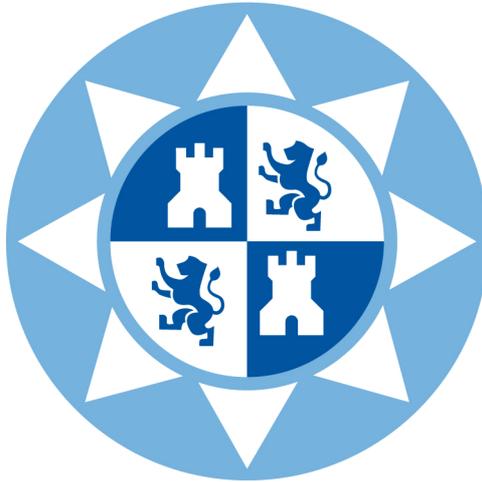


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



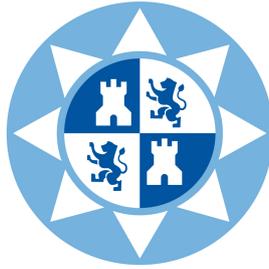
Proyecto Fin de Carrera

# **Desarrollo de una aplicación para el control remoto de un equipo de medidas en el tiempo para sistemas MIMO de banda ancha**



AUTOR: Eduardo Alonso Sánchez  
DIRECTOR(ES): José María Molina García-Pardo  
Concepción García Pardo

Marzo / 2010



<b>Autor</b>	Eduardo Alonso Sánchez
<b>E-mail del Autor</b>	edualonso82@hotmail.com
<b>Director(es)</b>	José María Molina García-Pardo, Concepción García Pardo
<b>E-mail del Director</b>	josemaria.molina@upct.es, conchi.gpardo@upct.es
<b>Codirector(es)</b>	
<b>Título del PFC</b>	Desarrollo de una aplicación para el control remoto de un equipo de medidas en el tiempo para sistemas MIMO de banda ancha.
<b>Descriptor(es)</b>	Sistemas de banda ancha, medida del canal radio, sistemas MIMO
<p><b>Resumen</b></p> <p>Los sistemas multiantena o MIMO son considerados como una de las tecnologías inalámbricas más prometedoras. Sin embargo, el estudio del canal de propagación es clave para el diseño y desarrollo de los sistemas de transmisión que usan este medio, por lo que las medidas del canal y su caracterización son fundamentales para desarrollar modelos que lo describan. Existen en la literatura numerosas propuestas para medir el canal MIMO en banda ancha, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.</p> <p>El objetivo del proyecto es el desarrollo de una aplicación para la automatización de todo un sistema de medidas en el tiempo encargado de caracterizar el canal radio para sistemas con múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO). Una vez conseguido esto, se realizarán tandas de medidas para estudiar las características típicas del canal MIMO en banda ancha, y así poder compararlas con los resultados que se obtienen con el anterior sistema.</p>	
<b>Titulación</b>	Ingeniero de Telecomunicaciones
<b>Intensificación</b>	Planificación y Gestión de Telecomunicaciones
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Marzo- 2010

# Índice General

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1    PRESENTACIÓN .....	8
1.2    OBJETIVOS.....	10
<b>CAPÍTULO 2. TEORÍA DEL CANAL RADIO .....</b>	<b>11</b>
2.1    DEFINICIÓN ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS .....	11
2.2    FENÓMENOS QUE AFECTAN A LAS ONDAS DE RADIO .....	13
2.2.1 <i>Dispersión</i> .....	13
2.2.2 <i>Difracción</i> .....	13
2.2.3 <i>Refracción</i> .....	13
2.2.4 <i>Reflexión</i> .....	14
2.3    DIFERENTES MODOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE RADIO: .....	14
2.3.1 <i>Propagación por onda directa</i> .....	14
2.3.2 <i>Propagación por onda terrestre</i> .....	15
2.3.3 <i>Propagación por onda refractada o ionosférica</i> .....	15
2.3.4 <i>Propagación por difracción ionosférica</i> .....	16
2.3.5 <i>Otras</i> .....	17
2.4    COCEPTOS RADIO.....	17
2.4.1 <i>Variabilidad temporal</i> .....	17
2.4.2 <i>Desvanecimiento rápido</i> .....	18
2.4.3 <i>Desvanecimiento lento</i> .....	18
2.4.4 <i>Dispersión Temporal</i> .....	18
2.4.5 <i>Perfil de retardo</i> .....	19
2.4.6 <i>RMS Delay Spread</i> .....	20
2.5    SISTEMAS MIMO .....	20
2.5.1 <i>Introducción</i> .....	20
2.5.1.1    SISO .....	21
2.5.1.2    MISO.....	22
2.5.1.3    SIMO.....	23
2.5.1.4    MIMO .....	23
2.5.2 <i>Funciones de los Sistemas MIMO</i> .....	25
2.5.2.1    Precodificación o array:.....	25
2.5.2.2    Multiplexado espacial:.....	26
2.5.2.3    Técnicas por Diversidad de codificación:.....	26
2.5.3 <i>Múltiples Usuarios (MU-MIMO)</i> .....	28
2.5.3.1    MIMO en el estándar IEEE 802.16 – Wimax .....	28
2.5.3.2    MIMO en el estándar IEEE 802.11n.....	28

2.5.3.3	MIMO en el estándar IEEE 802.20 .....	29
2.5.3.4	MIMO en el 3GPP .....	29
2.5.3.5	PU2RC (Per-User Unitary Rate Control):.....	29
2.5.3.6	SDMA (Spatial-Division Medium Access):.....	30
2.5.4	<i>Aplicaciones de los Sistemas MIMO</i> .....	30
2.6	SISTEMAS DE MEDIDAS DEL CANAL RADIO .....	30
2.6.1	<i>Introducción</i> .....	30
2.6.2	<i>Sistemas de Medida del Canal SISO:</i> .....	31
2.6.3	<i>Sistemas de Medida del Canal MIMO</i> .....	34
2.6.4	<i>Sistemas de Medida MIMO en Frecuencia desarrollado por SICOMO</i> .....	36
2.6.4.1	Equipos de Medidas .....	36
2.6.4.2	Software .....	37
2.6.4.3	Resumen:.....	38
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMA DE MEDIDAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....</b>		<b>39</b>
3.1	INTRODUCCIÓN.....	39
3.2	EQUIPOS DE MEDIDAS .....	41
3.2.1	<i>Generador en banda base Agilent 81150A</i> .....	41
3.2.2	<i>Modulador I/Q R&amp;S SMATE200A</i> .....	41
3.2.3	<i>Amplificador Mini Circuits ZVE-8G</i> .....	42
3.2.4	<i>Antenas omni-direccionales EM-6116:</i> .....	43
3.2.5	<i>Osciloscopio Agilent Infiniium 90808A:</i> .....	44
3.2.6	<i>Analizador de Redes</i> .....	45
3.2.7	<i>Adaptador USB Wireless N Dualband DWA-160 D-Link</i> .....	45
3.2.8	<i>Ordenador Portátil HP Mini</i> .....	46
3.2.9	<i>Cable GPIB/USB</i> .....	47
3.3	INTERCONEXIÓN DE LOS EQUIPOS: .....	47
3.4	CONFIGURACIONES PREVIAS.....	49
<b>CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DESARROLLADA PARA EL CONTROL REMOTO.....</b>		<b>50</b>
4.1	ENTORNO VISUAL BASIC.....	50
4.2	COMANDOS SCPI .....	51
4.3	EL SOFTWARE:.....	51
4.3.1	<i>Puesta en marcha:</i> .....	52
4.3.2	<i>Pantalla Principal:</i> .....	53
4.3.3	<i>Pantalla de Configuración de Otros Parámetros</i> .....	56
4.3.4	<i>Comienzo de la Tanda de Capturas</i> .....	59
4.4	CONSIDERACIONES DE LAS CONFIGURACIONES .....	59
4.4.1	<i>Relación entre Ancho de Banda y Frecuencia de Modulación de la señal</i> .....	59
4.4.2	<i>Eliminación de las Pérdidas de Inserción mediante Infiniisim</i> .....	61
4.4.3	<i>Ancho de Banda y Frecuencia de Muestreo</i> .....	68

4.4.4	<i>Almacenar Nuevas Formas de Onda</i> .....	69
4.5	PRINCIPALES DIFERENCIAS CON EL ANTERIOR SISTEMA DE MEDIDAS .....	70
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS</b> .....		<b>72</b>
5.1	MONTAJE Y CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDAS .....	72
5.2	RESULTADOS OBTENIDOS .....	74
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b> .....		<b>76</b>
6.1	CONCLUSIONES EXTRAIDAS.....	76
6.2	DIFICULTADES DEL PROYECTO .....	76
6.3	LÍNEAS FUTURAS.....	76
<b>ANEXO I.</b>	<b>CONFIGURACIÓN RED WIFI</b> .....	<b>78</b>
<b>ANEXO II.</b>	<b>CAPTURAS EN FORMATOS ‘.BIN’ O ‘.CSV’</b> .....	<b>83</b>
<b>ANEXO III.</b>	<b>SECUENCIAS PSEUDOALEATORIAS</b> .....	<b>87</b>
<b>ANEXO IV.</b>	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	.....	<b>94</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Evolución número de líneas en Telefonía Móvil [1].....	8
Figura 2.1 - Bandas de frecuencias del espectro electromagnético [6].....	11
Figura 2.2 - Propagación de RF con línea de vista [7].....	15
Figura 2.3 - Propagación de RF sobre la superficie de la tierra [7]. ....	15
Figura 2.4 - Propagación de RF por medio de refracción en la ionosfera [7].....	16
Figura 2.5 - Efecto de la difracción de una señal de RF en la ionosfera [7]. ....	16
Figura 2.6 - Evolución Sistemas MIMO [9]. ....	21
Figura 2.7 - SISO, SIMO, MISO y MIMO [9].....	21
Figura 2.8 - Esquema de un sistema SISO [2]. ....	22
Figura 2.9 - Esquema de un sistema MISO [2].....	22
Figura 2.10 - Esquema de un sistema SIMO [2].....	23
Figura 2.11 - Subcanales generados por Sistema MIMO [11]. ....	24
Figura 2.12 - Ejemplo de ganancia por diversidad en recepción [11]. ....	27
Figura 2.13 - Ejemplo de Ganancia de Diversidad y Array [11]. ....	27
Figura 2.14 - Direct RF Pulse System [15].....	31
Figura 2.15 - Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding [15]. ....	32
Figura 2.16 - Frequency Domain Channel Sounding [15].....	33
Figura 2.17 - Sistema Medida MIMO Conmutación Completo [18].....	35
Figura 2.18 - Sistema Medida MIMO Paralelo Completo [18]. ....	36
Figura 2.19 - Software de Medida MIMO. SICOMO 1.0 [14].....	37
Figura 3.1 - Esquema de Procesado de Datos .....	39
Figura 3.2 - Generador Banda Base Agilent 81150A [20].....	41
Figura 3.3 - Modulador R & S <sup>®</sup> SMATE200A [21]. ....	41
Figura 3.4 - Amplificador Mini Circuits ZVE-8G [22].....	42
Figura 3.5 - Antena omni-direccional EM-6116 [23] .....	43
Figura 3.6 - Osciloscopio Infiniium 90808A [24].....	44
Figura 3.7 - Analizador de Redes ENA 5071B [26].....	45
Figura 3.8 - Adaptador USB Wireless. [27] .....	45
Figura 3.9 - Portátil HP.....	46
Figura 3.10 - Cable GPIB/USB .....	47
Figura 3.11 - Esquema de Interconexión de Equipos. ....	48

Figura 3.12 - Modulador R&S SMATE200A – Vista Trasera.....	48
Figura 4.1 - Diagrama de Bloque del Funcionamiento del Programa .....	52
Figura 4.2 - Pantalla principal una vez configurados los equipos. ....	53
Figura 4.3 - Dirección del archivo $S_{21}$ en el osciloscopio. ....	54
Figura 4.4 - Resumen de la Configuración de los equipos. ....	55
Figura 4.5 - Ventana de Ayuda del Software de Medidas del Canal MIMO.....	56
Figura 4.6 - Pantalla secundaria, Configuración Otros Parámetros. ....	57
Figura 4.7 - Software en plena Captura de Señales .....	59
Figura 4.8 - Ejemplo de Código.....	60
Figura 4.9 - Señal en Banda Base.....	60
Figura 4.10 - Señal Modulada por Coseno. ....	60
Figura 4.11 - Obtención de la Función de Transferencia. ....	61
Figura 4.12 - Matriz de Parámetros-S.....	62
Figura 4.13 - Dispositivo de 2 puertos [31]. ....	62
Figura 4.14 - Macro SaveToTouchstone de VB.....	63
Figura 4.15 - Channel Setup.....	65
Figura 4.16 - InfiniiSim Setup.....	65
Figura 4.17 - Infiniisim Model Setup. ....	66
Figura 4.18 - Modelo para eliminación de efectos de Infiniisim .....	66
Figura 4.19 - Setup del Bloque de Infiniisim.....	67
Figura 4.20 - Ejemplo de Función de Transferencia aplicada por Infiniisim .....	68
Figura 4.21 - Tabla de Frecuencias de Muestreo .....	69
Figura 4.22 - Almacenar o Eliminar códigos del Generador.....	70
Figura 5.1 - Esquema del Montaje para las Medidas .....	72
Figura 5.2 - Sistema Transmisor .....	73
Figura 5.3 - Sistema Receptor.....	73
Figura 5.4 - Función de Transferencia del Canal. Tiempo vs. Frecuencia .....	74
Figura 5.5 - Gráfica de las componentes de la Matiz $H(\tau)$ .....	75

## Índice de Figuras Anexos

Figura Anexo 1 - Conexiones de red .....	78
Figura Anexo 2 - Direcciones de red .....	78
Figura Anexo 3 - Propiedades red inalámbrica .....	79
Figura Anexo 4 - Propiedades nueva red.....	79
Figura Anexo 5 - Conexiones Automática a la red.....	80
Figura Anexo 6 - Propiedades de Conexión.....	81
Figura Anexo 7 – Opción ‘Advanced’ del Adaptador WIFI .....	81
Figura Anexo 8 - Desactivar Banda de Tarjeta WIFI del Portatil .....	82
Figura Anexo 9 - Preferencia de Banda de Tarjeta WIFI del Portatil.....	82
Figura Anexo 10 - Interconexión Equipos mediante Switch.....	82
Figura Anexo 11 - Capturas guardadas en .BIN y .CSV .....	84
Figura Anexo 12 - Autocorrelación y Correlación Cruzada de las Secuencias Pseudoaleatorias [37].....	88
Figura Anexo 13 - Generador MS [36] .....	88
Figura Anexo 14 - Formación de los Códigos LS [38].....	89
Figura Anexo 15 - Autocorrelación Códigos LS [38] .....	90
Figura Anexo 16 - Correlación Cruzada Códigos LS [38].....	90
Figura Anexo 17 - Autocorrelación Codigos MS .....	91
Figura Anexo 18 - Autocorrelación Codigos Kasami.....	91
Figura Anexo 19 - Autocorrelación Codigos LS.....	91
Figura Anexo 20 - Correlación Cruzada MS .....	91
Figura Anexo 21 - Correlación Cruzada Kasami.....	91
Figura Anexo 22 - Correlación Cruzada LS.....	92

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Presentación

La industria de las comunicaciones móviles ha experimentado en los últimos años un crecimiento espectacular tanto en términos del número de abonados como de la cantidad de tráfico. Atendiendo a la evolución del número de líneas en telefonía móvil del Informe de la CMT de 2008, vemos en la Figura 1.1 que sigue una tendencia alcista:

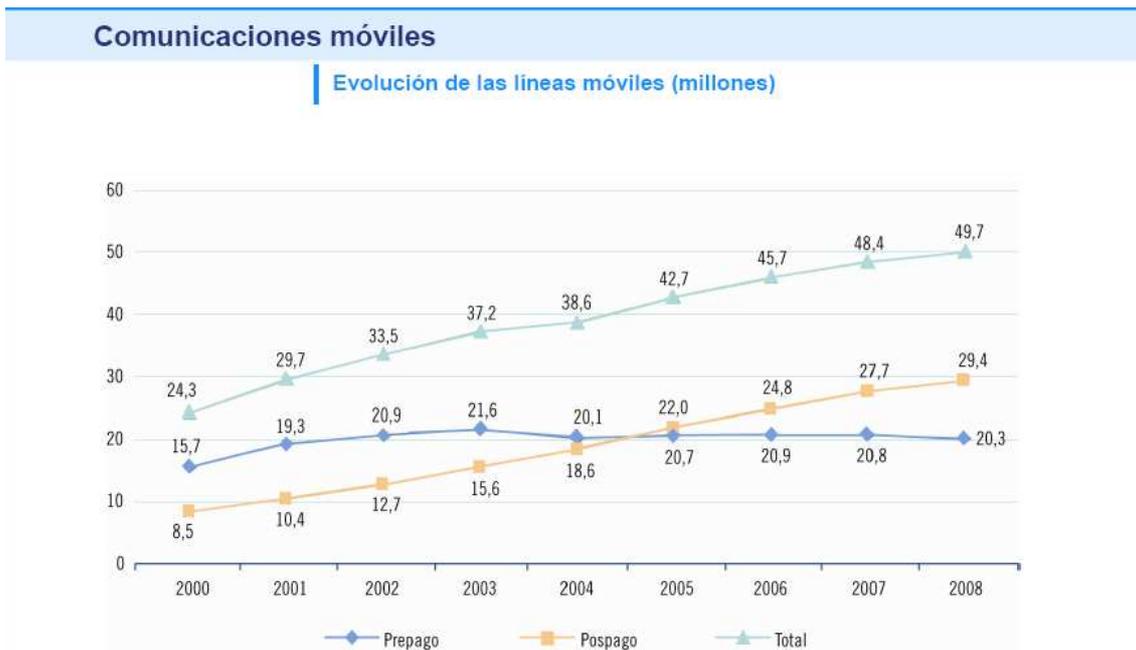


Figura 1.1 - Evolución número de líneas en Telefonía Móvil [1].

Los actuales sistemas de comunicación inalámbricos de Tercera Generación (3G) deben soportar distintos servicios con tasas de transferencia de 144 Kb/s en redes móviles y hasta 2 Mb/s en redes inalámbricas para entornos de propagación en interiores o en aplicaciones picocelulares. Las tasas de transferencia que se exigirían a los futuros sistemas (4G), serán previsiblemente mucho más elevadas [2], velocidades de acceso entre 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo.

En la siguiente tabla se puede ver el incremento de la tasa de transferencia en función del protocolo utilizado en comunicaciones móviles:

Estándar	Generación	Banda de frecuencia	Rendimiento
GSM	G2	Permite la transferencia de voz o datos digitales de bajo volumen.	9,6 kbps
GPRS	G2.5	Permite la transferencia de voz o datos digitales de volumen moderado.	21,4 a 171,2 kbps
EDGE	G2.75	Permite la transferencia simultánea de voz	43,2 a 345,6 kbps

		y datos digitales.	
<b>UMTS</b>	G3	Permite la transferencia simultánea de voz y datos digitales a alta velocidad.	144 a 2 Mbps
	4G	Tecnología basada en IP. Convergencia entre las redes de cables e inalámbricas	100Mbps-1Gbps

Tabla 1.1 - Evolución Tasa de Transferencia Telefonía Móvil [3].

Además, añadir la creciente aplicación de las redes inalámbricas de área local (WLAN), requiere un constante desarrollo de técnicas de transmisión, protocolos y tecnología que permitan cada vez mayor capacidad de servicios de comunicación en un medio de transmisión hostil y de espectro limitado, como es el canal inalámbrico con propagación multicamino. El conocimiento de las características del canal de propagación es clave para el diseño y desarrollo de los sistemas de transmisión que usan este medio, por lo que las mediciones del canal y su caracterización es fundamental para desarrollar modelos que describan adecuadamente los distintos escenarios de aplicación y permitan por ejemplo evaluar desarrollos por simulación.

Dada la naturaleza cambiante del canal inalámbrico multicamino, es necesario evaluar parámetros en forma estadística, como son el tiempo de coherencia y el ancho de banda de coherencia, características que cuantifican fenómenos que son independientes ya que por una parte el tiempo de coherencia da una medida de cuán rápido cambia el canal, y por otra parte el ancho de banda de coherencia indica una medida de cuán dispersa temporalmente es la propagación en el medio [4].

El diseño de estos futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos que doten al usuario de servicios de alta velocidad se planifica actualmente con el uso de frecuencias portadoras cada vez mayores, a la vez que grandes anchos de banda. A esas frecuencias las pérdidas de propagación serán superiores a las de los sistemas inalámbricos de segunda generación, y en consecuencia, una cobertura geográfica efectiva implicará una mayor densidad de estaciones base (o puntos de acceso) con el consiguiente incremento en coste de las infraestructuras. Ese aumento de densidad provocará además una oferta de ancho de banda por  $\text{km}^2$  que muy probablemente no será cubierta, si atendemos a pronósticos realistas de demanda. Para remediar esta situación, es necesario diseñar nuevos esquemas de transmisión que sean capaces de superar el compromiso entre cobertura y velocidad de transmisión.

Para ello, recientemente se han considerado nuevos métodos y esquemas para hacer uso de la diversidad espacial del canal, tales como el uso de antenas inteligentes. En la actualidad, la generación de antenas inteligentes más avanzada la constituyen los sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output), los cuales se basan en una configuración donde múltiples elementos radiantes se distribuyen en el transmisor y en el receptor. Existen gran cantidad de estudios que muestran el incremento en capacidad que se puede obtener gracias al uso de múltiples elementos de antena a ambos lados del enlace, así como la notable eficiencia espectral de estos sistemas MIMO. Esto ha llevado a un creciente interés en dichos sistemas.

Por otro lado, para evaluar las prestaciones de estos sistemas en un entorno real, es deseable contar con prototipos y sistemas de medida MIMO reales. Las

medidas de canal y posterior procesamiento de las mismas permiten analizar las características del mismo así como obtener la capacidad de estos sistemas. Además, el hecho de utilizar unos u otros algoritmos MIMO puede permitir aprovechar en mayor o menor medida las características de diversidad del canal [5].

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es el desarrollo de una aplicación para la automatización de todo un sistema de medidas en el tiempo, basado en un generador de señal en banda base, un modulador I/Q y un osciloscopio, en el que estos equipos serán controlados de forma remota. Dicho sistema será el encargado de caracterizar el canal radio para sistemas con múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO). Al automatizar todo el proceso de toma de medidas mediante un software que controle todos los equipos se está en disposición de realizar tandas de medidas más intensivas y rápidas, pudiendo así caracterizar más apropiadamente el canal y así obtener resultados antes que lo haría el anterior sistema de medidas basados en caracterización del medio en frecuencia que resultaba bastante lento y por lo que se a propuesto este nuevo sistema.

El siguiente paso en nuestro proyecto será la realización de tandas de medidas para estudiar características típicas del canal MIMO en banda ancha, y así poder compararlas con los resultados que se obtienen con el anterior sistema. Los datos obtenidos en las tandas de medias serán procesadas con programas desarrollados en Matlab para tal efecto.

## Capítulo 2. Teoría del Canal Radio

### 2.1 Definición Ondas Electromagnéticas

La señales u ondas que vamos a transmitir se propagarán por el espacio libre, estas ondas de radio frecuencia son ondas electromagnéticas, ondas que se propagan por el espacio libre a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s (velocidad de la luz), aunque algunas características de ésta provocan que no sea considerada como espacio libre estrictamente. La atmósfera normalmente genera pérdidas en las ondas transmitidas.

La siguiente ecuación muestra como calcular la longitud de onda para diferentes rangos de frecuencias [6].

$$\lambda = \text{Velocidad de propagación} / \text{Frecuencia} \quad (2.1)$$

Donde:

- $\lambda$  es la longitud de onda expresada en metros.
- Velocidad de propagación expresada en metros/segundo.
- Frecuencia expresada en Hertzios.

En la Figura 2.1 se pueden ver las bandas de Frecuencias existentes en el espectro electromagnético, además las longitudes de onda y ciertas características de éstas.

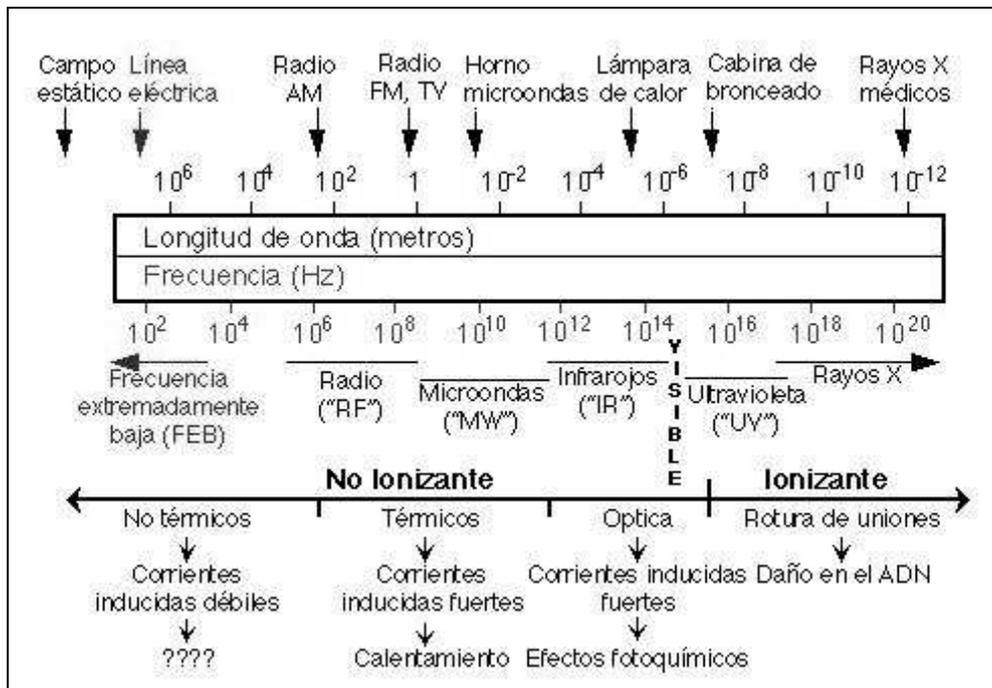


Figura 2.1 - Bandas de frecuencias del espectro electromagnético [6].

Las ondas electromagnéticas se pueden propagar dentro y fuera de la atmósfera, cuando las ondas se propagan dentro de la atmósfera se les puede llamar ondas terrestres u ondas espaciales, este tipo de clasificación es dependiente de las bandas de frecuencias que se está utilizando. Cada banda de frecuencias tiene designada aplicaciones para la que pueden llegar a ser utilizada. A cada de una de éstas bandas les corresponden tipos de transmisión distintos. El otro tipo de ondas son las llamadas ondas celestes, éstas se transmiten sobre el nivel del horizonte, con ángulos normalmente grandes con respecto a la tierra, se transmiten hacia el cielo donde son refractadas o reflejadas hacia la superficie terrestre por la ionosfera [6].

La tabla 2.1 muestra como están divididas las bandas de Radio Frecuencias y sus longitudes de onda.

<b>Frecuencia</b>	<b>Denominación</b>	<b>Longitud de onda</b>
3 – 30 Khz	VLF Frecuencia muy baja	100,000 – 10,000 m
30 – 300 Khz	LF Frecuencia baja	10,000 – 1000 m
300 – 3000 Khz	MF Frecuencia media	1000 - 100 m
3 – 30 Mhz	HF Frecuencia alta	100 – 10 m
30 – 300 Mhz	VHF Frecuencia muy alta	10 – 1 m
300 – 3000 Mhz	UHF Frecuencia Ultra elevada	1 m – 10 cm
3 – 30 Ghz	SHF Frecuencia Superelevada	10 – 1 cm
30 – 300 Ghz	EHF Frecuencia Extremadamente alta	1 cm – 1 mm

**Tabla 2.1** División del espectro electromagnético y longitudes de onda [6].

Las ondas de radio por ser ondas electromagnéticas, poseen una componente eléctrica y una componente magnética y como tales, están expuestas a ciertos fenómenos los cuales son capaces de modificar el patrón de propagación de las ondas.

En condiciones especiales y con una atmósfera uniforme, las ondas de radio tienden a desplazarse en línea recta, esto quiere decir que siempre que haya una línea de vista entre el emisor y el receptor, este tipo de comunicación será bastante eficiente, pero si se requiere de una comunicación de un punto a otro, el cual se encuentra más allá del horizonte, tendremos que tomar en cuenta las distintas condiciones de propagación y las adecuadas frecuencias para su correcta comunicación. Para realizar comunicaciones seguras entre dos puntos lejanos y sin salir de la atmósfera, se utilizan frecuencias denominadas altas frecuencias (High frequency) ó HF que van de 3 Mhz a los 30 Mhz, ya que estas frecuencias son reflejadas en la atmósfera y regresan a la tierra a grandes distancias. Las frecuencias en orden de VHF, UHF Y SHF no se reflejan en la atmósfera salvo en ciertas circunstancias, es por esto que solo son útiles en comunicaciones de punto a punto y satelitales.

No se podría hablar de comunicación por medio de ondas de radio a grandes distancias si no se toman ciertos fenómenos en cuenta como lo son la refracción, reflexión, dispersión y difracción los cuales hacen posible la comunicación entre dos puntos más allá del horizonte [7].

## 2.2 Fenómenos que afectan a las Ondas de radio

Pasamos a explicar algunos de estos fenómenos:

### 2.2.1 *Dispersión.*

El efecto de dispersión es un fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia que ocurre cuando las ondas de radio golpean contra una superficie rugosa/áspera o atraviesan alguna masa de electrones o pequeñas gotas de agua en áreas suficientemente grandes [7]. Todos los medios materiales son más o menos dispersivos, y la dispersión afecta a todas las ondas.

### 2.2.2 *Difracción.*

Se puede entender a la difracción como el esparcimiento de las ondas en los límites de una superficie, esto quiere decir que para que exista la difracción tiene que haber un obstáculo, así es como este fenómeno permite que parte de la señal llegue al otro lado del objeto. Este fenómeno es de gran utilidad para las zonas de sombra de señal que pueden ser producidas por grandes edificios o montañas.

### 2.2.3 *Refracción:*

Las ondas de radio están expuestas a sufrir una desviación en su trayectoria cuando atraviesan de un medio a otro con densidad distinta, en comunicaciones este efecto sucede cuando las ondas electromagnéticas atraviesan las distintas capas de la atmósfera variando su trayectoria en un cierto ángulo. Es decir, la señal EM incide sobre un medio distinto con un ángulo de incidencia  $\theta_i$  y es transmitida dentro de éste con un ángulo de transmisión  $\theta_t$ . Por lo tanto, la refracción es parecida a la difracción en cuanto a que hay un cambio de dirección, sin embargo, la segunda es ocasionada por la presencia de un obstáculo y la primera por la transición de un medio a otro. Los ángulos involucrados en la refracción están relacionados por la ley de Refracción de Snell [6]:

$$n_1 \text{Sen } \theta_i = n_2 \text{Sen } \theta_t \quad (2.2)$$

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio en el que viaja la señal y el medio en el que se transmite la señal respectivamente.

La desviación de la trayectoria es proporcional al índice de refractividad, el cual está dado por [7]:

$$IR = \frac{V_p}{V_m} \quad (2.3)$$

IR = Índice de refractividad.

V<sub>p</sub> = Velocidad de propagación en el espacio libre.

V<sub>m</sub> = Velocidad de propagación en el medio.

### 2.2.4 Reflexión.

Las ondas de radio atraviesan las diversas capas de la atmósfera, desde la troposfera hasta la ionosfera y si los índices de refractividad de cada una de estas capas son muy diferentes. Estos distintos índices pueden llegar a producir reflexión total, siendo las frecuencias de VHF y superiores las más propensas a esta desviación de trayectoria [7].

La señal se refleja con un ángulo de reflexión ( $\theta_r$ ), el cual es igual al de incidencia ( $\theta_i$ ), esto es el enunciado de la ley de reflexión de Snell [6]:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.4)$$

A altas frecuencias tanto la reflexión como la difracción dependen de la geometría del objeto, al igual que: la amplitud, la fase y la polarización de la señal en el punto de difracción [7].

## 2.3 Diferentes Modos de Propagación de Ondas de Radio:

Como ya se dijo antes, gracias a los fenómenos de reflexión, refracción, difracción y dispersión, se pueden realizar las comunicaciones inalámbricas a grandes distancias. A continuación se mostrarán las distintas formas de comunicación que existen gracias a estos fenómenos [7].

### 2.3.1 Propagación por onda directa.

Para realizar este tipo de propagación es necesario que exista una línea de vista entre el transmisor y el receptor. En este tipo de comunicación se utilizan frecuencias por encima de los 50 Mhz. Esto se debe a que las frecuencias altas se ven menos afectadas por los fenómenos atmosféricos, además de que no requiere de antenas grandes para tener una transmisión efectiva de gran directividad, lo que provoca la

confiabilidad de que la información llegue a otro lado del transmisor, este tipo de propagación se utiliza para la televisión y la radio FM [7].

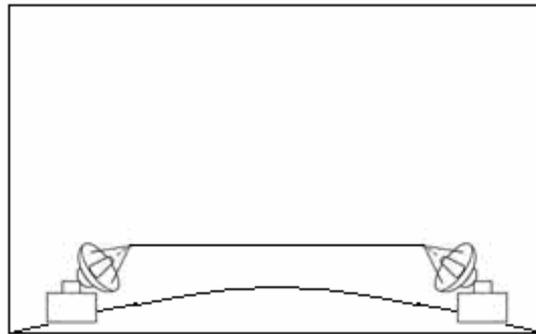


Figura 2.2 - Propagación de RF con línea de vista [7].

### 2.3.2 Propagación por onda terrestre.

Este tipo de propagación es posible gracias a la difracción. Las ondas de radio siguen la curvatura de la tierra por la cual la señal de RF es capaz de alcanzar grandes distancias antes de que la señal sea absorbida por la tierra. Gracias al efecto de la difracción la señal puede sortear edificios y montañas.

La propagación por onda terrestre solo es útil para frecuencias inferiores a los MHz, siendo ésta una de las mejores formas de transmitir una señal de RF de baja frecuencia a largas distancias. Este tipo de propagación es comúnmente usada por las radiodifusoras de media onda y de onda larga [7].

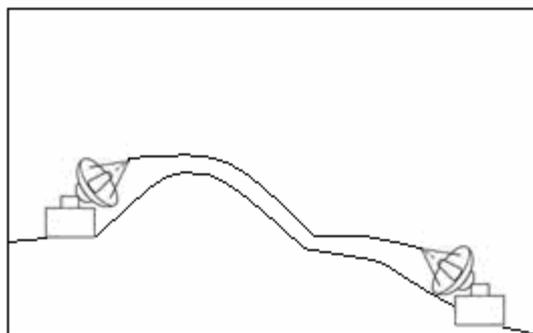


Figura 2.3 - Propagación de RF sobre la superficie de la tierra [7].

### 2.3.3 Propagación por onda refractada o ionosférica.

Ésta es una de los tipos de propagación más importantes. Aquí influirá la atmósfera como reflector y esto a su vez ocurre en la ionosfera. La ionosfera es una capa de la atmósfera que se encuentra entre los 40 Km. y 320 Km. y está formada por aire altamente ionizado por la radiación solar. Cuando esta capa se encuentra eléctricamente cargada hace que la señal comience a cambiar en un cierto ángulo, esto lo hace sucesivamente hasta que se realiza una reflexión total y la señal regresa a tierra.

Este tipo de propagación puede ser capaz de conectar dos puntos, los cuales no tienen línea de vista y se puede transmitir a una distancia de hasta 4000 Km. Si las condiciones de la atmósfera fueran adecuadas se podría conectar un punto a cualquier otro lado del planeta, esto es porque la señal refractada de la ionosfera también puede ser reflejada por la tierra y así sucesivamente. Es importante mencionar que la propagación ionosférica está determinada por la frecuencia utilizada y por el nivel de ionización de la atmósfera. Si se tiene una frecuencia grande la refracción sufrida por la misma ionosfera será menor. Se cuenta con una frecuencia establecida a utilizar a distintas horas del día para poder realizar la comunicación ionosférica, esto se conoce como Frecuencia Útil Máxima, FUM. Esto es útil para las comunicaciones satelitales, ya que si se utiliza una frecuencia mayor a la FUM, no se reflejará en la atmósfera y se disparará al espacio [7].

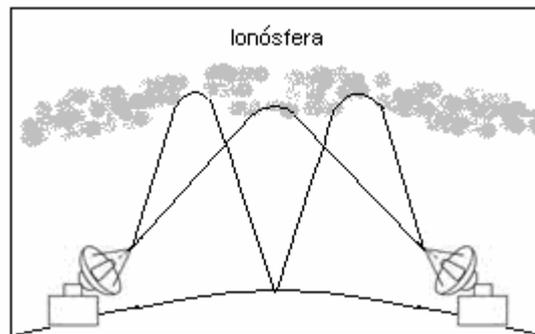


Figura 2.4 - Propagación de RF por medio de refracción en la ionosfera [7].

#### 2.3.4 Propagación por difracción ionosférica.

Este tipo de propagación se produce cuando las ondas emitidas son superiores a los 30 MHz, debido a su frecuencia la señal no será reflejada por la ionosfera, pero si será difractada, por lo que una pequeña parte de la señal llegará a tierra y solo podrá ser captada por un receptor especialmente sensible. Es por esto que este tipo de transmisión utiliza muy poco debido a su baja eficiencia. La figura 2.5 muestra el efecto de la difracción de una señal por la ionosfera [7].

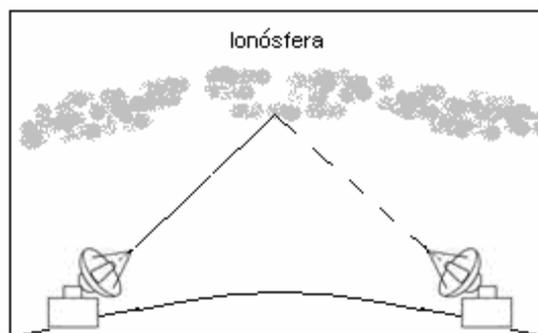


Figura 2.5 - Efecto de la difracción de una señal de RF en la ionosfera [7].

### 2.3.5 Otras

**Fenómeno de difracción ionosférica**, pero aquí la ionosfera se alimenta por el frotamiento de los meteoritos que vienen a gran velocidad del espacio exterior. Este tipo de transmisión se utiliza para comunicaciones a corta distancia y solo funciona a horas y condiciones precisas [7].

**Propagación troposférica.** La capa troposférica se encuentra entre los 11 Km. y los 16 Km. En esta capa se forman las nubes y la temperatura desciende rápidamente debido a la altura. Cuando se produce la inversión del gradiente de temperatura, se generan los denominados canales de ionización, los cuales son ideales para que las ondas de radio puedan viajar, este tipo de propagación es útil para frecuencias de VHF y UHF [7].

## 2.4 Coceptos Radio

La propagación radio se puede caracterizar mediante parámetros como Variabilidad Temporal, Fast Fading y Slow Fading, entre otros. En este apartado pasaremos a describir estos fenómenos [2].

### 2.4.1 Variabilidad temporal.

La variabilidad temporal es un efecto que sufre la señal como consecuencia de la velocidad que posea el móvil unido a la velocidad con la que varía el entorno. Este movimiento se traduce en distintas repeticiones de la señal que llegan al receptor, normalmente de menor amplitud que la señal principal [2].

La velocidad del móvil provoca un desplazamiento en frecuencia, conocido como desplazamiento Doppler, y es definido como el ancho espectral de la portadora recibida cuando una simple portadora sinusoidal es transmitida dentro de un canal de múltiples trayectorias. Es decir, cuando un transmisor o un receptor están en movimiento, la frecuencia de la portadora recibida presenta variaciones con respecto a la frecuencia de la portadora que se transmitió, produciendo de esta manera la pérdida parcial por instantes de tiempo o la pérdida completa de la señal que fue transmitida. Si la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, la frecuencia disminuye, cuando la frecuencia aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor disminuye. El máximo Corrimiento Doppler ocurre para una onda que viene desde de una dirección opuesta a la dirección de la antena en movimiento [6].

Podemos estudiar matemáticamente este efecto del siguiente modo:

$$f_i(t) = f_p \pm \frac{2\pi}{\lambda} v \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

$f_i$  : frecuencia de la señal recibida

$f_p$  : frecuencia de la portadora

$\lambda$  : longitud de onda de la señal

v: velocidad del móvil

El signo de la expresión indica si el desplazamiento se acerca o aleja del transmisor fijo.

El Corrimiento Doppler no afecta a todos los sistemas por igual puesto que, los sistemas que trabajan en las bandas de frecuencias altas son más susceptibles a estos cambios de frecuencias que ocurren en la señal transmitida, al igual que las transmisiones que se llevan a cabo a altas velocidades, es decir, el Corrimiento Doppler es directamente proporcional a las frecuencias y las velocidades con las cuales se realiza la comunicación [6].

### **2.4.2 Desvanecimiento rápido.**

La principal causa del desvanecimiento rápido es la propagación multicamino, es decir, los objetos del entorno producen reflexiones y scattering que hacen que la señal transmitida llegue en forma de múltiples repeticiones pero distorsionadas en amplitud, fase y ángulo de llegada [2]. El tiempo entre la recepción de la primera versión de la señal, y la recepción de la última copia se denomina retardo de dispersión (delay spread). Para entornos donde no hay un camino de visión directa entre emisor y receptor, la envolvente de la señal recibida sigue una distribución de Rayleigh, y en entornos donde un camino de este tipo si aparece, la distribución es la de Rice [8].

### **2.4.3 Desvanecimiento lento.**

El desvanecimiento lento (slow fading o también llamado shadow fading) ocurre cuando hay algún objeto entre el transmisor y el receptor que absorbe parcialmente la señal, y la duración del desvanecimiento puede variar entre varios segundos hasta minutos, de ahí su nombre. Este tipo de desvanecimiento es típico en entornos de interiores cuando hay una pared entre transmisor y receptor o en exteriores cuando entre ambos hay un edificio. La potencia que se recibe, variara de forma aleatoria debido al efecto de este tipo de desvanecimiento aunque la distancia entre emisor y receptor no varíe, incluso a veces hasta el punto de perder por completo la señal durante algún tiempo.

Para contrarrestar los efectos del desvanecimiento en la transmisión podemos aplicar técnicas de diversidad o modulaciones adaptativas. Los mecanismos de diversidad se basan en el hecho de que distintos caminos entre el transmisor y el receptor sufren distintos efectos de desvanecimiento, y, por tanto, si enviamos distintas partes de la señal sobre distintos canales lógicos incorrelados entre emisor y receptor podemos compensar los errores debidos al desvanecimiento. Los distintos caminos podrán ser distintos en el espacio, el tiempo, la frecuencia o la polarización. Algunos de los más importantes mecanismos de diversidad frecuencial utilizadas en las comunicaciones inalámbricas son las técnicas de espectro ensanchado por secuencia directa (direct sequence spread spectrum, DSSS) y por saltos de frecuencia (frequency hopping spread spectrum, FHSS). Las antenas deben estar espacialmente separadas una o más longitudes de onda para que no exista correlación entre las fases de las señales que sufren el desvanecimiento [8].

### **2.4.4 Dispersión Temporal.**

La dispersión temporal se produce por la propagación multicamino que sufre la señal y depende del ancho de banda que posea la señal. Antes hemos visto que la

variabilidad se correspondía con diferentes repeticiones de la señal. Ahora la dispersión se corresponde a su vez con distintas repeticiones de esas repeticiones que se producían con la variabilidad temporal.

La propagación multicamino es una causa muy clara de la dispersión temporal, pero no es la única. Otra causa que produce la dispersión temporal es el ancho de banda de la señal. Con el que se dan 2 situaciones:

- **Ancho de banda de la señal < Ancho de banda del canal**

Trabajamos en banda estrecha y podemos considerar que el canal es localmente plano en frecuencia.

En este caso la señal es estrecha en frecuencia y por lo tanto será ancha en el tiempo por lo que se deberá transmitir a una menor velocidad ya que en caso contrario la señal se solaparía. La ventaja de transmitir en banda estrecha es que los ecos de la señal no interfieren con la señal principal.

- **Ancho de banda de la señal > Ancho de banda del canal**

Trabajamos en banda ancha y por lo tanto diremos que el canal es selectivo en frecuencia.

Ahora la señal es ancha en frecuencia y por lo tanto estrecha en el tiempo. La ventaja de que la señal sea estrecha en el tiempo es que podemos transmitir a mayor velocidad que en un sistema de banda ancha con el inconveniente de que ahora el eco de la señal puede interferir haciéndose necesario el uso de ecualizadores [2].

### 2.4.5 Perfil de retardo.

El perfil del retardo de la energía (PDP) da la intensidad de una señal recibida a través de un canal de multicamino en función del tiempo. El retraso de tiempo es la diferencia en tiempo de recorrido entre las llegadas multicamino. En una gráfica los ejes serían las abscisas para el tiempo y la ordenada está generalmente en decibelios.

Es fácilmente medible y puede ser utilizada para extraer ciertos parámetros del canal tales como el Delay Spread.

Para hallar el perfil del retardo del canal se toma la respuesta al impulso del canal,  $h_b(\tau)$ , tal que:

$$\text{PDP} = |h_b(\tau)|^2 \quad (2.6)$$

Se podrá ver más sobre esto en el apartado 3.1.

### 2.4.6 RMS Delay Spread.

El RMS Delay Spread es una medida comúnmente usada para medir dispersión temporal en entornos multicamino. De hecho, se ha demostrado que el RMS Delay Spread está directamente relacionado con la mínima longitud de símbolo que se puede emplear. El ISI o interferencia entre símbolos, que viene dada como consecuencia de la propagación a través de un canal dispersivo, es un gran problema en el diseño de redes inalámbricas de alta velocidad [2].

Si el perfil de retardo es discreto (cosa que ocurre comúnmente), entonces el retardo medio queda de la siguiente manera:

$$\overline{\tau_{RMS}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P(t, \tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(t, \tau_i)} \quad (2.7)$$

donde:

$\tau_i$  : retardo de cada contribución

$P(t, \tau_i)$  : magnitud o potencia de dicha contribución.

El RMS Delay Spread lo definiremos como el momento de segundo orden del perfil de retardo:

$$\sigma_{\tau}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \tau_i^2 P(t, \tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(t, \tau_i)} - \left(\overline{\tau_{RMS}}(t)\right)^2} \quad (2.8)$$

El RMS Delay Spread es independiente del retardo medio y de la longitud del trayecto de propagación, definido únicamente por los retardos relativos. Es un buen indicador de la tasa de error del sistema para un tiempo de dispersión moderado [2]. Si  $\tau_{RMS}$  es menor que el período de símbolo de la señal, el espectro del canal se mantiene aproximadamente plano en el ancho de banda de la señal. En este caso, no se producen Interferencia Intersímbolo (ISI).

## 2.5 Sistemas MIMO

### 2.5.1 Introducción

La demanda creciente de altas velocidades de transmisión para aplicaciones avanzadas requiere de nuevas técnicas que sean capaces de asumir estas nuevas necesidades.

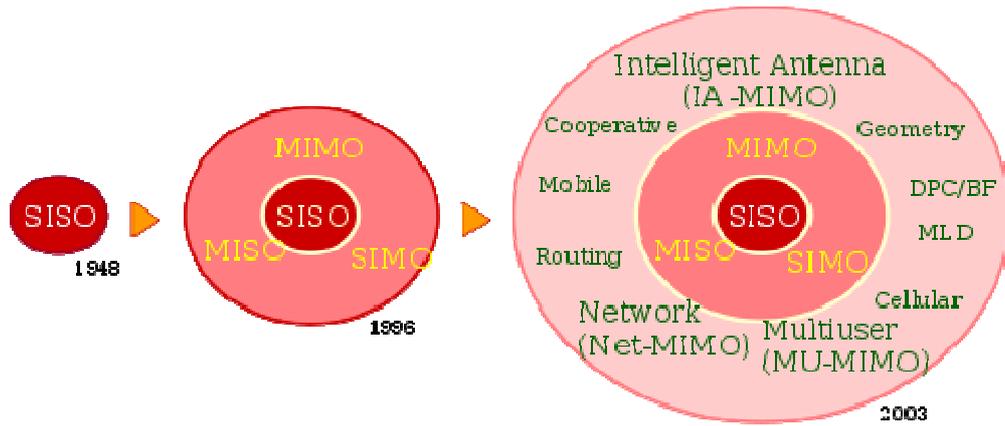


Figura 2.6 - Evolución Sistemas MIMO [9].

Para ver las mejoras de capacidad que introducen los sistemas MIMO frente a los sistemas SISO, MISO y SIMO vamos a expresar la capacidad de cada uno de estos sistemas [2].

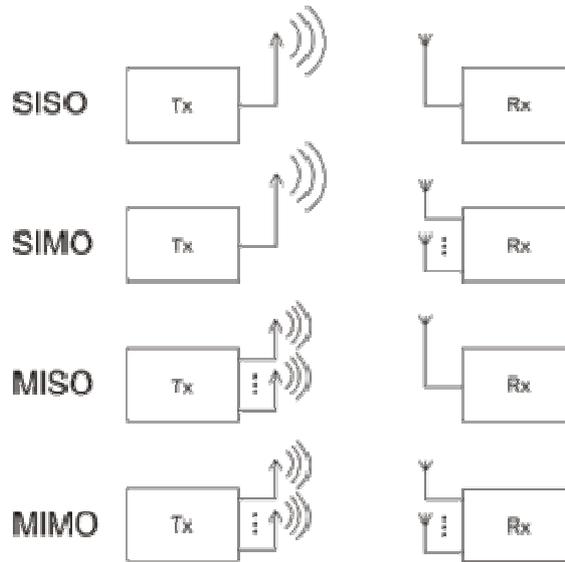


Figura 2.7 - SISO, SIMO, MISO y MIMO [9].

### 2.5.1.1 SISO

MIMO (Single input single output) este es el caso en el que tanto transmisor como receptor poseen una única antena [10].

o *Capacidad de un canal SISO:*

El sistema SISO es el sistema más sencillo que podemos diseñar. El esquema de dicho sistema es el siguiente:

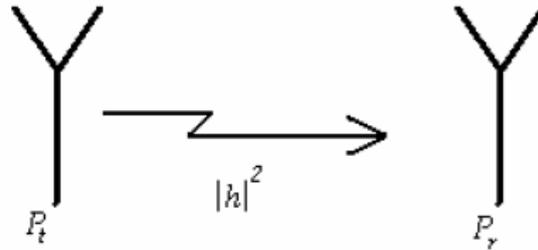


Figura 2.8 - Esquema de un sistema SISO [2].

Para un sistema con una sola antena tanto en transmisión como en recepción, la capacidad viene dada por la fórmula de Shannon [2]:

$$C_{SISO} = \log_2 \left( 1 + SNR \cdot |h_i|^2 \right) \text{ [bits / s / Hz]} \quad (2.9)$$

donde SNR es la relación señal a ruido que se alcanza en el receptor y  $h_i^2$  es la respuesta compleja y normalizada del canal [2].

### 2.5.1.2 MISO

MISO (Multiple input Single output) en el caso de varias cadenas de emisión pero únicamente una en el receptor [10].

#### o Capacidad MISO:

Ahora el objetivo es tener varias antenas en transmisión para ver como se comporta el canal. El esquema del sistema MISO es el siguiente:

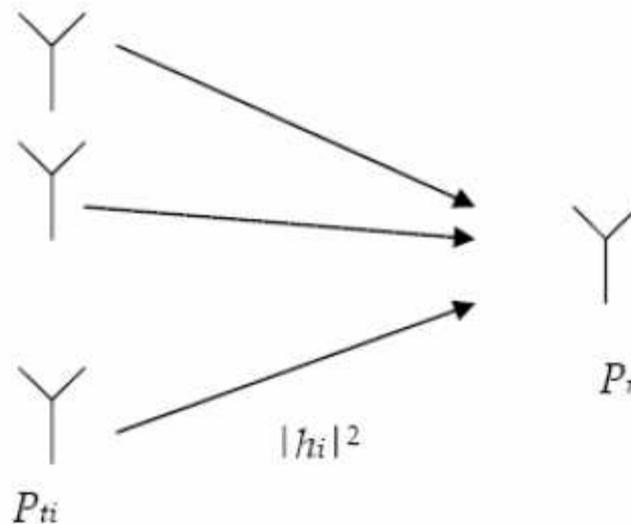


Figura 2.9 - Esquema de un sistema MISO [2].

Ahora en cambio la capacidad de este sistema viene dado por la siguiente expresión:

$$C_{MISO} = \log_2 \left( 1 + \frac{SNR}{M} \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right) [\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}] \quad (2.10)$$

donde M es el número de antenas transmisoras, SNR vuelve a ser la relación señal a ruido en el receptor y  $h_i$  es la respuesta compleja normalizada del canal cuando transmite la antena  $i$ -ésima. La SNR se normaliza para garantizar que la potencia transmitida por todas las antenas es la misma [2].

### 2.5.1.3 SIMO

SIMO (Single input multiple output) en el caso de una única antena de emisión y varias antenas en el receptor [10].

o *Capacidad SIMO* :

El objetivo que se persigue ahora es tener varias antenas en recepción de forma que tengamos diversidad en recepción. El esquema de un sistema SIMO es el siguiente:

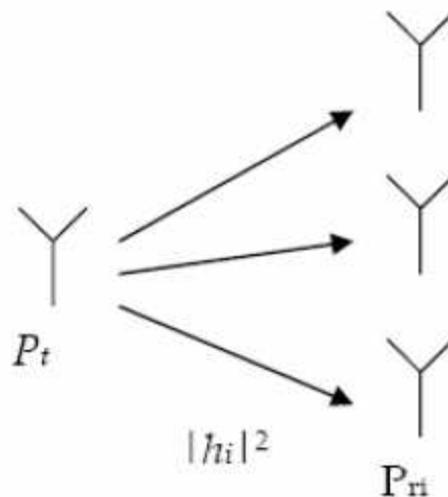


Figura 2.10 - Esquema de un sistema SIMO [2].

Con este sistema, la capacidad que se alcanza es la siguiente:

$$C_{SIMO} = \log_2 \left( 1 + SNR \sum_{i=0}^N |h_i|^2 \right) [\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}] \quad (2.11)$$

Como vemos en la expresión (2.11) ahora la relación señal a ruido no viene normalizada con respecto del número de antenas transmisoras puesto que sólo tenemos una antena [2].

### 2.5.1.4 MIMO

MIMO (Multiple-input Multiple-output) es el caso de varias antenas en emisión y varias antenas en el receptor. MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multicamino para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error. En resumen, MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de

comunicación inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial. Durante los últimos años la tecnología MIMO ha sido aclamada en las comunicaciones inalámbricas ya que aumenta significativamente la tasa de transferencia de información utilizando diferentes canales en la transmisión de datos o la multiplexación espacial por tener las antenas físicamente separadas [10].

En un sistema MIMO de M antenas transmisoras y N antenas receptoras, sistema M×N, se generan MN subcanales entre el array transmisor y el array receptor. La respuesta al impulso de un canal MIMO en banda estrecha se expresa en forma matricial como:

$$H(t) = \begin{pmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \dots & h_{1M}(t) \\ h_{21}(t) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N1}(t) & h_{N2}(t) & \dots & h_{NM}(t) \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Cada uno de los elementos  $h_{ij}(t)$  representa el canal generado entre la antena transmisora j, con  $j=1,\dots,M$  y la antena receptora i, con  $i=1,\dots,N$ . Para simplificar los desarrollos y asumiendo canales invariantes en el tiempo, se elimina de la notación la dependencia temporal de los subcanales. El canal MIMO descrito por la expresión (2.12) se representa en la Figura 2.11 en la cual puede verse las M antenas transmisoras y las N antenas receptoras y como se generan MN subcanales.

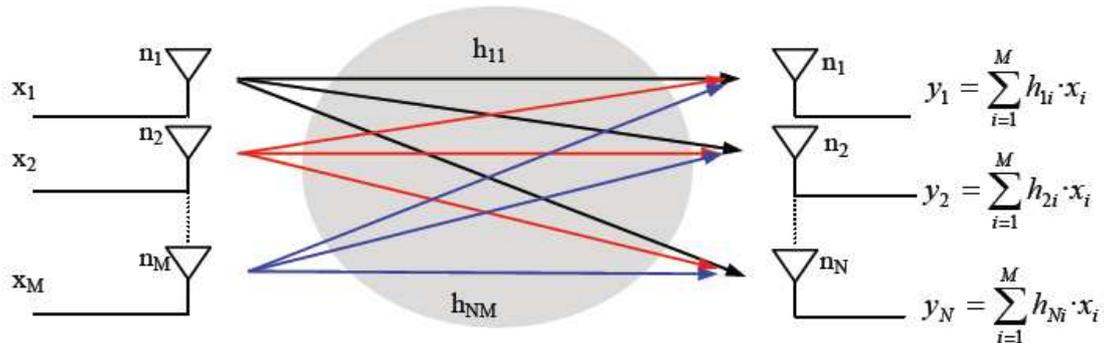


Figura 2.11 - Subcanales generados por Sistema MIMO [11].

Si transmisor y receptor se encuentran en un entorno rico en scattering, los elementos de la matriz H presentan baja correlación; en estas circunstancias, el canal MIMO proporciona alta eficiencia espectral [11].

o *Capacidad MIMO.*

Como hemos visto hasta ahora, la capacidad del canal depende de varios factores tales como el número de antenas transmisoras y receptoras, la respuesta compleja normalizada del canal o la relación señal a ruido [2].

Se denominará H a la matriz que caracteriza el canal MIMO, de dimensiones  $M_R \times M_T$ , siendo  $M_R$  y  $M_T$ , el número de elementos de antena en los array receptor y transmisor, respectivamente. Como aproximación, no se consideran efectos de los

conformadores de pulso y filtros adaptados en cada lado del enlace, restringiéndose el análisis a los elementos de canal o subcanales de propagación que unen el array transmisor con el receptor [12].

La capacidad del canal MIMO viene dada en términos del sumatorio de las capacidades individuales de cada canal desacoplado mediante la expresión:

$$C = \sum_{l=1}^k \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_l \cdot P}{M_T \cdot \sigma^2} \right) [\text{bits} / \text{s} / \text{Hz}] \quad (2.13)$$

donde  $\lambda_l$  son los valores propios de la matriz  $H$ , e indican el número de canales independientes entre Transmisor y Receptor,

$P$  es la potencia total transmitida, y  $\sigma^2$  es la potencia de ruido. En concreto, el canal MIMO ofrece  $k$  canales desacoplados, siendo  $k$  el rango de  $H^H H$  (el superíndice  $H$  indica transpuesta conjugada), estando limitados por  $k \leq \min \{M_T, M_R, Q\}$ , donde  $Q$  corresponde al número de subcanales discretos de propagación.

La ecuación (2.13) puede escribirse también como:

$$C = \log_2 \left\{ \det \left( I + \frac{P}{M_T \cdot \sigma^2} H^H H \right) \right\} \quad (2.14)$$

donde  $I$  es la matriz identidad y el producto  $H^H H$  es válido siempre y cuando  $H$  sea una matriz hermética de dimensiones  $M_R \times M_T$ , con  $M_T \geq M_R$  [12].

## 2.5.2 Funciones de los Sistemas MIMO

MIMO puede ser subdividido en tres categorías, precodificación, multiplexado espacial o SM, y la codificación de la diversidad.

### 2.5.2.1 Precodificación o array:

Se obtiene a través del procesado de las señales en el transmisor y en el receptor. Combinando coherentemente la señal en el transmisor o en el receptor se consigue un aumento de la relación señal a ruido media recibida. Dado que se pesa la señal transmitida/recibida por cada antena, en ocasiones la ganancia en array también se conoce como ganancia por conformación de haz (beamforming). Para realizar la combinación es necesario conocer el estado instantáneo del canal (CSI) en el extremo correspondiente para obtener los pesos.

Se puede conocer el estado del canal en el receptor mediante las secuencias de entrenamiento, sin embargo conocerlo en el transmisor es más complicado ya que se requiriere un canal de realimentación. En este sentido se distinguen dos tipos de sistemas para un canal MIMO  $M \times N$ : sin realimentación o de lazo abierto y con realimentación o de lazo cerrado. Al usar en recepción combinación por razón máxima, MRC, los sistemas de lazo cerrado aportan una ganancia en array de  $10 \log_{10} MN$  mientras que, en los de lazo abierto, la ganancia de array es de  $10 \log_{10} N$ . Los de lazo cerrado serán adecuados para escenarios de baja movilidad (canal de realimentación menos rápido) mientras que los de lazo abierto son más adecuados en escenarios de alta movilidad [11].

**2.5.2.2 Multiplexado espacial:**

Consiste en la transmisión de flujos de información independientes por las diferentes antenas de manera simultánea. Matemáticamente el número de subcanales equivalentes  $K$  viene dado por el número de valores singulares distintos de cero de la matriz de canal  $H$ , es decir, el rango de la matriz  $H$ , el cual está acotado el número de transmisores o de receptores ( $K = \text{rank}(H) \leq \min\{M, N\}$ ). La magnitud de los valores singulares elevada al cuadrado (valor propio de  $HH^H$ ) representa la ganancia en potencia de cada uno de los subcanales. El multiplexado de la información en  $K$  canales consigue, en teoría, aumentar la velocidad global de transmisión de datos en un factor  $K$  sin mayores requerimientos de potencia ni ancho de banda, consiguiendo una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal y sin necesidad de conocer el estado del canal (Channel State Information CSI) en el transmisor. En condiciones de riqueza de scattering, que generalmente implica correlación baja, y rango de  $H$  alto, el receptor puede separar los distintos flujos de información multiplexados. Un esquema de codificación con una tasa de transmisión  $R$  en función de la relación señal a ruido (SNR) tiene una ganancia de multiplexación  $r$  dada por:

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{R(SNR)}{\log(SNR)} = r \tag{2.15}$$

La máxima ganancia por multiplexación espacial de un canal MIMO  $M \times N$  viene dada por  $r_{\max} = \min(M, N)$  [11].

**2.5.2.3 Técnicas por Diversidad de codificación:**

Se utilizan cuando no hay conocimiento del canal en el transmisor. En los métodos de la diversidad solo se transmite un flujo (a diferencia de múltiples flujos del multiplexado espacial) pero la señal está codificada utilizando técnicas de codificación llamado espacio-tiempo. La señal es emitida por cada una de las antenas de transmisión haciendo uso de ciertos principios de la codificación ortogonal. Diversidad explota el desvanecimiento independiente en los enlaces de múltiples antenas para aumentar la diversidad de la señal. Debido a que no hay conocimiento del canal, no hay conformación de haz o aumento de matriz de codificación de la diversidad.

Multiplexado espacial también puede ser combinada con precodificación cuando el canal es conocido en el transmisor o en combinación con la codificación de la diversidad cuando se decodifica la fiabilidad está en relación inversa [9].

La ganancia por diversidad en el sistema MIMO representa la mejora en la SNR, promediada en el tiempo, con respecto a la SNR del mejor canal SISO. La idea de ganancia por diversidad está unida al concepto de fiabilidad el cual se analiza mejor desde el análisis de la probabilidad de corte del canal (probabilidad de que la SNR se encuentre por debajo de un cierto nivel umbral que haga que el sistema no esté disponible), indicando así la calidad del rendimiento del canal garantizada con un cierto nivel de probabilidad. Por tanto la definición de ganancia por diversidad está condicionada por el valor mínimo de referencia de la SNR. Por ejemplo, en la Figura 2.12 se muestra la función de densidad de probabilidad acumulada (CDF) de la SNR en un sistema SIMO. Se observa que la ganancia por diversidad para una probabilidad de corte de 1% es superior a la probabilidad de corte de 5% [11].

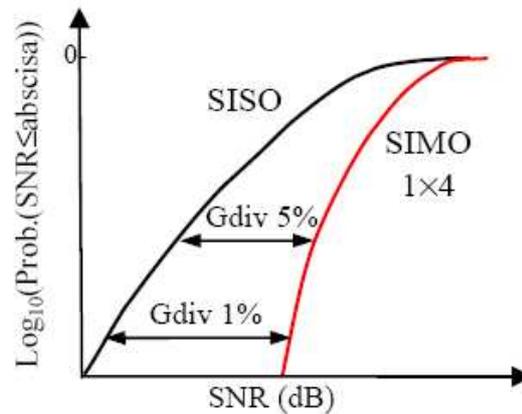


Figura 2.12 - Ejemplo de ganancia por diversidad en recepción [11].

Desde el punto de vista de probabilidad de error, la ganancia por diversidad se obtiene de (2.16). Así, la probabilidad de error cae según  $SNR^{-d}$  mientras que en un sistema SISO cae según  $SNR^{-1}$ . De manera intuitiva, la ganancia por diversidad se corresponde con el número de caminos independientes que recorre un símbolo, es decir, el número de subcanales que se pueden promediar para detectar el símbolo. Por tanto la ganancia por diversidad está limitada al grado de diversidad espacial ofrecido por el canal. En condiciones ideales, el orden de diversidad de un sistema MIMO  $M \times N$  es de  $MN$ , luego  $d_{max} = MN$ .

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log P(SNR)}{\log(SNR)} = -d \tag{2.16}$$

Obtener ganancia de diversidad en el transmisor, sin conocer el canal en el mismo, es posible codificando las señales transmitidas de una manera adecuada. Esta técnica se conoce como Codificación Espacio Temporal (STC).

En recepción la ganancia por diversidad y en array están interrelacionadas. Así mientras que la ganancia por diversidad de un sistema  $M \times 1$  es igual a la de un sistema  $1 \times M$ , este último aporta una ganancia en array de  $10 \log_{10} M$ , tal como se representa en la Figura 2.13 [11].

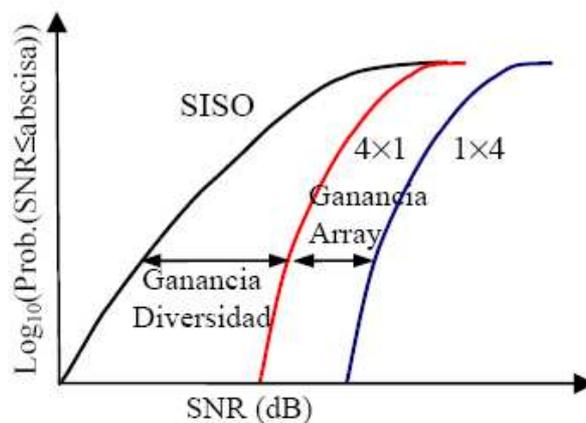


Figura 2.13 - Ejemplo de Ganancia de Diversidad y Array [11].

### 2.5.3 Múltiples Usuarios (MU-MIMO)

La investigación sobre la tecnología multiusuario MIMO esta emergiendo. En los últimos standards 3GPP y WiMAX, MU-MIMO está siendo tratado como una de las tecnologías adoptables en la especificación de una gran cantidad de empresas como Samsung, Intel, Qualcomm, Ericsson, TI, Huawei, Philips, Alcatel-Lucent, Freescale, etc [9].

#### 2.5.3.1 MIMO en el estándar IEEE 802.16 – Wimax

Wimax, (Worldwide Interoperability for Microwave Access), es una tecnología inalámbrica que define el interfaz inalámbrico de sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha (BFWA) que permite velocidades de transmisión de datos con una eficiencia espectral media de 3 bps/Hz. Wimax está basado en el estándar IEEE 802.16, aunque también abarca el estándar HiperMan de la ETSI como un subconjunto de IEEE 802.16.

Dadas las características tan generales del estándar, diferentes fabricantes pueden desarrollar equipos acordes con el estándar pero no compatibles entre ellos. El Wimax Forum, conformado por un amplio conjunto de industrias, define diferentes perfiles de funcionamiento que reúnen un conjunto detallado de características del estándar. El cumplimiento de estos perfiles permitirá que lo equipos sean compatibles con el estándar pero además garantizan la interoperabilidad con equipos de diferentes fabricantes.

Basados en el estándar IEEE 802.16-2004, se han definido 4 perfiles en la banda de 3.5 GHz y 1 en la banda de 5.8 GHz con diferentes anchos de banda de canal y duplex en el dominio del tiempo (TDD) o de la frecuencia (FDD). Los perfiles basados en el estándar IEEE 802.16e presentan todos ellos duplex en el dominio del tiempo y disponen de distintos anchos de canal en la banda de 2.5 GHz y 3.5 GHz.

Los perfiles de Wimax móvil contemplan el uso múltiples antenas para aumentar la eficiencia espectral o la calidad del enlace. El array de múltiples antenas puede utilizarse como antenas adaptativas (AAS), codificación Espacio-Temporal (STC) o multiplexado espacial.

Inicialmente Wimax está destinado a establecer enlaces fijos de banda ancha en escenarios exteriores o semi-exteriores, con los equipos receptores montados en la ventana. Sin embargo, la verdadera penetración de la tecnología se llevará a cabo con el desarrollo de modems de sobremesa o integrados en ordenadores portátiles que permitan explotar las características de portabilidad, llegando directamente al usuario final. Así fabricantes como Intel proporcionarán tarjetas Wimax para portátiles para 2008 [11].

#### 2.5.3.2 MIMO en el estándar IEEE 802.11n

Uno de los estándares cuyo uso está más extendido es el IEEE 802.11 para redes inalámbricas de área local. Su principal ventaja es utilizar bandas frecuenciales que no necesitan licencia lo que ha facilitado su penetración en el mercado. Sin

embargo, los reducidos anchos de banda junto con la necesidad de aplicar técnicas para combatir las interferencias de otras tecnologías con las que comparte la banda, solo consigue obtener velocidades de transmisión limitadas, con valores máximos de 54 Mbps.

Para incrementar la velocidad de transmisión es necesario bien aumentar el ancho de banda o bien aumentar la eficiencia espectral. La nueva revisión del estándar de redes locales inalámbricas IEEE 802.11 desarrollada por el grupo de trabajo TGn propone el uso de múltiples antenas con multiplexación espacial combinados con la posibilidad de uso de canales de doble ancho (40MHz). Las primeras versiones contemplan el uso de dos antenas transmisoras que permitirán velocidades máximas de 300 Mbps con una eficiencia espectral de 7.5bps/Hz. Versiones posteriores utilizarán 3 y 4 antenas transmisoras [11].

### **2.5.3.3 MIMO en el estándar IEEE 802.20**

Estándar IEEE 802.20 para la especificación de un interfaz radio (capa física y de control de acceso al medio) para transmisión eficiente de paquetes optimizada para servicios IP. El objetivo es el desarrollo de redes de acceso inalámbrico de banda ancha móviles (MBWA). Este estándar nace con el objetivo de complementar al estándar IEEE 802.16a que inicialmente estaba destinado a enlaces fijos (FBWA). La evolución del estándar 802.16 hacia enlaces móviles implica que ambos estándares estarán orientados a cubrir el mismo tipo de comunicaciones móviles.

IEEE 802.20 está destinado a operar en bandas bajo licencia a velocidades de hasta 250 Km/h. IEEE 802.20 usa anchos de canal escalables entre 5-20 MHz e incorpora el uso de múltiples antenas tanto para realizar beamforming como para conformar canales MIMO [11].

### **2.5.3.4 MIMO en el 3GPP**

El 3rd Generation Partnership Project (3GPP) es un acuerdo de colaboración establecido en diciembre de 1998 con el objetivo de crear la especificación de un sistema de telefonía móvil global. Una de sus características más importante introducidas ha sido HSDPA (High Speed downlink packet access). HSDPA representa un avance en WCDMA para obtener mayores velocidades de transmisión de datos. Permitirá actualizar la arquitectura existente para lanzar servicios de alta velocidad con un mínimo de inversión. El 3GPP identifica 3 fases en la evolución de HSDPA. En primer lugar, "HSDPA básica", permite tasas de datos típicas de 10.8Mbit/s (máxima de 14.4Mbit/s). La segunda fase incorpora antenas inteligentes y HSUPA y la tercera fase ya contempla la combinación de OFDM y MIMO [11].

### **2.5.3.5 PU2RC (Per-User Unitary Rate Control):**

Permite a la red para asignar a cada antena a los diferentes usuarios en lugar de asignar sólo un solo usuario como en la programación de un solo MIMO usuario. La red puede transmitir datos de usuario a través de un libro de códigos basados en haz de una antena espacial o virtual. La programación de usuario eficientes, como la vinculación a los usuarios espacio distinguibles con libro de códigos espaciales basado en las vigas, se discutieron, además, para la simplificación de las redes inalámbricas en términos de requisitos adicionales en materia de recursos inalámbricos y la

modificación del protocolo complejo. Recientemente, PU2RC ha sido adoptada para el uso estándar LTE en el 3GPP y, además, PU2RC se incluye la descripción de la documentación del sistema (SDD) de la IEEE 802.16m (la evolución de WiMAX para satisfacer las IMT UIT-R-requisitos Advance) [9].

### **2.5.3.6 SDMA (Spatial-Division Medium Access):**

Representa, bien el acceso múltiple por espacio-división o acceso múltiple por super- división en que super hace hincapié en que la división ortogonal como la frecuencia y por división de tiempo no se usa, pero no se utilizan criterios tales como la codificación ortogonal superposición. Cooperative MIMO (CO-MIMO) [9].

### **2.5.4 Aplicaciones de los Sistemas MIMO**

El multiplexado espacial hace a los receptores muy complejos, por lo que es normalmente combinada con la frecuencia de multiplexión por división ortogonal (OFDM) o con modulación Acceso Multiple por División en Frecuencias Ortogonales (OFDMA), donde los problemas creados por la ruta de acceso multi-canal se manejan de manera eficiente. El estándar IEEE 802.16e incorpora MIMO-OFDMA. El estándar IEEE 802.11n, que se prevé finalizar a finales de 2009, recomienda MIMO-OFDM.

MIMO también está previsto para ser utilizado en las normas de telefonía móvil de radio, tales como el 3GPP y los últimos standards 3GPP2. En 3GPP, High-Speed Packet Access Plus (HSPA +) [9].

## **2.6 Sistemas de Medidas del Canal Radio**

### **2.6.1 Introducción**

La caracterización del Canal Radio se puede obtener de varias formas distintas según la técnica empleada o el dominio (temporal o frecuencial) utilizado. Basándonos en esto último podemos distinguir dos formas:

#### **o Caracterización en el Dominio de la Frecuencia:**

La respuesta en frecuencia de un canal inalámbrico se puede medir usando un analizador vectorial de redes (VNA). El VNA recorre un rango de frecuencias dentro de la anchura de banda de interés y, en cada frecuencia, mide la respuesta de la magnitud y fase del canal [13].

#### **o Caracterización en el Dominio del Tiempo:**

Una medida del canal en el dominio de tiempo implica la transmisión de un impulso corto. La brevedad del pulso permite que uno mida los diferentes tiempos de llegada de las componentes de trayectoria múltiple para determinar la respuesta al impulso del canal radio.

Éste, es un concepto directo, pero en la práctica no es tan simple. Las dos preocupaciones más comúnmente posible citadas son interferencia y el pobre rango dinámico de las medidas. En comparación con transmitir un solo impulso, es posible transmitir secuencias empleando técnicas de espectro ensanchado (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum). Con el proceso apropiado de este tren del impulso en el

receptor, uno puede determinar la respuesta de impulso del canal. Además, las características únicas de las señales de DSSS proporcionan el rechazo de interferencias en banda así como mejoras en rango dinámico [13].

**2.6.2 Sistemas de Medida del Canal SISO:**

**o 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 [14].

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:

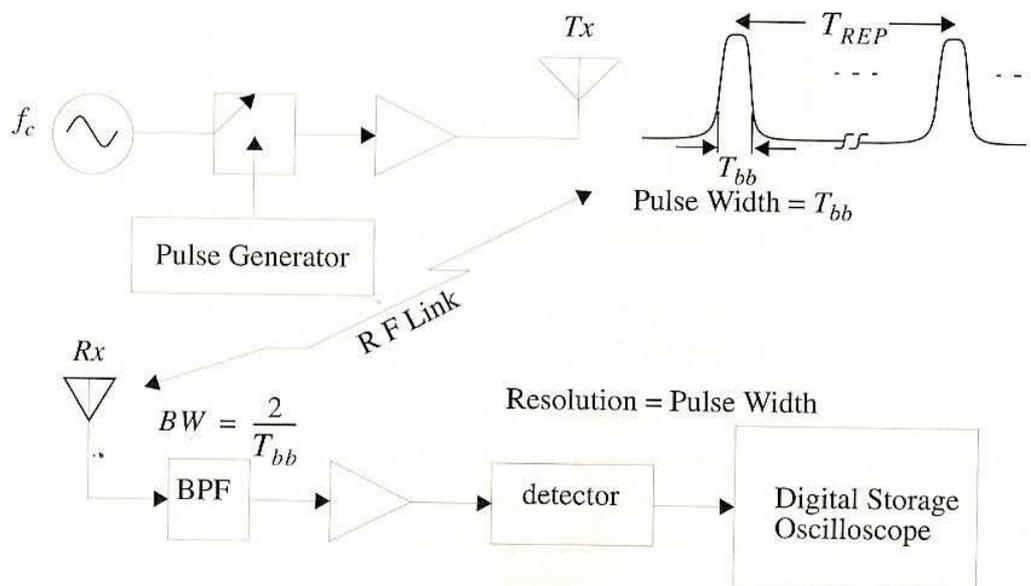


Figura 2.14 - Direct RF Pulse System [15].

- Determina el perfil del retardo de la energía de cualquier canal usando la señal de pulso con  $T_{bb}$  como ancho de pulso [16].
- El mayor problema con este sistema reside en las interferencias y ruido, además de que las fases de los componentes individuales de trayectoria múltiple no son recibidas [16].

**o 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:

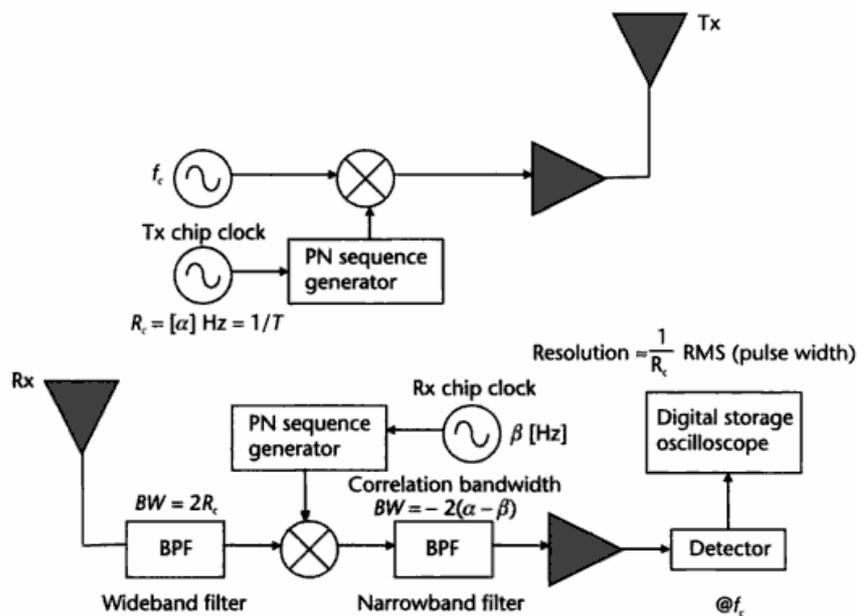


Figura 2.15 - Spread Spectrum Sliding Correlator Channel Sounding [15].

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  $1/T_c$ . Al modular la señal el ancho de banda que se obtiene es el doble [14].

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 pseudoaleatorio 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. Esta señal posteriormente es pasada por un filtro paso banda.

La correlación obtenida nos da la información de la respuesta del canal [14].

Ventajas que tiene este sistema:

- Elimina la mayoría del ruido y de las interferencias. Además aparece la ganancia de procesado.
- 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.

o **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:

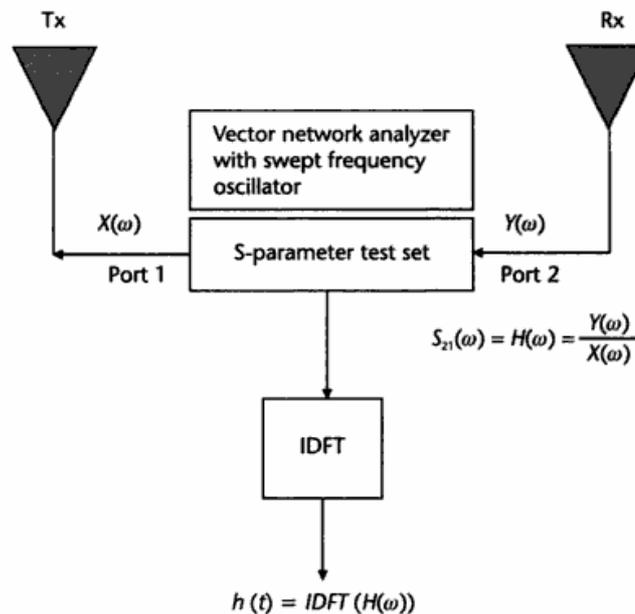


Figura 2.16 - Frequency Domain Channel Sounding [15].

El funcionamiento de este sistema consiste en utilizar un analizador de redes para generar una señal. Dicha señal esta 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 [14].

El nivel de la señal transmitida es conocido. 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) [14].

- 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.

### 2.6.3 *Sistemas de Medida del Canal MIMO*

Las técnicas para caracterizar el canal MIMO se puede clasificar de acuerdo con dos criterios: las señales de excitación que determinan el dominio de caracterización (tiempo o frecuencia) y la técnica de multiplexación que permite la identificación de la antena transmisora. Diversas clases de señales se puede utilizar para caracterizar el canal y estas señales se pueden categorizar por las señales de pulso u onda continua (pulse-shaped or continuous-wave) (CW) y por las señales de banda estrecha o banda ancha.

En relación con la identificación de la antena transmisora, allí existen tres técnicas de la multiplexación: multiplexación por división de tiempo (TDM), multiplexación por división de frecuencia (FDM) y multiplexación por división de códigos (CDM). La opción cuya multiplexación se utiliza es obligada parcialmente por la viabilidad de construir el hardware, así como la resolución deseada de las medidas del canal [17].

#### *o Señales de la excitación*

La opción de señales de excitación es un aspecto clave en el caracterizador de canal puesto que determina el siguiente tratamiento que se aplicará a las señales y tiene implicaciones sobre el hardware. Los primeros experimentos con caracterizadores han sido realizados usando señales de onda continua de un solo tono (CW). Esto era suficiente mientras el comportamiento de interés estuviera en banda estrecha. Para alcanzar alta resolución del retardo, fue desarrollado el caracterizador secuencial para un número de diversas frecuencias. Su desventaja es el enorme tiempo resultante de la medida, que no es conveniente para medidas de alta movilidad.

Las señales de espectro ensanchado hace de estas señales muy útiles para la identificación en tiempo real, puesto que todas las frecuencias se excitan instantáneamente y se alcanza un aumento considerable de la ganancia de procesa SNR en el dominio de tiempo debido a la correlación. Un ejemplo de estas señales de excitación son las señales binarias pseudoaleatorias periódicas (PRBS) o las señales de ruido pseudoaleatorias (PRNS). Pueden ser generadas fácilmente y sirven como señales de banda ancha de excitación. La desventaja de este principio, trabajando secuencialmente, es otra vez el tiempo largo de la medida que prohíbe operaciones en tiempo real [17].

La compresión del pulso usando la técnica de chirp (en la que se emplea un pulso que barre todas las frecuencias, llamado chirp, para expandir la señal espectral) ha demostrado ser un método de gran alcance para medir la respuesta del canal puesto que evita limitaciones de energía máxima del transmisor y ofrece capacidades excelentes del rechazo de interferencias. El uso de las señales de chirp para la

caracterización canal radio móvil ha sido limitado generalmente siempre por las capacidades de la tecnología digital moderna.

Finalmente, otra posibilidad son las señales multifrecuenciales. La ventaja de esta clase de señales es que la respuesta de frecuencia del canal se puede medir en las frecuencias deseadas. Estas señales presentan los altos niveles de la relación Pico-a-Media (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) de la energía, que se pueden reducir por la optimización numérica. La diferencia con respecto a PRBS es que las fases y las magnitudes de los coeficientes de Fourier se pueden elegir arbitrariamente para optimizar el funcionamiento de sistema [17].

**o Técnicas de la multiplexación**

Hay tres esquemas de multiplexación para los sistemas de medida MIMO:

- transmitiendo por un solo elemento en un momento específico, multiplexación por división de tiempo (TDM),
- transmitiendo en frecuencia distinta, o frecuencias, por cada elemento - multiplexación por división de frecuencia (FDM),
- transmitiendo un código distintivo en cada elemento - multiplexación por división de códigos (CDM) [18].

El propósito del sistema de medida secuencial del canal MIMO (TDM) es distinguir las antenas transmisoras así como la reducción de complejidad y coste. La conmutación secuencial del array de antena en ambos extremos, conocidos como los sistemas fully-switched (figura 2.17), hacen uso de una unidad de multiplexación para encaminar secuencialmente en el tiempo una sola cadena del RF a través de todos los elementos de transmisión/recepción [17].

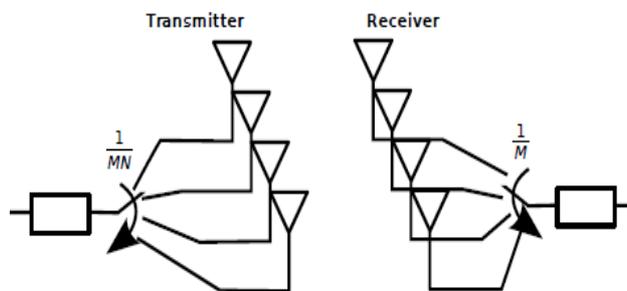


Figura 2.17 - Sistema Medida MIMO Conmutación Completo [18]

En un sistema semi-switched, los receptores funcionan paralelamente mientras que la conmutación se implementa en el transmisor. El uso de receptores paralelos permite alta resolución en las medidas del comportamiento radio sin la reducción de la frecuencia de muestreo eficaz del canal. Este esquema no es conveniente para la medida en tiempo real del canal y tiene algunas desventajas importantes tales como el requisito de la sincronización exacta entre el transmisor y el receptor y de la reducción de la exactitud durante el tiempo de conmutación.

La conmutación se puede evitar usando transmisores paralelos y receptores paralelos (figura 2.18). Claramente, cuantos más elementos se utilizan, mayor es el

requisito para usar paralelismo dentro del sistema. Por otra parte, el tiempo se reduce perceptiblemente si comparamos con un esquema fully-switched [17].

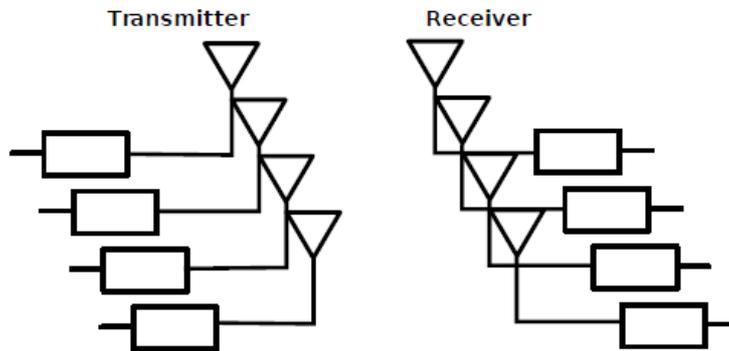


Figura 2.18 - Sistema Medida MIMO Paralelo Completo [18].

Este enfoque apoya FDM y CDM, cada uno con diversas ventajas/desventajas. Con FDM, un subconjunto de frecuencias se asigna a cada antena, así todas no caracterizan el canal en exactamente las mismas frecuencias. CDM dará la discriminación excelente entre los elementos de la antena a condición de que se mantenga una correlación baja entre los códigos dentro del canal que es caracterizado. Desafortunadamente, como el canal es múlticamino, la correlación cruzada entre los códigos es importante [17].

### 2.6.4 Sistemas de Medida MIMO en Frecuencia desarrollado por SICOMO

Una vez repasados los posibles sistemas de medida del canal, vamos a mostrar el sistema utilizado para la caracterización del canal radio anterior al que se ha hecho para este Proyecto Fin de Carrera. Para ello se hablará de los equipos que utilizan y el software desarrollado para el efecto.

#### 2.6.4.1 Equipos de Medidas

Los Equipos que se utilizan para realizar la caracterización del canal radio son:

- o **Analizador de Redes ENA:** El encargado de la recepción y almacenamiento de las señales recibidas por las antenas receptoras, las cuales están conectadas a las entradas del multipuerto.
- o **Multipuerto:** conmuta 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.
- o **Conmutador:** comunica 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.
- o **Controlador:** Es el aparato encargado de indicar al conmutador hacia que antena transmisora debe ir dirigida la señal de salida del analizador de redes.

o **Antenas transmisoras y receptoras.**

o **Ordenador portátil:** 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.

o **Otros dispositivos:** Otros dispositivos importantes que podemos encontrar en nuestro sistema son: Tarjetas de red inalámbricas o cable de red cruzado, fuentes de alimentación, cables y transiciones, amplificadores,...

**2.6.4.2 Software**

El software fue desarrollado en Visual Basic basándose en otro ya existente que mezclaba Hojas de Calculo de Excell y V.B.6.

El funcionamiento básico del sistema de medidas es el siguiente:

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 se conmuta a la siguiente y así sucesivamente con todas [14].

Este nuevo software aportaba mejoras como son:



Figura 2.19 - Software de Medida MIMO. SICOMO 1.0 [14].

o Mantener 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. ENA 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.

- o Posibilidad de elegir el número de veces que queremos que se repita el ciclo de medidas.
- o Realizar una configuración del analizador de redes en tiempo de ejecución, es decir, poder 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).
- o Otra importante cualidad, 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
- o Otra nueva función que posee nuestro programa es la de poder guardar la configuración actual.
- o Se le puede indicar la dirección en la que almacenar los datos obtenidos.
- o 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, sobretudo cuando no se está familiarizado todavía con el software de medidas [14].

### **2.6.4.3 Resumen:**

El sistema de medidas del canal en el dominio de la frecuencia ofrece una serie de ventajas e inconvenientes que resumimos a continuación:

Ventajas:

- Es un sistema de medidas del que se obtienen los resultados que se esperan, por haber sido probado durante bastante tiempo.
- Del sistema se extrae información de la respuesta del canal tal como el módulo y la fase.
- Además, haciendo la IFFT (Transformada Inversa Rápida de Fourier) obtenemos la respuesta del canal en el tiempo.

Inconvenientes:

- Complicado y laborioso montaje de todo el sistema para realizar una tanda de medidas.
- El principal inconveniente y el que a la postre nos hace plantear otro sistema de medidas mas rápido, es que es un sistema lento puesto que tiene que medir el  $S_{21}$  para toda la banda de frecuencias en estudio y para cada combinación de antenas. Esto hace que mientras el sistema está midiendo el canal, éste debe permanecer invariante. Por lo tanto, si se tiene un canal que varía rápidamente, o se quiere caracterizar sistemas en movimiento, no podrá hacerlo.

## Capítulo 3. Sistema de Medidas en el Dominio del Tiempo.

### 3.1 Introducción

A raíz de los inconvenientes del anterior sistema surge este nuevo sistema de medidas del canal. Lo que se pretende es poder comparar los resultados obtenidos del Sistema de Medidas en el Dominio de la Frecuencia con los del Dominio del Tiempo, para ello compararemos las respuestas al impulso del canal en el dominio del tiempo y así sacar conclusiones.

A partir del siguiente esquema (Figura 3.1), se explicará el proceso de toma de datos y posterior procesamiento de estos.

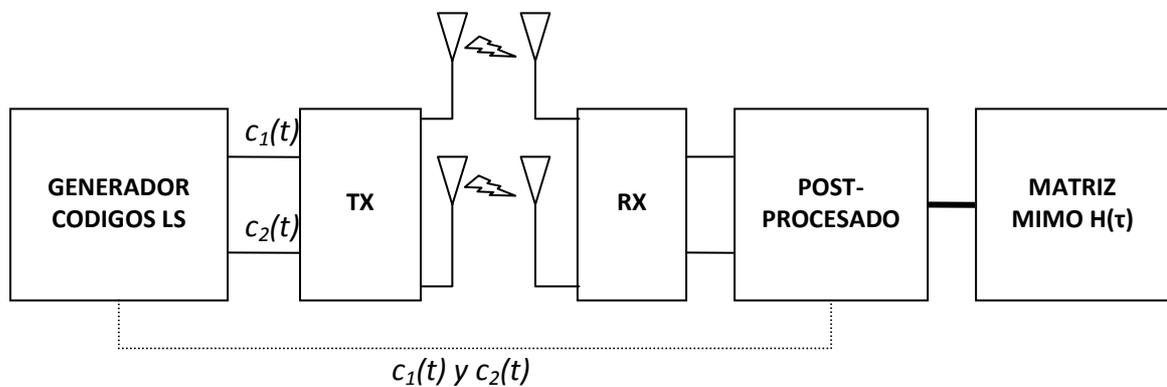


Figura 3.1 - Esquema de Procesado de Datos

En primer lugar, son generadas y almacenadas dos secuencias LS como tren de pulsos,  $c_1(t)$  y  $c_2(t)$ , en dos canales del generador de banda base. Las señales son moduladas en el Modulador R&S quedando:

$$s_{TX1}(t) = c_1(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad \text{Y} \quad s_{TX2}(t) = c_2(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (3.1)$$

con  $f_0$  como frecuencia central.

Estas señales son transmitidas y recibidas por las cuatro antenas, y que serán adquiridas y almacenadas por nuestro osciloscopio Agilent Infiniium 90804A.

El objetivo es hallar la matriz de transferencia del Sistema MIMO 2x2, que puede ser descrita como:

$$H(\tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau) & h_{21}(\tau) \\ h_{12}(\tau) & h_{22}(\tau) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde  $h_{ij}(\tau)$  es la respuesta al impulso del canal cuando la antena  $i$  esta recibiendo y la antena  $j$  esta transmitiendo.

### Capítulo 3. Sistema de Medidas en el Dominio del Tiempo

Una vez las señales,  $s_{RX1}(t)$  y  $s_{RX2}(t)$ , han sido adquiridas por el osciloscopio, las respuestas al canal,  $h_{ij}(\tau)$  son calculadas en un post-procesado en MATLAB. Sin embargo, previamente deberemos almacenar los dos códigos LS originales,  $c_1(t)$  y  $c_2(t)$  durante al menos el doble de duración del código [19].

El paso previo al post-procesado es un filtrado de la señal recibida, solo en la banda de interés,  $f_0 \pm f_{chip}$ .

Entonces, para demodular coherentemente cada señal recibida,  $s_{RXi}(t)$ , utilizamos una portadora a frecuencia igual a la frecuencia central de la banda bajo estudio, para extraer las componentes en Fase,  $r_i^I(t)$ , y Cuadratura,  $r_i^Q(t)$ . La demodulación se completa usando un filtro paso bajo de Butterworth para eliminar las frecuencias que aparecen tras la demodulación y que no necesitamos.

Finalmente, debido a las características únicas de autocorrelación y de correlación cruzada de los códigos LS (ver Anexo III), las componentes de la respuesta de impulso del canal en Fase y Cuadratura,  $h_{ij}^I(\tau)$  y  $h_{ij}^Q(\tau)$ , pueden ser obtenidas por correlación a  $r_i^I(t)$  y  $r_i^Q(t)$  con  $c_j(t)$ , respectivamente. Así, el módulo y la fase de la respuesta de impulso del canal cuando la antena  $i$  recibe y la antena  $j$  transmite,  $h_{ij}(\tau)$ , se calcula como [19]:

$$|h_{i,j}(\tau)| = \sqrt{(h_{i,j}^I(\tau))^2 + (h_{i,j}^Q(\tau))^2} \quad (3.3)$$

y

$$\phi_{h_{i,j}}(\tau) = \arctan\left(\frac{h_{i,j}^Q(\tau)}{h_{i,j}^I(\tau)}\right) \quad (3.4)$$

respectivamente.

Una vez que se ha calculado la matriz entera  $H(\tau)$ , podemos pasar a comparar ambos Sistemas de Medidas. Para ello, el perfil de retardo-potencia (power-delay profile PDP) para cada respuesta al impulso del canal,  $h_{ij}$ , de la matriz MIMO,  $H(\tau)$ , que han sido calculados con ambos sistemas como:

$$PDP_{ij}(\tau) = |h_{ij}(\tau)|^2 \quad (3.5)$$

También podemos calcular RMS - delay Spread como:

$$\tau_{rms} = E\{\tau_{rms}^{ij}\} \quad (3.6)$$

donde

$$\tau_{rms}^{ij} = \sqrt{\frac{\sum_k PDP_{ij}^k \tau_k^2}{\sum_k PDP_{ij}^k} - \left(\frac{\sum_k PDP_{ij}^k \tau_k}{\sum_k PDP_{ij}^k}\right)^2} \quad (3.7)$$

### 3.2 Equipos de Medidas

Los instrumentos utilizados para el sistema de medidas del canal, automatizado por el software implementado en Visual Basic son:

#### 3.2.1 Generador en banda base Agilent 81150A



Figura 3.2 - Generador Banda Base Agilent 81150A [20].

El 81150A de Agilent Technologies es un generador de pulsos en banda base de 120 MHz para señales arbitrarias y de 240 MHz para salidas senoidales, que posee dos canales de salida con la posibilidad de acoplar ambas señales y no estar desfasadas en tiempo. Y algo importante para nuestro proyecto, esta dotado de las siguientes interfaces de entrada/salida: GPIB, LAN o USB para poder ser manejado remotamente mediante instrucciones.

Tiene predefinidas varias funciones en memoria como son Pulsos, Senoidales, Señales Cuadradas, Rampas y Ruido. Y puede almacenar señales de hasta 512k muestras por canal que haya creado el usuario, además de la capacidad de Modulación en FM, AM, PM, PWM y FSK [20].

#### 3.2.2 Modulador I/Q R&S SMATE200A



Figura 3.3 - Modulador R & S® SMATE200A [21].

El R&S® SMATE200A es un Generador de Señales Vectoriales que utilizaremos para la modulación de las señales que vamos transmitir. Está diseñado para entornos de producción. Como tal, la pantalla y el interfaz de usuario del panel han sido eliminados y los conectores están en la parte trasera [21].

Las características más importantes que vamos a necesitar son:

Mejor calidad de la señal

- Muy bajo ruido de fase SSB (típ. -135 dBc / Hz a  $f = 1$  GHz, 20 kHz offset; típ. -140 dBc / Hz, con opción de bajo ruido de fase).
- Ruido de banda ancha de típ. -153 dBc ( $> 10$  MHz portador offset,  $f = 1$  GHz, 1 Hz de ancho de banda de medición)
- Potencia de salida típica +26 DBm del Modulador I/Q con ancho de banda de 200 MHz RF
- Hasta dos generadores de señal totalmente independiente en una sola unidad.
- Hasta dos fuentes independientes de banda que no sólo apoyar la generación de la señal en tiempo real, sino también ofrecer la generación de forma de onda arbitraria con hasta 128 Msamples cada uno.

Conectividad

- control a distancia a través de LAN (Gigabit Ethernet) y GPIB
- Conectores USB para el teclado, ratón
- Conector VGA para un monitor externo

Destacar que las entradas de señal que tiene el modulador son:

- 'I IN A' e 'I IN B' que son la entradas en fase de cada canal.
- 'Q IN A' e 'Q IN B' que son la entradas en cuadratura.

#### 3.2.3 Amplificador Mini Circuits ZVE-8G

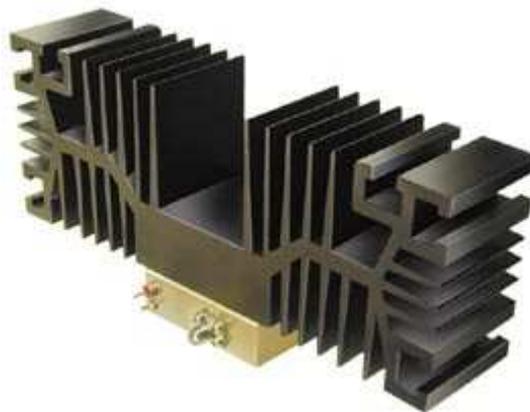


Figura 3.4 - Amplificador Mini Circuits ZVE-8G [22].

Las señales que obtendremos moduladas así como las recibidas por las antenas en recepción, las amplificaremos con el Amplificador Mini Circuits ZVE-8G para que puedan ser detectadas correctamente por nuestro osciloscopio.

Este amplificador tiene las siguientes características:

- Rango de Frecuencias: 2 a 8 GHz
- Ganancia (Min): 30 dB
- Alto Rango Dinámico
- Impedancia In/Out (Ohms): 50/50
- Máxima Salida de Potencia (1 dB Compression): +30 dBm Min.
- Máxima Salida de Potencia, Input (Sin daño): +20 dBm Min.
- Rango Dinámico, NF: 4 dB Typ y IP3: +40 dBm Typ.
- Alimentación: 12 (Volts)
- Corriente Max: 1.2 A
- Conectores In/Out: SMA(Hembra)

#### 3.2.4 Antenas omni-direccionales EM-6116:



Figura 3.5 - Antena omni-direccional EM-6116 [23]

Las antenas EM-6116 omni-direccionales son de polarización vertical, con un ancho de banda que cubre la gama de frecuencias 2 a 10 GHz y una ganancia nominal de +1dBi. La antena puede operar tanto como transmisor como receptor, con una respuesta en frecuencia plana. La antena está encerrada dentro de un radomo resistente para la protección del medio ambiente. Más pequeño que otras antenas similares, el EM-6116 es ideal para aplicaciones en interiores [23].

### 3.2.5 Osciloscopio Agilent Infiniium 90808A:

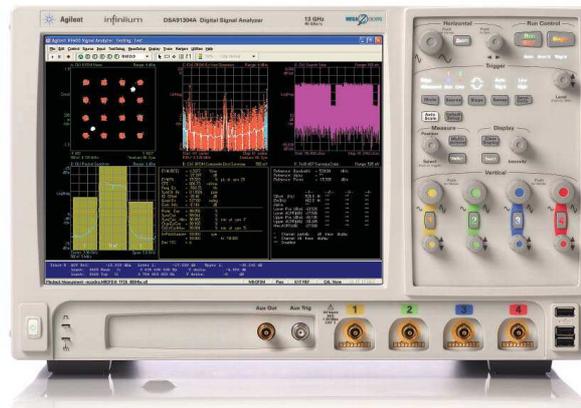


Figura 3.6 - Osciloscopio Infiniium 90808A [24]

Infiniium es el osciloscopio con el que capturaremos las señales recibidas de las antenas receptoras.

Este modelo tiene cuatro canales de entrada y captura simultáneamente en tiempo real, con un ancho de banda máximo de 8GHz y una velocidad de muestreo de hasta 40GSamples/seg para cada uno de los canales, con tiempos de subida/bajada (Rise time/fall time) de 54ps/34ps. A añadir también los 4 bancos de 20Mpts de memoria para almacenar señales capturadas antes de guardarlas en disco.

El osciloscopio puede aplicar un buen número de funciones a cada uno de los canales de entrada como son:

- Matemáticas (valor absoluto, media, suma de señales, etc...)
- FFTs (para el Análisis de las Señales en el Dominio de la Frecuencia)
- Histogramas a las señales de entrada.
- Además, esta dotado de una nueva función propia de Agilent, como es Infiisim<sup>1</sup> con la que podremos aplicarle a cualquiera de los canales de entrada una función de transferencia o parámetros s en tiempo real, útil para eliminar los efectos de los cables y conectores [ver 4.4.2].

El osciloscopio tiene la opción de guardar en disco tanto los puntos de la señal como la imagen (BMP, PNG, TIFF, GIF o JPEG) capturada en pantalla. Hay varios formatos para salvar los datos:

- .wfm (formato interno de Infiniium)
- .txt (archivo de texto)
- .csv (valores separados por comas)
- .tsv (valores separados por tab)

---

<sup>1</sup> Infiisim es una funcionalidad que se adquiere por separado [25].

- .bin (Formato Binario y el que menos tamaño en disco ocupa)

El osciloscopio nos da la posibilidad de guardar en el mismo fichero los canales activos, ahorrando así considerablemente tiempo en el salvado de las señales [ver Anexo 2].

Es posible la instalación de software de terceros en nuestro Osciloscopio, que funciona sobre Windows® XP Pro, como puede ser Matlab, Visual Basic u otras aplicaciones del propio Agilent. Y al igual que el resto de equipo tiene como interfaces de entrada/salida tiene GPIB, LAN, RS-232 (serial) y USB 2.0 para el control remoto [24].

### 3.2.6 Analizador de Redes



Figura 3.7 - Analizador de Redes ENA 5071B [26]

Los Analizadores de Redes 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. El modelo que vamos a utilizar es el ENA 5071B de Agilent, que tiene un rango de frecuencias desde 300Hz hasta los 8,5GHz y posee un puerto de salida y tres de entrada para las señales.

El uso que le daremos a este dispositivo será el de medir el parámetro  $S_{21}$  de los cables y conectores que vamos a utilizar en las medidas, para poder usarlos con la función Infiniisim.

### 3.2.7 Adaptador USB Wireless N Dualband DWA-160 D-Link



Figura 3.8 - Adaptador USB Wireless. [27]

Para tener total independencia entre los equipos que van a generar las señales y los que van a recibirlas, utilizaremos un adaptador USB Wireless para comunicarnos con el osciloscopio estableciendo una red Inalámbrica y así no estar limitados por cables (LAN).

El Mini Adaptador USB Wireless N Dualband DWA-160 de D-Link es un dispositivo cliente 802.11n (draft 2.0) pensado para una conexión inalámbrica segura y confiable, que nos da la posibilidad de trabajar en dos bandas distintas según la configuración elegida.

**Ventajas de los 5GHz:** El DWA-160 soporta señales Wireless N tanto en la banda de 2,4 como en la de 5 GHz. El DWA-160 también es totalmente compatible con redes 802.11a/b/g. Además, la tecnología Wireless N ofrece más velocidad y mayor cobertura que los estándares anteriores. Con el mini adaptador USB DWA-160 disfrutaremos de todos estos beneficios también en la frecuencia de los 5 GHz. Esta frecuencia está menos congestionada y cuenta con un mayor número de canales. De este modo se evitan los problemas de interferencias con otras redes Wi-Fi cercanas u otros dispositivos inalámbricos que operan en los 2,4 GHz (como teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth, etc) [27].

Además:

- Conexión USB 2.0
- Tasas de transferencia de hasta 300 Mbps
- Seguridad de datos con encriptación WPA/WPA2/WPS
- Soporta Windows Vista y XP
- Gestor de redes inalámbrica de D-Link incluido

#### 3.2.8 Ordenador Portátil HP Mini



Figura 3.9 - Portátil HP.

El HP Mini 5101 será el ordenador portátil al que irán conectados todos los equipos y el que ejecutará el Software que manejará el Sistema de Medidas. Es un equipo pequeño y ligero pero lo suficiente potente para manejar el sistema de medidas. Entre sus características cabe destacar:

- Sistema operativo instalado: Windows XP Home
- Procesador: Procesador Intel® Atom™ N280 (1,66 GHz, 667 MHz FSB, 512 KB de caché L2)
- Unidades internas: Unidad de disco duro Serial ATA 160
- Tecnologías inalámbricas: Broadcom 802,11a/b/g/draft-n, Bluetooth® 2.1 opcional, HP Wireless Assistant, módulo de banda ancha móvil opcional EV-DO/HSPA HP un2400 (requiere un servicio de operador de redes móviles)
- Puertos de E/S externos: 3 puertos USB 2.0, VGA, entrada de micrófono estéreo y RJ-45 [28].

### 3.2.9 Cable GPIB/USB



Figura 3.10 - Cable GPIB/USB

El interfaz 82357B USB/GPIB de Agilent, será el encargado de interconectar nuestro portátil y el generador de señales a través de sus interfaces USB y GPIB respectivamente. Gracias a su tasa de transferencia de datos (1.15MB/seg) la comunicación entre equipos será prácticamente en tiempo real.

### 3.3 Interconexión de los Equipos:

Como ya se ha comentado, todos los equipos que componen el sistema de medidas estarán conectados a nuestro portátil. La conexión se hará de la siguiente forma:

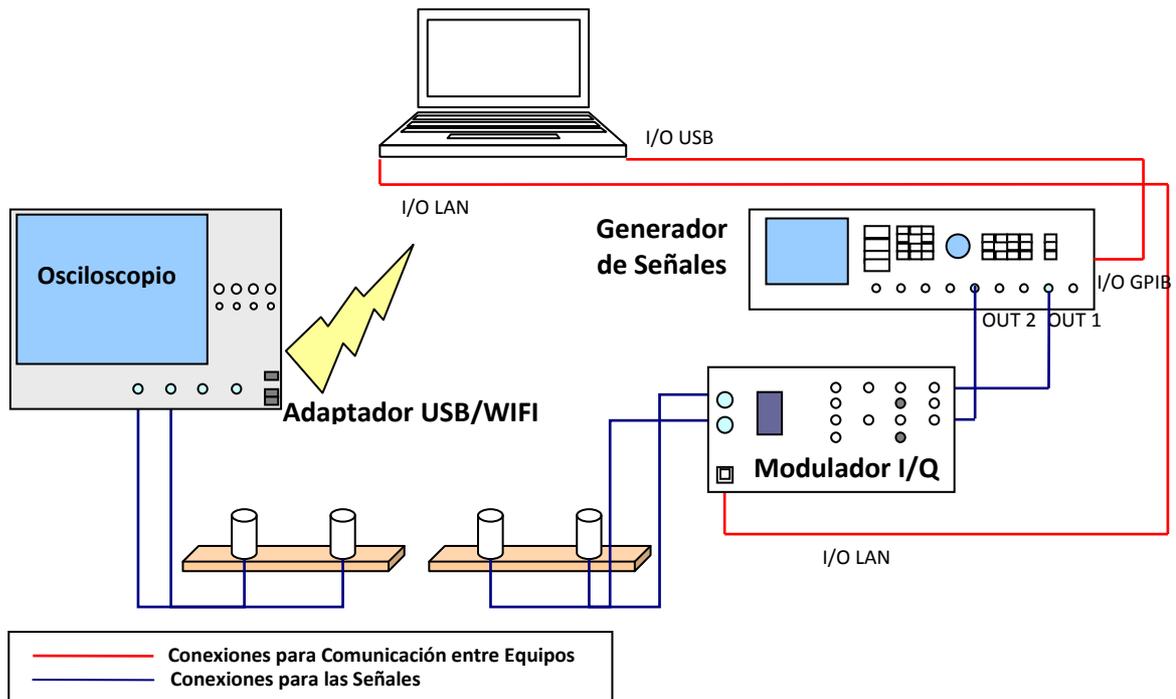


Figura 3.11 - Esquema de Interconexión de Equipos.

- El **Generador de Señales** se conectará mediante el Conector GPIB (puerto 10) al PC por uno de sus USB 2.0. A su vez con cables SMA conectará los puertos OUT1 y OUT2 con los de entrada del Modulador R&S (“I IN A” e “I IN B”), por los que mandará las señales generadas.
- El **Modulador R&S** se comunicará con el PC gracias a su interfaz LAN mediante un cable de red, en una red privada. Además las salidas RF ya moduladas por el SMATE200A irán al amplificador. Los puertos de entrada “Q IN A y B” irán adaptados con cargas.



Figura 3.12 - Modulador R&S SMATE200A – Vista Trasera.

**Osciloscopio y PC** estarán conectados gracias al adaptador USB Wireless que irá en el osciloscopio y la tarjeta WIFI integrada en el Portátil.

La salida del Amplificador y la entrada al Osciloscopio estará conectada con las antenas mediante cables SMA y conectores BNC.

### 3.4 Configuraciones Previas

En alguno de los equipos será necesario la instalación de drivers o configuración de algunos parámetros:

- Instalación de las **Agilent IO Libraries**, tanto en el ordenador portátil como en el osciloscopio. Esto será necesario para poder comunicarnos con los equipos y poder entender las instrucciones que enviemos o recibamos.
- Instalación de los Drivers del **Adaptador USB Wireless** en el Osciloscopio, para el correcto funcionamiento de la conexión WIFI.
- Configuración de las distintas **Redes Privadas** que compondrán nuestro sistema. Configuraremos cada una de la tarjetas de red de la siguiente manera:
  - ✓ Red entre PC y Modulador R&S: utilizaremos una red privada con las direcciones de red 192.168.2.1 y 192.168.2.2 respectivamente.
  - ✓ Red WIFI Ad-Hoc para el PC y Osciloscopio: red 192.168.1.0. [ver Anexo I Configuración Red WIFI].

## Capítulo 4. Aplicación Desarrollada para el Control Remoto.

### 4.1 Entorno Visual Basic

Visual Basic es un lenguaje de programación de los llamados "visuales", puesto que parte de la programación que se realiza con él, se basa en la utilización de elementos visuales. La palabra "Visual" hace referencia a que en lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y la ubicación de los elementos de la interfaz, simplemente podemos agregar objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla.

Visual Basic es un lenguaje orientado a eventos. En las aplicaciones tradicionales o "por procedimientos", la aplicación es la que controla qué partes de código y en qué secuencia se ejecutan. La ejecución comienza con la primera línea de código y continúa con una ruta predefinida a través de la aplicación, llamando a los procedimientos según se necesiten.

En una aplicación controlada por eventos, el código no sigue una ruta predeterminada; ejecuta distintas secciones de código como respuesta a los eventos. Los eventos pueden desencadenarse por acciones del usuario, por mensajes del sistema o de otras aplicaciones, o incluso por la propia aplicación. La secuencia de estos eventos determina la secuencia en la que se ejecuta el código, por lo que la ruta a través del código de la aplicación es diferente cada vez que se ejecuta el programa.

Para manejar los objetos y controles del lenguaje hay que conocer tres conceptos asociados a ellos:

- **Propiedades:** Para todos los objetos y controles de Visual Basic, hay definidas una serie de propiedades que nos permiten controlarlos: nombre, tamaño, color, posición, etc..., la mayoría de las propiedades serán comunes, pero evidentemente, habrá objetos que tengan unas determinadas propiedades específicas.
- **Eventos:** Cada objeto lleva asociados unos determinados eventos que le pueden ocurrir, por ejemplo a un botón, le puede ocurrir que el usuario pulse con el botón principal del ratón sobre él, eso es el evento `NombreDelBotón_Click()`, bien cuando esto ocurra, se dispara este evento, al cual nosotros le añadiremos el código de lo que queremos que haga la aplicación cuando el usuario pulse el botón.
- **Métodos:** Son procedimientos asociados a un objeto, es decir, nos permiten realizar acciones como por ejemplo escribir un texto en un objeto, necesitaríamos usar el método `Print`, con la siguiente sintaxis: `NombreDelObjeto.Print "Texto deseado"`.

El esquema de programación es muy sencillo, para crear una aplicación, primero crearemos un formulario vacío sobre el que iremos poniendo los controles que deseemos, en tiempo de diseño podremos especificar las propiedades iniciales de

esos controles. Posteriormente escribiremos el "código respuesta" a los eventos que queramos controlar de nuestros objetos [29].

### 4.2 Comandos SCPI

Los comandos estándar para instrumentos programables (SCPI) (Standard Commands for Programmable Instruments) definen un conjunto de comandos estándar para el control y medición de los dispositivos en los sistemas de instrumentación.

Los SCPI estándar especifican la sintaxis, la estructura de mando, y formatos de datos para el control de instrumentos programables. El vínculo físico de comunicaciones, tales como GPIB (IEEE-488), RS232 o USB para SCPI también incluye el conjunto de comandos estándar para varias clases de instrumentos, por ejemplo, fuentes de alimentación, cargas, los dispositivos de medición y, como voltímetros y osciloscopios. Un predecesor de SCPI, pero con alcance más limitado, fue IEEE 488.2 en 1987.

Los comandos SCPI son cadenas de texto ASCII, que envían los instrumentos a través de los puertos de salida, tales como GPIB. Las respuestas a comandos de consulta suelen ser cadenas ASCII, también. Sin embargo, para los datos en general, tales como adquisición de datos de la señal, pueden ser utilizados los formatos binarios [30].

Dos ejemplos de nuestro software:

- Si al generador le enviamos "APPL1:USER 2.5E9, 1 , 0" le estaremos diciendo que la salida sea la Señal definida previamente por el Usuario, con una frecuencia de 2.5 GHz, una amplitud de 1 voltio y 0 voltios de Offset.
- Mientras que si al osciloscopio le mandamos "ACQUIRE:BANDwidth 8E9" este lo interpretará como que las adquisiciones se harán con un ancho limitado a 8GHz

Algunos fabricantes de instrumentos, en particular, Agilent, Berkeley Nucleonics y Tektronix, han implementado SCPI en muchos de los nuevos instrumentos de propósito general.

En 2002-2003, el Consorcio SCPI votó a favor de formar parte de la Fundación IVI (Interchangeable Virtual Instruments).

### 4.3 El Software:

En esta sección pasaremos a explicar la configuración y funcionamiento del Software implementado para el control remoto del equipo de medidas en el tiempo para sistemas MIMO de banda ancha.

El software desarrollado en Visual Basic es de fácil manejo y no es necesario tener conocimientos muy avanzados en el manejo de los instrumentos o en la teoría de señales para poder obtener resultados.

## Capítulo 4. Aplicación Desarrollada para el Control Remoto

La aplicación se basa en una pantalla principal con los parámetros fundamentales y una secundaria para la configuración de parámetros más específicos de los equipos.

El funcionamiento tiene tres fases: Inicialización del Programa, Configuración de Parámetros y Tanda de Capturas.

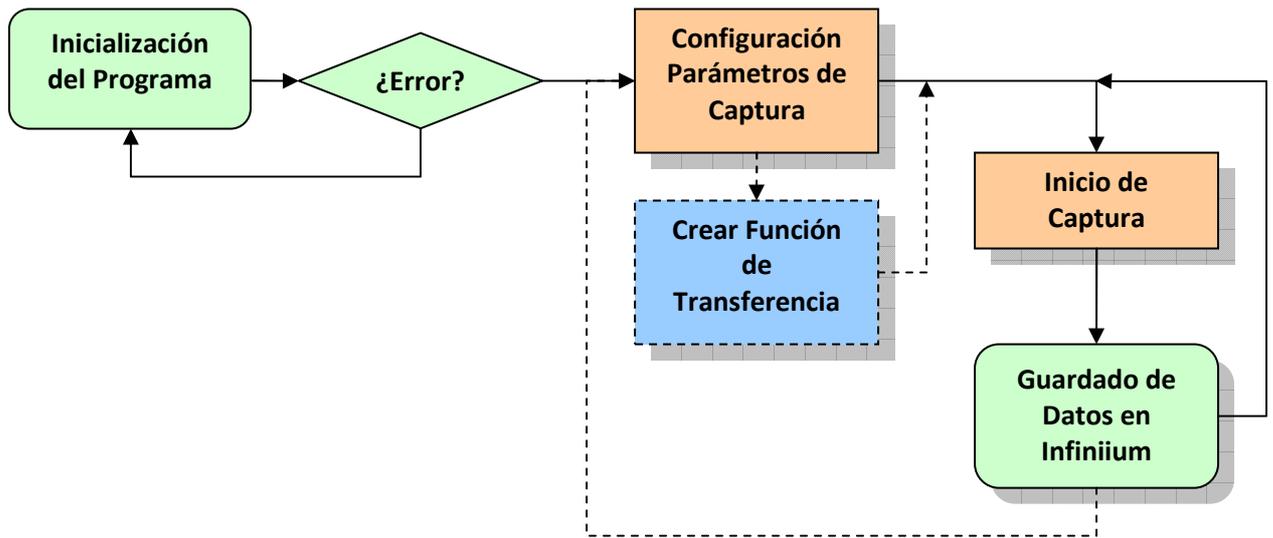


Figura 4.1 - Diagrama de Bloque del Funcionamiento del Programa

### 4.3.1 Puesta en marcha:

Al iniciar el programa, éste se encargará de conectarse al generador, modulador y osciloscopio; en el caso de que alguno de estos equipos no este conectado o bien configurado el programa nos pedirá que revisemos la conexión de los equipos y recarguemos el programa con el botón 'Recargar' para su efecto. Si todo va bien aparecerá la pantalla principal con un mensaje en el cuadro de estado de '¡¡Conexión con los Equipos!!'.

4.3.2 Pantalla Principal:



Figura 4.2 - Pantalla principal una vez configurados los equipos.

Los principales campos de esta pantalla son:

- **Direcciones de los equipos conectados:** estos campos están deshabilitados al usuario y son informativos para conocer las direcciones de cada uno de los equipos. El generador de señales conectado por GPIB tiene la dirección 10, el modulador R&S conectado mediante cable de red a la interfaz LAN tiene la 192.168.0.2 y el Infiniium con el adaptador USB Wireless tendrá la 192.168.1.2. Si se quisieran cambiar estas direcciones podríamos hacerlo en 'Config. Otros Parámetros'.
- **Frecuencia Central:** en la que especificaremos la frecuencia central de la señal que queremos medir. El desplegable nos da la posibilidad de elegir el orden de magnitud MHz o GHz.
- **Ancho de Banda:** como bien dice es el ancho de banda del canal que queremos medir.
- **Nº Antenas Transmisoras:** Puesto que el software está diseñado para un Sistema MIMO, tenemos la opción de especificar si vamos a transmitir con una o dos antenas a la vez. Mas de dos antenas no es posible ya que el Modulador R&S solo tiene dos salidas.

## Capítulo 4. Aplicación Desarrollada para el Control Remoto

- **Nº Antenas Receptoras:** Será el número de antenas en recepción conectadas al osciloscopio. Si el número de antenas es igual a dos, las capturas de ambas antenas se guardarán en un único fichero que contendrá el eje temporal y los valores de las dos capturas.
- **Directorio Destino:** será la dirección dentro del osciloscopio en la que se guardarán las capturas. Si el directorio no existiese, el software lo crearía automáticamente.
- **Nombre Capturas:** Es el nombre con el que se almacenarán las capturas. Si ya existiese alguna captura con ese nombre se sobrescribirán las nuevas capturas. Está deshabilitado y es sólo informativo para el usuario. Internamente el nombre de las capturas sigue la siguiente nomenclatura:
  - **SIGNAL\_1\_N:** 1 nos indica que el archivo contiene la captura del Canal 1, porque previamente habremos configurado como antenas receptoras una sola de ellas. Siendo N el número de captura.
  - **SIGNAL\_1+2\_N:** 1+2 nos indica que el archivo contiene la captura de los dos canales (Canal 1 y 2). Siendo N el número de captura.
- **Número de Capturas:** en el indicaremos cuantas capturas seguidas (o repeticiones) queremos hacer cuando se presione al botón “>> **ADQUIRIR** <<”.
- **Eliminar Perdidas de Inserción:** si seleccionamos esta casilla, el osciloscopio aplicará una función de transferencia a las capturas, para eliminar efectos indeseados introducidos por los cables y/o conectores mediante la función Infiinisim [ver 4.4.2]. Al activar la casilla se nos mostrará un mensaje en el que nos especificará el directorio del osciloscopio en el que se debe encontrar el archivo ‘.tf2’.

Al activar la casilla, nos aparecerá un nuevo desplegable ‘Escala Visualización Infiinisim’ que es propio de esta función y necesario para poder representar correctamente la señal en pantalla. Con este parámetro le indicaremos la Escala de Visualización de la señal tras ser aplicada la función Infiinisim.

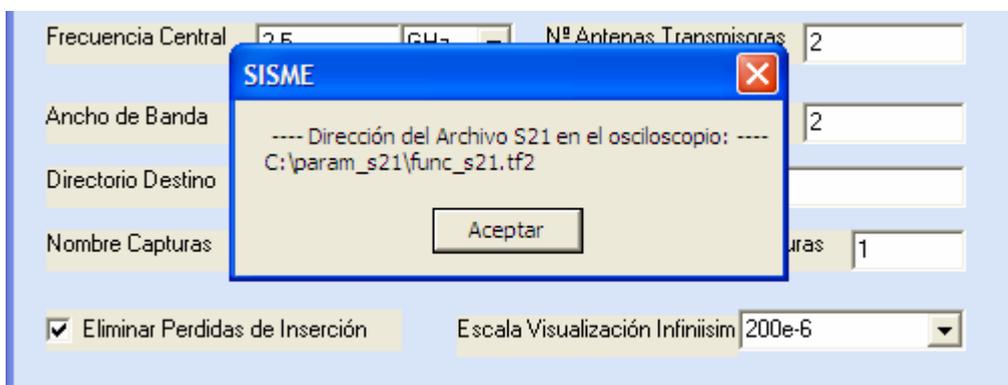


Figura 4.3 - Dirección del archivo  $S_{21}$  en el osciloscopio.

Botones de la pantalla principal:

- **CONFIGURAR:** al hacer clic, configuraremos los tres equipos con los parámetros introducidos. Con esta acción cambiará el nombre mostrado por el de ">> RE-CONFIGURAR <<", se habilitará el botón ">> ADQUIRIR <<" y deshabilitará el de "Config. Otros Parámetros" así como todos los campos de introducción de parámetros. Si quisiéramos cambiar algún parámetro tendríamos que pulsar el botón ">> RE-CONFIGURAR <<".

**Nota:** Si la opción 'Eliminar Perdidas de Inserción' esta activada, la configuración puede tardar varios minutos que se nos indicará en un mensaje al darle al botón ">> CONFIGURAR <<", necesarios para la activación del Infiniisim.

- **ADQUIRIR:** deshabilitado inicialmente hasta que se hayan configurado los equipos, es el encargado de comenzar con la adquisición y el guardado de las capturas en el osciloscopio.

- **Config. Actual:** este nos mostrará un resumen de todos los parámetros con los que vamos a configurar nuestros equipos.

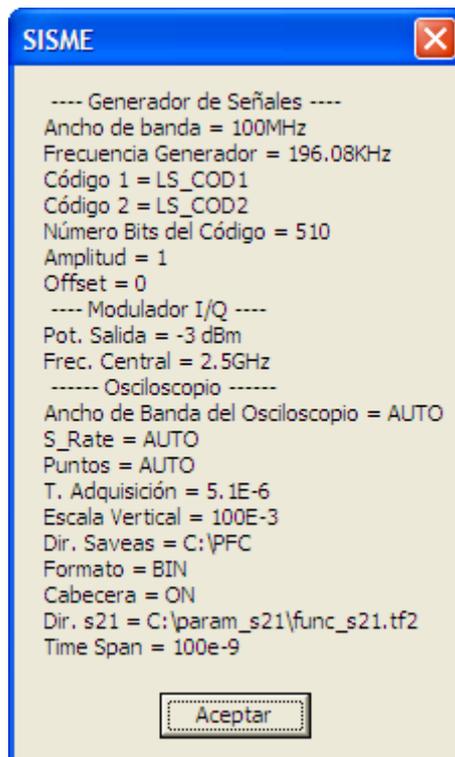


Figura 4.4 - Resumen de la Configuración de los equipos.

- **Config. Otros Parámetros:** este nos sacará una segunda pantalla para la configuración de otros parámetros que pueden ser interesantes en nuestra adquisición.
- **Recargar:** solo es visible cuando ocurre un error al cargar inicialmente el programa y con él recargaremos las configuraciones iniciales de los equipos.

- **STOP:** aparecerá en pantalla cuando comencemos las capturas y lo podremos usar para detener la tanda de capturas en el momento en el que lo presionemos.
- **Ayuda:** Se nos mostrará una ventana de ayuda, que nos guiará en el funcionamiento y configuración del software de una manera facil e intuitiva. Dicha ayuda ha sido creada con el programa 'HTML Help Workshop', y el resultados lo vemos en la Figura 4.5:

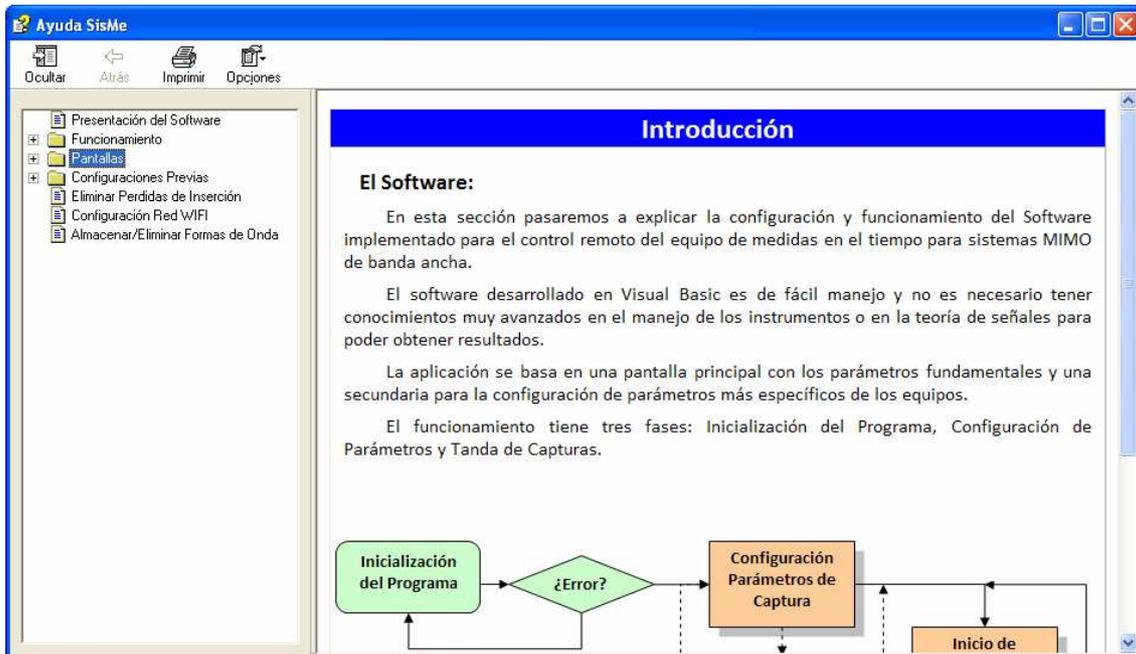


Figura 4.5 – Ventana de Ayuda del Software de Medidas del Canal MIMO

También tenemos un **Cuadro de Estado** en la parte inferior de la pantalla principal donde aparecerán mensajes informativos. Además de una **Barra de Progreso** para seguir el proceso de capturas.

### 4.3.3 Pantalla de Configuración de Otros Parámetros

En esta pantalla se podrán configurar una serie de parámetros más específicos de los equipos que pueden ser interesantes según el tipo de medidas que queramos hacer.

Como se puede ver en la Figura 4.6 los parámetros están agrupados según al equipo al que pertenecen.

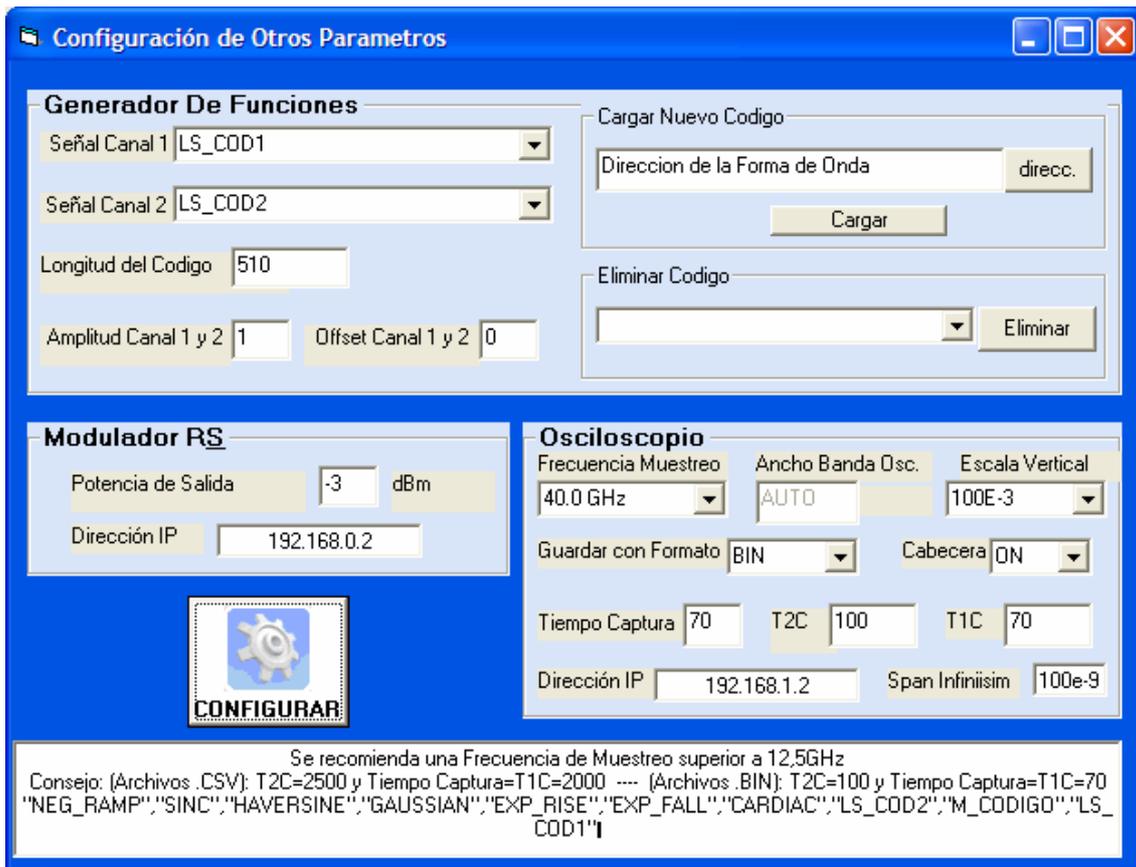


Figura 4.6 - Pantalla secundaria, Configuración Otros Parámetros.

Del Generador de Funciones:

- **Señal Canal 1 y 2:** en la que podremos seleccionar el tipo de código que queremos que transmita el generador por cada uno de los canales. A modo de desplegable nos muestra los distintos códigos almacenados en la memoria del Generador.
- **Longitud del Código:** es el número de bits que originalmente tiene nuestro código.
- **Amplitud Canal 1 y 2:** será la amplitud en voltios de las señales generadas por el generador.
- **Offset Canal 1 y 2:** será el Offset o desplazamiento de la señal respecto del origen (en voltios).
- **Cargar Nuevo Código:** Tenemos la posibilidad de almacenar en la memoria del generador nuevos códigos que tengamos en nuestro PC, para su posterior utilización [ver 4.4.4].
- **Eliminar Código:** puesto que el número de códigos que se pueden almacenar en la memoria del generador son limitados, podemos eliminar alguno de los ya existentes para dejar espacio para otros nuevos.

Del Modulador R&S:

- **Potencia de Salida:** es el único parámetro que nos queda por poder cambiar, y es la Potencia de Transmisión en dBm, por defecto está fijado a -3dBm.
- **Dirección IP** del Modulador.

Del Osciloscopio:

- **Frecuencia Muestreo:** será la velocidad a la que el osciloscopio tomará muestras por segundo para representarlas en pantalla.
- **Ancho de Banda:** nos limitará la máxima frecuencia de la señal de entrada. Por defecto a **AUTO** o, lo que es lo mismo, al máximo valor del Osciloscopio unos **8 GHz** y es un campo que está deshabilitado.
- **Escala Vertical:** Escala o rango de representación vertical de la señal de entrada en voltios. En el caso de estar activado Infiniisim, esta escala será la de adquisición de la señal. Si no, es además, la escala de representación en pantalla.
- **Guardar con Formato:** es el tipo de Formato con el que se guardarán las capturas en el osciloscopio. Por defecto **.BIN** que es la que menos espacio ocupa en disco (ver Anexo II).
- **Cabecera:** si se elige **ON**, las capturas guardadas tendrán al inicio del fichero una serie de datos de las capturas. En caso contrario se deshabilitará la cabecera. Para cualquier tipo de Formato elegido se puede optar por añadir cabecera o no, sin ningún tipo de problema.
- **Tiempo Captura, T2C y T1C:** son valores internos del programa y se refieren a los tiempos de captura y almacenado de las capturas en milisegundos.
  - ✓ Tiempo Captura: es el tiempo de espera tras hacer la captura y mostrarla en pantalla.
  - ✓ T1C: tiempo de espera para guardar la captura de un solo canal.
  - ✓ T2C: tiempo de espera para guardar la captura de dos canales en el mismo fichero.

Por defecto, los valores están ya fijados y en función del formato en el que se quieran guardar las capturas cambiarán estos valores, ya que el tamaño en disco de uno y otro formato varía. Con la función Infiniisim activada estos tiempos se ven incrementados.

- **Dirección IP** del Osciloscopio.
- **Span Infiniisim:** controlamos la duración máxima de la respuesta al impulso de la función de transferencia. El aumento de este control permite a Infiniisim aplicar transformaciones que tienen constantes de tiempo más lentas. Por defecto se fija a 100ns.

#### 4.3.4 Comienzo de la Tanda de Capturas

Una vez configurados todos los parámetros del Software y habiéndole dado al botón “>> CONFIGURAR <<” se nos habilitará el botón “>> ADQUIRIR <<”, si lo pulsamos comenzará la tanda de capturas. Puesto que se pueden hacer un buen número de capturas seguidas, al comenzar la Adquisición, aparecerá un nuevo botón “STOP” (como se puede ver en la Figura 4.7) por si, por algún motivo, quisiéramos detener las adquisiciones y no esperar a que haga el número que le hubiéramos indicado en ‘Número de Capturas’.

La Pantalla Principal posee de una barra de progreso para poder conocer en cada instante el estado actual de la tanda de capturas y poder hacerse una idea del tiempo que falta para finalizar las capturas. Finalizadas las capturas el software nos indicará que se han hecho con éxito y que está preparado para una nueva Tanda de capturas.

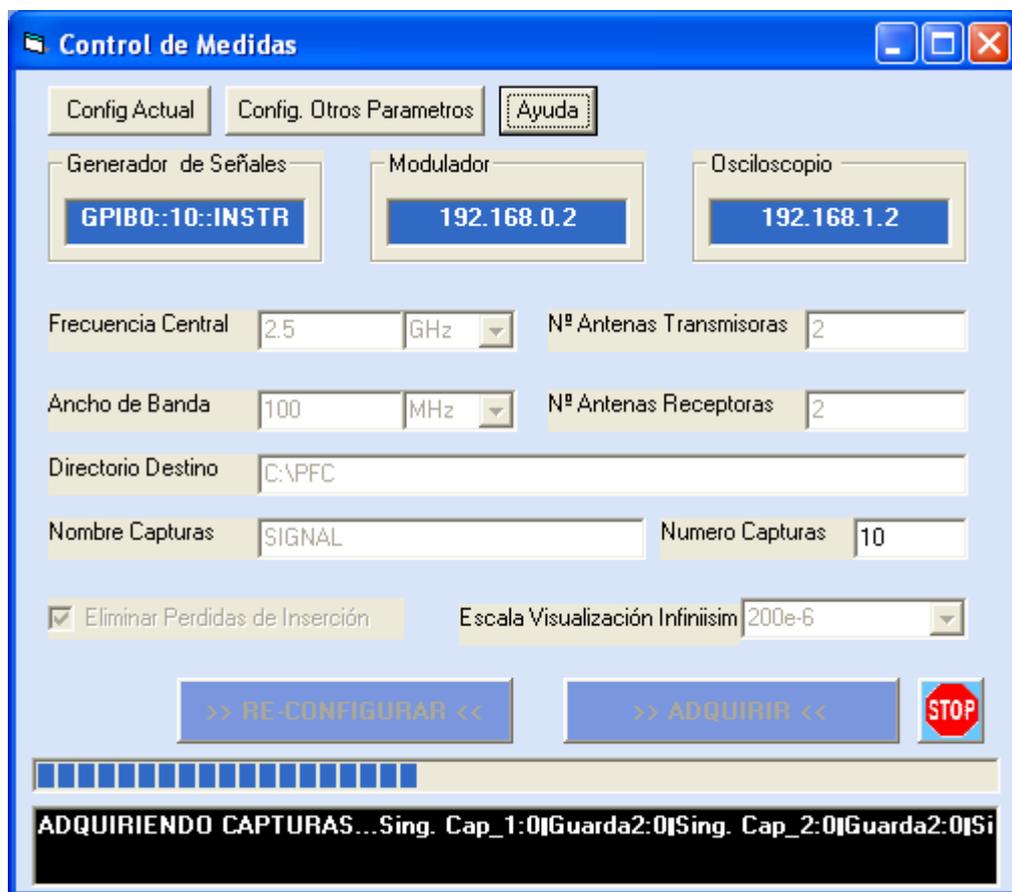


Figura 4.7 - Software en plena Captura de Señales

## 4.4 Consideraciones de las Configuraciones

### 4.4.1 Relación entre Ancho de Banda y Frecuencia de Modulación de la señal

En la pantalla principal del programa se nos piden una serie de parámetros como son la frecuencia central y ancho de banda, ya que otro valor importante como es la Longitud del Código es conocido por el usuario e interno en el programa pero que se puede modificar en la Configuración de Otros Parámetros.

## Capítulo 4. Aplicación Desarrollada para el Control Remoto

Para explicar como el software utiliza estos parámetros para configurar el Generador de Señales y Modulador R&S se utilizará un ejemplo práctico:

Para este caso en particular vamos a utilizar el Código LS generado y almacenado en el Generador que tiene unas características especiales (ver Anexo III) y una longitud de código de 510 bits. Además, como valores de configuración usaremos un ancho de banda, BW, de 100 MHz y una frecuencia central,  $f_c$ , de 2,5GHz. Con todo ello tenemos lo siguiente:

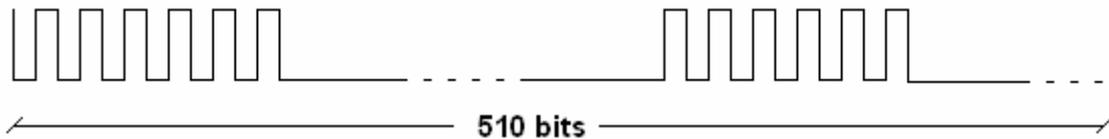


Figura 4.8 - Ejemplo de Código.

Esta señal tiene un Tiempo de Bit de  $T_b = 1/BW = 1/100\text{MHz} = 10 \text{ ns}$ , que es el tiempo de 1 ó 0, siendo 100 MHz el ancho de banda en Banda Base de nuestra señal generada.

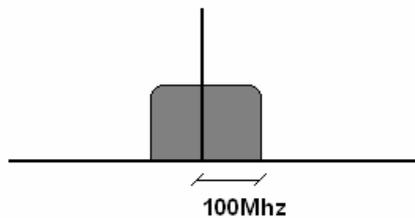


Figura 4.9 - Señal en Banda Base.

Por lo que el tiempo que necesita el código al completo es

$$T_{\text{cod}} = 510\text{bits} \cdot T_b = 5.1\mu\text{s}$$

Con este valor, ya podemos sacar la frecuencia que utilizará el Generador

$$F_g = 1/T_{\text{cod}} = 196.08\text{KHz}$$

que es la Frecuencia de Modulación o la frecuencia de repetición del Código LS.

La señal de 100MHz en banda base es modulada con un coseno de 2.5GHz por el Modulador obteniendo la señal de 200 MHz centrada en 2.5GHz, como se muestra en la figura:

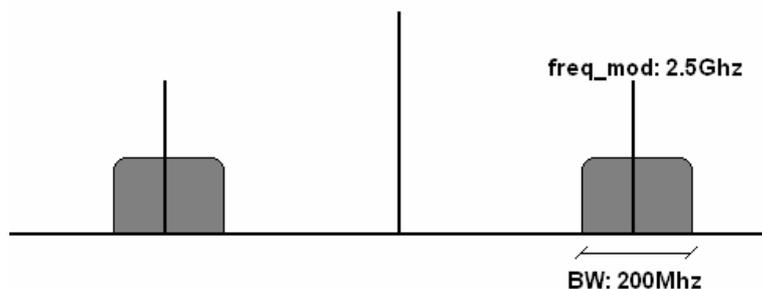


Figura 4.10 - Señal Modulada por Coseno.

Reseñar que el tiempo de adquisición del osciloscopio será el Tiempo de Código ( $T_{cod}$ ), para así capturar una trama completa del código.

Puesto que la Frecuencia de Chip de la Señal es igual al Ancho de Banda, BW, que el usuario introduce en el software. Cuando queremos comparar las medidas con el antiguo sistemas de medidas utilizando el Analizador de Redes (ENA), el BW que utilizamos en el ENA es el mismo que se ha medido con el sistema en el dominio del tiempo.

Con esto podemos ver, que lo único que el usuario debe saber para comenzar a hacer las medidas es la Frecuencia central y el ancho de Banda de la Señal que quiere analizar.

### 4.4.2 Eliminación de las Pérdidas de Inserción mediante Infiniisim

Cuando hacemos una captura, lo que obtenemos no es precisamente la señal transmitida con el efecto del medio, sino que ésta también se ve modificada por los efectos introducidos por los cables y conectores de las antenas. Para eliminar estos efectos, nos vamos a valer de una nueva función del osciloscopio, el Infiniisim.

Para utilizar esta función debemos conseguir previamente el parámetro  $S_{21}$ , para ello actuaremos de la siguiente forma (Figura 4.11):

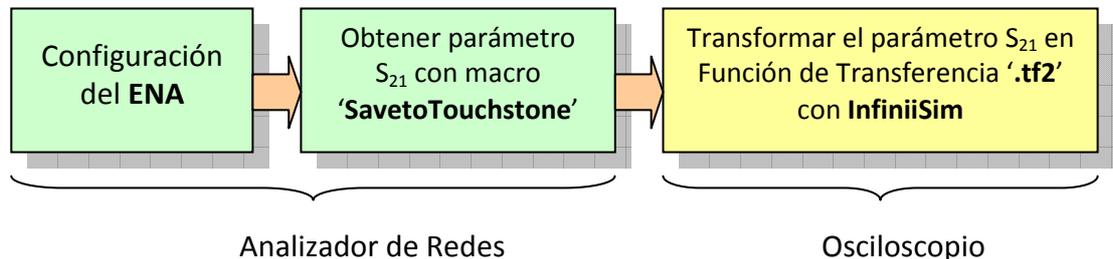


Figura 4.11 - Obtención de la Función de Transferencia.

#### o Parámetros-S

Muchas propiedades eléctricas útiles de las redes o de componentes pueden expresarse por medio de los parámetros-S, como por ejemplo la ganancia, pérdida por retorno, relación de onda estacionaria de tensión (ROEV), coeficiente de reflexión y estabilidad de amplificación. El término 'dispersión' (del inglés, scattering) en el contexto de los parámetros-S, se refiere a la forma en que las corrientes y tensiones que se desplazan en una línea de transmisión son afectadas cuando se encuentran con una discontinuidad debida por la introducción de una red en una línea de transmisión. Esto equivale a la onda encontrándose con una impedancia diferente de la impedancia característica de la línea. En general los parámetros-S cambian con la frecuencia a la que se miden, razón por la cual ésta debe especificarse para cualquier medición de parámetros-S, junto con la impedancia característica o la impedancia del sistema. Los parámetros-S se representan en una matriz (Figura 4.12).

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdot & \cdot & S_{1n} \\ S_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{pmatrix}$$

Figura 4.12 - Matriz de Parámetros-S.

El parámetro que nos interesa es el  $S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$ , que nos representa la relación entre la onda  $a_1$  de entrada y la onda de salida  $b_2$ .

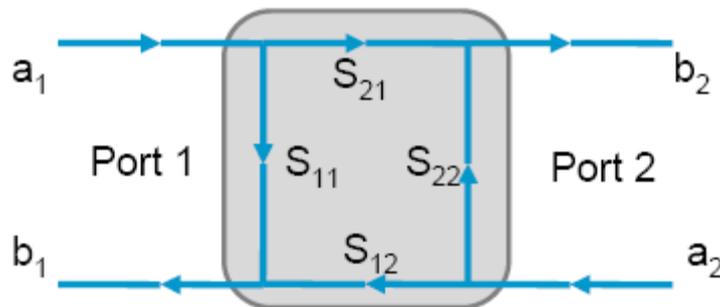


Figura 4.13 - Dispositivo de 2 puertos [31].

Lo que buscamos con los parámetros S es deshacer los efectos de los cables. Si suponemos que:

$M(k)$ : Datos de la adquisición, que obtiene el osciloscopio por sus canales

$S(n)$ : Medida en Tiempo discreto, que realmente queremos medir

$H(n-k)$ : Representación de la Función Transferencia

Por lo que haremos  $M(k) * H(n-k) = S(n)$ , para obtener finalmente  $S(n)$ , siendo:

$H(n-k) = S_{21}^{-1}$  (Eliminando Perdidas por Inserción) [31].

#### o Conseguir el Parámetro $S_{21}$

Puesto que el Osciloscopio no puede obtener el parámetro  $S_{21}$  con ninguna de sus funcionalidades, usaremos el Analizador de Redes y una de las macros de Visual Basic que lleva incorporada.

Lo primero que haremos será conectar el circuito, que vayamos a utilizar en las medidas para conectar las antenas, al Analizador de Redes en los puertos 1 y 2 para obtener el parámetro  $S_{21}$  y, muy importante, si estamos utilizando amplificadores deberemos limitar la entrada del ENA para no saturarlo, esto lo haremos en **Sweet Setup** → **Power**; en nuestro caso que utilizaremos dos amplificadores de 30dB cada uno, situaremos el parámetro Power a -55dBm.

Y ahora configuraremos el Analizador con los siguientes valores:

- **Measurements:** S21
- **Format:** Polar (Lin/Phase)
- **Stimulus:** Frecuencia central igual a la frecuencia que queremos analizar y Span al doble del ancho de banda
- **Sweep:** Points al numero de puntos deseados.

Pasamos ahora a obtener el parámetro  $S_{21}$ . Para cargar la macro de Visual 'Save To Touchstone'<sup>2</sup> seguimos los siguientes pasos:

- Presionamos [**Macro Setup**].
- Presionamos **Load Project**.
- Aparecerá un menú en el que elegiremos la macro de VB alojada en "**D:\Agilent\SaveToTouchstone.vba**"
- Presionamos el botón **Open**.
- Presionamos [**Macro Run**] y arrancará la macro.

En la Figura 4.14 podemos ver la macro de Visual Basic ejecutándose en el Analizador de Redes, que esta configurado con los parámetros anteriores

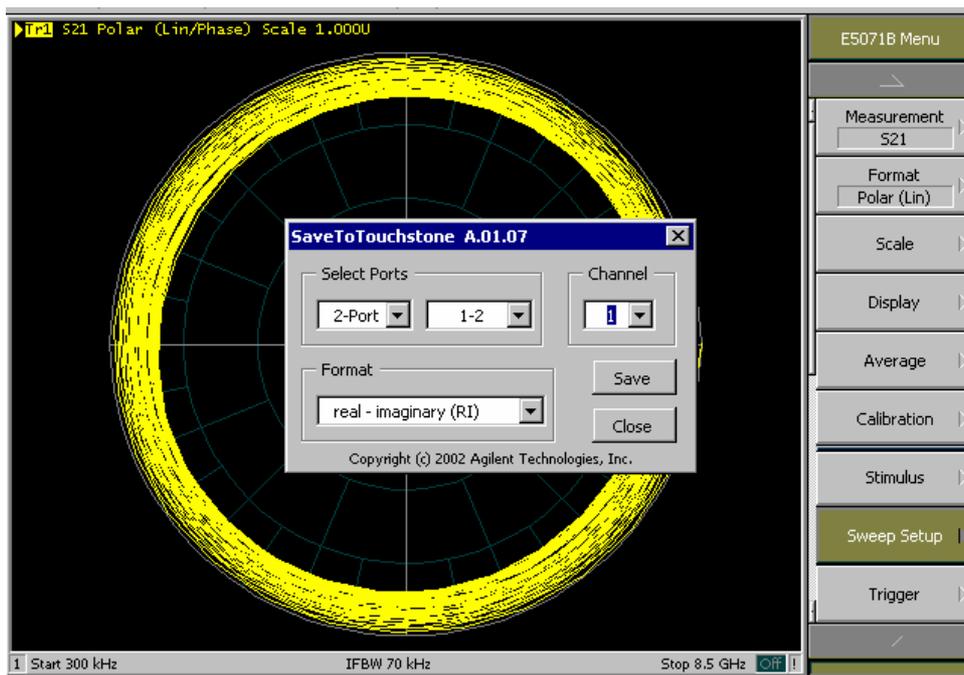


Figura 4.14 - Macro SaveToTouchstone de VB.

Con la macro ya activa, generamos y guardamos el parámetro  $S_{21}$ , haciendo lo siguiente:

---

<sup>2</sup> Podemos encontrar la macro de Visual y un pequeño manual en la Web de Agilent: [32]

1. Seleccionamos el número de puertos, en nuestro caso 2, y los puertos de los que queremos el parámetro (1-2) del **'Select Ports'**.
2. Seleccionamos el canal 1 del **'Channel'**.
3. Seleccionamos el formato en el que vamos a guardar el parámetro S21 en **'Format'**. Cualquiera de estos formatos es valido para Infiniisim:
  - i. real - imaginary (RI) : formato real e imaginario.
  - ii. magunitude - angle (MA): magnitud lineal y fase en grados.
  - iii. dB - angle (DB): magnitud logarítmica (db) y fase en grados.

Pero para poder manejar el fichero con un editor de texto, se recomienda el formato dB - angle (DB) que lo hace más intuitivo.
4. Presionamos el botón **Save**.
5. Cuando la medida se haya completado aparecerá un menú **"Save As"** para guardar el parámetro. Especificar el nombre y presionar **"Save"**
6. Cuando se haya guardado el parámetro, aparecerá la pantalla de inicio otra vez.

### o *InfiniiSim de Agilent*

El software InfiniiSim de Agilent, que se encuentra en el osciloscopio Infiniium, nos permite modelar las pérdidas existentes y los factores de distorsión en la adquisición datos [33].

Lo primero que haremos será crear la función de transferencia para dos puertos '.tf2' con el Infiniisim, que mas tarde cargaremos con nuestro software. Accedemos al menú de Infiniisim a través de **Setup -> Channel 1 . . . (or Channel 2, Channel 3, or Channel 4)**, seleccionamos **'2 Port'** y presionamos **'Setup...'**

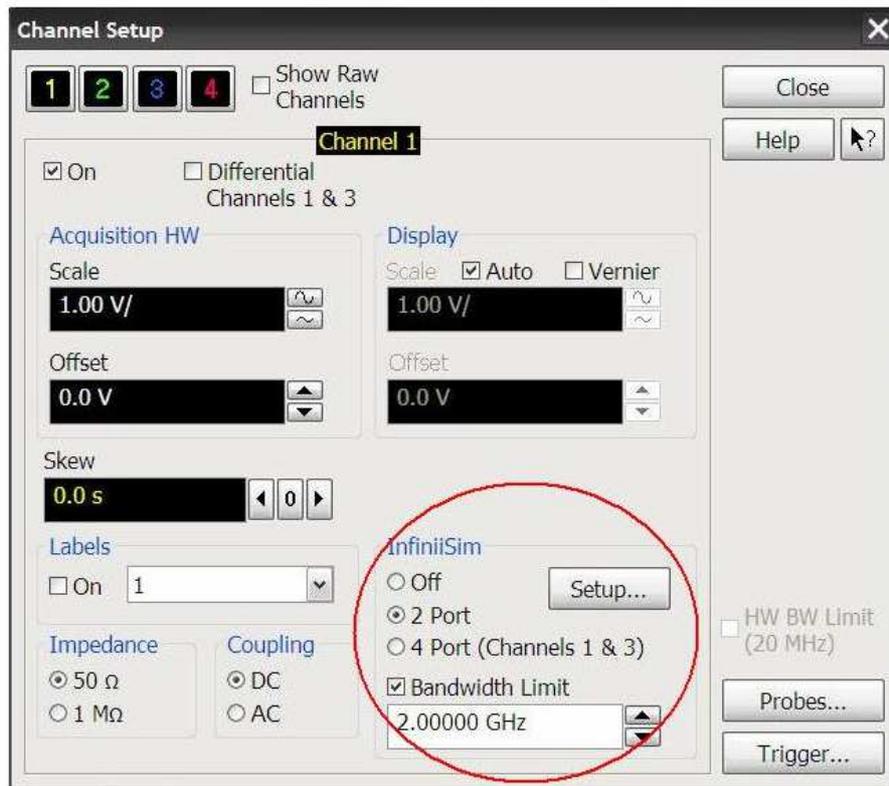


Figura 4.15 - Channel Setup.

A continuación nos aparecerá el menú de Setup de InfiniiSim en el que le daremos al botón **'Create Transfer Function From Model...'** para poder crear nuestra función de transferencia

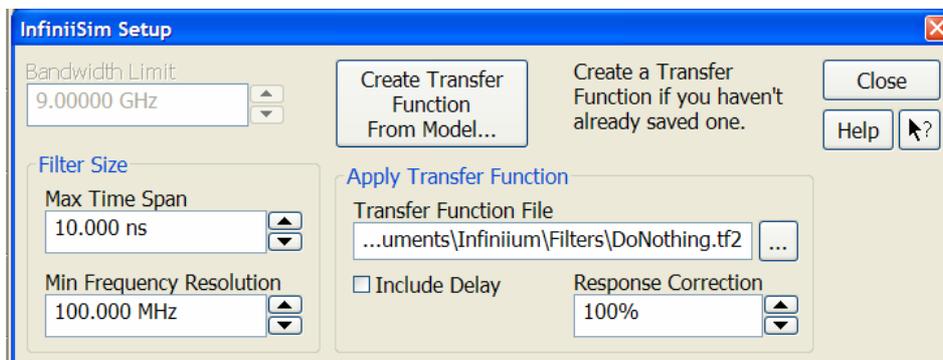


Figura 4.16 - InfiniiSim Setup.

De todas las opciones del **'Application Preset'** escogeremos **'Remove insertion loss of a fixture or cable'** para eliminar los efectos indeseados.

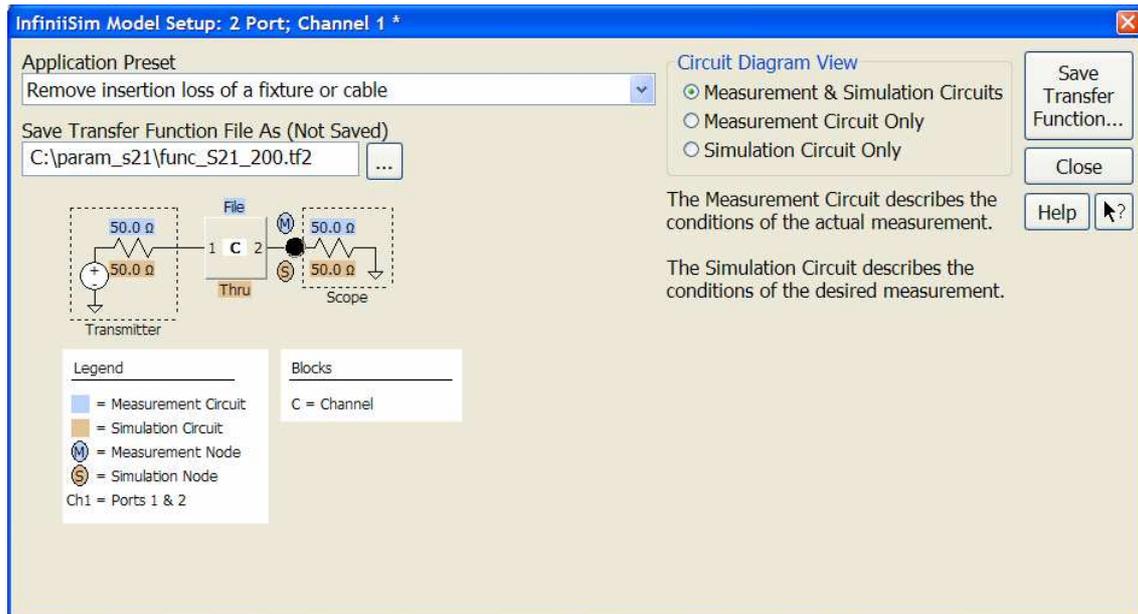


Figura 4.17 - InfiniiSim Model Setup.

El software nos creará un modelo como el de la figura, en el que la caja representa el parámetro-s que representa los cables y conectores de las antenas.

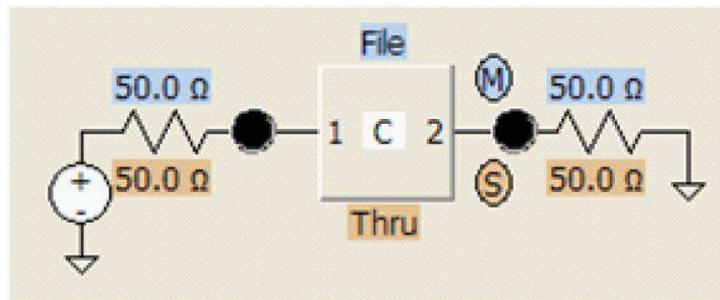


Figura 4.15

Figura 4.18 - Modelo para eliminación de efectos de InfiniiSim

Si nos metemos dentro del bloque, nos saldrá el menú de configuración de éste, donde debemos indicarle en el '**Block Type**' que el tipo de bloque es a partir de un Archivo de Parámetros-s (S-parameter File con extensión .s2p) e indicarle la localización del archivo dentro del osciloscopio.

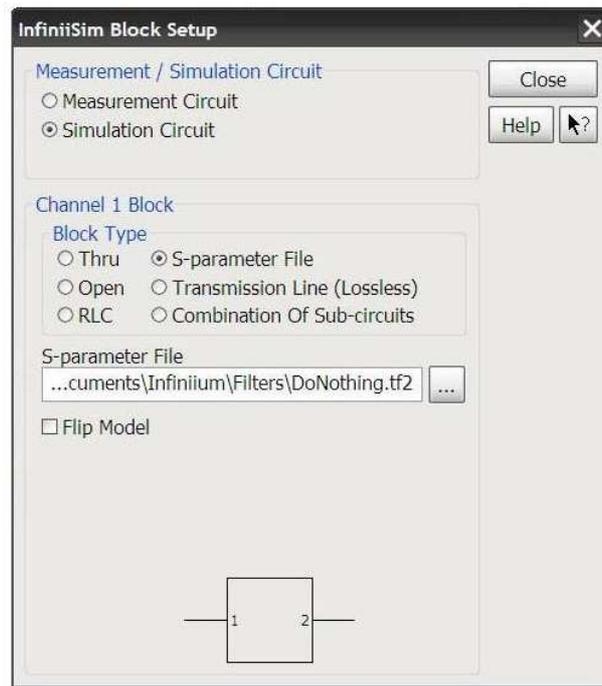


Figura 4.19 - Setup del Bloque de Infiniisim

Una vez hecho esto, le daremos nombre al archivo .tf2 y guardaremos la función de transferencia con **'Save Transfer Function...'** en la dirección del disco **"C:/param\_s21"** para que nuestro software pueda utilizarla y aplicársela a los canales.

La limitación de nuestro software de medidas es que aplica la misma función de transferencia a los dos canales, en el caso de utilizarse, aunque el osciloscopio Infiniium está preparado para poder usar diferentes funciones para cada uno de los cuatro canales que tiene, esto se debe a que se necesita tener los mismos dispositivos en las dos ramas del sistema de medidas.

El procesamiento de la señal de entrada con la función de transferencia se hace en tiempo real, por lo que no nos limitará a la hora de capturar y guardar las capturas.

En la Figura 4.20 podemos ver un ejemplo de una función de transferencia aplicada a las señales de entrada en el dominio de la frecuencia. Vemos la función de transferencia (en amarillo) del parámetro  $S_{21}$  que se ha obtenido previamente con el analizador de redes definido entre los 2.4GHz y 2.6GHz. A la señal obtenida por las antenas (en verde) se le aplica Infiniisim y se obtiene la señal simulada (en azul) que es aproximadamente 60dB inferior, ya que se elimina los efectos del cable, conectores y amplificadores.

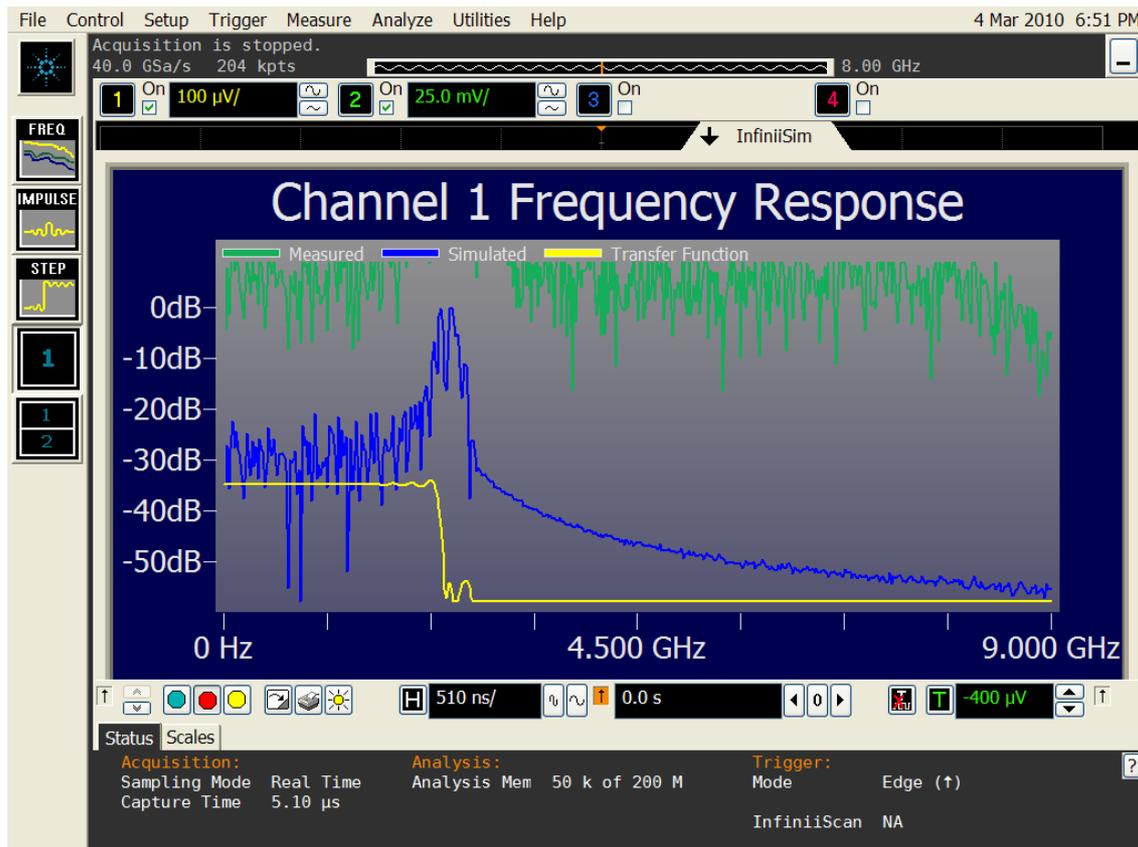


Figura 4.20 - Ejemplo de Función de Transferencia aplicada por Infiniisim

#### 4.4.3 Ancho de Banda y Frecuencia de Muestreo

A continuación se describen dos parámetros de gran importancia del generador como son el ancho de banda y la frecuencia de muestreo.

- **Ancho de banda:** nos especifica el rango de frecuencias en las que los osciloscopios pueden medir con precisión. El ancho de banda se calcula desde 0Hz (continua) hasta la frecuencia a la cual una señal de tipo senoidal se visualiza a un 70.7% del valor aplicado a la entrada.

Por defecto tiene el valor AUTO que nos fija el ancho de banda al máximo de su capacidad, en este caso para el Infiniium 90808A es de 8 GHz. El manejo de este parámetro puede ser interesante ya que si nuestra señal modulada llega a los 3GHz, hay un rango de frecuencias entre 3 y 8GHz en las que se podrían pasar señales indeseadas y ruido a alta frecuencia que nos distorsionen la medida del canal. Por lo que podríamos reducir, este valor sin variar los resultados esperados. Sin embargo es una opción que se adquiere por separado con el Infiniium.

- **Frecuencia de muestreo:** en los osciloscopios digitales se indican cuantas muestras por segundo son capaces de tomar el sistema de adquisición de datos (específicamente el convertor A/D). Una velocidad de muestro grande es importante a la hora de poder visualizar pequeños periodos de tiempo.

## Capítulo 4. Aplicación Desarrollada para el Control Remoto

Al igual que nos pasa con el ancho de banda, este parámetro también esta por defecto al máximo, a 40GSs. El efecto producido de muestrear a tan alta velocidad es que cogemos muchas muestras por periodo de la señal, lo que implica un alto número de puntos a almacenar en memoria y más tiempo para guardar la captura. Por el teorema de Nyquist, el mínimo de frecuencia es el doble, pero para adquirir la señal con una precisión aceptable, comprobamos que hay que hacerlo al menos a cinco veces la frecuencia máxima. Por lo que si a 2.5Ghz (frecuencia moduladora) tenemos un periodo del coseno de 400ps, cogiendo 5 muestras de ese coseno cogemos muestras cada 80ps → 12.5GS/s de frecuencia de muestreo, bastante inferior a los 40 GSs.

Tendremos que tener en cuenta, que los posibles valores para la frecuencia de muestreo están tabulados en unas tablas:

---

91304A, 91204A, 90804A Models Sample Rate Values (in Sa/s)  
Normal Sampling Mode

---

10	20	25	40	50	100	200	250	400	500	1k	2k	2.5k	4k	5k
10k	20k	25k	40k	50k	100k	200k	250k	400k	500k	1M	2M	2.5M	4M	5M
10M	20M	25M	40M	50M	100M	125M	200M	250M	400M	500M	1G	1.25G	2G	2.50G
4G	5G	10G	20G	40G										

---

Figura 4.21 - Tabla de Frecuencias de Muestreo

Por lo que los 12,5GSs serán en realidad el valor mas cercano por encima, los 20GSs. Con ello reducimos a la mitad la frecuencia de muestreo y también el tamaño del archivo y tiempo de guardado.

En la pantalla de **'Configuración de Otros Parámetros'** podemos cambiar estos valores; por defecto, al abrir este menú la frecuencia de muestreo (un desplegable) se fija al máximo del Osciloscopio, pero en el cuadro informativo de la parte inferior se nos aconseja el mínimo que deberíamos utilizar para muestrear la señal.

### 4.4.4 Almacenar Nuevas Formas de Onda

El generador lleva almacenadas en memoria algunos códigos prediseñados, pero dispone de espacio en memoria para alguno definido por el usuario. Lo primero es crear el código con algún programa que los genere; Agilent nos ofrece el **'IntuiLink Waveform Editor'** que nos permite generar señales con herramientas (señales predefinidas, funciones matemáticas, combinación de señales, etc...) o utilizar el editor grafico para dibujar la señal. Estas señales se pueden guardar en formato .CSV o almacenarlo directamente en el generador a través del propio software [34].

Nosotros utilizaremos Matlab para generar unos códigos que respondan a unas características concretas (ver Anexo III). Estos códigos generados tendrán que guardarse en formato .CSV (valores separados por comas) en nuestro PC.

Lo siguiente será irse a la **'Configuración de Otro Parámetros'** de la pantalla principal. En la sección del Generador, seleccionaremos en el menú que nos aparecerá al clicar sobre el botón **'direcc.'** la dirección en la que se encuentra el fichero con el

código generado. Le daremos a guardar y el PC almacenará el código en la Memoria del Generador.

El funcionamiento interno consiste en la carga el código desde el PC en la memoria volátil del Generador y en el siguiente paso copiar el contenido de la memoria volátil en la memoria no volátil junto con el resto de códigos.

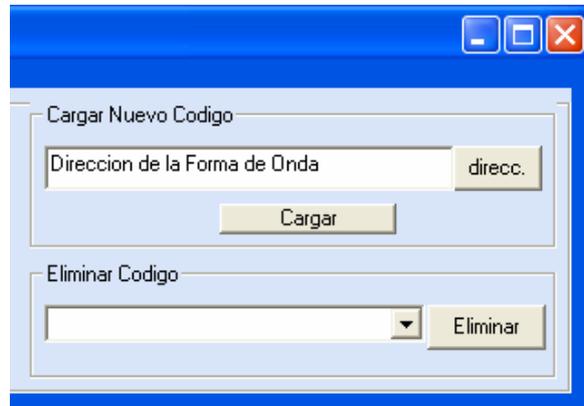


Figura 4.22 - Almacenar o Eliminar códigos del Generador

Es posible que no haya espacio en memoria para almacenar más códigos, por lo que haya que eliminar alguno de los ya existentes. Para hacerlo, basta con seleccionar el nombre del código en el desplegable del submenú **'Eliminar Código'** y darle a **'Eliminar'**.

### 4.5 Principales Diferencias con el Anterior Sistema de Medidas

Una vez hemos presentado nuestro sistema de medidas pasamos a destacar las principales diferencias con el anterior sistema de caracterización del canal:

#### o **Tiempo vs. Frecuencia.**

Es la principal diferencia. Si el anterior sistema utilizaba el analizador de redes para obtener los datos en frecuencia, el nuevo sistema hace uso del osciloscopio para capturar señales en tiempo. Esto conlleva que el analizador tenga que conmutar antenas transmisoras y receptoras hasta conseguir la tanda completa de medidas, mientras que con el osciloscopio en una sola captura obtiene las señales por las antenas transmisoras y receptoras al mismo tiempo con la posibilidad de guardar los datos en un solo fichero. Todo esto hace que la toma de datos sea muchísimo más rápido, ya que una captura se hace en unos pocos segundos.

#### o **El Analizador de redes.**

Como se ha dicho en el punto anterior, no se utiliza el analizador de redes para caracterizar el medio. Aunque si lo necesitaremos para obtener los Parámetros-S de los cables y conectores para utilizarlos en el software.

### o Necesidad de más equipos.

Para la toma de capturas nos deshacemos del analizador cambiándolo por el osciloscopio, pero sin embargo vamos a necesitar dos aparatos más: el generador de señales y el modulador. Salimos perdiendo en el número de equipos que se tienen que desplazar pero ganamos en libertad, ya que con el osciloscopio tanto las antenas transmisoras como receptoras van conectadas a él, por lo que la distancia para tomar medidas esta limitada por la longitud del cable. Cosa que no nos pasa con el nuevo sistema, con el que controlará el osciloscopio mediante una conexión WIFI.

### o Uso de TIMERS en el Software

Una debilidad del nuevo sistema, que no tiene el anterior, es la utilización de Timers para la obtención de capturas, ya que no se ha conseguido implementar con éxito la función que nos indicaba que el osciloscopio había terminado de Configurarse o Guardar las capturas. Por lo que se optó, como mejor solución, dejar un tiempo de guarda entre captura y captura, en el que le diese suficiente tiempo al osciloscopio en hacer la captura y almacenarla en disco, habiéndose hecho numerosas pruebas para reducir este tiempo al máximo.

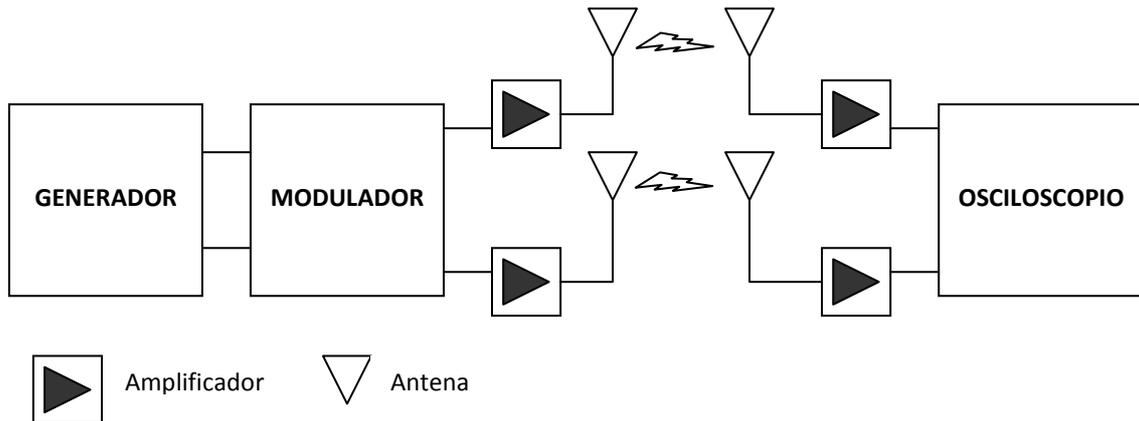
### o Botón de Parada y Barra de Progreso

Una novedad respecto al anterior sistema, es que el nuevo software posee un Botón con el que podemos detener la Tanda de Capturas y una Barra de Progreso con la que nos hacemos una idea del tiempo restante de la adquisición.

## Capítulo 5. Resultados

### 5.1 Montaje y Configuración del Sistema de Medidas

Para poner en práctica nuestro sistema y poder comprobar su correcto funcionamiento comparándolo con los resultados que obtendríamos de realizar la misma caracterización del medio pero con el sistema de medidas en frecuencia, realizamos el siguiente montaje (Figura 5.1):



**Figura 5.1** - Esquema del Montaje para las Medidas

En las dos imágenes siguientes (Figura 5.2 y 5.3) podemos ver el montaje final con los instrumentos que se utilizaron para la caracterización del medio:



Figura 5.2 – Sistema Transmisor



Figura 5.3 – Sistema Receptor

Un paso previo a la toma de datos es la obtención del parámetro  $S_{21}$  (ver 4.4.2): por simetría del circuito el  $S_{21}$  lo obtenemos de una de las ramas del montaje que incluye (cable-amplificador-conexión-cable-amplificador-cable).

La configuración que vamos a utilizar para la tanda de capturas será:

- Frecuencia Central: 5GHz en nuestro software, seleccionando por tanto la banda 'b+g' para la conexión WIFI
- Ancho de Banda: 100MHz, que nos dará una frecuencia de repetición de 196.08 kHz en el generador en banda base.
- Códigos: LS\_COD1 y LS\_COD2, de longitud 510 bits
- Número de Antenas Transmisoras y Receptoras: 2
- Frecuencia de Muestreo: 40GHz, la máxima frecuencia de muestreo del osciloscopio.
- Potencia Salida del Modulador: -3dBm
- Numero de Capturas: 100
- Formato de Salida de los Datos: .bin

## 5.2 Resultados Obtenidos

En primer lugar y para poder manejar los datos con los programas de post-procesado en Matlab, debemos convertir los archivos '.bin' a '.csv', para ello hacemos uso de la función 'importAgilentBin' (ver Anexo II).

Una vez tenemos los archivos en '.csv' pasamos al post-procesado (ver 3.1); para tener unos resultados estables, se han hecho 100 capturas de cada canal con el osciloscopio para poder hacer un promediado de la matriz de transferencia MIMO  $H(\tau)$  de todas ellas. Al final obtenemos las graficas 5.4 y 5.5.

Para la función de transferencia, tanto para el sistema que trabaja en el dominio de la frecuencia como del tiempo:

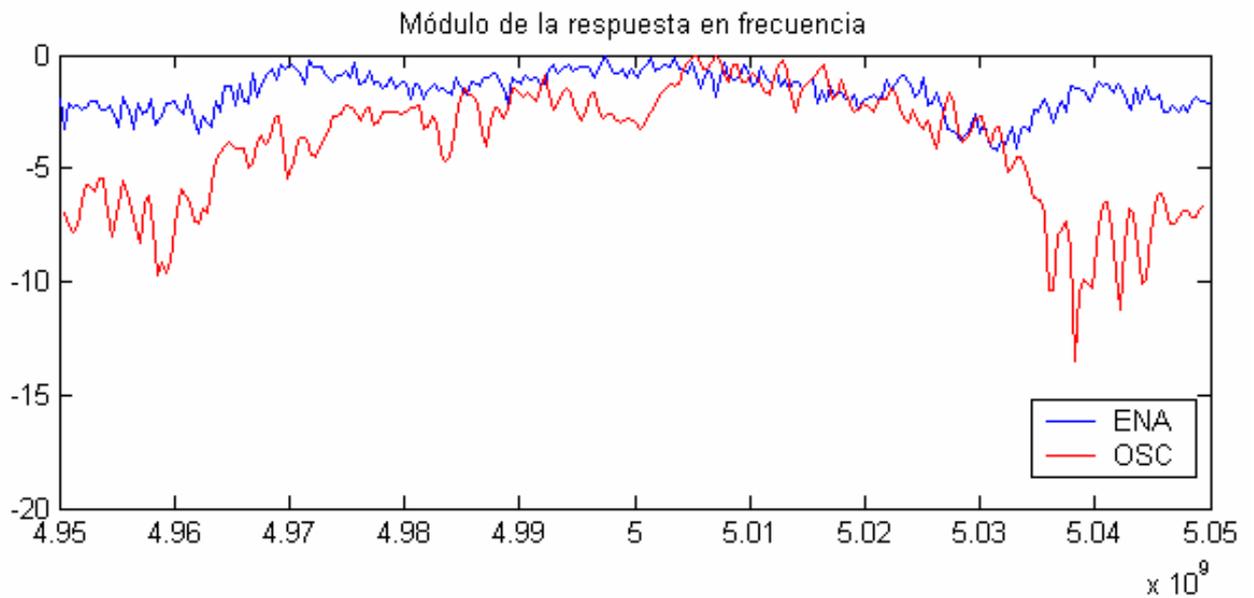


Figura 5.4 - Función de Transferencia del Canal. Tiempo vs. Frecuencia

Mientras que el perfil de retardo normalizado de la Matriz  $H(\tau)$ :

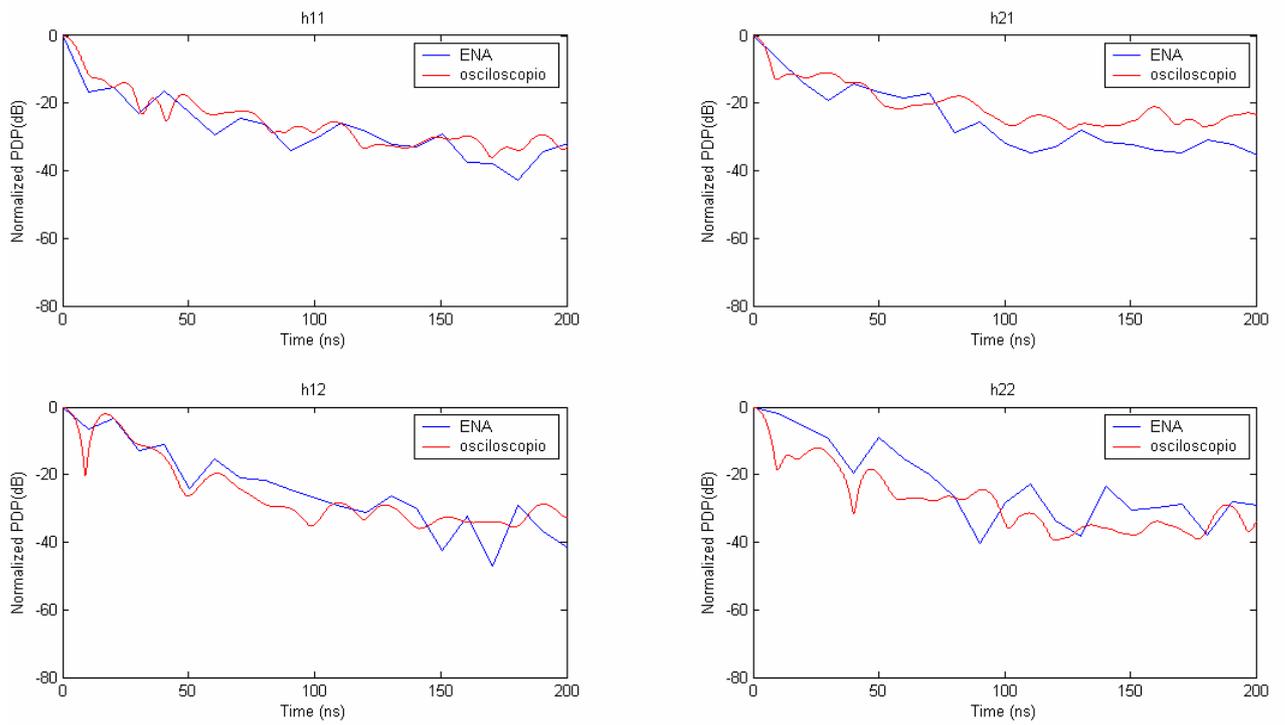


Figura 5.5 - Gráfica de las componentes de la Matiz  $H(\tau)$

Además tenemos que:

	RMS - delay Spread
Sistema en el Dominio Frecuencial	8.1366 ns
Sistema en el Dominio Temporal	5.1264 ns

## Capítulo 6. Conclusiones

### 6.1 Conclusiones extraídas

A la vista de los resultados, podemos observar que tanto en la Función de Transferencia como en la gráfica de las componentes de la matriz de transferencia MIMO  $H(\tau)$ , el comportamiento se asemeja mucho al del sistema en el dominio frecuencial.

Reseñar que la grafica de la matriz  $H(\tau)$  extraída del sistema de medidas en el dominio de la frecuencia es menos suave que la del tiempo ya que el analizador de redes tomó muchos menos puntos que el osciloscopio y además la gráfica de la matriz  $H(\tau)$  en el tiempo es un promediado de 100 capturas por lo que se compensan capturas que nos pudiesen conducir a error.

Una gran ventaja del sistema nuevo respecto al anterior, es que en apenas 40 segundos teníamos almacenadas 100 capturas del medio, mientras que en ese tiempo nos daba lugar ha hacerlo una sola vez.

Por lo tanto se puede decir que este nuevo sistema es igualmente válido, que el sistema en el dominio de la frecuencia que sabemos que funciona correctamente, para la caracterización del canal radio.

### 6.2 Dificultades del Proyecto

El proyecto tuvo básicamente los siguientes problemas, los cuales están relacionados con el osciloscopio.

- El principal fue el fallo de hardware del equipo, que tuvo que ser reparado en un par de ocasiones, con el consiguiente retraso del proyecto.
- Mientras que otro fue que gran parte del software, se desarrolló con un osciloscopio de sustitución temporal que nos ofreció Agilent y que tenía funcionalidades activadas que el nuestro no tenía. Por lo que una vez reparado el osciloscopio, se comprobó que nuestra aplicación fallaba por no tener el equipo esas funciones y tuvieron que ser suprimidas.
- Un problema que no está relacionado con el osciloscopio, es el que se tuvo en postprocesado de las 100 capturas, ya que puntualmente fallaba en algunas capturas (3 o 4 de 100).

### 6.3 Líneas Futuras

Con todo ello se proponen una serie de ideas para mejorar el sistema de medidas:

- Inserción de filtros en recepción, para eliminar todas las señales externas y que no son deseadas para nuestro estudio.

- Eliminar los 'Timers' de la aplicación, que mejorarían la funcionalidad del sistema y lo harían algo más rápido. Para conseguirlo se haría uso de las funciones 'OPT\*' y 'OPT?'.
- Probar el sistema de medidas en movimiento y verificar su funcionamiento.
- Para evitar los errores puntuales en postprocesado, se piensa en la sincronización de códigos entre en el generador y osciloscopio; lo que haría que en lugar de capturar dos veces la longitud del código, solo se capturase una vez la longitud de éste para su postprocesado.

## Anexo I. Configuración Red WIFI

En esta sección se explicará como configurar nuestra Red WIFI para conectar los equipos sin necesidad de cables.

Lo primero que debemos hacer es instalar los drivers del Adaptador USB WIFI (que vendrán con el dispositivo) en el osciloscopio. A continuación configuraremos la red entre Portátil y Osciloscopio. Para ello seguiremos los siguientes pasos:

Configuración de la Conexión Red Inalámbrica.

Nos dirigimos a **Panel de Control** → **Conexiones de Red** y seleccionamos las **Propiedades** de la Interfaz Inalámbrica de nuestro equipo

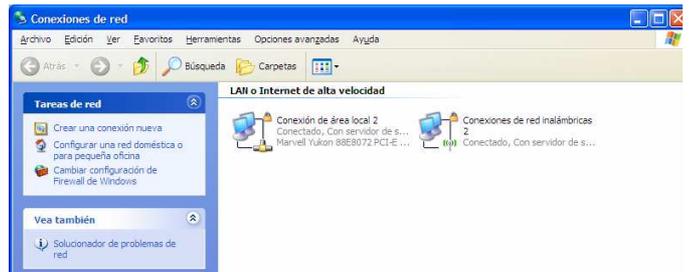


Figura Anexo 1 - Conexiones de red

En Propiedades nos metemos en **Protocolo TCP/IP** y configuramos la red privada para nuestro PC y Osciloscopio.

Direcciones IP:

Ordenador: 192.168.1.1

Osciloscopio: 192.168.1.2

Mascara de Red: 255.255.255.0 para las dos.

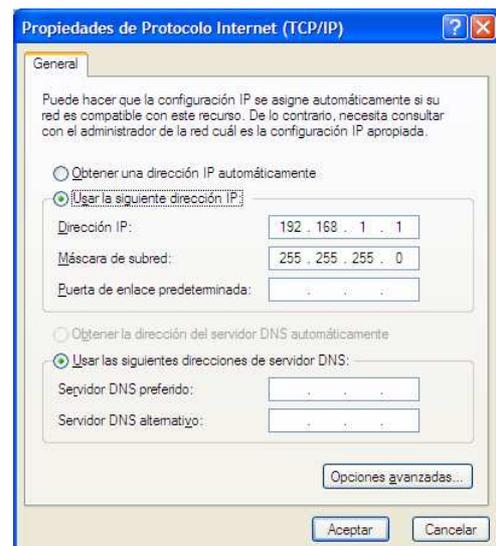


Figura Anexo 2 - Direcciones de red

En **Propiedades de Conexión** nos vamos a la Pestaña de **Red Inalámbrica** (Figura Anexo 3) y agregamos una nueva y la configuramos (Figura Anexo 4):

- Le damos un nombre, en nuestro caso **SICOMO**.
- Marcamos las casillas **“Conectarme aunque la red no esté difundiendo”** y **“Este es una red de equipo a equipo (ad-hoc)”**
- **Autenticación de red: Abierta**
- **Cifrado de Datos: Deshabilitado**

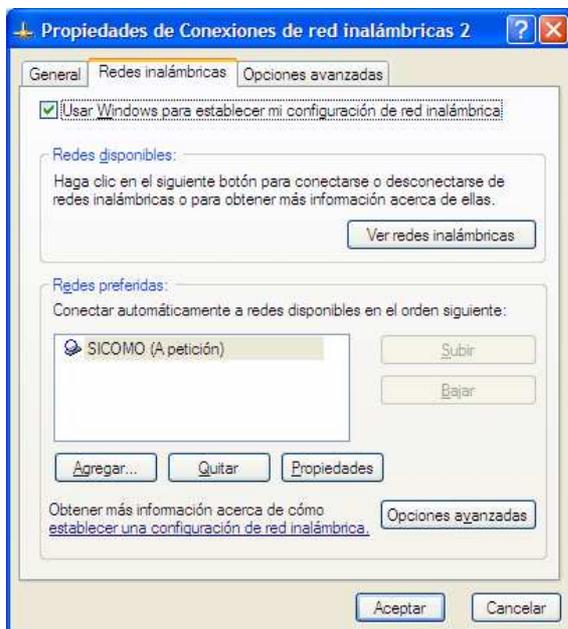


Figura Anexo 3 - Propiedades red inalámbrica

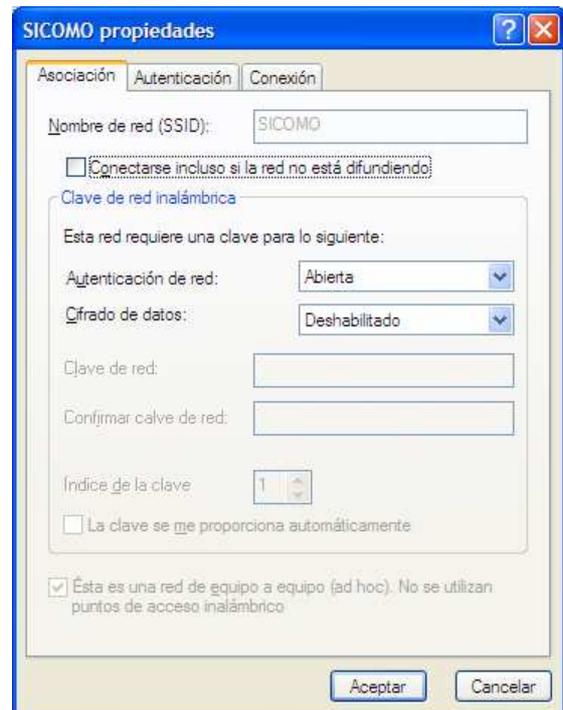
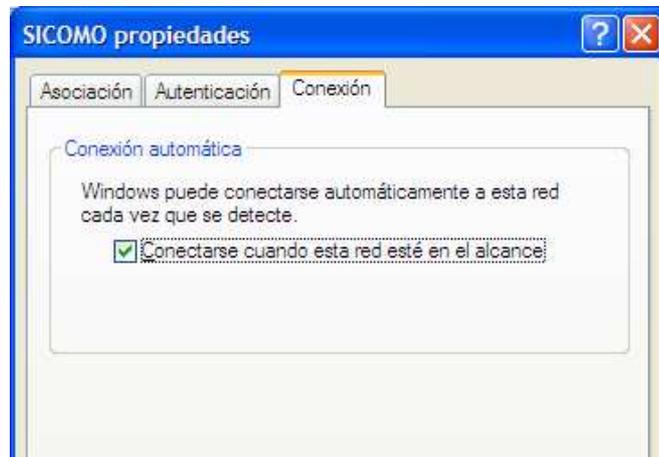


Figura Anexo 4 - Propiedades nueva red

En la pestaña de **Conexión**, activar la casilla “**Conectarse cuando esta red esté en el alcance**” para que automáticamente se conecten los dos equipos.



**Figura Anexo 5 - Conexiones Automática a la red**

Hasta este punto la configuración de la red entre Portátil y Osciloscopio es común, pero hay varias alternativas que hay que contemplar antes de hacer las medidas.

En función de la frecuencia de portadora que vayamos a utilizar para hacer la caracterización del medio, será necesario trabajar con una u otra banda de frecuencia del adaptador/tarjeta wifi para que no nos interfiera en nuestras medidas. Esto es así ya que por defecto tanto la tarjeta wifi del portátil como el adaptador inalámbrico trabajan a 2,45GHz, frecuencia que se nos puede solapar con las señales que nosotros radiamos con las señales según la portadora que elijamos. Por lo tanto sugerimos dos opciones:

### ***o Banda de Frecuencia de la WIFI a 5GHz y Portadora a 2,5GHz***

Configuramos nuestro Sistema de Medidas con una portadora de 2,5GHz, mientras que, tanto en el portátil como en el osciloscopio, seleccionamos la banda de 5GHz. Para ello lo hacemos de la siguiente manera.

En el Portátil y en el Osciloscopio vamos a **Propiedades de Conexión** y en la pestaña 'General' le damos a 'Configure...' (como vemos en Figura Anexo 6), para cada equipo haremos:

En el menú de configuración del Adaptador WIFI del Osciloscopio nos metemos en la pestaña 'Advanced'. De las opciones de 'Property' seleccionamos 'Ad Hoc Mode' y en 'Value' elegimos la opción '802.11a' que trabaja a 5GHz (Figura Anexo 7).

En el menú de configuración del Portátil nos metemos en la pestaña 'Opciones Avanzadas'. De las opciones de 'Propiedad' seleccionamos 'Desactivar Bandas' y en 'Valor' elegimos la opción 'Desactivar 802.11g/b' (Figura Anexo 8). También seleccionamos 'Preferencias de Banda' y en 'Valor' elegimos la opción 'Preferir 802.11a' (Figura Anexo 9).

***o Banda de Frecuencia de la WIFI a 2,5GHz y Portadora a 5GHz***

Configuramos nuestro Sistema de Medidas con una portadora de 5GHz, mientras que, tanto en el portátil como en el osciloscopio, seleccionamos la banda de 2,5GHz. Para ello lo hacemos de la siguiente manera.

En el Portátil y en el Osciloscopio vamos a **Propiedades de Conexión** y en la pestaña ‘General’ le damos a ‘Configure...’ (como vemos en Figura Anexo 6), para cada equipo haremos:

En el menú de configuración del Adaptador WIFI del Osciloscopio nos metemos en la pestaña ‘Advanced’. De las opciones de ‘Property’ seleccionamos ‘Ad Hoc Mode’ y en ‘Value’ elegimos la opción ‘802.11b+g’ que trabaja a 2,5GHz (Figura Anexo 7).

En el menú de configuración del Portátil nos metemos en la pestaña ‘Opciones Avanzadas’. De las opciones de ‘Propiedad’ seleccionamos ‘Desactivar Bandas’ y en ‘Valor’ elegimos la opción ‘Desactivar 802.11a’ (Figura Anexo 8). También seleccionamos ‘Preferencias de Banda’ y en ‘Valor’ elegimos la opción ‘Preferir 802.11g/b’ (Figura Anexo 9).

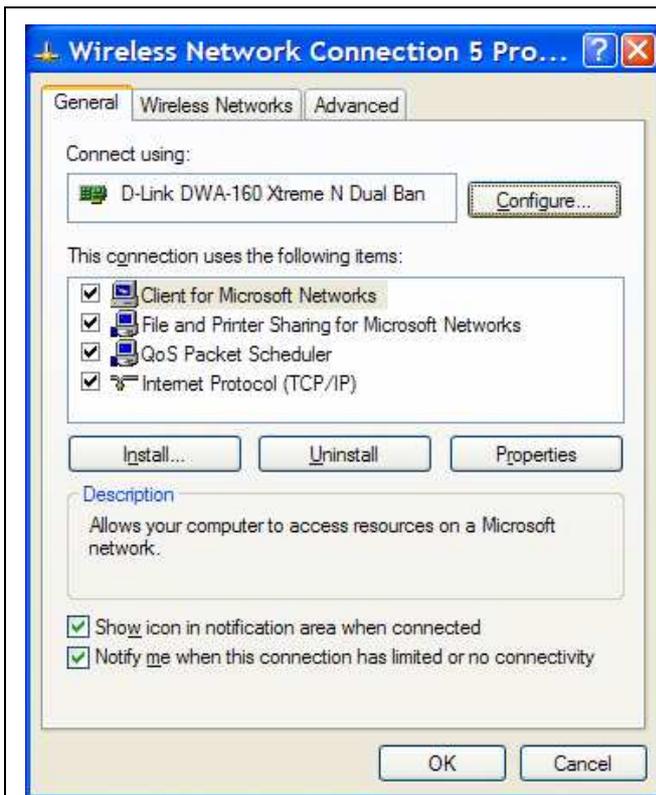


Figura Anexo 6 - Propiedades de Conexión

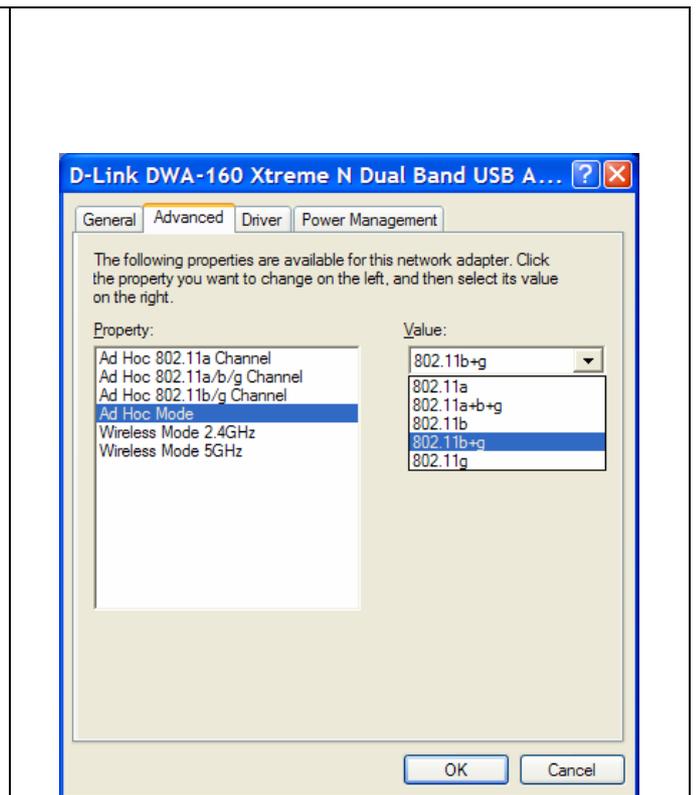
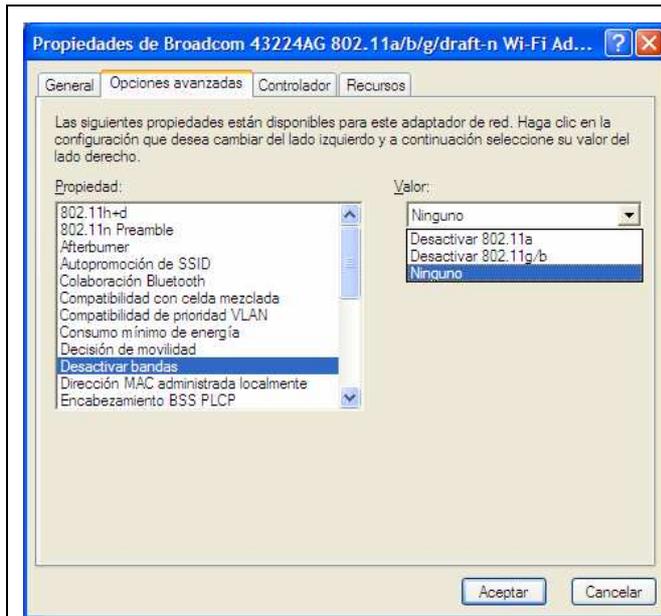
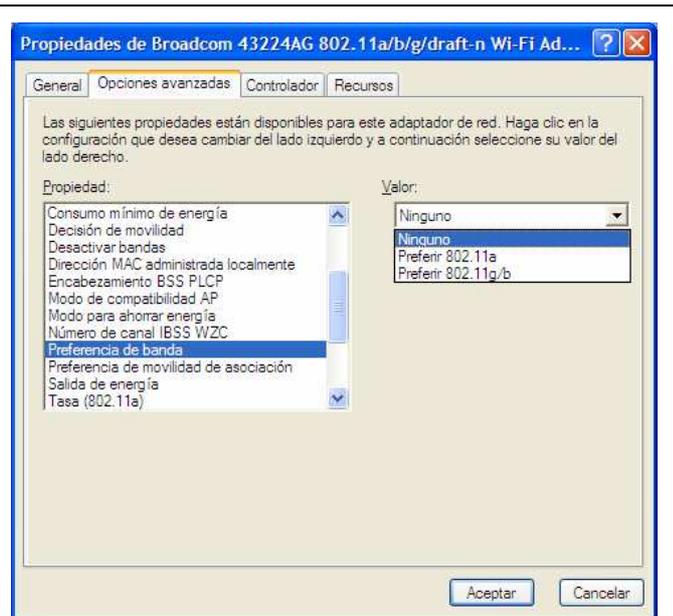


Figura Anexo 7 – Opción ‘Advanced’ del Adaptador WIFI

## Anexo I. Configuración Red WIFI



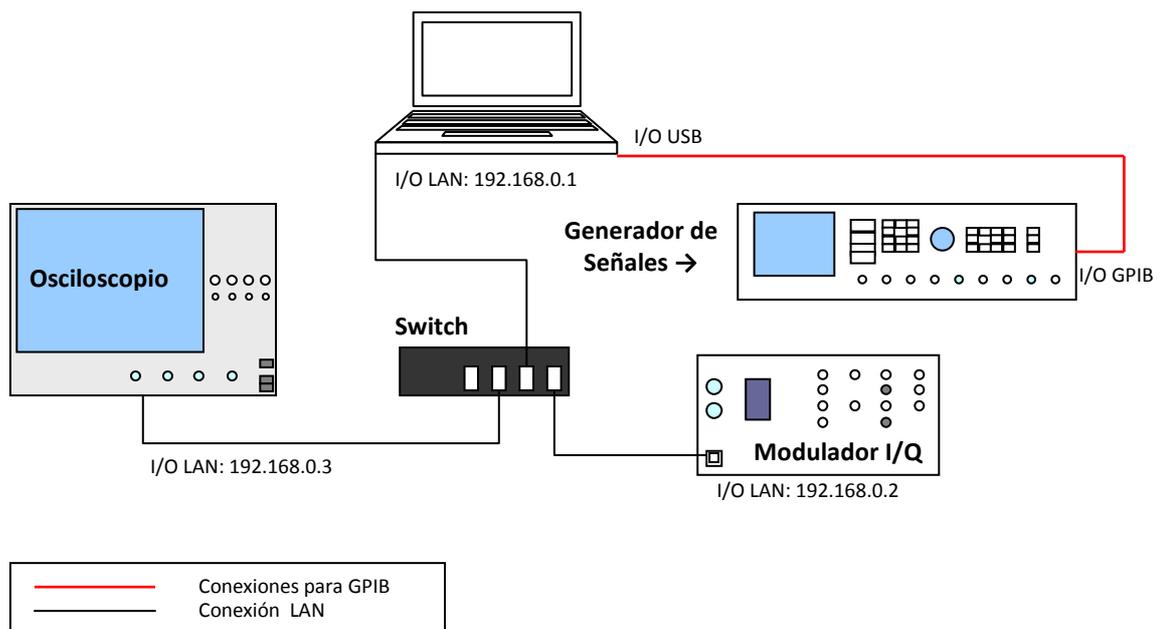
**Figura Anexo 8** - Desactivar Banda de Tarjeta WIFI del Portatil



**Figura Anexo 9** - Preferencia de Banda de Tarjeta WIFI del Portatil

Aunque el Sistema de Medidas está pensado para conectar el Osciloscopio mediante una conexión WIFI, está preparado para que se pueda conectar con cable de red, en una red privada en la que estarían los tres aparatos: Osciloscopio, Modulador y PC. Para ello habría que cambiar en la pantalla de 'Configurar Otros Parámetros' una de las dos IP de los equipos, como por ejemplo:

Si dejamos las IPs Ordenador: 192.168.0.1 y Modulador: 192.168.0.2, podríamos configurar el Osciloscopio con la 192.168.0.3 y conectar los tres aparatos a un switch como se indica en la Figura siguiente.



**Figura Anexo 10** – Interconexión Equipos mediante Switch

## Anexo II. Capturas en Formatos '.BIN' o '.CSV'

El Osciloscopio Infiniium de Agilent nos da la posibilidad de guardar las capturas en varios formatos de los que vamos a destacar '.BIN' y '.CSV'.

El formato CSV es nos almacena los datos de la captura en columnas separadas por comas. Estas columnas son el eje de tiempos y las amplitudes de las ondas capturadas (en el caso de que sean más de una).

El formato BIN es muy parecido al anterior, solo que guarda los datos en un formato binario pero con la misma estructura de columnas.

La diferencia entre ambos formatos radica, en el peso en disco que ocupan. Siendo el formato .BIN el que menos ocupa, ya que los archivos .CSV pueden llegar a ser 3 veces más grandes que .BIN.

Los archivos CSV por ser un formato bastante extendido son de fácil manejo con Hojas de Excel o Matlab, pero no ocurre lo mismo con los .BIN. Aun así Agilent nos ofrece una función en Matlab para manejar estos archivos, la '*importAgilentBin*'<sup>3</sup>.

Se tuvo que hacer alguna modificación de la función original ya que no conseguía sacar los valores de dos capturas en el mismo archivo. Solucionado el problema, esta función nos genera dos arrays, el eje temporal de la captura y los vectores de datos:

***[timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename, varargin)***

Para su funcionamiento basta con llamar a la función y pasarle el nombre del fichero en el que están las capturas, no es necesario incluir el parámetro 'varargin'. La función extraerá los distintos vectores en '*timeVector*' y '*voltageVector*'.

En el caso que a nosotros nos interesa, si el fichero lleva la captura de dos canales (para ahorrar tiempo y espacio en disco) el array 'voltageVector' contendrá dos vectores, uno por canal.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la función, se guardaron dos capturas de dos canales en diferentes los formatos (.BIN y CSV):

Los canales CH1 y CH2 por separado en formato CSV y los dos canales en el mismo archivo en formato .BIN.

Se puede ver en las gráficas, que no hay diferencia entre los datos guardándolos de diferente forma:

---

<sup>3</sup> En la Web de Agilent encontramos el Fichero de Matlab para poder manipular los archivos .BIN [35].

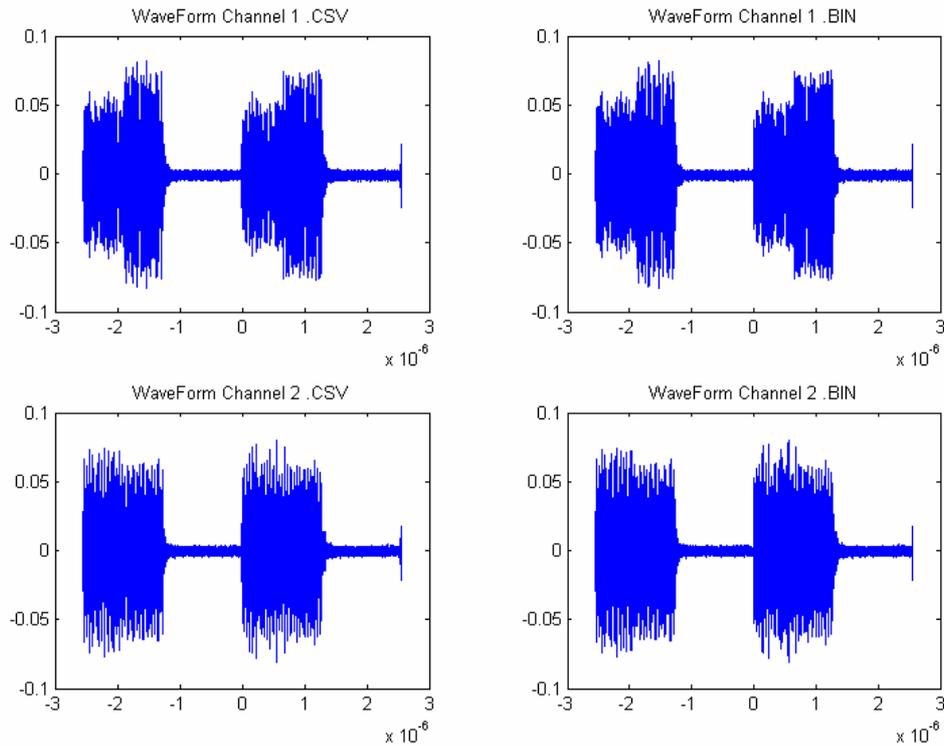


Figura Anexo 11 - Capturas guardadas en .BIN y .CSV

A continuación les mostramos el código modificado para la manipulación de archivos .BIN:

```
function [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename,
varargin)
% ImportAgilentBin reads the Agilent Binary Waveform filetype.
% [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename)
% [timeVector, voltageVector] = importAgilentBin(inputFilename,
waveform_index)
% if waveformIndex is not provided, the first waveform will be read
% voltageVector may contain two columns [MIN, MAX]

if (~exist(inputFilename))
    error('inputFilename missing.');
```

end

```
fileId = fopen(inputFilename, 'r');

% read file header
fileCookie = fread(fileId, 2, 'char');
fileVersion = fread(fileId, 2, 'char');
fileSize = fread(fileId, 1, 'int32');
nWaveforms = fread(fileId, 1, 'int32');
```

```

% verify cookie
fileCookie = char(fileCookie');
if (~strcmp(fileCookie, 'AG'))
    fclose(fileId);
    error('Unrecognized file format.');
```

end

```

% determine which waveform to read
waveformSelect = 1;
if (size(varargin) == 1 & varargin{1} <= nWaveforms)
    waveformSelect = varargin{1};
end
```

```

for waveformIndex = 1:nWaveforms
    % read waveform header
    headerSize = fread(fileId, 1, 'int32')
    bytesLeft = headerSize - 4;
    waveformType = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    nWaveformBuffers = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    nPoints = fread(fileId, 1, 'int32')
    bytesLeft = bytesLeft - 4;
    count = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    xDisplayRange = fread(fileId, 1, 'float32')
    bytesLeft = bytesLeft - 4;
    xDisplayOrigin = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xIncrement = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xOrigin = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    xUnits = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    yUnits = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;
    dateString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    timeString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    frameString = fread(fileId, 24, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 24;
    waveformString = fread(fileId, 16, 'char'); bytesLeft = bytesLeft - 16;
    timeTag = fread(fileId, 1, 'double'); bytesLeft = bytesLeft - 8;
    segmentIndex = fread(fileId, 1, 'uint32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;

    % skip over any remaining data in the header
    fseek(fileId, bytesLeft, 'cof');
```

```

% generate time vector from xIncrement and xOrigin values
if (waveformIndex == waveformSelect)
    timeVector = (xIncrement * [0:(nPoints-1)]) + xOrigin;
end
```

end

## Anexo II. Capturas en Formatos '.BIN' o '.CSV'

```
% read waveform buffer header
headerSize = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = headerSize - 4;
bufferType = fread(fileId, 1, 'int16'); bytesLeft = bytesLeft - 2;
bytesPerPoint = fread(fileId, 1, 'int16'); bytesLeft = bytesLeft -
2;
bufferSize = fread(fileId, 1, 'int32'); bytesLeft = bytesLeft - 4;

% skip over any remaining data in the header
fseek(fileId, bytesLeft, 'cof');

    if ((bufferType == 1) | (bufferType == 2) | (bufferType == 3))
        % bufferType is PB_DATA_NORMAL, PB_DATA_MIN, or PB_DATA_MAX
(float)
        voltageVector(:, waveformIndex) = fread(fileId, nPoints,
'float');

    elseif (bufferType == 4)
        % bufferType is PB_DATA_COUNTS (int32)
'int32');
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, nPoints,

    elseif (bufferType == 5)
        % bufferType is PB_DATA_LOGIC (int8)
'uint8');
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, nPoints,

    else
        % unrecognized bufferType read as unformatted bytes
'uint8');
        voltageVector(:, bufferIndex) = fread(fileId, bufferSize,

    end

end
fclose(fileId);
```

Código Anexo 2.1 Función importAgilentBin

## Anexo III. SECUENCIAS PSEUDOALEATORIAS

Una secuencia pseudo aleatoria o de ruido (Pseudo Noise-PN) se define como un conjunto de señales binarias, periódicas y de cierta longitud de tal forma que, dentro de cada período, la señal puede aproximarse a una señal aleatoria. Se hace esto para tener la certeza de que la misma secuencia puede generarse tanto en el transmisor como en el receptor. Si fuese totalmente aleatoria esto no sería posible.

Dentro de estas secuencias PN se define un chip como la duración de cada elemento dentro de la misma. Se le llamará  $T_c$ . Este tiempo será mucho menor que la duración de 1 bit en la secuencia que se quiere codificar. Las secuencias periódicas pseudoaleatorias deben satisfacer las siguientes propiedades [36]:

1. Balance: El número de 1's, en un período de la secuencia, difiere en uno del número de 0's.
2. Balance en Cadenas: Dentro de un período de la secuencia se definen cadenas de 1's y cadenas de 0's. El número de cadenas de cada uno deben ser iguales. En cada periodo la mitad de las cadenas del mismo signo tiene longitud 1, un cuarto tienen longitud 2, un octavo tiene longitud 3 y así sucesivamente.
3. Autocorrelación: La función de autocorrelación de estas secuencias es periódica y con dos valores. Para una secuencia  $\{a_k\}$  de 1s y -1s la autocorrelación  $C(k)$  se calcula como:

Autocorrelación:

$$\theta_{aa}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot a_{i+\tau} \begin{cases} \tau = 0 & \text{Pico} \\ \tau \neq 0 & \text{Lobulos Secundarios} \end{cases} \quad (\text{A3.1})$$

La correlación cruzada:

$$\theta_{aa}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot b_{i+\tau} \quad (\text{A3.2})$$

Si en cambio se calcula la autocorrelación normalizada, la cual se define como  $C(k)/N$  [37].

Sus valores serán 1 para  $k=0$  y  $-1/N$  para el resto de valores de  $k$ . Esto está asociado con el hecho de que la secuencia periódica al ser comparada con cualquier versión de ella desplazada tendrá una diferencia entre acuerdos y desacuerdos igual a 1.

El código que se quiere detectar superará un determinado umbral:

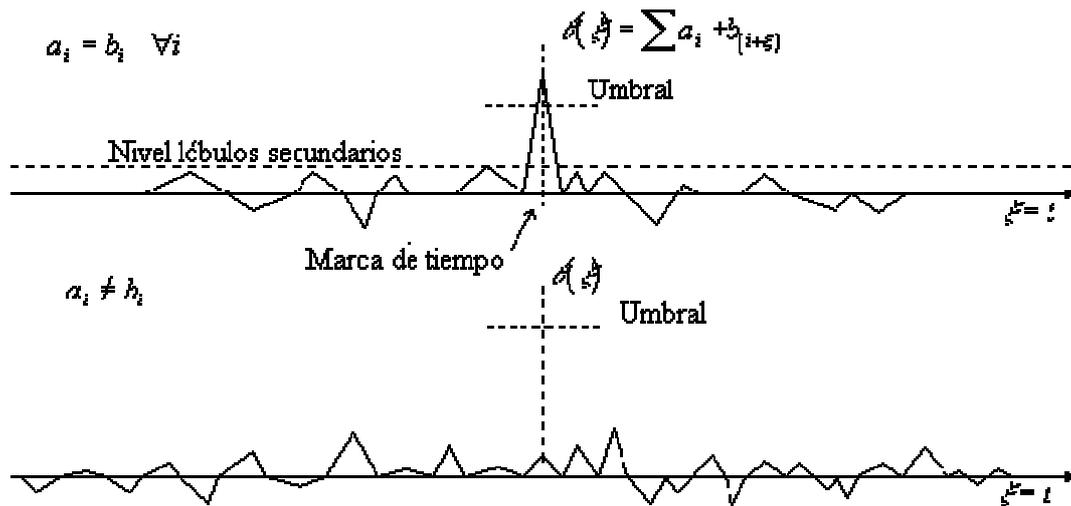


Figura Anexo 12 - Autocorrelación y Correlación Cruzada de las Secuencias Pseudoaleatorias [37]

### Secuencias de Máxima Longitud (M-Sequences)

Es el tipo más importante de secuencias de PN utilizadas; la denominación de máxima longitud significa que es el código de mayor longitud que se puede generar por medio de un registro de desplazamiento de longitud  $m$ , esto es  $2^m - 1$  chips de longitud [36].

Una secuencia de este tipo puede conseguirse con el siguiente arreglo de registros de desplazamiento y sumadores módulo 2:

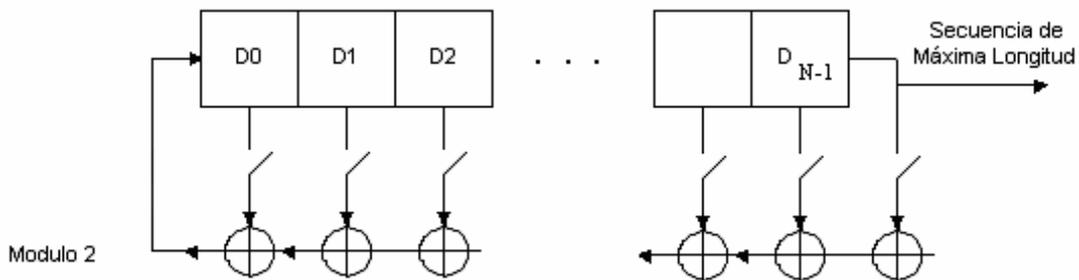


Figura Anexo 13 - Generador MS [36]

### Secuencias de Kasami

Otro tipo importante de secuencias pseudoaleatorias son los códigos Kasami ya que cuentan con una correlación de cruce baja. Las secuencias Kasami se clasifican en secuencias cortas y largas.

Para una  $n$  par podemos generar un conjunto de secuencias cortas conteniendo  $M = 2^{n/2}$  secuencias distintas, cada una con un periodo  $N = 2^n - 1$ . Un conjunto de secuencias Kasami cortas es obtenido a partir de una secuencia  $\mathbf{a}$  con un periodo  $N$  y que al decimar esa secuencia con una  $q = 2^{n/2} + 1$  se obtiene una secuencia  $\mathbf{a}'$  con un

periodo de  $2^{n/2} - 1$ . De esta forma una secuencia de  $\mathbf{a}'$  tiene una longitud  $N = (2^{n/2} - 1)(2^{n/2} + 1)$ . Finalmente se generan las secuencias Kasami tomando  $N$  bits de  $\mathbf{a}$  y  $N$  bits de  $\mathbf{a}'$  y formar una nueva secuencia al realizar la operación Or exclusiva de los bits de  $\mathbf{a}$  y los de  $\mathbf{a}'$  al efectuar  $2^{n/2} - 1$  corrimientos de los bits correspondientes a  $\mathbf{a}'$ .

El valor máximo de correlación de cruce para las secuencias Kasami cortas es de  $2^{n/2} - 1$ , valor que es menor que el de los códigos Gold.

Las secuencias Kasami largas cuentan con un periodo de  $N = 2^n - 1$  para  $n$  par. Un conjunto de secuencias Kasami largas se obtiene a partir de secuencias  $\mathbf{a}$  con un periodo  $N$  y que al ser decimado con una  $q = 2^{n/2} + 1$  formamos  $\mathbf{a}'$ , la cual va a ser decimada con una  $q = 2^{(n+2)/2} + 1$  para obtener una secuencia  $\mathbf{a}''$ . Así un conjunto de secuencias Kasami largas se obtiene al realizar la operación Or exclusiva de  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{a}'$  y  $\mathbf{a}''$  con diferentes corrimientos de  $\mathbf{a}'$  y  $\mathbf{a}''$ . El valor máximo de cross correlation de las secuencias Kasami largas es de  $2^{(n+2)/2}$  [36].

### CÓDIGOS LOOSELY SÍNCRONO (LS)

Los códigos LS se definen como la combinación de subsecuencias  $C$  y  $S$ , un par de secuencias complementarias de Golay, con ceros,  $W_0$ , insertados para evitar la superposición entre las dos subsecuencias. Si  $(C_0, S_0)$  y  $(C_1, S_1)$  son ambas parejas Golay de códigos de LS, decimos que dos códigos LS son una pareja. Como resultado de los ceros insertados, los códigos LS tienen la característica de que los lóbulos laterales de autocorrelación aperiódica y las correlaciones son cero creándose la llamada Ventana de Libre Interferencia (Interference Free Window, IFW), tal y como se observa en la figuras Anexo 15 y 16 [38].

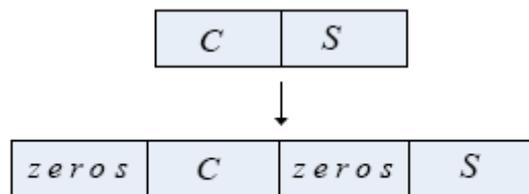


Figura Anexo 14 - Formación de los Códigos LS [38]

El objetivo principal de ceros de inserción de los códigos de LS es evitar que las secuencias de  $C_0$  y  $C_1$  se superpongan con las secuencias de  $S_0$  y  $S_1$ . Hay que tener en cuenta que también es necesario introducir intervalos de guardia suficiente entre las secuencias con una longitud mayor que el retardo máximo del canal multicamino. En el supuesto de que el  $W_0/2$  es el retardo máximo del canal multicamino sin disminuir la eficiencia energética, se define que la longitud de IFW  $W_0$  es igual a  $L_p - 1$ , donde  $L_p$  es la longitud un par complementario [38].

Con esto obtenemos la siguiente autocorrelación y correlación cruzada:

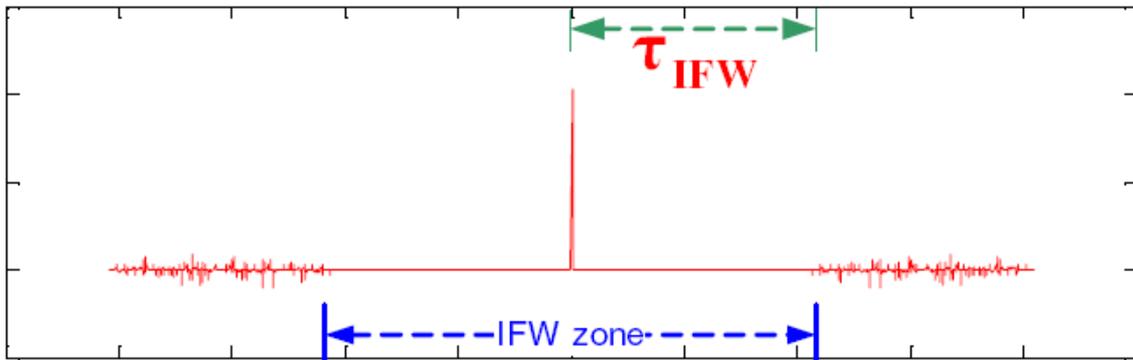


Figura Anexo 15 - Autocorrelación Códigos LS [38]

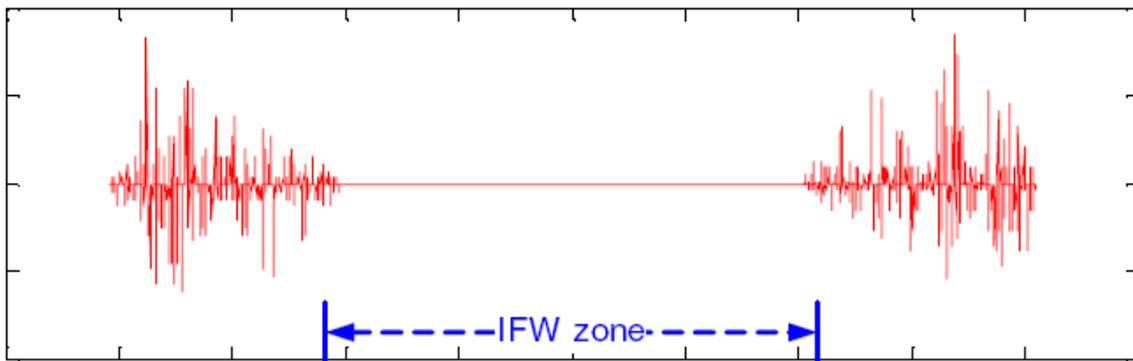


Figura Anexo 16 - Correlación Cruzada Códigos LS [38]

Además tenemos una banda de Interferencia Nula (IFW) que depende de la longitud (en bits) del código en cuestión.

#### Códigos a Utilizar:

Del estudio "*MIMO Channel Sounder with Loosely Synchronous Codes and Kasami Codes*" realizado por la Escuela de Ingeniería, Información y Comunicaciones de Korea se desprende que:

Con los códigos de Kasami, podemos medir retardos más largos y el sistema en los que transmitan muchas antenas. Aunque los códigos de Kasami tienen valores bajos de la correlación, estos valores no son ignorables. Por lo tanto, la sensibilidad del sistema usando los códigos de Kasami está limitada por el número de códigos usados y el valor máximo de la correlación cruzada sobre el valor de la autocorrelación ( $R_{xx}(0)$ ).

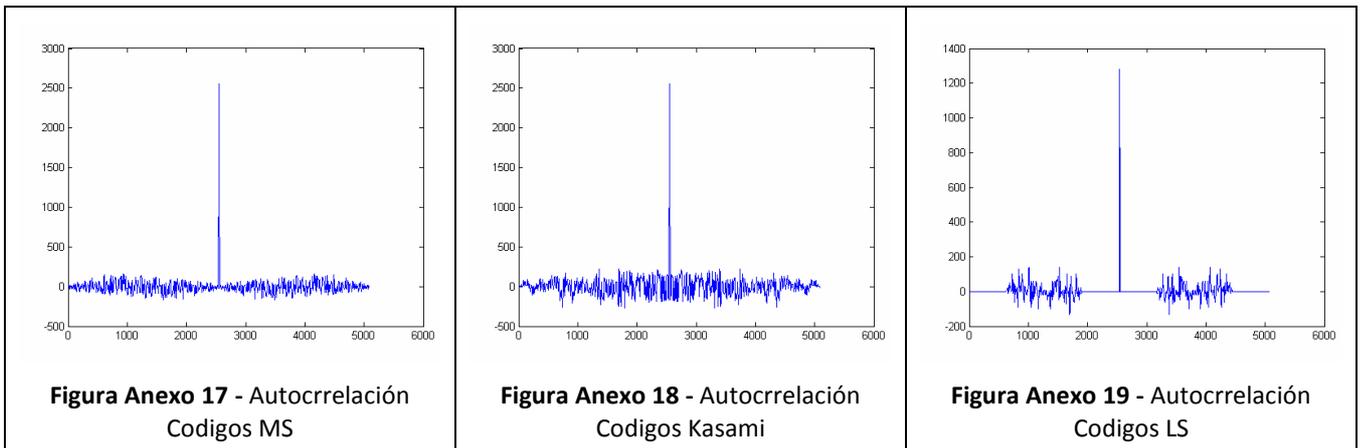
El Sistema basado en los códigos de Kasami también tiene buen funcionamiento pero su funcionamiento es menor que el de los códigos LS y de los códigos modificados LS. La razón es que el sistema usando los códigos de Kasami tiene umbral más alto que los otros. En varias ocasiones, los códigos de Kasami no detectan las señales con poca energía [39].

Por lo tanto los códigos que se utilizan en este Proyecto son los Loosely Synchronous.

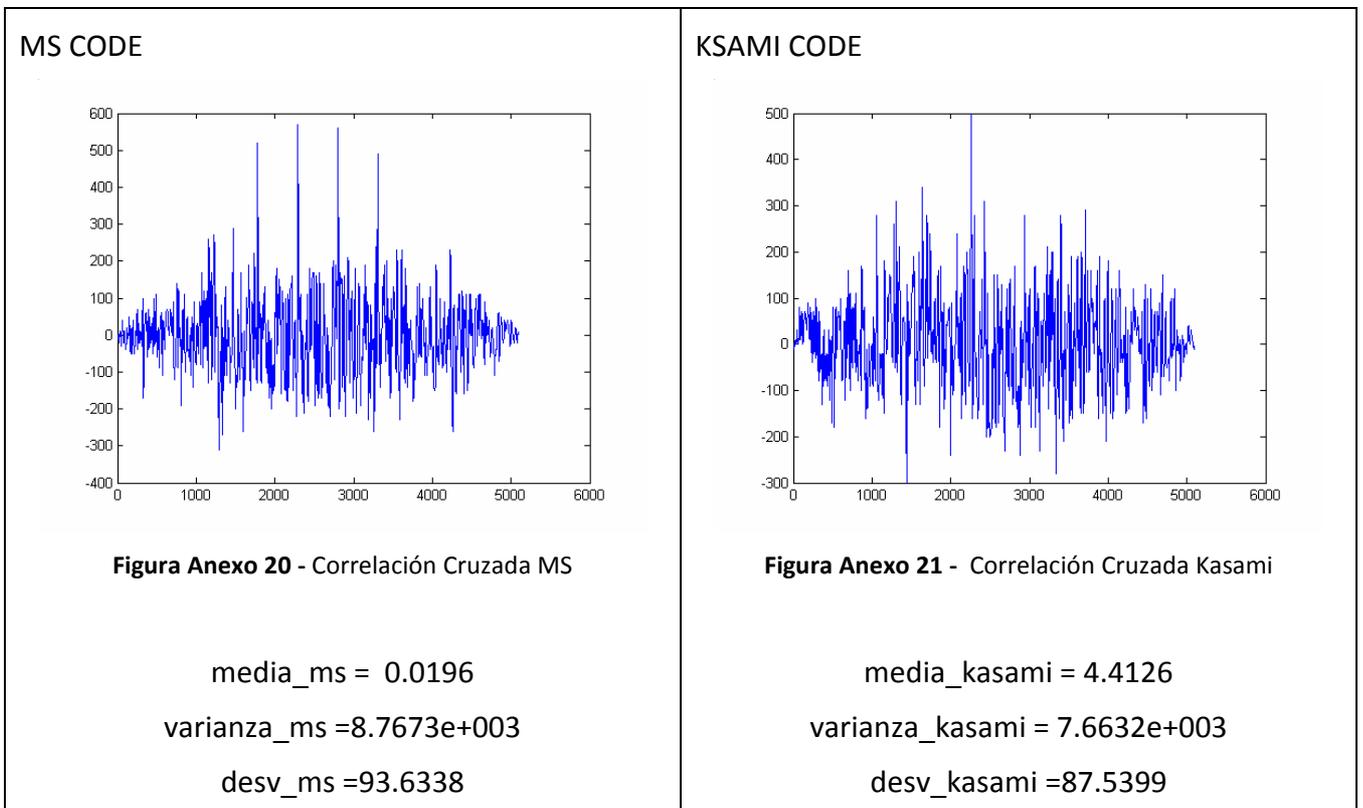
**Estudio de los tres Códigos:**

Se estudiaron los Códigos MS, Kasami y LS para nuestro proyecto, para ello se implementaron los tres códigos en Matlab y se representó en graficas tanto su Autocorrelación como Correlación Cruzada.

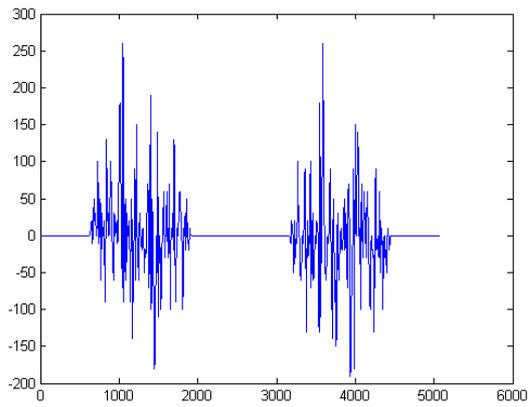
Podemos ver la representación de la Autocorrelación para cada uno de los códigos en estudio, con la salida esperada:



Tras la posterior simulación, se extrajeron los valores de la media, varianza y desviación típica del resultado obtenido al realizar la correlación cruzada de códigos del mismo tipo:



LS CODE



media\_ls = 1.3908e-016  
varianza\_ls = 1.4355e+003  
desv\_ls = 37.8883

Figura Anexo 22 - Correlación Cruzada LS

Con los valores obtenidos vemos como la media de los Códigos LS es prácticamente nula, con una desviación muy inferior al resto de códigos, lo que hace al código idóneo para nuestra caracterización del Medio.

## **Anexo IV. Agradecimientos**

Debo agradecer en primer lugar a mi director de proyecto, José María Molina García-Pardo, por ofrecerme un proyecto tan interesante así como por su ayuda.

También agradecer la ayuda y consejos recibidos, en todo momento, por parte de mi directora de proyecto, Concepción García Pardo.

Y por último y más importante, a mi familia y novia por su apoyo a lo largo de la carrera.

GRACIAS

---

## Bibliografía

- [1]: Informe Anual 2008. Reinaldo Rodríguez Illera, Presidente de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones.
- [2]: Caracterización experimental del canal radio a 2.4Ghz para sistemas MIMO en entornos interiores. Iván Castillo Olmo, PFC 2006. UPCT
- [3]: <http://es.kioskea.net/contents/telephonie-mobile/reseaux-mobiles.php3>
- [4]: Laboratorio de Sistemas de Comunicaciones. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- [5]: Diseño Implementación Sobre Plataforma Software-Radio y Medidas de un demostrador de Sistemas MIMO para Comunicaciones Inalámbricas: Carlos Gómez Calero, PFC. Universidad de Madrid.
- [6]: Cobertura dentro de construcciones para Comunicaciones Personales Móviles Vía Satélite: Campos Velázquez, D. A. 2004. Universidad de las Américas Puebla. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/campos\\_v\\_da/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo1.pdf)
- [7]: Software para análisis del presupuesto de enlace para comunicaciones vía satélite: Peredo Álvarez, S. 2004. Universidad de las Américas Puebla. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/peredo\\_a\\_s/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/peredo_a_s/capitulo1.pdf).
- [8]: Eduardo Casilari Perez, Universidad de Málaga
- [9]: MIMO en Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
- [10]: MIMO en Wikipedia. <http://es.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
- [11]: TESIS DOCTORAL: Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN. Oscar Fernández Fernández. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
- [12]: Medida, simulación y análisis de eficiencia espectral para canales MIMO en entornos indoor en la banda de 2 GHz. Alexis Paolo García Ariza (Ingeniero Electrónico UIS) y Lorenzo Rubio Arjona(Ingeniero de Telecomunicaciones. UPV)
- [13]: Tesis "A Sliding Correlator Channel Sounder For Ultra-Wideband Measurements", Ryan J. Pirkl. School of Electrical and Computer Engineering Georgia URL: [http://smartech.gatech.edu/dspace/bitstream/1853/16261/1/pirkl\\_ryan\\_j\\_200708\\_mast.pdf](http://smartech.gatech.edu/dspace/bitstream/1853/16261/1/pirkl_ryan_j_200708_mast.pdf)
- [14]: Software para la automatización de medidas de un sistema MIMO de banda ancha. Rafael Antonio Lucas Ávila. PFC 2005. UPCT.
- [15]: Space-time codes and MIMO Systems, Mohinder Jankiraman.
- [16]: Wireless Communications(and Networks). Department of Electrical and Computer Engineering, Boise State University
- [17]: Frequency-domain methodology for measuring MIMO channels using a generic testbed, Jesús Gutiérrez, Oscar Gonzalez, Jesus Perez, David Ramirez, Jesus Ibañez y Ignacio Santamaria. Dept. De Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria,

Santander.

[18]: A Review of Radio Channel Sounding Techniques. Dave Laurenson and Peter Grant. Institute for Digital Communications, Joint Research Institute for Signal & Image Processing, School of Engineering and Electronics, The University of Edinburgh, Edinburgh.

[19]: C. García-Pardo, J.M. Molina-García-Pardo, J.V. Rodríguez, L. Juan-Llácer. "2x2 Real-Time Code-Division Multiplexed MIMO Channel Sounder". Aceptado para presentación en European Conference on Antennas and Propagation 2010, EuCAP2010. Barcelona, abril de 2010.

[20]: Web de Agilent. 81150A Pulse Function Arbitrary Noise Generator  
<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.aspx?pid=1287544&pageMode=OV&guid=185729&cc=ES&lc=spa>

[21]: Web de R&S. R&S<sup>®</sup> SMATE200A Vector Signal Generator.[http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test\\_and\\_measurement/signal\\_generation/SMATE200A-%7C-Key\\_Facts-%7C-4-%7C-8.html](http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test_and_measurement/signal_generation/SMATE200A-%7C-Key_Facts-%7C-4-%7C-8.html)

[22]: web : <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZVE-8G.pdf>

[23]: web de Electro Metrics. EM-6116 OMNI-DIRECTIONAL ANTENNA.  
<http://d16375077.e35.empirewebpages.net/PDFs/EM-6116.pdf>

[24]: web de Agilent. Agilent Technologies Infiniium 90000 Series Oscilloscopes.  
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7819EN.pdf>

[25]: Infiniisim, Web de Agilent:  
<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=ES&lc=spa&ckey=1666175&nid=-35491.900848.00&id=1666175>

[26]: E5071B ENA RF Network Analyzer, 300 kHz to 8.5 GHz.  
<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=ES&lc=spa&nid=-536902663.536881709&pageMode=SP>

[27]: Especificaciones Adaptador USB D-Link, web: <ftp://ftp.dlink.eu/datasheets/DWA-160.pdf>

[28]: Web de HP. HP Mini 5101- Especificaciones.  
<http://h10010.www1.hp.com/wwpc/es/es/sm/WF06a/321957-321957-64295-3955550-3955550-3973865.html>

[29]: Introducción a Visual Basic.  
[http://www.adrformacion.com/curso/visualbasic/leccion1/introduccion\\_visual\\_basic.htm](http://www.adrformacion.com/curso/visualbasic/leccion1/introduccion_visual_basic.htm)

[30]: SCPI en Wikipedia.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Commands\\_for\\_Programmable\\_Instruments](http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Commands_for_Programmable_Instruments)

[31]: Seminario "Fundamentos de Medida con Osciloscopios y Analizadores Lógicos". Agilent Technologies. Benjamín García.

[32]: Macro de Visual Save To Touchstone:  
<http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=DE&lc=ger&ckey=1000001123:epsg:sud&nid=-536902444.0.00&id=1000001123:epsg:sud&NEWCCCLC=ESspa>

- [33]: Agilent Technologies' InfiniiSim Waveform Transformation Software Lets Engineers View Waveforms Anywhere in High-Speed Digital Systems.  
<http://www.agilent.com/about/newsroom/presrel/2009/16jun-em09113.html>
- [34]: IntuiLink Waveform Editor for Function/Arbitrary Waveform Generators.  
<http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=ES&lc=spa&ckey=1000000918:epsg:sud&nid=-536902257.793368.02&id=1000000918:epsg:sud>
- [35]: Función ImportAgilentBin, Web de Agilent,  
<http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=ES&lc=spa&ckey=1185953&nid=-35802.0.00&id=1185953>
- [36]: Trina Adrián de Pérez, Profesora Universidad Simon Bolívar (Departamento de Electrónica y Circuitos).
- [37]: Jesús Ángel del Pozo Domínguez. Universidad de Valladolid,  
<http://www.tel.uva.es/personales/jpozdom/telecomunicaciones/tutorial/apartado31.html>
- [38]: "MIMO Channel Sounder with Loosely Synchronous Codes and Kasami Codes", Ji Hwan Choi, Hyun Kyu Chung, Hyunseok Lee, Jongsub Cha, and Hyuckjae Lee, School of Engineering, Information and Communications University, Korea.
- [39]: "Time-Division Multiplexing based MIMO Channel Sounder using Loosely Synchronous Codes", Wonsop Kim, Jae Joon Park, Myung-Don Kim, Hyun Kyu Chung, Mobile Telecommunication Research Laboratory Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea.