas. Esto es muy importante ya que abre la posibilidad de poder realizar diferentes estudios con diferente número de antenas para poder comprobar cual es la distribución más eficiente dependiendo del entorno en el que nos encontremos y de la aplicación para la que se esté estudiando utilizar esta técnica.
- Otra aplicación muy importante que posee este nuevo software consiste en la posibilidad de realizar una configuración del analizador de redes en tiempo de ejecución, es decir, mientras que con el anterior programa solamente podíamos cambiar los parámetros de la configuración antes de ejecutar el programa variando los parámetros de la hoja *Excel*, o cambiándolos manualmente desde el panel frontal del analizador de redes, con nuestro programa podemos realizar todas las configuraciones que deseemos desde el propio programa sin la necesidad de cerrar el programa ni de utilizar el panel del analizador de redes (solamente a la hora de realizar la calibración). Esto es muy útil ya que ahorramos el tiempo de tener que cerrar al programa y volverlo a abrir cada vez que deseemos cambiar cualquier configuración.
- Una de las variaciones más importantes que se han realizado al programa consiste en haber trasladado el programa del editor de Visual Basic, que incorpora el programa Microsoft Excel, al programa Microsoft Visual Basic 6.0. Para poder realizar este cambio tuvimos que realizar gran variedad de cambios en el programa para que dicho programa fuese totalmente independiente de la hoja de cálculo de Excel, con lo cual también conseguimos que durante la ejecución de nuestro programa pudiésemos hacer todos los cambios necesarios sin la necesidad de tener que cerrar y reiniciar el programa.
- Este traslado produjo grandes ventajas, como por ejemplo la utilización de un entorno mucho más cómodo y potente que el que nos encontrábamos en el editor de Visual Basic del Excel. Pero el mayor beneficio que encontramos al utilizar el programa Microsoft Visual Basic 6.0 consistió en que gracias a él pudimos crear una aplicación independiente de nuestro programa (un archivo ejecutable *\*.exe*), lo cual es un avance muy importante en relación con el software anterior. Un ejemplo muy importante de esto radica en que ya no es necesario la utilización del *Excel* ni la instalación de ningún otro programa (salvo los *drivers* de los controladores que en cualquier caso son fundamentales).
- Uno de los principales inconvenientes del anterior programa radicaba en el hecho de que los datos que guardábamos de las medidas se guardaban todas en la unidad

USER(D:) del analizador de redes, sin posibilidad de elegir antes de realizar las medidas el directorio destino. Esto resultaba muy incómodo ya que teníamos que crear manualmente desde los controles del ENA el directorio destino que deseásemos y una vez hechas las medidas y los archivos guardados en el directorio raíz de la unidad D: del ENA transportarlos manualmente hasta dicho directorio. Además de la incomodidad y consiguiente pérdida de tiempo podía ocurrir el caso de que si no guardásemos los datos obtenidos en otro directorio podríamos accidentalmente sobrescribir los datos anteriores con nuevos datos, con lo cual perderíamos datos y tendríamos que volver a repetirlos.

- Otra nueva e importante utilidad que lleva el nuevo software radica en la posibilidad de elegir el número de veces que queremos que se repita el ciclo de medidas. Anteriormente teníamos que indicar que empezase a medir cada vez que terminase un ciclo de medidas, mientras que ahora podemos seleccionar el número que queremos que se repitan. Esto es útil cuando necesitamos tomar varias medidas desde una misma posición, ya que simplemente tenemos que indicar el número de repeticiones y darle a botón **RUTINA DE MEDIDAS**, con el consiguiente ahorro de tiempo.
- Otra importante cualidad que posee nuestro programa es la posibilidad de indicar un tiempo determinado de espera que debe transcurrir entre la finalización de un ciclo de medidas y el comienzo de la siguiente. La utilidad de esta función radica en la posibilidad de poder realizar campañas de medidas que requieren tomar datos en diferentes intervalos de tiempo. Por ejemplo, si deseamos tomar medidas a lo largo de un día y queremos encontrar las diferencias que se producen en el canal radio a lo largo del día, podríamos indicar al programa que realizase un ciclo de medidas cada hora.
- Con el programa anterior si al realizar una toma de medidas una de estas medidas resultaba errónea por alguna circunstancia, no tendríamos posibilidad de realizar una medida correcta que sobrescribiera a la errónea e indicar al contador de medidas por donde tendría que volver a empezar a medir. Otra circunstancia parecida se produciría si por alguna razón se cerrase el programa de manera accidental, al reiniciar el programa el contador de medidas empezaría siempre a contar desde uno. Este problema acarrearía la necesidad de guardar las medidas que ya se hayan realizado y renombrar las medidas que realicen a continuación para que la secuencia de ambas sea correcta, lo cual como podemos observar conllevaba mucho trabajo y mucha pérdida de tiempo de manera innecesaria. Sin embargo con el nuevo programa de medidas ya no existe este problema, ya que, ya sea por tomar una medida de manera incorrecta, por un cierre accidental del programa o por cualquier otra circunstancia, siempre podemos indicar al programa de medidas que varíe en contador de medidas para que las siguientes medidas se realicen con el número de secuencia deseado. Y todo esto lo podemos realizar sin la necesidad de tener que cerrar el programa y volverlo a abrir.
- Otra nueva función que posee nuestro programa es la de poder guardar la configuración actual. Esto puede ser muy útil si por alguna razón no podemos seguir realizando medidas en ese momento pero en otra ocasión queremos continuar realizando dichas medidas con la misma configuración que estamos utilizando en estos momentos, tenemos la posibilidad de poder guardar la

configuración actual en un directorio que indiquemos (si no existiese es importante que le digamos al programa que cree dicho directorio para que no se produzca ningún error a la hora de guardar), para que en otra ocasión poder cargar dicha configuración en el analizador de redes para que se pueda volver a proseguir con las medidas (es importante indicar que aunque se cargue una configuración es fundamental realizar otra vez la calibración para que las medidas que tomemos sean correctas). Tanto la acción de guardar configuración como la de cargar configuración se realizan desde el propio programa en tiempo de ejecución, es decir, sin necesidad de tener que cerrar y volver a abrir el programa.

- En este programa se ha reformado completamente el entorno gráfico utilizado en la anterior versión del programa. Además de disponer de muchas más utilidades y opciones de las que no disponía la anterior versión, dispone de una consola con la que muy sencillo e intuitivo seguir el curso de la toma de medidas ya que te avisa del comienzo de la toma de medidas, de la repetición que se está realizando en ese momento y de la finalización de dichas medidas, así como de indicar si se ha producido algún cambio en la configuración o si la configuración indicada es errónea, entre otras funciones. Además también dispone de un visualizador que nos indica en todo momento del valor del contador de medidas, de esta manera siempre podemos saber si el valor de dicho contador es el adecuado y si no lo es proceder a cambiar dicho valor.
- La última gran novedad que vamos señalar que no existía en el anterior programa es la existencia de un botón de ayuda que nos muestra un menú con la ayuda necesaria para poder manejar el programa de manera correcta. Dicha ayuda es muy importante, sobretodo cuando no se está familiarizado todavía con el software de medidas.

## Capítulo 6 Campañas de medidas

### 6.1. Metodología para realizar una medida

En este apartado vamos a describir los pasos necesarios para realizar una medida correctamente.

#### **Paso 1**

Se revisa que todos los dispositivos estén conectados correctamente y que los *drivers* necesarios están correctamente instalados.

#### **Paso 2**

Se configura el ENA de la manera que deseemos. Para ello existen tres posibilidades:

##### *-- Primera posibilidad:*

Realizar una configuración manualmente desde el analizador de redes utilizando los mandos que se encuentran en su frontal.

##### *-- Segunda posibilidad:*

Realizar una configuración desde nuestro programa a través de la ventana **Cambiar configuración**.

##### *-- Tercera posibilidad:*

Cargar una configuración que haya sido guardada anteriormente. Esto se puede hacer manualmente desde los comandos del panel frontal del analizador de redes o a través de nuestro software en la ventana **Cargar configuración**.

#### **Paso 3**

Se realiza la calibración de cada uno de los cables. Esta es una de las partes más delicadas a la hora de realizar una medida. Se realiza de manera manual y la forma correcta de hacerlo lo veremos con detenimiento en el siguiente apartado.

#### **Paso 4**

Se especifican las características generales de la medición (numero de repeticiones, directorio destino,...) que se encuentran en la **ventana principal de medidas** de nuestro programa.

### Paso 5

Finalmente se aprieta el botón **RUTINA DE MEDIDAS** de la ventana principal y las medidas empezarán a realizarse.

En el siguiente esquema podemos ver de forma gráfica estos pasos:

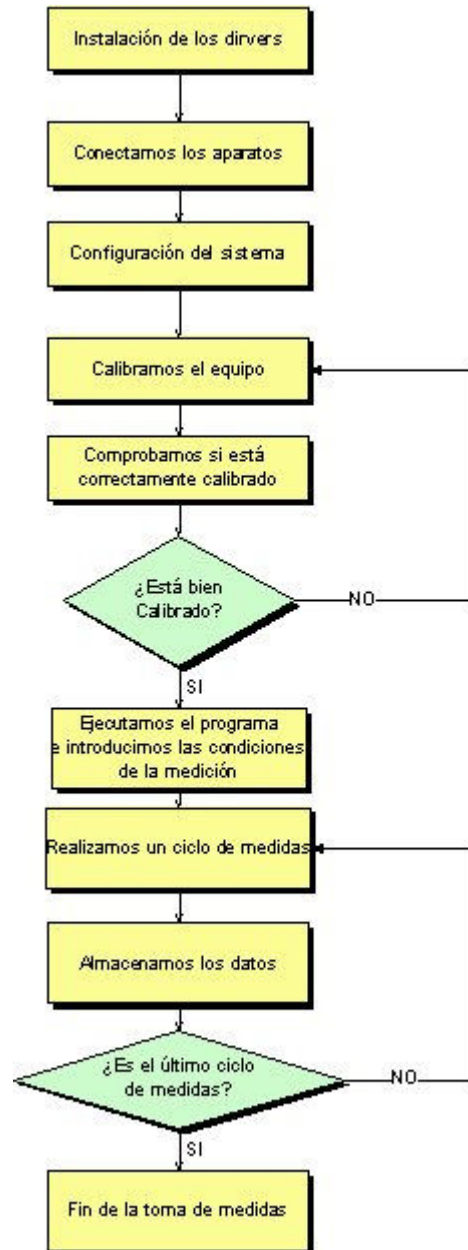


Figura 6.1. Esquema de la realización de una campaña de medidas

#### 6.1.1 Calibración

Como hemos dicho anteriormente la calibración es una de las partes más delicadas a la hora de realizar las medidas, con lo cual hay que realizarla con mucho cuidado.

Para realizar una calibración, en primer lugar hay que activar una de las ventanas del analizador de redes y poner el estado del *trigger* de esa ventana en **continuos**, es decir, en el estado para recibir datos, mientras que las otras ventanas deben de estar en **hold**, es decir, sin realizar ninguna acción. Entonces hay que conectar el cable que va hacia la antena transmisora, a la que pertenece esa ventana, con cada una de las antenas receptoras (de una en una). Con cada una de estas conexiones debemos utilizar las siguientes opciones del analizador de redes: “Calibrate”, después a “Calibrate thru” y finalmente a “done”. Y pasamos a la siguiente combinación.

Una vez hemos hecho todas las combinaciones debemos comprobar si la calibración es correcta. Para ello debemos medir el nivel de ruido que se obtiene y con ello ver que umbral es el adecuado para comprobar si las medidas que estamos realizando van a ser correctas o no.

### 6.2 Algunos ejemplos de utilización del programa

En este apartado vamos a mostrar algunos ejemplos representativos de la utilización de nuestro programa. Con estos ejemplos esperamos que queden claras las posibilidades de este software y la utilidad práctica que tiene en un sistema de medidas.

En primer lugar mostraremos un ejemplo de cómo realizar una configuración de nuestro sistema utilizando nuestro software, después mostraremos como se realiza una medición de banda ancha y el procedimiento que hay que seguir para realizarlo de manera correcta, paso a paso. Posteriormente mostraremos un ejemplo de cómo guardar una configuración determinada y otro ejemplo de cómo cargar dicha configuración.

#### 6.2.1 Ejemplo 1. Como configurar el sistema

En este primer ejemplo vamos a mostrar como configurar el analizador de redes utilizando nuestro programa de medidas.

La configuración que deseamos que tenga nuestro sistema es la siguiente:

```
Frecuencia inicial: 2.35 MHz
Frecuencia Final: 2.55 MHz
Número de puntos: 512 puntos
IFBW: 3 KHz
Número de antenas transmisoras: 4
Número de antenas receptoras: 4
Average: 0
Formato: Polar linear
```

Algo fundamental para que funcione el programa de forma adecuada es que la comunicación entre el ordenador portátil con el analizador de redes y el controlador se haga de manera correcta. Para ello hay que conocer la dirección IP del ENA, ya sea la que comunica con la tarjeta de red inalámbrica, en el caso de que utilicemos una comunicación inalámbrica, o en de la tarjeta de red, en caso de utilizar un cable cruzado. En este ejemplo utilizaremos un cable cruzado, y la dirección IP que hemos utilizado es **15.1.201.236**. También es imprescindible conocer la dirección del controlador GPIB para que se pueda realizar la comunicación con éxito, en nuestro ejemplo esta dirección es **28**.

En primer lugar es conveniente realizar un *reset* al ENA para que vuelva a la configuración inicial que tiene cuando se inicia el equipo. Una vez que hemos iniciado el programa debemos darle al botón **continuar** para pasar a la ventana principal de medidas. Para realizar el *reset* hay que darle al botón **Preset** de la ventana principal de medidas tal como vemos en la siguiente figura:

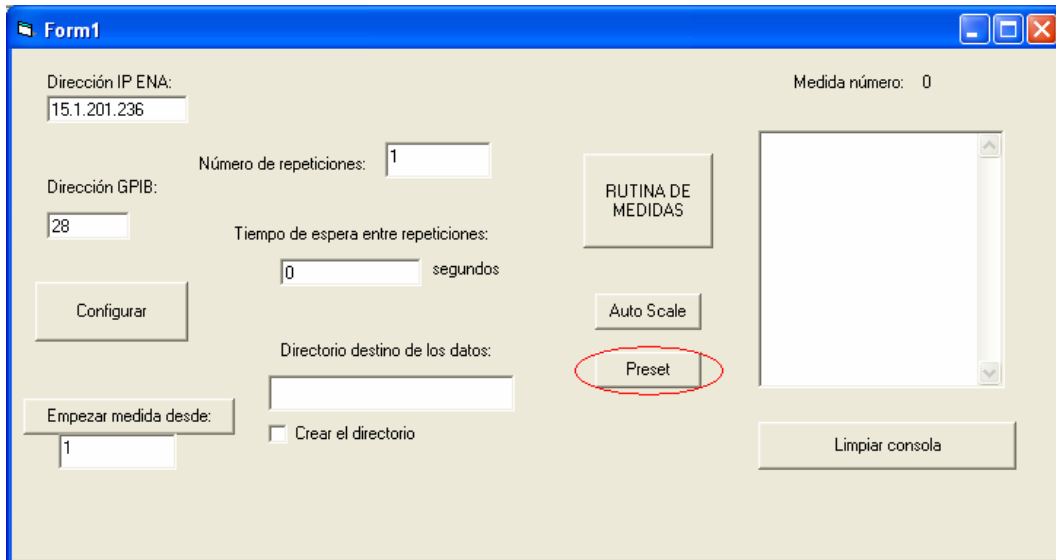


Figura 6.2. Botón preset

Una vez reseteados los parámetros del analizador de redes procederemos a la configuración del mismo con los parámetros indicados anteriormente.

En primer lugar debemos acceder a la ventana de configuración, para ello debemos presionar el botón **Configurar** de la ventana principal de medidas, tal y como podemos ver en la siguiente figura:

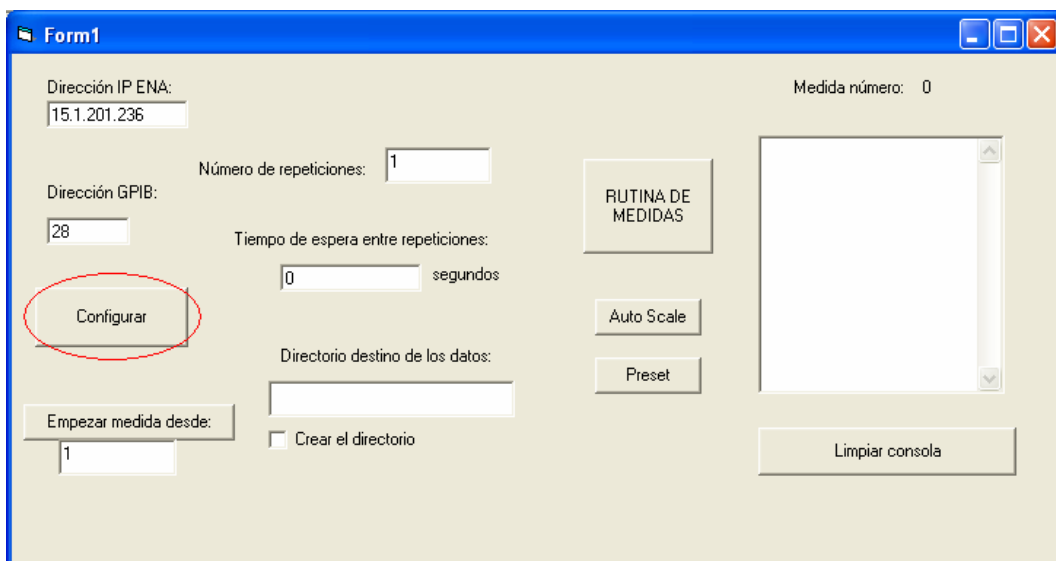


Figura 6.3. Botón configurar

Con esta acción llegaremos a la ventana de configuración. Para poder realizar una configuración con los parámetros deseados debemos ir a la ventana de cambio de configuración. Para llegar allí debemos darle al botón **Cambiar configuración** que se encuentra en la ventana de configuración, tal y como vemos en la figura:

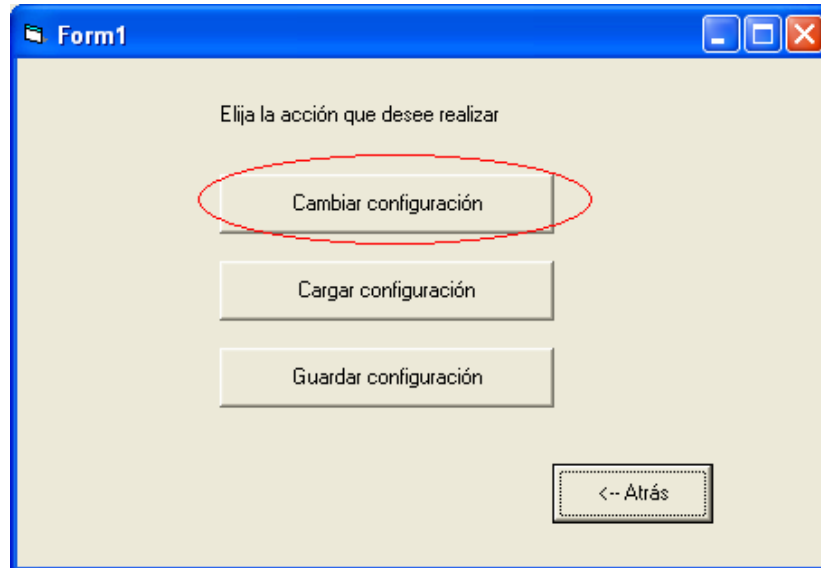


Figura 6.4. Cambiar configuración

Esto nos llevará a la ventana de cambio de configuración, en donde pondremos los parámetros requeridos, tal y como vemos en la siguiente figura:

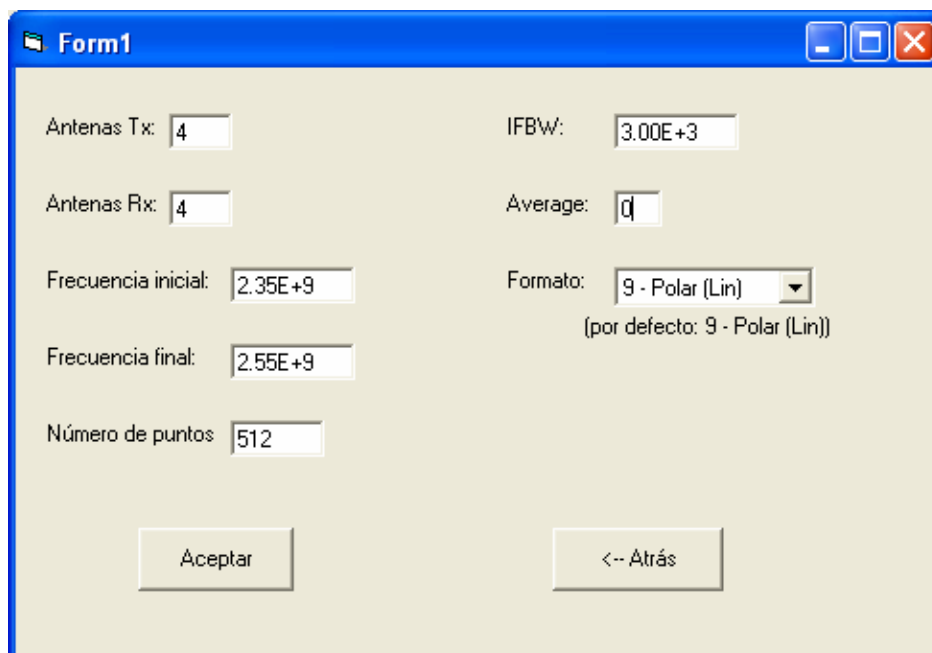


Figura 6.5. Introducimos los parámetros que deseamos

Una vez introducidos los parámetros, para que se proceda a la configuración del analizador de redes tenemos que confirmar estos parámetros dándole al botón **Aceptar**, tal y como vemos en la siguiente figura:



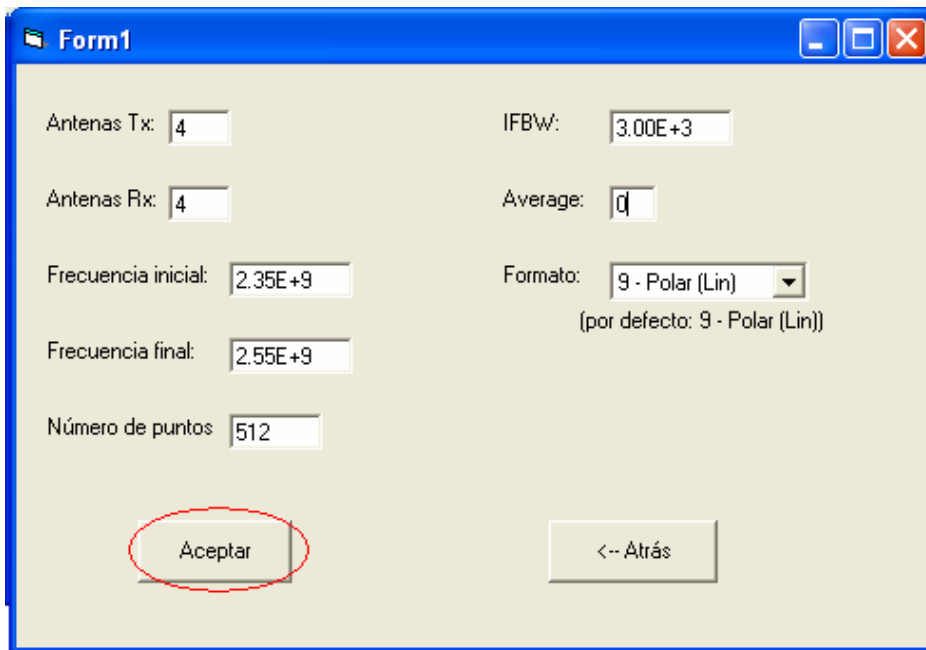


Figura 6.6. Confirmamos la configuración

Si hemos realizado todos los pasos de manera correcta y la comunicación con el analizador de redes está bien establecida, el ENA se configurará con los parámetros que le hemos indicado y en su pantalla aparecerá la siguiente imagen:



Figura 6.7. Imagen del analizador de redes

Si la configuración ha sido correcta el programa volverá a la ventana principal de medidas y en la consola nos aparecerá la confirmación de que la configuración se ha realizado de manera correcta.

Después de este paso es importante recordar que posteriormente a cada cambio de configuración o cada vez que se conecta un nuevo cable o antena debemos de volver a calibrar el aparato, en caso contrario nos arriesgamos a que las medidas obtenidas no sean correctas.

### 6.2.2 Ejemplo 2. Como iniciar un ciclo de medidas

Una vez que el analizador de redes está configurado con los parámetros que deseamos, el siguiente paso importante es el de establecer las condiciones de medida que va a utilizar el programa para realizar el ciclo de medidas.

En este ejemplo vamos a utilizar la configuración realizada en el apartado anterior. Las condiciones de medida que vamos a utilizar son las siguientes:

Número de repeticiones: 5

Tiempo de espera entre repeticiones: 120 segundos

Directorio destino de los datos: Ejemplo2

Estos parámetros deben ser introducidos en la ventana principal de medidas, tal y como podemos ver en la siguiente figura:

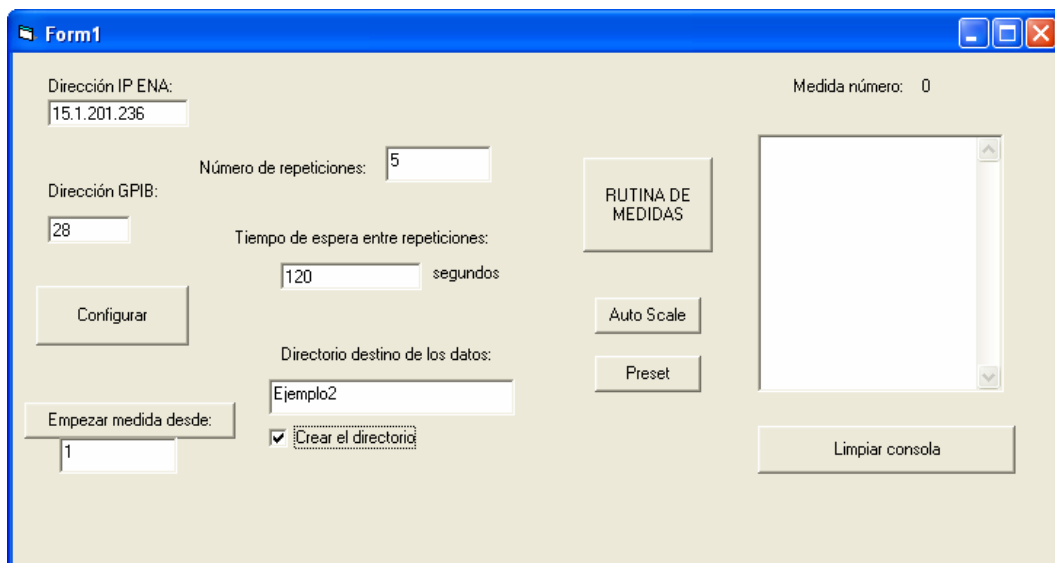


Figura 6.8. Introducción de las condiciones de medida

Es importante recordar que si el directorio destino que hemos indicado no existiese debemos marcar la casilla **Crear el directorio**, en caso contrario se producirá un error y los datos no se guardarán en el sitio correcto.

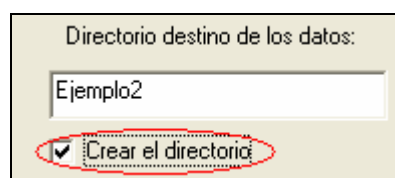


Figura 6.9. El directorio no existe

Hay que tener en cuenta también que es en esta ventana principal donde hay que introducir la dirección IP del ENA y la dirección del puerto GPIB.

Ahora ya está todo listo para empezar a realizar los ciclos de medidas. Para ellos solamente hay que presionar el botón **RUTINA DE MEDIDAS**, tal y como vemos en la siguiente figura:

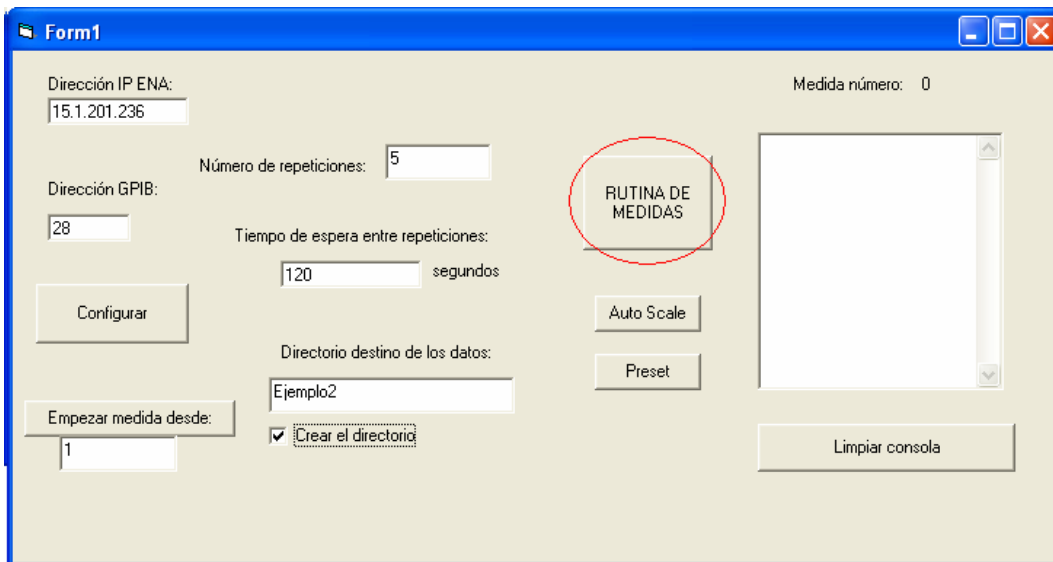


Figura 6.10. Iniciar los ciclos de medidas

Una vez que se inicie el ciclo de medidas en la consola aparecerá un mensaje anunciando el comienzo de cada uno de los ciclos de medidas:

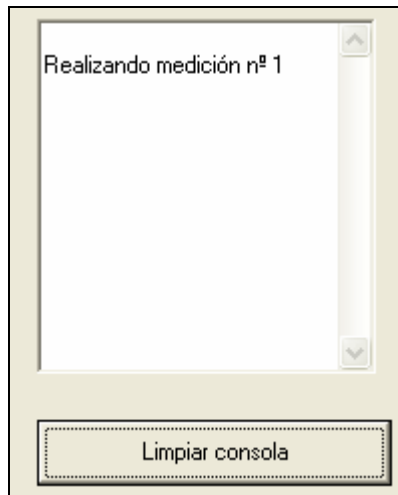


Figura 6.11. Comenzando la medida número 1

Una vez que las medidas hayan finalizado, la consola nos avisará de esta situación:

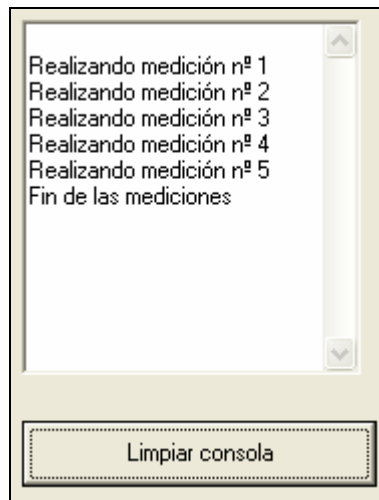


Figura 6.12. Fin del ciclo de medidas

Una vez que ya se han terminado las mediciones podemos comprobar en el analizador de redes como los datos obtenidos de las mediciones se han guardado en el directorio indicado.

### 6.2.3 Ejemplo 3. Como guardar una configuración

En muchas ocasiones es importante guardar la configuración que se este utilizando en un archivo aparte para poder volver a utilizarla en otra ocasión. En este ejemplo vamos a mostrar paso a paso como se guarda una configuración de manera correcta utilizando nuestro software de medidas.

La configuración que queramos guardar debe de estar usándose en ese momento en el analizador de redes. En primer lugar tenemos que acceder a la ventana de configuración, para ello debemos de presionar el botón **Configurar** que aparece en la ventana principal de medidas:

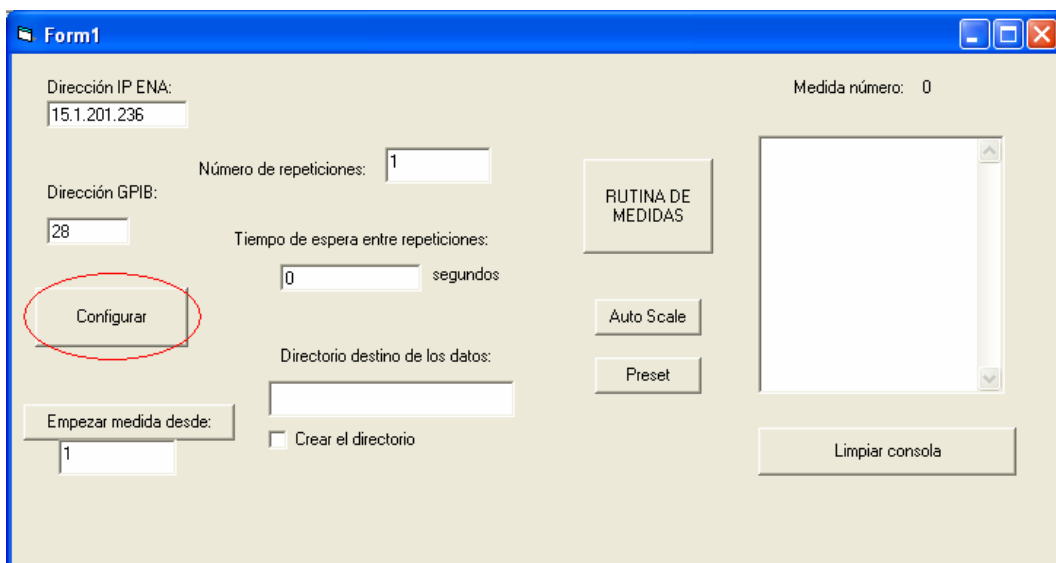


Figura 6.13. Botón configurar

Una vez en la ventana de configuración tenemos que acceder a la ventana de guardar configuración, para ello debemos presionar al botón **Guardar configuración** que aparece en esta ventana:

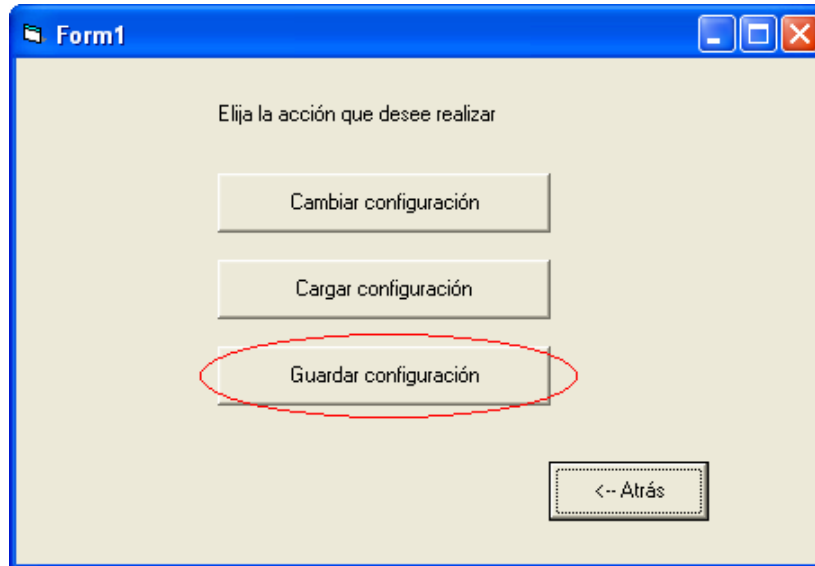


Figura 6.14. Botón Guardar configuración

Una vez estemos en la ventana de guardar configuración tenemos que especificar el nombre del directorio destino donde queremos que se guarde el archivo de configuración y el nombre que queremos ponerle a dicho archivo. En este ejemplo hemos elegido un directorio de nombre *configuración* y un archivo de configuración de nombre *ejemplo3*, tal como vemos en la figura:

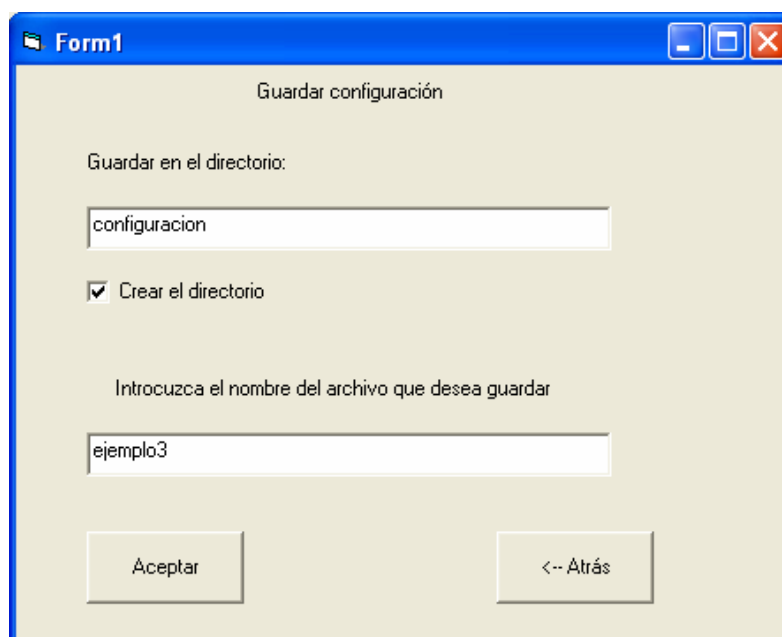


Figura 6.15. Guardar configuración

Hay que tener en cuenta que si no existiese un directorio con ese nombre deberíamos marcar la casilla **Crear directorio** para que se cree dicho directorio y no se produzcan errores.

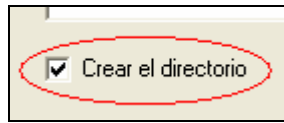


Figura 6.16. Crear directorio

Para confirmar que deseamos guardar esta configuración tenemos que darle al botón **Aceptar**.

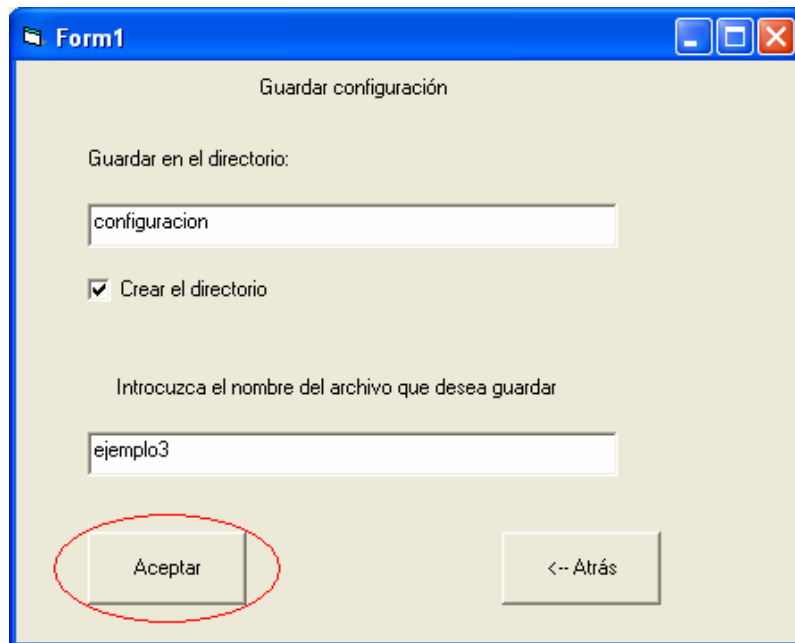


Figura 6.17. Confirmamos guardar la configuración

Una vez que la configuración se ha guardado con éxito nos aparecerá un mensaje en la consola confirmándolo.

### 6.2.4 Ejemplo 4. Como cargar una configuración

Tan importante como guardar una configuración es poder cargar dicha configuración posteriormente. En este ejemplo veremos paso a paso como cargar dicha configuración.

En primer lugar tenemos que acceder a la ventana de configuración. Esto lo haremos de la misma manera que en el apartado anterior.

Una vez estemos en esta ventana debemos presionar el botón **Cargar configuración** como podemos ver en la figura:

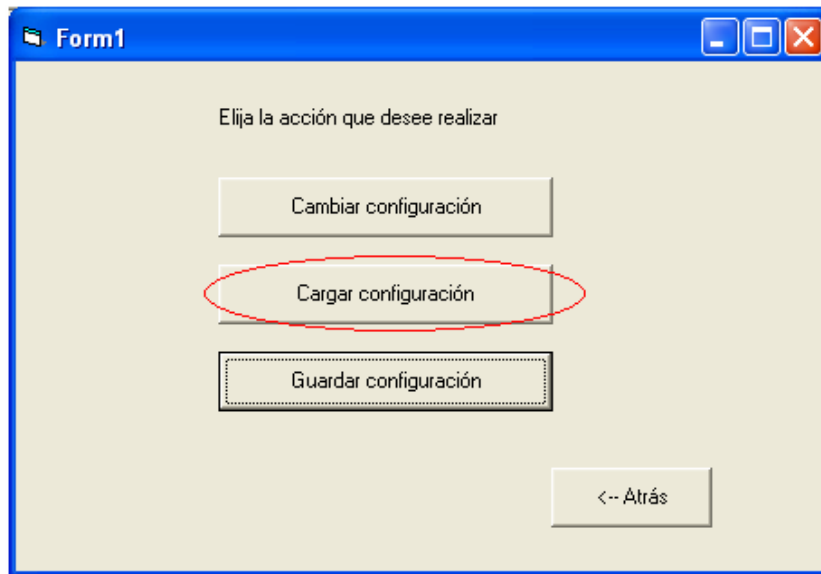


Figura 6.18. Botón Cargar configuración

Una vez que estamos en la ventana de cargar configuración, tenemos que poner la ruta y el nombre del archivo que queremos cargar, en este caso cargaremos el archivo de configuración guardado en el apartado anterior, y le daremos al botón **Aceptar** para confirmarlo.

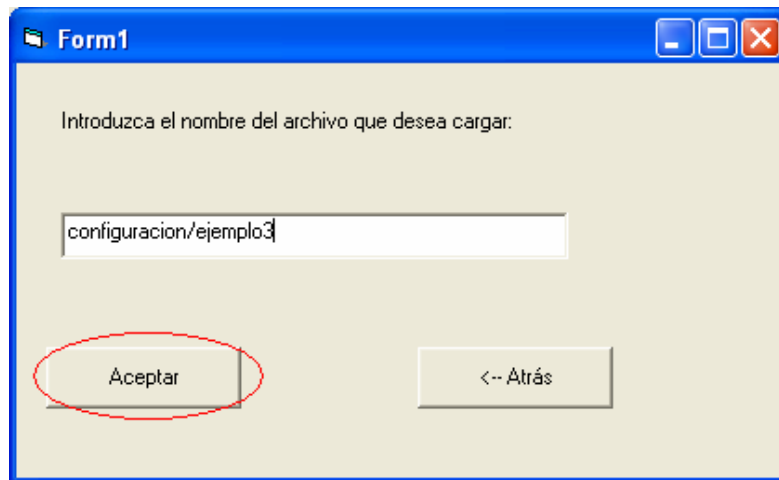


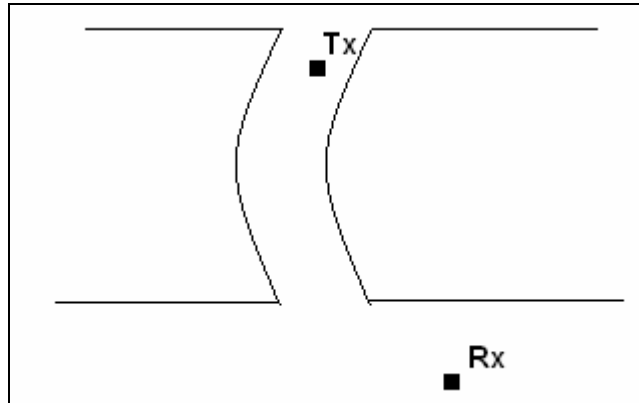
Figura 6.19. Confirmar Cargar configuración

Una vez que la configuración se haya cargado en la consola de la ventana principal de medidas nos aparecerá un mensaje confirmándonos que la configuración se ha cargado con éxito.

### 6.2.5. Ejemplo práctico

Para poder comprobar el correcto funcionamiento de nuestro programa decidimos realizar una prueba práctica en un terreno real. De esta manera podríamos obtener los datos que caracterizan el canal radio del entorno donde hemos realizado la prueba. Dicha prueba fue una parte de los dos proyectos fin de carrera [ProGZ][ProGF] que han utilizado este software para realizar sus campañas de medidas de manera satisfactoria.

El sitio elegido para realizar estas mediciones fue el túnel que se encuentra junto al antiguo Hospital de Marina, que por sus características resulta de gran importancia la medición de sus parámetros radioeléctricos. En el siguiente dibujo mostramos un pequeño esquema de la estructura de dicho túnel:



**Figura 6.20.** Estructura del túnel

Para realizar este ejemplo procedimos de la misma manera que hemos indicado a lo largo de este informe.

En primer lugar tuvimos que llevar los aparatos al lugar apropiado transportándolos desde el laboratorio por medio de unos carros apropiados para esta función. Una vez que los aparatos estuvieron en la posición correcta procedimos a la conexión de los aparatos de la manera que se indicaba en la *Figura 4.1*. En esta ocasión también dispusimos de la ayuda de amplificadores para poder mejorar la calidad de la señal recibida. Hay que subrayar que los *drivers* ya habían sido instalados en el laboratorio con anterioridad.

La configuración que realizamos, la hicimos de la misma manera que la indicada en el *ejemplo 1*, utilizando los mismos parámetros que en dicho ejemplo.

Posteriormente realizamos la delicada tarea de calibración. Como ya hemos indicado en más de una ocasión a lo largo de este proyecto, esta tarea tiene que realizarse con el mayor cuidado posible.

Una vez configurado y calibrado el sistema fue el momento de comenzar el ciclo de medidas. Las condiciones de medidas también fueron las mismas que las utilizadas en el *ejemplo 2*, con lo cual tuvimos que proceder de la misma manera que en dicho ejemplo.

Una vez realizadas las medidas y almacenados los datos correspondientes a dichas medidas fue la hora de analizar dichos datos, esto se realizó con la ayuda del ordenador y los resultados obtenidos fueron los siguientes:



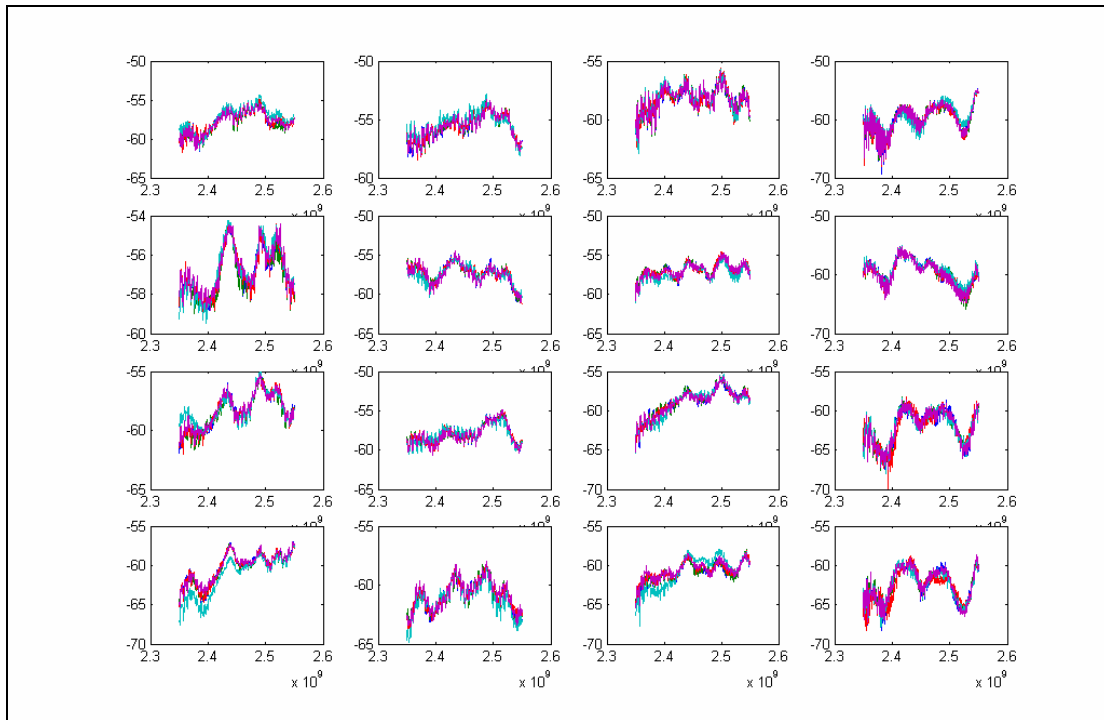


Figura 6.21. Magnitud de las medidas tomadas

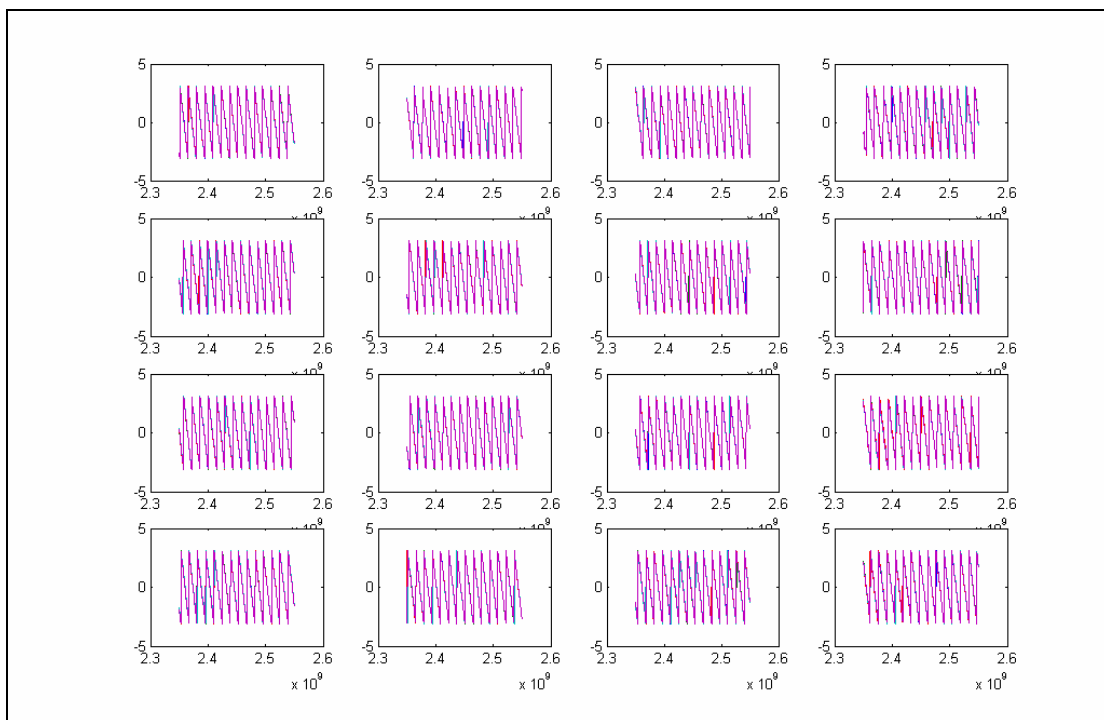


Figura 6.22. Fase de las medidas tomadas

Estos parámetros se usan para caracterizar el canal radio de este entorno. Dichos parámetros son analizados con la ayuda del software adecuado.

### 6.3. Precauciones

En este apartado vamos a indicar unas pequeñas consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de realizar las medidas para evitar que los datos que obtengamos no sean del todo satisfactorios.

- Asegurarse de que todos los dispositivos y los *drivers* estén correctamente instalados.
- Comprobar que la dirección IP del ENA y la del GPIB son las correctas, ya que de lo contrario se producirá un error y no se realizarán las medidas.
- Si el directorio destino donde queremos almacenar los datos no existe debemos marcar la casilla *Crear directorio*, en caso contrario se producirá un error y los datos no se guardarán en el sitio correcto.
- A la hora de guardar una configuración debemos tener cuidado por la misma razón que en el caso anterior.
- Tener cuidado que el número de antenas que queremos utilizar esté dentro del rango que puede utilizar el analizador de redes ENA.
- Realizar la calibración con todo cuidado ya que una incorrecta calibración podría provocar un ruido indeseado que podría llegar a producir unas medidas incorrectas.

## Capítulo 7 Conclusiones y líneas futuras

### 7.1. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha ido desarrollando un software que se encargase de la automatización de un sistema de medidas MIMO de manera que se pudiese realizar una campaña de medidas de una manera eficaz. Las diferentes mejoras que se han ido realizando a lo largo de este proyecto han ido dirigidas principalmente al cumplimiento de los siguientes objetivos:

- *Optimizar el tiempo de medidas:* Este ha sido uno de los principales objetivos que hemos desarrollado a lo largo de nuestro proyecto. Gracias a mejoras como la comunicación bidireccional entre equipos o la modificación de la forma de realizar las medidas nos ha propiciado un ahorro de hasta tres veces de tiempo menos del que se utilizaba con el software anterior.
- *Fiabilidad a la hora de realizar una medida:* Este era uno de los objetivos fundamentales que nos propusimos cuando empezamos este proyecto. También gracias a la comunicación bidireccional que hemos ido describiendo a lo largo de este informe hemos conseguido que las medidas que obtengamos sean del todo fiables, ya que el sistema siempre se esperará el tiempo necesario para la realización correcta de las medidas, y nunca antes.
- *Independencia del programa:* Esta es otra de las ventajas conseguidas, ya que con este nuevo programa una vez que lo ejecutemos se pueden realizar todos los cambios de configuración a través del mismo programa sin la necesidad de tener que cerrar el programa para realizar los cambios y volverlo a abrir.
- *Realizar las campañas de medidas con mayor comodidad:* Esto se ha conseguido gracias a las nuevas funciones como poder indicar el número de repeticiones que deseamos que se realice una medida o la posibilidad de indicar y crear el directorio destino donde deseamos que se almacenen nuestros datos dentro del analizador de redes ENA, etc.
- *Corregir medidas erróneas:* Con el nuevo programa si una medida no se toma de manera correcta por cualquier motivo es posible repetir dicha medida y que los nuevos datos sobrescriban a los erróneos.
- *Realizar medidas en banda ancha:* Este es otro de los objetivos fundamentales que nos propusimos realizar cuando empezamos el proyecto.
- *Flexibilidad:* Ya que ahora es posible realizar campañas de medidas variando un gran número de parámetros, por ejemplo realizar las medidas utilizando un número diferente de antenas transmisoras y receptoras.
- *Disponer de una ayuda en el propio programa:* Esta es otra de las importantes mejoras que hemos conseguido en nuestro proyecto, ya que es posible acceder a un archivo de ayuda desde el propio programa.

- Este software ya se ha utilizado con éxito a la hora de realizar campañas de medidas en otros dos proyectos [ProGZ][ProGF].

### 7.2. Líneas futuras

- Desarrollar el software para que sea capaz de analizar las medidas obtenidas una vez tomadas para que no sea necesario usar un software independiente que se encargue de esta tarea.
- Conseguir que el programa sea capaz de almacenar las medidas tomadas directamente en el ordenador portátil en lugar de hacerlo en el analizador de redes, con lo cual se ahorraría tiempo.
- Realizar campañas de medidas en más entornos para poder comprobar la respuesta del canal a un sistema MIMO en la mayoría de los entornos posibles.
- Repetir las campañas de medidas realizadas y repetir otras nuevas cambiando los parámetros utilizados hasta el momento, como por ejemplo hacer las medidas variando el número de antenas transmisoras y receptoras.

## Principales funciones utilizadas

### *Medidas*

Esta función es una de las más importantes de nuestro programa, y es la encargada de mandar los comandos necesarios, tanto al analizador de redes como al controlador, para que el proceso de medidas se haga de manera correcta.

```
Sub medidas ()
  Dim A As Long
  Dim B As Long
  Dim l, M, kk, k, MM, RR2, R, RA As Integer
  Dim recvBuf As String * 20
  Dim aux, aux2, aux3, aux4, mensaj As String
  Dim llam As Boolean

  Call calcVentanas

  Call StartIt
  Call get_hostnameENA

  y1 = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)

  directorio$ = UserForm1.Text4.Text

  If UserForm1.Check1.value = Checked Then
    y = SendCommand_ENA(":MMEM:MDIR " + """" + directorio$ + """)
  End If

  repetit$ = UserForm1.TextBox5.Text

  Y1 = SendCommand_ENA(":SENS1:MULT1:STAT ON")
  Call opc_ENA
  ' sirve para pasar el control al puerto del aparato que hay
  debajo del ENA

  A = SendCommand_ENA(":DISP:SPL?")          'Para ver el tipo de
  configuración q tiene
  A = RecvAscii_ENA(recvBuf, 20)
  Call opc_ENA

  llam = True
  R = 1
  While llam          'Para pasar lo q ha recibido antes a un formato
  legible
    aux4 = Right(Left(recvBuf, R + 1), 1)
    If aux4 <> " " Then
      aux2 = Left(recvBuf, R)
      aux3 = Right(aux2, 1)
      aux = aux + aux3
    Else
      llam = False
    End If
    R = R + 1
  Wend
```

```
'-----
Select Case aux
Case "D1"
    ventV = 1
    ventH = 1
Case "D12"
    ventV = 1
    ventH = 2
Case "D1_2"
    ventV = 2
    ventH = 1
Case "D123"
    ventV = 1
    ventH = 3
Case "D1_2_3"
    ventV = 3
    ventH = 1
Case "D1234"
    ventV = 1
    ventH = 4
Case "D1_2_3_4"
    ventV = 4
    ventH = 1
Case "D123_456"
    ventV = 2
    ventH = 3
Case "D12_34_56"
    ventV = 3
    ventH = 2
Case "D1234_5678"
    ventV = 2
    ventH = 4
Case "D12_34_56_78"
    ventV = 4
    ventH = 2
Case "D123_456_789"
    ventV = 3
    ventH = 3
End Select
ventT = ventV * ventH
'-----
-----
    RR2 = repetiç$
    For R = 1 To RR2          'Para que se repitan las mediciones el
numero de veces indicado
        mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
        UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Realizando medición n°
" & R
        RM$ = 0
        RMA$ = 0
        repet = repet + 1
        UserForm1.Label3.Caption = repet
        LL$ = repet

        k = 1
        l = 0
        M = 0
        tr = 0
```

```
    If k = 1 Then
        Call controlador1

    End If
    ventT2$ = ventT
    B = SendCommand_ENA(":CALC" + ventT2$ + ":PAR:COUN?") 'Comprobar
el numero de trazas que hay en la última ventana
    B = RecvAscii_ENA(recvBuf, 20)
    Call opc_ENA
    aux2 = Right(Left(recvBuf, 2), 1)
    If aux2 = 1 Then
        aux4 = (ventH * 2) - 1
    Else
        aux4 = ventH * 2
    End If

    For kk = 1 To ventV

    For RA = 1 To ventH
        RM$ = RM$ + 1
        B = SendCommand_ENA(":INIT" + RM$ + ":CONT ON")
        Call opc_ENA
    Next RA

    B = SendCommand_ENA(":TRIG:SOUR BUS")
    B = SendCommand_ENA(":TRIG:SING")
    B = SendCommand_ENA("*OPC?")
    B = RecvAscii_ENA(recvBuf, 10)

    For RA = 1 To ventH
        RMA$ = RMA$ + 1
        B = SendCommand_ENA(":INIT" + RMA$ + ":CONT OFF")
        Call opc_ENA
    Next RA

        If kk = 1 And kk < CInt(ventV) Then
            Call controlador2
        End If
        If kk = 2 And kk < CInt(ventV) Then
            Call controlador3
        End If
        If kk = 3 And kk < CInt(ventV) Then
            Call controlador4
        End If
        Call opc_ENA
        k = k + 1

    Next kk
    Call opc_ENA

'-----
-----

'La siguiente parte del código se encarga de al ENA que almacene
'los datos obtenidos

    k = 1
    l = 0
    M = 0
```

```
tr = 0

For kk = 1 To ventT

    tr = tr + 1
    If tr = ventH + 1 Then
        tr = 1
        k = k + 1
    End If

    kka$ = kk
    B = SendCommand_ENA(":CALC" + kka$ + ":PAR:COUN?")
    B = RecvAscii_ENA(recvBuf, 20)
    Call opc_ENA
    aux2 = Right(Left(recvBuf, 2), 1)
    For MM = 1 To aux2
        l = l + 1
        If l = aux4 + 1 Then
            l = 1
        End If

        p$ = kk
        t$ = MM

        lab$ = l
        Mev$ = k

        Y1 = SendCommand_ENA(":DISP:WIND" + p$ + ":ACT")
        Y1 = SendCommand_ENA(":CALC" + p$ + ":PAR" + t$ +
":SEL")

        yl = SendCommand_ENA(":MMEM:STOR:FDAT " + "" +
directorio$ + "/" + "datos" + lab$ + Mev$ + "_" + LL$ + "")
        Call opc_ENA

    Next MM
Next kk

Call espera
Next R
mensaje = UserForm1.TextBox4.Text
UserForm1.TextBox4.Text = mensaje & vbCrLf & "Fin de las mediciones"
Call CloseConnection_ENA
Call EndIt

End Sub
```

### **Configurar**

Esta es otra de las funciones más importantes y su objetivo es mandar al analizador de redes los comandos precisos para que se configure de manera correcta con los parámetros que le hayamos indicado.

```
Sub configurar ()
```

```
Dim y As Long
```



## Anexos. Principales funciones utilizadas

---

```
Dim recvBufENA As String * 1024
Dim R, l, N, A, B, C As Integer
Dim bueno As Boolean
Dim mensaj, elecform As String

Call StartIt
Call get_hostnameENA

y = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)

elecform = Trim(Left(UserForm4.ComboBox1.Text, 2))

Select Case elecform
Case "1"
    formato$ = "MLOG"
Case "2"
    formato$ = "PHAS"
Case "3"
    formato$ = "GDEL"
Case "4"
    formato$ = "SLIN"
Case "5"
    formato$ = "SLOG"
Case "6"
    formato$ = "SCOM"
Case "7"
    formato$ = "SMIT"
Case "8"
    formato$ = "SADM"
Case "9"
    formato$ = "PLIN"
Case "10"
    formato$ = "PLOG"
Case "11"
    formato$ = "POL"
Case "12"
    formato$ = "MLIN"
Case "13"
    formato$ = "SWR"
Case "14"
    formato$ = "REAL"
Case "15"
    formato$ = "IMG"
Case "16"
    formato$ = "UPH"
Case Else
    formato$ = "PLIN"
End Select

StartVal$ = UserForm4.TextBox3.Text
StopVal$ = UserForm4.TextBox4.Text
Nop$ = UserForm4.TextBox5.Text
FIBW$ = UserForm4.TextBox7.Text
Aver$ = UserForm4.TextBox8.Text
av = Aver$

Call calcVentanas

bueno = True
```

```
If ventV = 1 Then
  If ventH = 1 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1")
  ElseIf ventH = 2 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D12")
  ElseIf ventH = 3 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D123")
  ElseIf ventH = 4 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1234")
  Else
    bueno = False
  End If

ElseIf ventV = 2 Then
  If ventH = 1 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1_2")
  ElseIf ventH = 2 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D12_34")
  ElseIf ventH = 3 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D123_456")
  ElseIf ventH = 4 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1234_5678")
  Else
    bueno = False
  End If

ElseIf ventV = 3 Then
  If ventH = 1 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1_2_3")
  ElseIf ventH = 2 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D12_34_56")
  ElseIf ventH = 3 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D123_456_789")
  Else
    bueno = False
  End If

ElseIf ventV = 4 Then
  If ventH = 1 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D1_2_3_4")
  ElseIf ventH = 2 Then
    y = SendCommand_ENA(":DISP:SPL D12_34_56_78")
  Else
    bueno = False
  End If
Else
  bueno = False
End If

If bueno Then

  y = SendCommand_ENA(":SENS:MULT1:DISP ON")
  Call opc_ENA

  y = SendCommand_ENA(":SENS:MULT1:STAT ON")
  Call opc_ENA

  For R = 1 To ventT
    RR$ = R
    If (R Mod ventH) = 0 And Not traz Then
      y = SendCommand_ENA(":CALC" + RR$ + ":PAR:COUN 1")
    Else
```

## Anexos. Principales funciones utilizadas

```
        y = SendCommand_ENA(":CALC" + RR$ + ":PAR:COUN 2")
    End If

Next R

For R = 1 To ventT
    RR$ = R
    y = SendCommand_ENA(":INIT" + RR$ + ":CONT ON")
Next R

For R = 1 To ventT
    RR$ = R
    y = SendCommand_ENA(":INIT" + RR$ + ":CONT OFF")
Next R

For R = 1 To ventT
    RR$ = R
    If Not traz And (R Mod ventH) = 0 Then
        N = 1
    Else
        N = 2
    End If
    For l = 1 To N
        LL$ = l
        If l = 1 Then
            SS$ = "S21"
        Else
            SS$ = "S31"
        End If

        y = SendCommand_ENA(":CALC" + RR$ + ":PAR" + LL$ + ":SEL")
        y = SendCommand_ENA(":CALC" + RR$ + ":PAR" + LL$ + ":DEF " +
SS$)

        y = SendCommand_ENA(":CALC" + RR$ + ":FORM " + formato$)
    Next l
    ' seleccionar la traza 1 de la ventana 1
    y = SendCommand_ENA(":SENS" + RR$ + ":FREQ:STAR " + StartVal$)
    y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":FREQ:STOP " + StopVal$)
    y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":SWE:POIN " + Nop$)
    y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":BAND " + FIBW$)
    y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":CORR:STAT ON")

    If av = 0 Then
        y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":AVER OFF")
    Else
        y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":AVER ON")
        y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":AVER:COUN " + Aver$)
        y = SendCommand_ENA("SENS" + RR$ + ":AVER:CLE")
    End If
    ' establece el formato fijado anteriormente

Next R

C = 1
For A = 1 To ventV
    For B = 1 To ventH
        C1$ = C
        B1$ = B
        y = SendCommand_ENA("SENS" + C1$ + ":MULT1:TSET9:PORT3 R" +
```

## Anexos. Principales funciones utilizadas

---

```
B1$)
        y = SendCommand_ENA("SENS" + C1$ + ":MULT1:TSET9:PORT4 R" +
B1$)
        C = C + 1
    Next B
Next A

    mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
    UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Configuración
realizada"
Else
    mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
    UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Configuarión no válida"

End If
    Call CloseConnection_ENA
    Call EndIt

End Sub
```

### *Preset*

Esta función se encarga de enviar el comando oportuno para que se produzca un reset en el analizador de redes:

```
Sub preset ()

    Dim x As Long
    Dim y As Long
    Dim mensaj As String

    Call StartIt
    Call get_hostnameENA

    y = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)
    y = SendCommand_ENA(":SYST:PRES")

    mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
    UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Preset realizado"

    Call CloseConnection_ENA

    Call EndIt

End sub
```

### *Autoscale*

La objetivo de esta función es el de realizar un escalado automático de las medidas que se han tomado en el analizador de redes.

```
Sub autoscale ()
```

## Anexos. Principales funciones utilizadas

```
Dim x As Long
Dim y As Long
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim mensaj As String

    Call StartIt
    Call get_hostnameENA

y = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)
For i = 1 To 8
    For j = 1 To 2
        ii$ = i
        jj$ = j
        y = SendCommand_ENA(":DISP:WIND" + ii$ + ":TRAC" + jj$ +
":Y:AUTO")
    Next j
Next i
mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Autoescale realizado"
    Call CloseConnection_ENA
    Call EndIt

End Sub
```

### *miCalibracion*

Esta función es utilizada cuando queremos cargar una configuración que anteriormente había sido almacenada.

```
Sub miCalibracion()
    Dim mensaj As String

    Call StartIt
    Call get_hostnameENA

y = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)

archivo$ = UserForm3.TextBox1.Text

y = SendCommand_ENA(":MMEM:LOAD:STAT " + """" + archivo$ + ".sta" +
""")

mensaj = UserForm1.TextBox4.Text
UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Cargado archivo de
configuración"
    Call CloseConnection_ENA
    Call EndIt

End Sub
```

### *GuardCalib*

Cuando queremos guardar la calibración que estamos utilizando en ese momento, esta es la función que debemos utilizar.

```
Sub GuardCalib()  
    Dim mensaj As String  
  
    Call StartIt  
    Call get_hostnameENA  
  
    y = OpenSocket_ENA(HostnameENA$, ScpiPort)  
  
    archivo$ = UserForm5.Text1.Text  
    directorio$ = UserForm5.Text2.Text  
  
    If UserForm5.Check1.value = Checked Then  
        y = SendCommand_ENA(":MMEM:MDIR " + "" + directorio$ + "")  
    End If  
  
    y = SendCommand_ENA(":MMEM:STOR:STAT " + "" + directorio$ + "/" +  
    archivo$ + ".sta" + "")  
  
    mensaj = UserForm1.TextBox4.Text  
    UserForm1.TextBox4.Text = mensaj & vbCrLf & "Guardado archivo de  
    configuración"  
    Call CloseConnection_ENA  
    Call EndIt  
  
End Sub
```

## Bibliografía

[Agile]: [www.agilent.es](http://www.agilent.es)

[Chr04]: Christine Kuhnert, Christian Waldschmidt, Werner Wiesbeck. “*Quality Measures for MIMO Antenna Array*”. Institut für Höchsthfrequenz-technik und Elektronik (IHE). Universität Karlsruhe (TH), September 2004.

[CoGPI]: Agilent 82357A User’s Guide

[CoWLA]: Guía de inicio rápido de la tarjeta de red D-Link DWL-120+

[Dev86]: Devarsirvatham, D. M. J., “Time delay Spread and Signal Level Measurements of 850 MHz Radio Waves in Building Environments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 2, pp. 1300-1305, November 1986

[Digit]: “Digital wireless communications using MIMO link: applications to broadband mobile systems” Overview by professor David Gesbert, [http://www.ifi.uio.no/%ACgesbert/mimo\\_research.html](http://www.ifi.uio.no/%ACgesbert/mimo_research.html)

[Dix84]: Dixon, R. C., *Spread Spectrum System*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons, New York, 1984

[Fos96]: “Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas” G. J. Foschini, Bell Labs. Tech. Journal, Vol. 1, No 2, Autumn 1996, pp 41-59

[Fos98]: “On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas” G. J. Foschini and M. J. Gans, *Wireless Personal Communications*, Vol. 6, No 3, March 1998, pp 311-335

[Ges03]: D. Gesbert, M. Shafi, D-S Shiu, P. Smith and A. Naguib, “From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No.3, April 2003

[Mol02]: “Capacity of MIMO systems Based on Measured Wireless Channels” A. F. Molisch, M. Steinbauer, M. Toeltsch, E. Bonek and R. S. Thomä, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, No 3, April 2002, pp 561-569

**[ProCe]:** “Implementación de un Sistema de Medidas para Canales MIMO”, Proyecto fin de carrera. Javier Celdrán Blaya. 2004

**[ProGF]:** “Caracterización del Canal Radio a 2.4 GHz en una Esquina Difractora y en un Pasillo para Sistemas Multiantena”, Proyecto fin de carrera. Óscar Gascón Francés. 2005

**[ProGZ]:** “Caracterización del Canal Radio a 2.4 GHz en un laboratorio y en un pequeño túnel para Sistemas Multiantena”, Proyecto fin de carrera. Alberto García Zapata. 2005

**[Rab97]:** “Comunicaciones Móviles”, José María Hernando Rábanos, Editorial centro de estudios Ramón Areces, S.A. 1997

**[Rap02]:** “Wireless Communications, Principles and practice”, Second edition. Theodore S. Rappaport. Prentice Hall. 2002

**[Ros96]:** “Instrumentación de comunicaciones” Vicent Miquel Rodrigo Peñarrocha. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). 96.139, 1996

**[Sha48]:** C. E. Shannon. “*A Mathematical Theory of Communication*”. Bell System technical journal, Vol.27, pp.379- 423 and 623-656, July and October, 1948.

**[Win87]:** “On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment” J. Winters, IEEE journal of selected areas in communication vol. SAC-5 June 1987, pp 871-878



## **Agradecimientos**

- A Alberto García Zapata y a Óscar Gascón Francés por su ayuda con las pruebas prácticas del programa.
- A José María Molina García-Pardo por su ayuda en el desarrollo del proyecto.
- A Rubén Ibernón Fernández por su aportación de ideas al proyecto.