

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

**Análisis y comparación teórico-experimental de la difracción simple y  
doble sobre una arista conductora en la banda de UHF**



AUTOR: Marina Victoria Baltasar Sanz  
DIRECTOR: Leandro Juan Lácer  
Mayo / 2017



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero dar las gracias a mi tutor, Leandro Juan Llácer por toda la ayuda que me ha dado para poder realizar este proyecto y todo lo que me ha enseñado, gracias a él he aprendido mucho durante estos largos años de carrera. En general también a todos los profesores de la escuela que tanto me han enseñado durante estos años.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mi familia, por todo lo que se han interesado por mí durante todos estos años de carrera. En especial a mis padres Jose Manuel y María José, que han vivido de cerca todos los buenos y malos momentos por los que he pasado para llegar hasta aquí. Gracias a vosotros todo ha sido más fácil, pues siempre me habéis indicado el camino correcto que debía seguir y habéis insistido tanto para evitar rendirme, sobre todo en estos últimos momentos.

Y por último también a Pedro, gracias por ayudarme a sacar las fuerzas necesarias para llegar hasta el final, por ayudarme a levantarme cada vez que me he caído y por todo el apoyo que me da día a día.

# Índice

1.-Introducción .....	8
1.1.- Introducción .....	9
1.2.- Objetivos .....	10
1.3.- Estructura .....	11
2.- Sistema de Medidas.....	12
2.1.- Equipamiento Hardware.....	13
2.2.- Calibración del Sistema de Medidas. ....	18
2.3.- Realización de una medida.....	23
2.4.- Factor de corrección de la medida respecto del valor teórico. ....	31
2.5.- Software de Simulación .....	32
3.- Difracción Múltiple .....	37
3.1.- Difracción Simple. ....	38
3.2.- Difracción Múltiple. ....	40
4.- Resultados .....	42
4.1.- Resultados Difracción Simple.....	43
4.1.1.- Antena Bicónica .....	44
4.1.2.- Antena EM 6116.....	47
4.2.- Resultados Difracción Doble. ....	50
4.2.1.- Antena Bicónica .....	50
4.2.2.- Antena EM 6116.....	53
5.- Conclusiones y Líneas Futuras.....	56
5.1.- Conclusiones. ....	57
5.2.- Líneas Futuras. ....	58
6.- Referencias.....	59

## Lista de Figuras

Figura 1- Antena EM 6116. [EM6116].....	13
Figura 2- Especificaciones Antena EM 6116 .....	13
Figura 3- Antena bicónica SCHWARZBECK SBA 9113. [SCHW9113] .....	14
Figura 4- Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113 .....	14
Figura 5- Analizador de Redes Agilent ENA 5071B.....	15
Figura 6- Ordenador Portátil .....	15
Figura 7- Conmutador .....	16
Figura 8- Controlador .....	16
Figura 9- Cable GPIB-USB Agilent 82357A .....	17
Figura 10- Entorno de realización de medidas .....	17
Figura 11- Cables.....	18
Figura 12- Transición tipo N Jack to Jack .....	18
Figura 13- Conexión del cableado de las antenas.....	18
Figura 14- Selección de S21 en el menú Measurement .....	19
Figura 15- Frecuencias Start y Stop de ambas antenas .....	19
Figura 16- Número de puntos.....	20
Figura 17- Parámetro IF Bandwith.....	20
Figura 18- Menú Calibrate .....	21
Figura 19- Calibración de la antena biconica (0.5-3 GHz).....	21
Figura 20- Calibración de la antena EM 6116 (2-8.5 GHz) .....	22
Figura 21- Esquema entorno de medidas .....	23
Figura 22- Software de medida .....	24
Figura 23- Configuración para la antena bicónica.....	24
Figura 24- Configuración para la antena EM 6116 .....	25
Figura 25- Pantalla principal del Software de medida .....	25
Figura 26- Archivo de medida realizada.....	26
Figura 27- Esquema ancho de banda.....	27
Figura 28- Cálculo del ancho de banda de resolución.....	28
Figura 29- Potencia relativa – Retardo en microsegundos.....	29
Figura 30- Potencia relativa – Distancia en metros.....	29
Figura 31- Máximo de la potencia relativa.....	30
Figura 32- Difracción Simple .....	38
Figura 33- Campo total simplemente difractado .....	39
Figura 34- Difracción Múltiple .....	40
Figura 35- Campo total doblemente difractado.....	41
Figura 36- Esquema escenario con 1 edge. ....	43
Figura 37- Antena Bicónica $y_0 = +10$ con 1 edge.....	44
Figura 38- Perfil de retardo Antena Bicónica $y_0 = +10$ 1 edge.....	45
Figura 39- Pérdidas en función de $y_0$ antena Bicónica con 1 edge.....	46
Figura 40. Antena EM 6116 $y_0 = +10$ con 1 edge.....	47
Figura 41- Perfil de retardo Antena EM 6116 $y_0 = +10$ con 1 edge .....	47
Figura 42- Pérdidas en función de $y_0$ antena EM 6116 con 1 edge. ....	48
Figura 43- Esquema escenario con 2 edges.....	50
Figura 44- Antena Bicónica $y_0 = +10$ con 2 edges .....	50
Figura 45-Perfil de retardo Antena Bicónica $y_0 = +10$ con 2 edges .....	51
Figura 46-Pérdidas en función de $y_0$ antena bicónica con 2 edges.....	52
Figura 47- Antena EM 6116 $y_0 = +10$ con 2 edges.....	53

Figura 48-- Perfil de retardo Antena EM 6116 $y_0=+10$ con 2 edges. ....	53
Figura 49- Pérdidas en función de $y_0$ antena EM 6116 con 2 edges.....	54

## Lista de Tablas

Tabla 1- Pérdidas Antena Bicónica con 1 edge.....	45
Tabla 2- Error Antena Bicónica con 1 edge.....	46
Tabla 3- Pérdidas Antena EM 6116 con 1 edge.....	48
Tabla 4- Error Antena EM 6116 con 1 edge.....	49
Tabla 5- Pérdidas Antena Bicónica con 2 edges.....	51
Tabla 6- Error Antena Bicónica con 2 edges.....	52
Tabla 7- Pérdidas Antena EM 6116 con 2 edges.....	54
Tabla 8- Error Antena EM 6116 con 2 edges.....	55
Tabla 9- Comparación error.....	57

# 1.-Introducción



## 1.1.- Introducción

La caracterización del canal de radiocomunicaciones resulta fundamental para el desarrollo de modelos que sean capaces de predecir las pérdidas de propagación de un enlace [HER2013]. Los fenómenos de propagación en la banda de UHF son la propagación en espacio libre, la reflexión, la difracción, dispersión, absorción, etc. Diversos modelos electromagnéticos basados en óptica física o en óptica geométrica se han venido utilizando para caracterizar cada uno de estos fenómenos, dando lugar a modelos de propagación que se incorporan a herramientas de planificación de sistemas de radiocomunicaciones. El fenómeno de la difracción [BER2000] está presente en numerosos entornos, por ejemplo, la difracción causada por una montaña en entorno rural o la causada por una esquina en entorno urbano. Este fenómeno resulta especialmente relevante cuando no hay visión directa entre el transmisor y el receptor. Por ello, es importante caracterizarlo desde el punto de vista electromagnético.

## 1.2.- Objetivos

Con este proyecto se pretende analizar, utilizando modelos teóricos, el fenómeno de la difracción causado por una arista (simple) mediante la teoría uniforme de la difracción (UTD) [KOUY1974] y por dos aristas utilizando la formulación introducida por Holm [HOLM1996]. Además, para validar los resultados teóricos se realizarán medidas experimentales en el Laboratorio mediante un sistema de medidas que incluye un analizador de redes vectorial, dos antenas en la banda de 0,5 a 3 GHz y los cables y conectores necesarios.

### 1.3.- Estructura

Este apartado está destinado a ofrecer una visión global de cada uno de los apartados en los que se encuentra dividida la memoria. Este documento se compone de seis capítulos.

El capítulo 1 se titula “Introducción” en él se hace una breve introducción al proyecto, se describe el objetivo de este proyecto y se enumeran las fases del proyecto.

En el capítulo 2, “Sistema de medidas” se explica todo el equipamiento hardware utilizado, así como el programa para la realización de las medidas y una descripción paso por paso del procedimiento utilizado para medir y realizar las simulaciones.

En el capítulo 3, “Difracción Múltiple” se explica brevemente en qué consisten los fenómenos de la difracción simple y difracción doble.

En el capítulo 4, “Resultados” se presentan los resultados obtenidos tanto de difracción simple como doble.

El capítulo 5, “Conclusión y Líneas Futuras”, pretende dar una valoración global del proyecto realizado, además, se exponen algunas ideas para la futura mejora de la aplicación.

Y, por último, el capítulo 6 recoge las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este TFM.

## 2.- Sistema de Medidas

## 2.1.- Equipamiento Hardware.

Para este proyecto ha sido necesario utilizar una serie de herramientas y equipos de medidas, que describiremos a continuación.

### Antena EM 6116:

Estas antenas son del tipo EM-6116. Las principales características de estas antenas es que son omni-direccionales en el plano horizontal, su polarización es vertical, tiene un rango de frecuencia de 2 a 10 GHz (debido a las restricciones de frecuencia del analizador de redes el rango utilizado para esta antena será de 2 GHz a 8.5 GHz), puede operar tanto de emisor como de receptor.



Figura 1- Antena EM 6116. [EM6116]

Sus especificaciones sacadas del catálogo [EM6116] serían:

SERIAL NUMBER TYP	ELECTRO-METRICS GAIN AND ANTENNA FACTORS MODEL EM-6116		1 METER CALIBRATION	
	FREQUENCY MHZ	ANTENNA FACTOR dB/m	GAIN dBi	
	2000	35.03	1.21	1.32
	2500	36.96	1.22	1.32
	3000	39.18	0.58	1.14
	3500	37.42	3.68	2.33
	4000	39.20	3.06	2.02
	4500	39.67	3.61	2.30
	5000	41.87	2.33	1.71
	5500	41.80	3.23	2.10
	6000	43.31	2.47	1.77
	6500	43.78	2.70	1.86
	7000	43.51	3.61	2.30
	7500	46.51	1.21	1.32
	8000	45.14	3.14	2.06
	8500	46.63	2.18	1.65
	9000	46.90	2.40	1.74
	9500	47.01	2.76	1.89
	10000	46.86	3.36	2.17

Figura 2- Especificaciones Antena EM 6116

### Antenas SCHWARZBECK SBA 9113:

Estas antenas son del tipo SCHWARZBECK SBA 9113. Las principales características de estas antenas es que es una antena bicónica de banda ancha, con un diagrama omnidireccional en el plano horizontal, tiene polarización lineal y un rango de frecuencias de 0.5 MHz a 3 GHz.



Figura 3- Antena bicónica SCHWARZBECK SBA 9113. [SCHW9113]

Sus especificaciones extraídas del catálogo [SCHW9113] son:

#### Technische Daten:

Linear polarisierte Mikrowellen-Bikonus-Breitbandantenne	
Frequenzbereich:	500 MHz - 3 GHz
Anschluß: Buchse	50 W N
Befestigungsrohr:	LH=560mm, d=22 mm
Rastring:	LR=190mm
Elementlänge gesamt:	LE =140 mm
Elementdurchmesser:	D = 49 mm
Elementaufnahme:	M 4
Isotropgewinn:	typ. -1.5...+1.5 dBi (600 MHz - 3 GHz)
Antennenwandlungsmaß:	25 ... 41 dB/m
SWR typ.:	1-4
Balun (verlustarm):	1:1
Inversionssymmetrie:	typ. < 0.2 dB (600 MHz - 3 GHz)
Max. Eingangsleistung:	20 W
Halbwertsbreite E-Ebene:	80° - 50°
Gewicht:	750 g

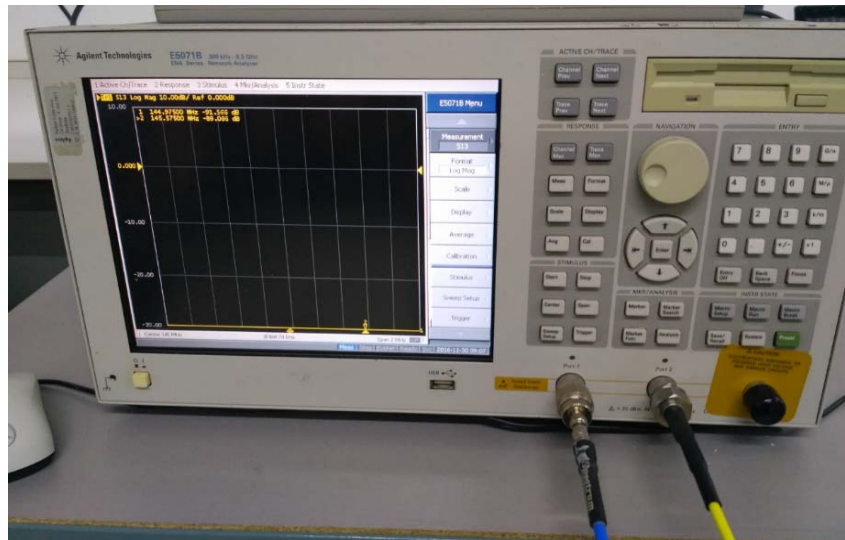
#### Specifications:

Linear polarised microwave biconical broadband antenna	
Frequency range:	
Connector: female	
Mounting tube:	
Index Ring:	
Element length total:	
Element diameter:	
Element fixture:	
Isotropic gain:	
Antenna Factor:	
SWR typ.:	
Balun (low loss):	
Inversion Symmetry:	
Max. Input Power:	
Half-Power Beamwidth (E-plane):	
Weight:	

Figura 4- Especificaciones antena SCHWARZBECK SBA 9113

### **Analizador ENA E5071B:**

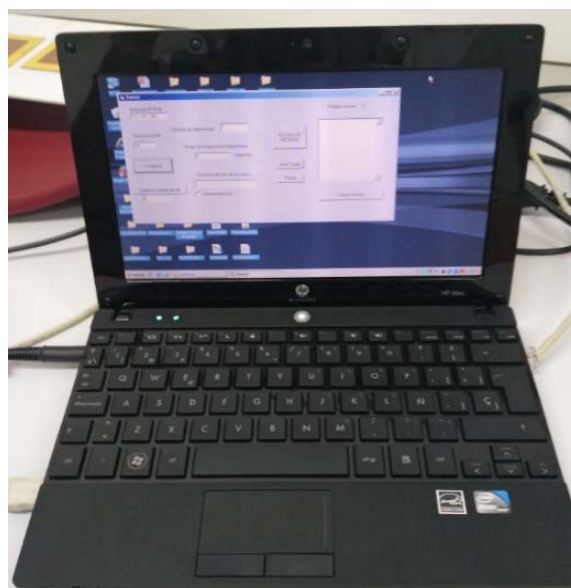
Utilizaremos un analizador ENA E5071B de la marca Agilent, con el que es posible caracterizar el entorno en dispositivos RF de forma precisa y rápida a varias frecuencias y formatos. Su sistema operativo es Microsoft Windows 2000 Professional. [ENA5071B]



*Figura 5- Analizador de Redes Agilent ENA 5071B*

### **Ordenador Portátil:**

Podemos considerar el portátil como el “cerebro” desde donde se manejará el funcionamiento del sistema de medidas a través del software programado en Visual Basic 6. El software es el Software de Medida MIMO. SICOMO



*Figura 6- Ordenador Portátil*

### Conmutador Agilent 87406B:

Proporciona la durabilidad y fiabilidad necesaria para la realización de medidas, monitorización de señales y las aplicaciones de enrutado. Ha sido diseñado para funcionar más de 10 millones de ciclos. Las pérdidas por repetición son mínimas y reduce al máximo los errores. Dispone de 6 puertos para la selección de señal y su misión es la de conmutar la entrada proveniente del receptor de fibra óptica entre las cuatro antenas.



*Figura 7- Conmutador*

### Controlador 11713A:

Será el que controle el conmutador. A través de nuestro portátil la podremos controlar, interconectando ambos aparatos a través del puerto GPIB mediante un adaptador USB.



*Figura 8- Controlador*



### Cable GPIB-USB:

Es el encargado de conectar el ordenador portátil con el conmutador. Es necesario instalar los drivers en el ordenador para que funcione correctamente y poder realizar las medidas. [CoGPI]



*Figura 9- Cable GPIB-USB Agilent 82357A*

Con todos estos equipos, el entorno de realización de medidas quedará de la siguiente manera:



*Figura 10- Entorno de realización de medidas*

## 2.2.- Calibración del Sistema de Medidas.

Para que las medidas sean correctas, el analizador ha de ser calibrado previamente para los cables y conectores que vayamos a utilizar. A continuación, se describe cada uno de los pasos que se deben realizar para calibrar el equipo de manera adecuada.

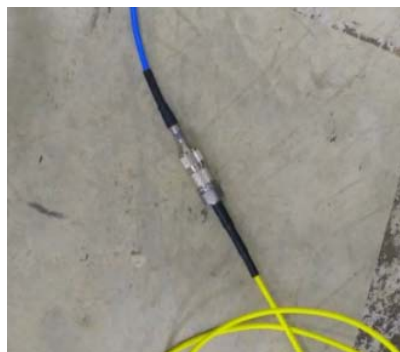
En primer lugar, debemos conectar el cable que va a la antena transmisora con el cable que va a la antena receptora mediante la transición correspondiente, en nuestro caso una transición tipo N Jack to Jack.



*Figura 11- Cables*



*Figura 12- Transición tipo N Jack to Jack*



*Figura 13- Conexión del cableado de las antenas*

Una vez conectamos los cables ya podemos empezar a calibrar el analizador

El siguiente paso es seleccionar el parámetro S que queremos medir, para nuestras mediciones seleccionaremos el S21. Para ello entramos en el menú *Measurement* y escogemos dicho parámetro.



*Figura 14- Selección de S21 en el menú Measurement*

Fijamos el rango de frecuencias en el que calibramos. Deberá abarcar las frecuencias de trabajo. Además, procuraremos que sea lo más reducido posible, para mejorar la resolución de las medidas efectuadas. Entramos en el menú *Stimulus* e introducimos la frecuencia inicial (*Start*) y la frecuencia final (*Stop*). Como vamos a realizar dos tipos de mediciones con dos antenas en bandas de frecuencia diferentes, tendremos que calibrar dos veces por lo que para la primera antena tendremos *Start* = 0.5 GHz y *Stop* = 3 GHz y para la segunda antena *Start* = 2 GHz y *Stop* = 8.5 GHz



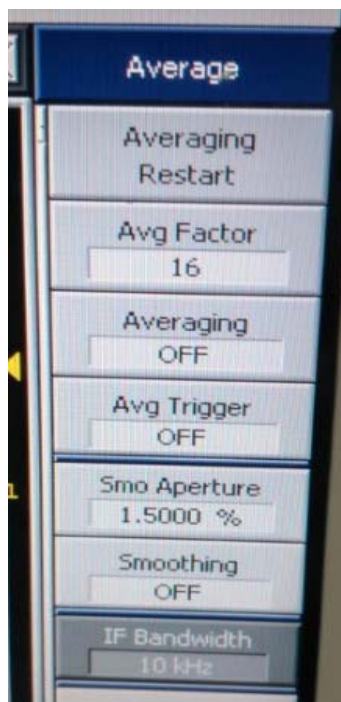
*Figura 15- Frecuencias Start y Stop de ambas antenas*

El siguiente paso es seleccionar el número de puntos que queremos tomar en la medida, entramos en el menú *Sweep Setup* y escogemos 1024 puntos.



*Figura 16- Número de puntos*

En el menú *Average* ponemos el parámetro *IF Bandwidth* a 10 KHz



*Figura 17- Parámetro IF Bandwidth*

Por último, entramos en el menú *Calibration*, después en *Calibrate* y pulsamos dos veces en *Response (Thru)* y finalizamos pulsando *Done*. Nos aparecerá la línea recta y centrada en cero lo que significará que la calibración se ha realizado correctamente.

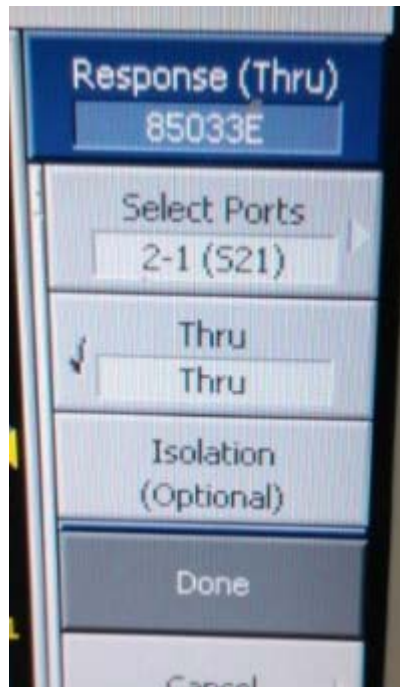


Figura 18- Menú Calibrate

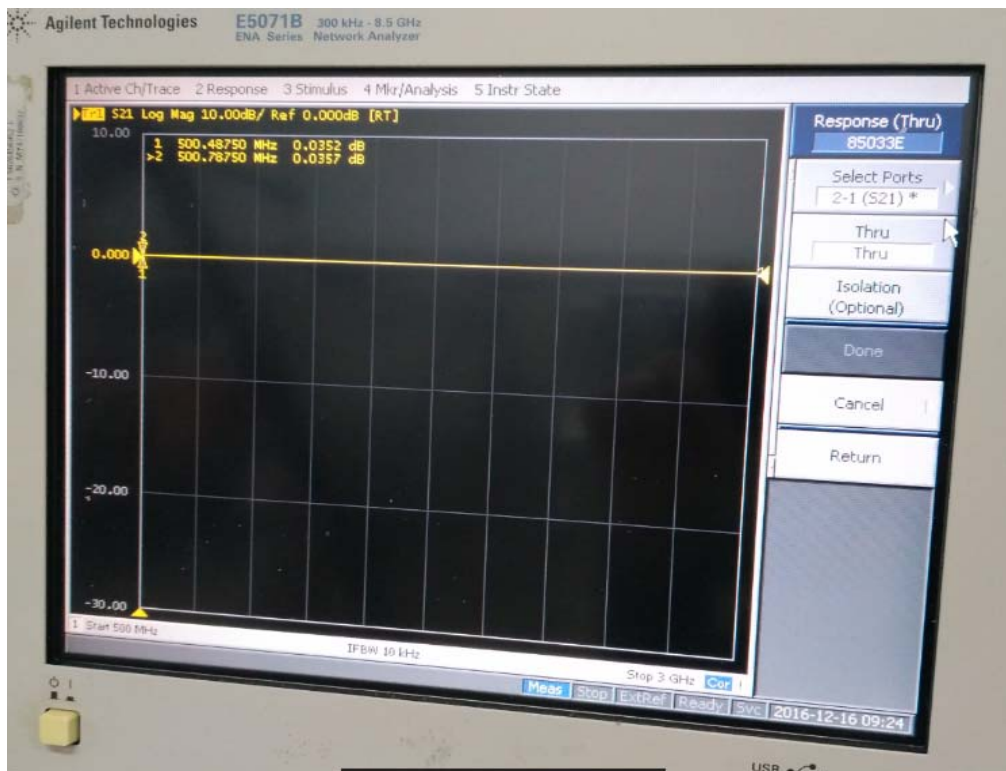


Figura 19- Calibración de la antena biconica (0.5-3 GHz)

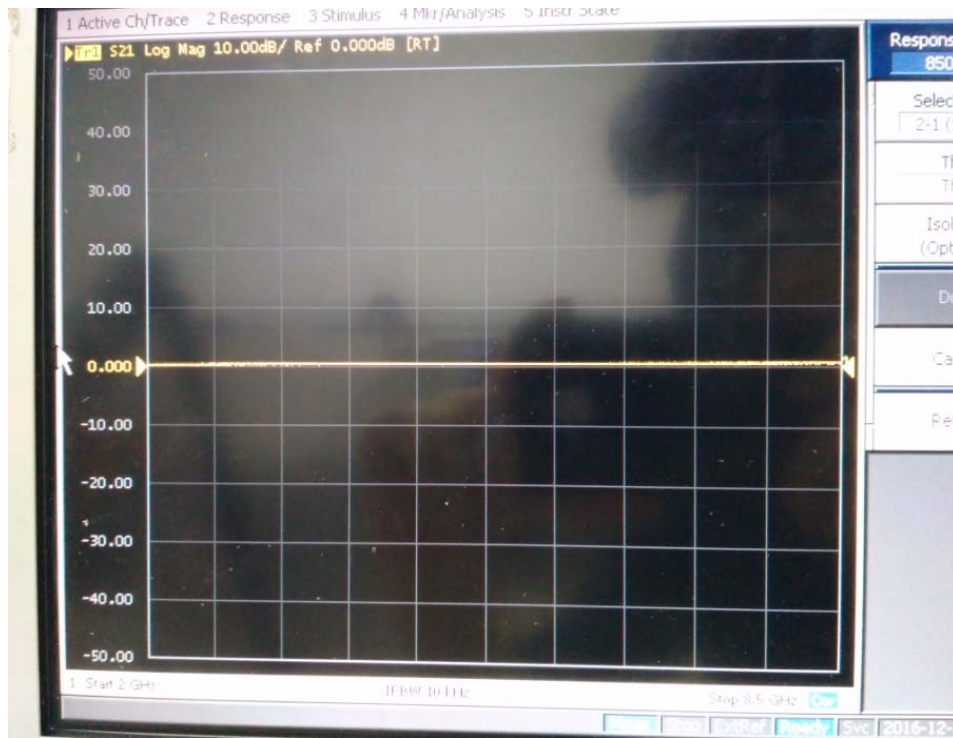


Figura 20- Calibración de la antena EM 6116 (2-8.5 GHz)



### 2.3.- Realización de una medida.

En este apartado explicaremos los pasos que se debe seguir para la realización de las medidas.

#### 1.- Calibración del Sistema.

La calibración del sistema es un paso obligatorio para poder medir correctamente la respuesta del canal. Es un método para “anular” las pérdidas y reflexiones que se produzcan en los equipos de medidas, así como en cables y transiciones de forma que las únicas pérdidas que obtengamos sean las del canal de propagación de la señal MIMO. Este paso está explicado en el apartado 2.2.

#### 2.- Situación de los equipos.

Situaremos los equipos atendiendo al siguiente esquema:

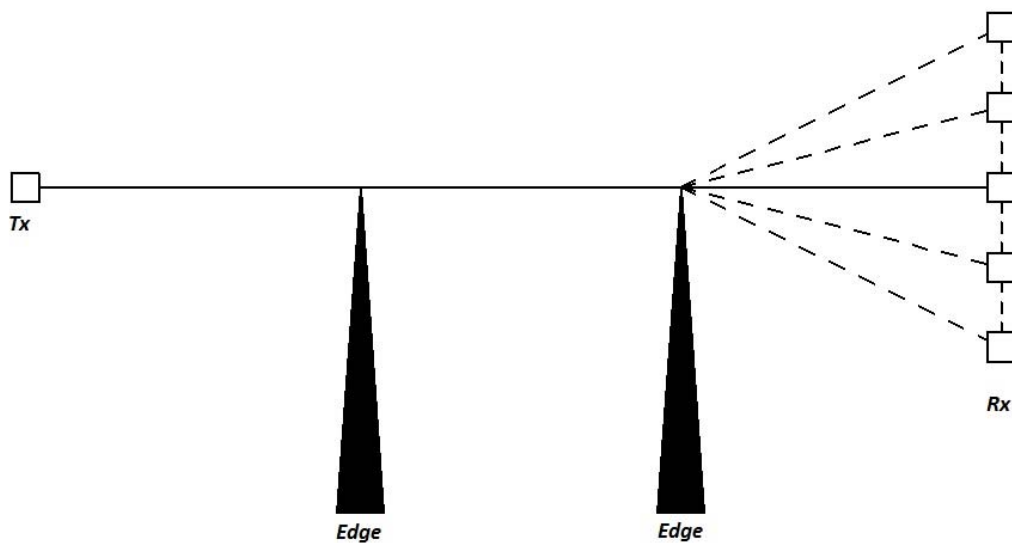


Figura 21- Esquema entorno de medidas

Tal y como se ve en el esquema tendremos un transmisor el cual estará fijo y un receptor al que iremos variando la altura para poder comprobar las contribuciones de las cuñas situadas entre ambos y entre las dos antenas situaremos una o dos cuñas para poder ver el efecto de éstas en las medidas.

### 3.- Programa de Medidas

Una vez hemos calibrado el sistema y colocado los equipos, podemos empezar a realizar las mediciones ejecutando el programa MIMO 1.0 desarrollado por Rafael Antonio Lucas Ávila [ProLA]

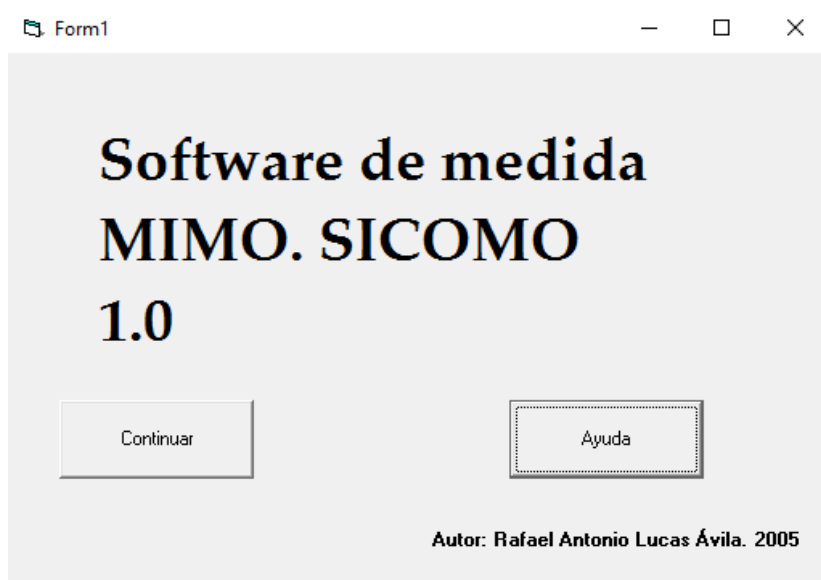


Figura 22- Software de medida

Antes de realizar las medidas debemos configurar el programa:

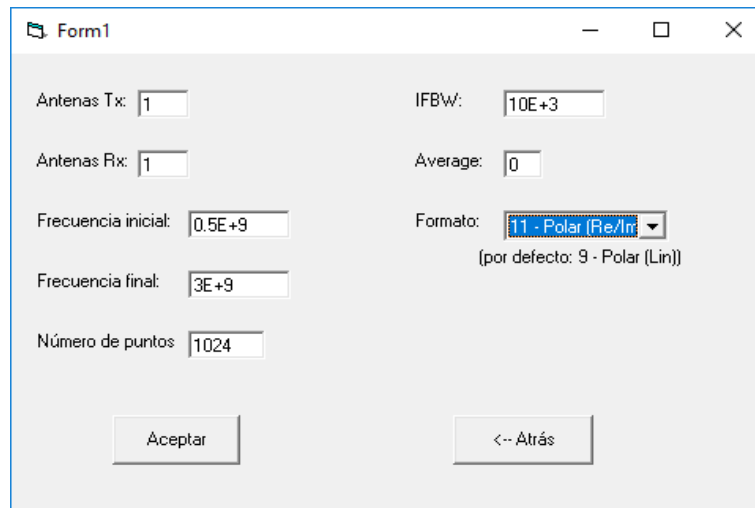


Figura 23- Configuración para la antena bicónica



Form1

Antenas Tx: 1

Antenas Rx: 1

Frecuencia inicial: 2E+9

Frecuencia final: 8.5E+9

Número de puntos: 1024

IFBW: 10E+3

Average: 0

Formato: 11 - Polar (Re/Im)  
(por defecto: 9 - Polar (Lin))

Aceptar <- Atrás

Figura 24- Configuración para la antena EM 6116

Una vez configurado el software podemos proceder a realizar las medidas:

Form1

Dirección IP ENA: 15.1.201.236

Dirección GPIB: 28

Número de repeticiones: 1

Tiempo de espera entre repeticiones: 0 segundos

Empezar medida desde: 1

Medida número: 0

Configurar

RUTINA DE MEDIDAS

Auto Scale

Preset

Limpiar consola

Crear el directorio

Figura 25- Pantalla principal del Software de medida

Los datos obtenidos por el analizador de redes son la parte real y la parte imaginaria de la respuesta en frecuencia de la medida realizada entre la antena transmisora y la antena receptora. Por tanto, cada vez que se realiza una medida se obtienen 1 archivo con 1024 valores de frecuencia, parte real y parte imaginaria que es almacenado en el directorio que indiquemos en el programa software de medidas MIMO 1.0 en el disco duro del ENA.

```

"# Channel 1"
"# Trace 1"
Frequency, Formatted Data, Formatted Data
+2.00000000000E+009, -1.69057080804E-003, -2.19053982264E-003
+2.00635386119E+009, -1.06937853883E-003, -2.68650464554E-003
+2.01270772239E+009, -3.13498227683E-003, -4.55805019440E-003
+2.01906158358E+009, -6.01831162132E-003, -3.25872344962E-003
+2.02541544477E+009, -7.74616791467E-003, -2.91447060616E-004
+2.03176930596E+009, -5.97022697295E-003, +3.30530562234E-003
+2.03812316716E+009, -3.94365277237E-003, +3.53047622030E-003
+2.04447702835E+009, -3.65806685955E-003, +2.54050994367E-003
+2.05083088954E+009, -6.66683363970E-003, +4.50235212392E-003
+2.05718475073E+009, -4.05407548018E-003, +1.00852548751E-002
+2.06353861193E+009, +2.97038136717E-003, +1.15407369868E-002
+2.06989247312E+009, +7.16746434185E-003, +7.56288074883E-003
+2.07624633431E+009, +8.43401558560E-003, +2.39872414197E-003
+2.08260019550E+009, +6.33226067416E-003, +2.36338672060E-004
+2.08895405670E+009, +5.03442783793E-003, -9.24876407424E-004
+2.09530791789E+009, +4.73873395586E-003, -7.89220145614E-004
+2.10166177908E+009, +4.10920248308E-003, -1.08472446146E-003

```

Figura 26- Archivo de medida realizada

#### 4.-Tratamiento de las medidas realizadas.

Una vez tenemos los ficheros de todas las medidas realizadas los pasaremos por Matlab para realizar las transformaciones necesarias para poder obtener la información que necesitamos.

En primer lugar, ponemos como directorio de Matlab la carpeta en la se encuentran nuestros archivos y los cargamos en Matlab mediante la siguiente línea de código:

```
medida1= load('prueba1_05_05_05_-20_2edge.txt');
```

A continuación, llamamos a la función que tenemos para calcular la potencia relativa en función del retardo (*Power Delay Profile*, PDP) en microsegundos y en función de la distancia:

```
function [frec_ini, frec_fin, tau, h_dB,H] = calcula_h(medida)

frec=medida(:,1);
frec_ini=frec(1);
frec_fin=frec(end);

B=frec_fin-frec_ini;
N=size(medida,1);
tau=0:1/B:(N-1)/B;
tau_micro=tau/1e-6;
```

```

dist=tau*3e8;

H=medida(:,2)+1i*medida(:,3);
h=ifft(fftshift(hanning(N).*H));
h_dB=20*log10(abs(h));

figure
plot(tau_micro,h_dB,'-','Linewidth',2);
xlabel('Retardo en microsegundos')
ylabel('Potencia relativa recibida (dB)')

figure
plot(dist,h_dB,'-','Linewidth',2);
xlabel('Distancia en metros')
ylabel('Potencia relativa recibida (dB)')

end

```

En primer lugar, calculamos la resolución temporal  $\tau$  a partir del ancho de banda BWR (ver Fig. 27) como  $1/BWR$ , la longitud temporal máxima de  $1/BW=(N-1)/BWR$  si empezamos en 0, siendo N el número de muestras temporales (1024 muestras en nuestro caso) y convertimos la resolución temporal en espacial para poder representar la información en función del retardo y de la distancia.

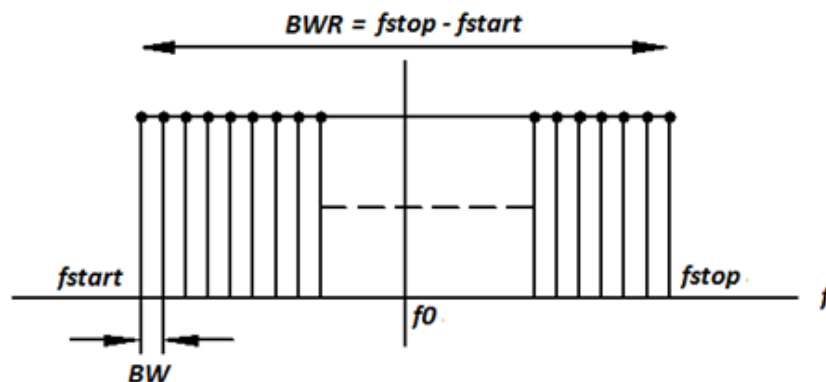


Figura 27- Esquema ancho de banda

Para nuestros dos tipos de antenas tenemos:

BICONICA ->  $f_{start} = 0.5 \text{ GHz}$

$f_{stop} = 3 \text{ GHz}$

$f_0 = 1.75 \text{ GHz}$

$BW = 2.4438 \text{ MHz}$

$BWR = 2.5 \text{ GHz}$

EM 6116 ->  $f_{start} = 2 \text{ GHz}$

$f_{stop} = 8.5 \text{ GHz}$

$f_0 = 5.25 \text{ GHz}$

$BW = 6.3538 \text{ MHz}$

$BWR = 6.5 \text{ GHz}$

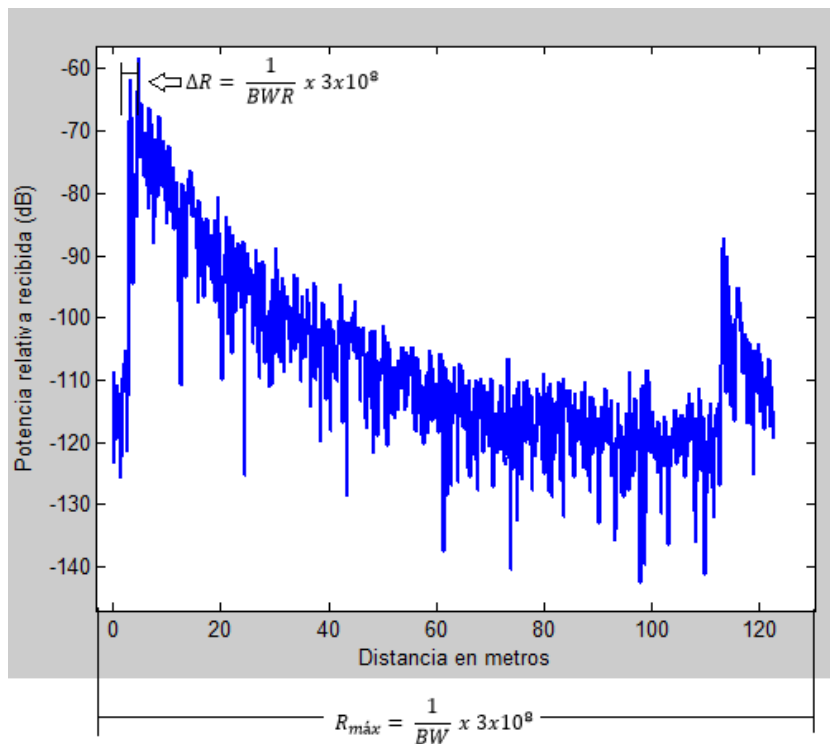


Figura 28- Cálculo del ancho de banda de resolución

Utilizamos un enventanado (en frecuencia) para reducir la amplitud de los lóbulos secundarios (en el tiempo). Así, se obtiene una respuesta más suave, sin la distorsión de los lóbulos. Para hacer esto multiplicamos la respuesta en frecuencia por una ventana de la misma longitud que las muestras. En nuestro caso vamos a emplear la ventana Hanning (función Hanning de Matlab).

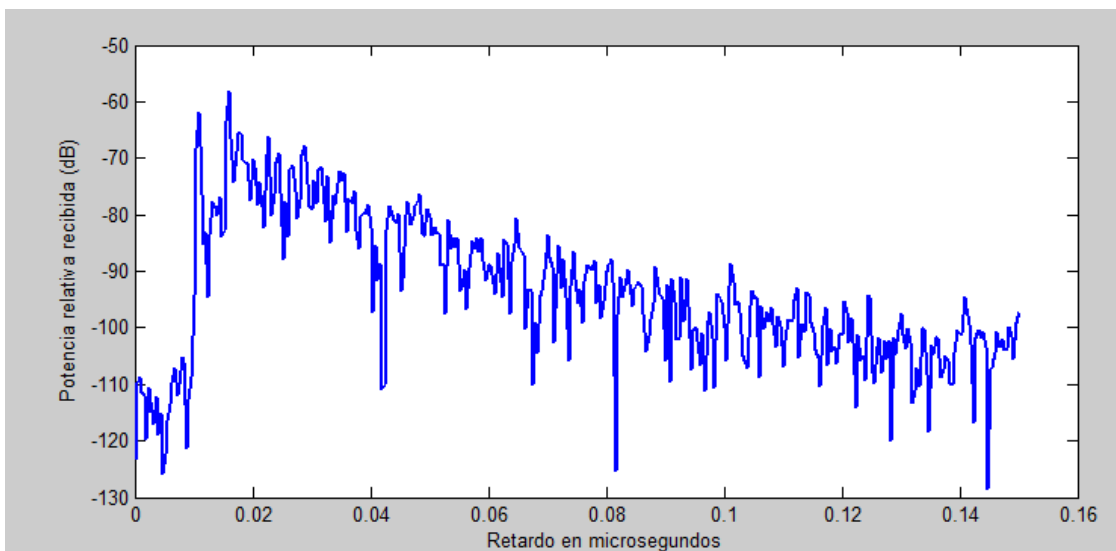
La respuesta temporal  $h(\tau)$  se calcula mediante la transformada inversa de Fourier de la respuesta en frecuencia de un canal, que es la medida recogida por el analizador de redes.

El perfil de retardo (*Power Delay Profile, PDP*) lo podemos calcular con la siguiente expresión:

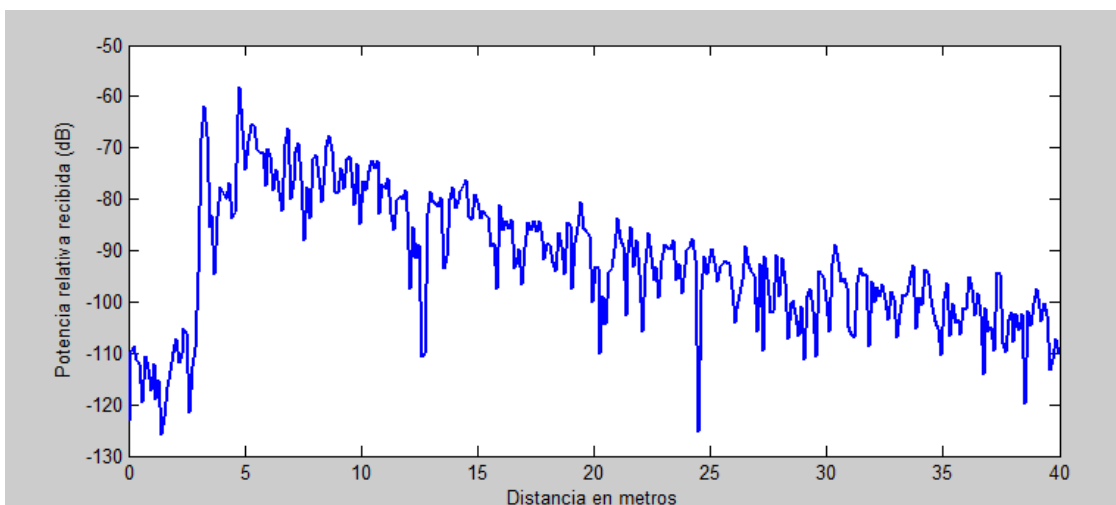
$$PDP(\tau) = |h(\tau)|^2 = [TF^{-1} |H(f)|]^2$$

La transformada inversa de Fourier se lleva a cabo con Matlab con la orden 'ifft'. Como los valores de la respuesta en frecuencia provienen de un analizador de redes y no de una transformada de Fourier previa realizada con Matlab, hay que aplicar primero una transformación a los datos antes de hacer la transformada inversa. La transformación consiste en una inversión del orden y se lleva a cabo con la orden 'ifftshift'. Por tanto, deberemos escribir:  $\text{ifft}(\text{ifftshift}(H) * \text{hanning}(N))$ , donde  $H$  es la respuesta en frecuencia  $H(f)$ . Al resultado final no hace falta aplicarle la transformación  $\text{fftshift}$  ya que no deseamos una respuesta temporal centrada en el instante 0.

Por último, lo pasamos a unidades logarítmicas y lo representamos en función del retardo en microsegundos y de la distancia en metros.

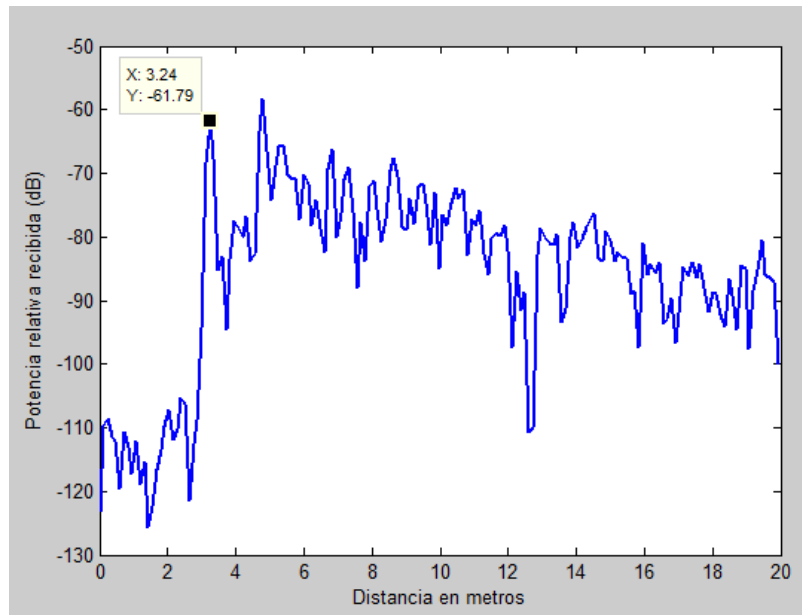


*Figura 29- Potencia relativa – Retardo en microsegundos*



*Figura 30- Potencia relativa – Distancia en metros*

Para nuestro análisis utilizaremos la gráfica en función de la distancia, por lo que cogemos el primer máximo de las gráficas y los compararemos con los resultados de las simulaciones



*Figura 31- Máximo de la potencia relativa*

## 2.4.- Factor de corrección de la medida respecto del valor teórico.

En el apartado 2.2 se ha realizado la calibración del equipo para suprimir las contribuciones que se puedan dar debido a los cables y las conexiones, pero una vez realizada las medidas y obtenida la potencia recibida también debemos realizar una corrección de éstas con respecto a la teoría.

Para hacer esto correctamente debemos tener en cuenta las pérdidas teóricas en espacio libre que se calculan a partir de la siguiente fórmula:

$$L_0 = -20 \log_{10} \left( \frac{3 \times 10^8}{4\pi r f} \right)$$

Siendo  $r$  la distancia entre el transmisor en metros y el receptor y  $f$  la frecuencia en Hz.

Por tanto, calculamos dichas pérdidas para ambas frecuencias y se las restamos al valor que tenemos medido en espacio libre con las antenas a la misma altura y ese será el factor de corrección que tenemos que restar a la medida obtenida:

$$\text{ANTENA EM 6116: } L_0 = -20 \log_{10} \left( \frac{3 \times 10^8}{4\pi \times 1.5 \times 5.25 \times 10^9} \right) = 50.45 \text{ dB}$$

$$L_{med} = 56 \text{ dB}$$

$$\text{Factor de Corrección} = 56 - 50.45 = 5.5 \text{ dB}$$

$$\text{ANTENA BICONICA: } L_0 = -20 \log_{10} \left( \frac{3 \times 10^8}{4\pi \times 1.5 \times 1.75 \times 10^9} \right) = 40.82 \text{ dB}$$

$$L_{med} = 48.18 \text{ dB}$$

$$\text{Factor de Corrección} = 48.18 - 40.82 = 7.36 \text{ dB}$$

## 2.5.- Software de Simulación

El software utilizado para la realización de las simulaciones está programado en Borland C++. El programa principal es el siguiente código, en el que iremos variando algunos parámetros para obtener la simulación de cada uno de los escenarios que queremos simular.

```
#include "cab.hpp"

//En el programa de UTD incide una onda esférica sobre los wedges.
//En el de Holm una onda esférica incide sobre 2 wedges también

// Variables globales que emplean funciones de otros módulos

int knife=1;
double valor=5.0;
double absorbente=1;
double frec;
double y0= -0.10;
double hmax=0.0;
double sigma_h=0.0;
int SOFT=0;
// Función principal

void main(void)
{
    /* Definición de variables:
        puntos: Número de puntos a calcular en un intervalo de ángulos.
        intervalo_angulos: Intervalo de ángulos a representar en torno a 0.
        alpha: Angulo a representar (con un valor inicial).
        d: Distancia tal que se tenga una onda casi plana para el
        campo directo (p.ej. 33 Km).
        s1,s2: Distancia entre los picos de los wedges (75*lambda=50 m)
        s21: Distancia teniendo en cuenta el desplazamiento de 1mm
        necesario para que la formulación de Holm de un resultado.
        r: Distancia entre el TX y el RX
        s: Distancia entre el punto de la difracción simple y el RX.
        s3: Distancia entre el punto de la doble difracción y el RX.
        phi1,phi2,phid1,hiprima1,hiprima2: Ángulos para el cálculo
        del Coeficiente de difracción.
        Asd,Add: Spread factor para la difracción simple y doble.
        alpha1,alpha2,alphap: Ángulos para el cálculo de phi's.
        delta1,delta2: Ángulos interiores de los dos wedges.
        Edir,Esd,Edd,Etot: Variables para cálculo del campo eléctrico.
        Dsd,Ddd: Coeficientes de difracción simple y doble.
        aux1,aux2: Variables auxiliares para el cálculo del campo.
        paso: Incremento de alpha en el intervalo definido.
        L,L1,L2: Parámetros de distancia para los coef. de difracción.
        v1r,v1i,v2r,v2i: Almacenan los coeficientes del desarrollo de Holm.
        t1,t2: Toma de tiempos de simulación.
        punterof: Fichero de salida de datos. */
```



```

double puntos=1;
double intervalo_angulos=0.0*pi/180.0;
//double alpha=-10.0*pi/180.0;
//double alpha=0.859*pi/180.0;
double alpha;
double d=0.5;
double s1=0.5, s2=0.5;
double s21=sqrt(s2*s2+0.001*0.001);
double r,s,phi1,phi2,phid1,Asd,Add,alpha1,alpha2,alphap,s3;
double phiprima1,phiprima2;
double delta1=0.01*pi/180; // ángulo interior del primer wedge
double delta2=0.01*pi/180; // ángulo interior segundo wedge
fcomplex Elibre,Edir,Esd,Edd,Etotsd,Etotdd,aux1,aux2,Dsd,Ddd;
double paso=intervalo_angulos/puntos;
int k,pulsa;
//double L,L1,L2,y0;
double L,L1,L2;
double v1r[orden2],v1i[orden2],v2r[orden2],v2i[orden2];
double atenuacion;
double atenuacion1;
double atenuacion2;
double retardo_dir;
double retardo_dif;

clock_t t1,t2;

FILE* punterof;

t1=clock();
punterof=fopen("c:/Tesis/Holm(bueno)/prueba_2000_8500_-10.dat","w+t");

// Ángulos fijos por la geometría de dos wedges.

phid1=0.5*pi-0.5*delta1-atan(0.001/s2);
phiprima1=1.5*pi-0.5*delta1;
phiprima2=1.5*pi-0.5*delta2-atan(0.001/s2);

// Bucle para el cálculo de los campos en el conjunto de ángulos definido.

//for(y0=-0.30;y0<=0.40;y0=y0+0.1)
for(frec=2.0e9;frec<=8.5e9;frec=frec+6.3538e6)
{
    // Calculo de ángulos y distancias

    alpha=atan(y0/d);
    // alpha=5*pi/180.0;
    alpha1=atan((d*tan(alpha))/(d+s1+s2));
    alpha2=atan((d*tan(alpha))/(d+s2));
    alphap=atan((d*tan(alpha)+0.001)/d);
    r=(d+s1+s2)/cos(alpha1);
    s=(d+s2)/cos(alpha2);
}

```

```

s3=d/cos(alphap);

phi1=0.5*pi+alpha2-0.5*delta1;
phi2=0.5*pi+alphap-0.5*delta2;
// Calculo de campos eléctricos

// Si alpha>=0 aparecen las contribuciones de la simple
// difracción y del campo directo desde el transmisor.

//Campo en espacio libre

Elibre=Exp(Complex(0,-2.0*pi*r/(cluz/frec))); // Exponencial del campo
Elibre.r=Elibre.r/r;
Elibre.i=Elibre.i/r;

if(alpha>=0.0) //
{
// Campo directo
// Exponencial del campo

Edir=Exp(Complex(0,-2.0*pi*r/(cluz/frec)));
Edir.r=Edir.r/r;
Edir.i=Edir.i/r;

// Campo simplemente difractado
// Parámetro de distancia
L=(s1*s)/(s1+s);

Dsd=Coef_difrac(SOFT,1,Complex(0,0),delta1,2.0*pi/(cluz/frec),0.5*pi,phi1,phiprima1,
L);

Asd=sqrt(1.0/((s1+s)*s*s1)); // Spread-factor
aux1=RCmul(Asd,Dsd);
// Campo SD
Esd=Cmul(aux1,Exp(Complex(0,-2.0*pi*(s1+s)/(cluz/frec))));
}
else
{
Edir=Complex(0,0);

// Campo simplemente difractado

L=(s1*s)/(s1+s); // Parámetro de distancia

Dsd=Coef_difrac(SOFT,1,Complex(0,0),delta1,2.0*pi/(cluz/frec),0.5*pi,phi1,phiprima1,
L);

Asd=sqrt(1.0/((s1+s)*s*s1)); // Spread-factor
aux1=RCmul(Asd,Dsd);
// Campo SD
Esd=Cmul(aux1,Exp(Complex(0,-2.0*pi*(s1+s)/(cluz/frec))));
}
}

```

```

// Campo doblemente difractado
// Parametros de distancia
    L1=(s21*s1)/(s21+s1);
    L2=(s3*s21)/(s3+s21);

    // Calculo de los términos de la extensión de Holm

    Coef_difrac_HO1(SOFT,1,Complex(0,0),delta1,2.0*pi/(cluz/frec),0.5*pi,phiprima1,phid
1,L1,v1r,v1i,1);

    Coef_difrac_HO1(SOFT,1,Complex(0,0),delta2,2.0*pi/(cluz/frec),0.5*pi,phiprima2,phi2,
L2,v2r,v2i,0);

    // Coeficiente de la doble difracción

    Ddd=Doble_Coef_difrac_HO(v2r,v2i,v1r,v1i,s21);

    Add=sqrt(1.0/(s1*s21*s3*(s1+s21+s3))); // Spread-factor modificado
aux2=RCmul(Add,Ddd);

    Edd=Cmul(aux2,Exp(Complex(0,-2.0*pi*(s1+s21+s3)/(cluz/frec)))); // Campo DD

    // Suma coherente de campos: directo, difractado y doblemente difractado

    Etotdd=Cadd(Cadd(Esd,Edd),Edir);
    Etotsd=Cadd(Esd,Edir);

// doble difracción (2 edge)
atenuacion=-20.0*log10((cluz/(4.0*pi*frec*r))*Cabs(Cdiv(Etotdd,Elibre)));

//espacio libre (directo)
atenuacion1=-20.0*log10(cluz/(4.0*pi*frec*r));

//difracción simple (1 edge)
    atenuacion2=-20.0*log10((cluz/(4.0*pi*frec))*Cabs(Cdiv(Etotsd,Elibre)));

retardo_dir=(r/cluz)*1.0e9;
retardo_dif= ((s1+s2+s3)/cluz)*1.0e9;

// Escritura en un fichero
    fprintf(punterof,"%f\t%f\t%f",frec/1.0e9,atenuacion2,atenuacion);
    fprintf(punterof,"%c",'\n');
    //printf("%.2f \n",alpha);

// Incremento de Angulo de recepción
    //alpha=alpha+paso;
    }

    fclose(punterof);

    t2=clock();

```

```
cout<<("\nTiempo de ejecucion: ")<<(t2-t1)/CLK_TCK;  
cout<<("\n\n\t ** FINAL DEL PROGRAMA **");
```

```
cin>>pulsa;
```

```
}
```

## 3.- Difracción Múltiple

La difracción se produce cuando algún obstáculo obstruye la trayectoria entre el transmisor y el receptor en un enlace. En la zona de difracción los campos no son nulos y por lo tanto es posible la recepción debida a la difracción causada por el obstáculo, aunque en esta zona se producen atenuaciones superiores a las que se tendrían en una situación de espacio libre.

Esta obstrucción no implica necesariamente que se obstruya directamente la trayectoria visual entre las antenas transmisora y receptora, sino que basta con que el límite superior del obstáculo se acerque a una determinada distancia de esa visual a partir de la cual consideraremos el fenómeno de la difracción lo suficientemente importante como para que tenga incidencia en la recepción de la señal.

### 3.1.- Difracción Simple.

Para el estudio de la difracción simple seguiremos el siguiente esquema:

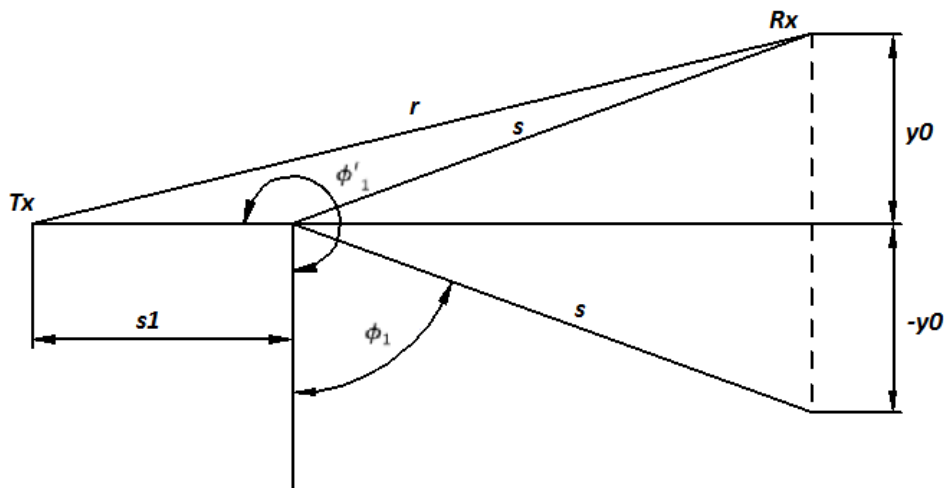


Figura 32- Difracción Simple

En el esquema tenemos un transmisor fijo y un receptor que varía su altura entre  $y_0$  y  $-y_0$ ,  $s$  es la distancia entre el punto de la difracción simple y el RX,  $r$  es la distancia entre el receptor y el transmisor y  $s_1$  es la distancia al pico de la cuña. Para el cálculo del campo utilizamos los coeficientes calculados siguiendo la teoría uniforme de la difracción [KOUY1974]

Por últimos calculamos las pérdidas para la difracción simple mediante la siguiente fórmula:

$$Pérdidas_{sd} = -20 * \log_{10} \left( \frac{c}{4\pi * frec} * |E_{totsd}| \right)$$

Donde  $E_{totsd}$  es la suma del campo simplemente difractado y el campo directo, atendiendo al siguiente esquema:

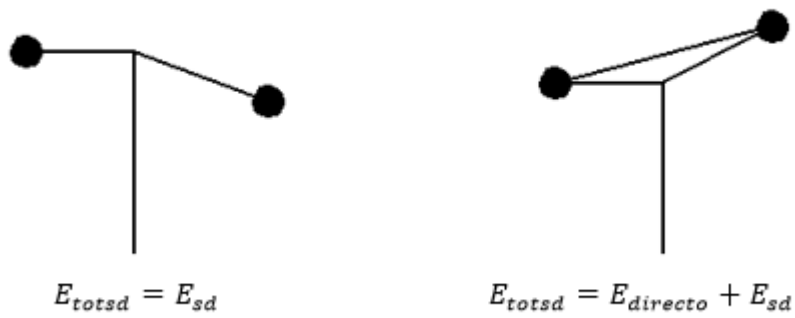


Figura 33- Campo total simplemente difractado

El campo eléctrico de un rayo que llega a la antena receptora se calcula utilizando las siguientes fórmulas:

$$E_{directo} = \frac{E_0}{r} e^{-jkr}$$

$$E_{sd} = \frac{E_0}{s_1} e^{-jks_1} D \sqrt{\frac{s_1}{s(s + s_1)}} e^{-jks}$$

Donde D es el coeficiente de difracción, s 'es la longitud de la trayectoria desde la fuente hasta la cuña difractora y s es la longitud de la trayectoria desde la cuña difractora al receptor. [MOL2004]

### 3.2.- Difracción Múltiple.

Para el estudio de la difracción doble seguiremos el siguiente esquema:

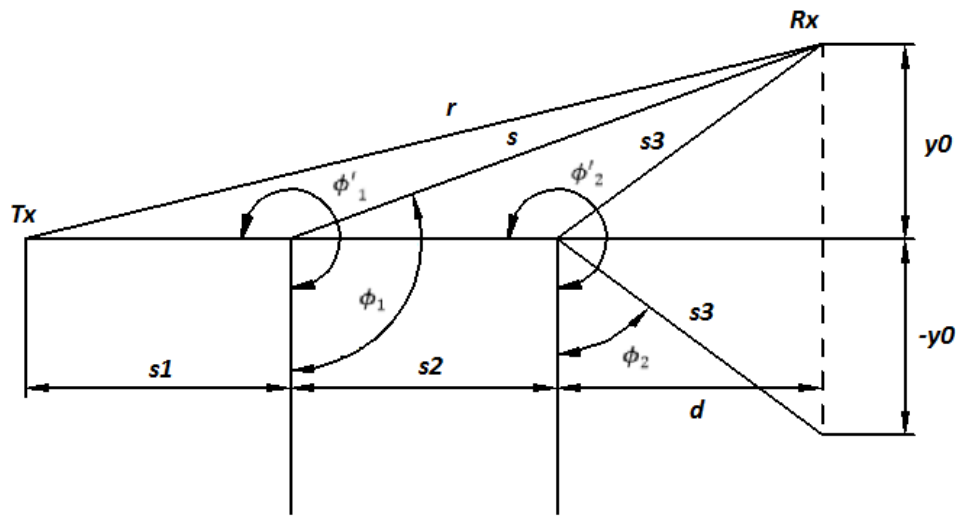


Figura 34- Difracción Múltiple

En el esquema tenemos un transmisor fijo y un receptor que varía su altura entre  $y_0$  y  $-y_0$ ,  $s$  es la distancia entre el punto de la difracción simple y el receptor,  $s_3$  es la distancia entre el punto de la doble difracción y el receptor,  $r$  es la distancia entre el receptor y el transmisor,  $s_1$  y  $s_2$  son las distancias entre los picos de las cuñas y, por último,  $d$  es la distancia tal que se tenga una onda casi plana para el campo directo.

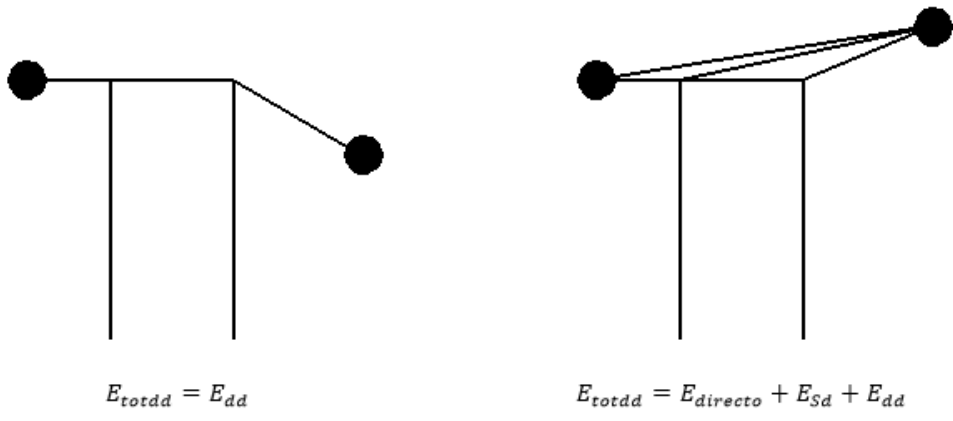
Para el cálculo del campo utilizamos los coeficientes calculados siguiendo la teoría de Holm [HOLM1996].

Por últimos calculamos las pérdidas para la difracción doble mediante la siguiente fórmula:

$$Pérdidas_{dd} = -20 * \log_{10} \left( \frac{c}{4\pi * frec} * |E_{totdd}| \right)$$

Donde  $E_{totdd}$  es la suma del campo simplemente difractado, el campo doblemente difractado y el campo directo, atendiendo al siguiente esquema:





*Figura 35- Campo total doblemente difractado*

## 4.- Resultados

Para obtener todas las medidas se han realizados varias mediciones en el laboratorio con las dos antenas diferentes. En primer lugar, se coloca todo el equipamiento tal y como se explica en el apartado 2.1 y se va variando la altura de la antena receptora a varias alturas para poder tener varias mediciones. Por otro lado, también vamos cambiando entre tener una cuña, dos cuñas o espacio libre para poder realizar la comparación.

Una vez obtenidos los ficheros para cada una de las alturas de la antena receptora procedemos a tratar los datos obtenidos mediante Matlab y simulamos los mismos escenarios en el programa 'Borland C++' para poder realizar la comparación.

Haremos dos simulaciones en la que variaremos la altura de la antena para una determinada frecuencia, una para una cuña y otra para dos cuñas. Para la antena biconica fijaremos la frecuencia a 1.75 GHz para y a 5.25 GHz para la antena EM 6116.

#### 4.1.- Resultados Difracción Simple

Para este escenario utilizaremos una arista simple, un transmisor fijo y el receptor variará su altura de manera que quede a 10 y 20 centímetros por encima de la cuña, a 10 y 20 cm por debajo de la cuña y a la misma altura que el transmisor. Por tanto, el entorno para la realización de las medidas quedará de la siguiente manera:

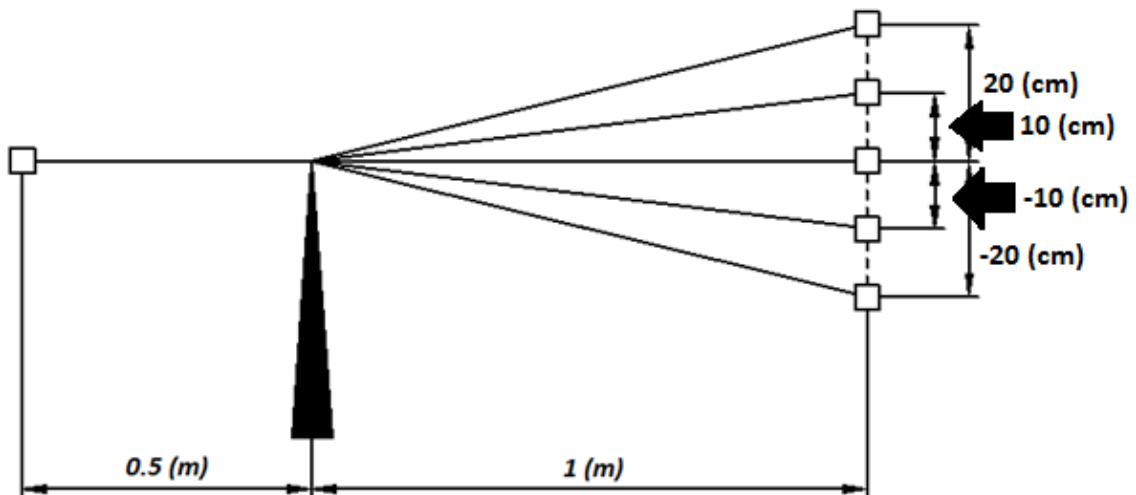
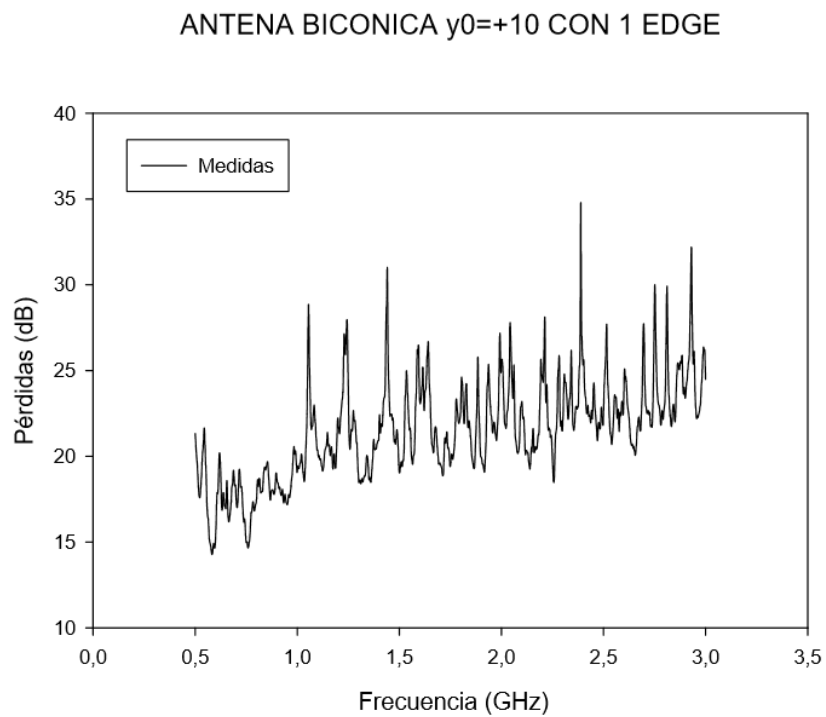


Figura 36- Esquema escenario con 1 edge.

#### 4.1.1.- Antena Bicónica

En primer lugar, obtenemos las medidas tal y como se ha explicado en el apartado 2.3 de este proyecto. Como el procedimiento es el mismo para todas las alturas vamos a mostrar solo los resultados para una de las alturas.

Ponemos la antena receptora a 10 cm por encima de la antena transmisora y realizamos una medida. Obtenemos la siguiente grafica que representa las pérdidas medidas en función de la frecuencia:



*Figura 37- Antena Bicónica y0= +10 con 1 edge.*

A continuación, realizamos el tratamiento de la medida con Matlab para obtener el PDP (*Power Delay Profile*) para la frecuencia central, en este caso  $f_0 = 1.75$  GHz y nos quedamos con el valor de la contribución principal:

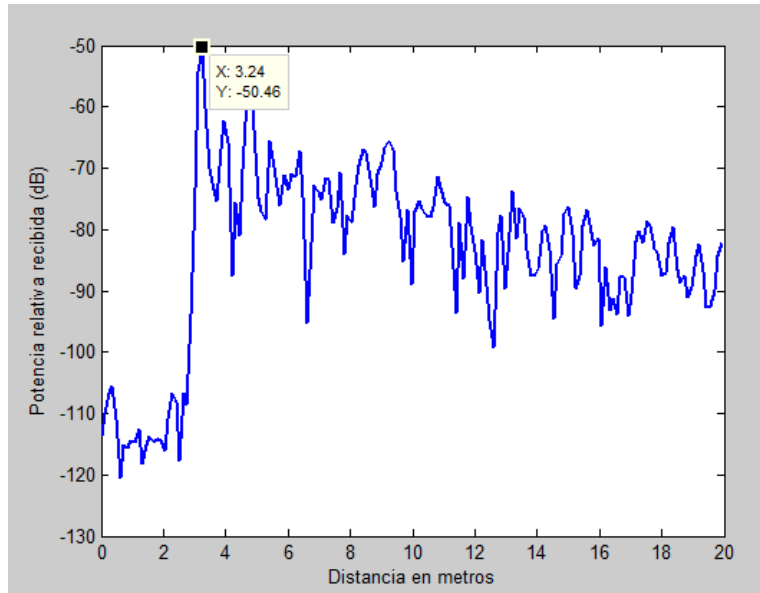


Figura 38- Perfil de retardo Antena Bicónica  $y_0=+10$  1 edge.

Realizamos estos dos pasos para todas las alturas, les aplicamos el factor de corrección calculado en el apartado 2.4, le cambiamos el signo para representar las pérdidas:

$y_0$	Valor de la gráfica	- Valor – Factor de Corrección (7.36 dB)
-20	-54.57	47.21
-10	-55.01	47.65
0	-53.06	45.7
+ 10	-50.46	43.1
+ 20	-49.21	41.85

Tabla 1- Pérdidas Antena Bicónica con 1 edge.

A continuación, representamos dichas medidas y la simulación realizada:

ANTENA BICONICA f=1.75 GHz con 1 edge

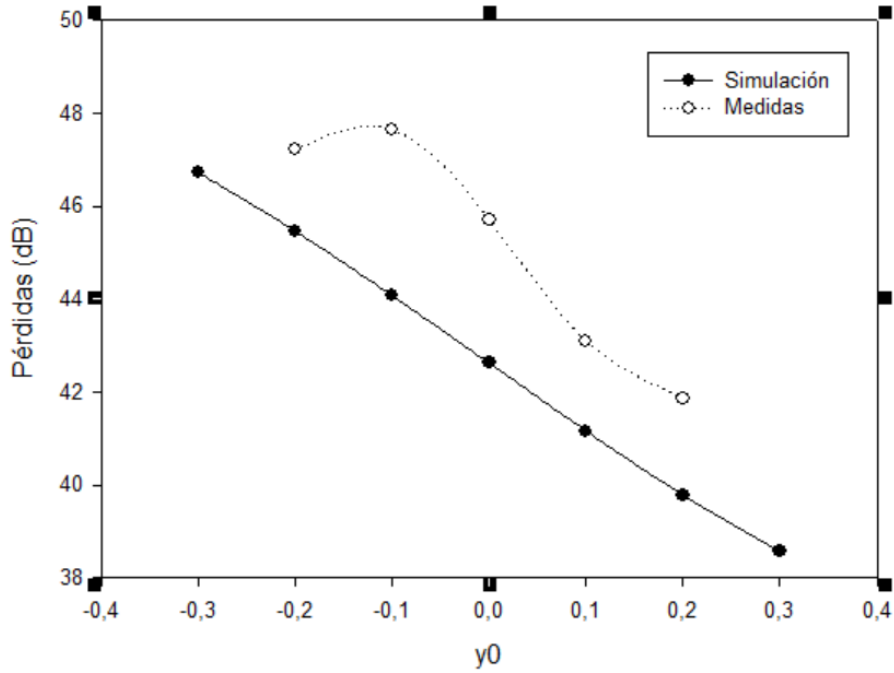


Figura 39- Pérdidas en función de  $y_0$  antena Bicónica con 1 edge.

Para finalizar calculamos el error, es decir, la diferencia entre el valor de la simulación y los valores obtenidos de las mediciones:

$y_0$	Error (e)
-20	1,7625
-10	3,5869
0	3,0865
+10	1,9433
+20	2,0768

Tabla 2- Error Antena Bicónica con 1 edge.

#### 4.1.2.- Antena EM 6116.

Realizamos los mismos pasos que para el apartado anterior, pero cambiando la antena y para una altura de 10 cm por encima de la antena transmisora medimos:

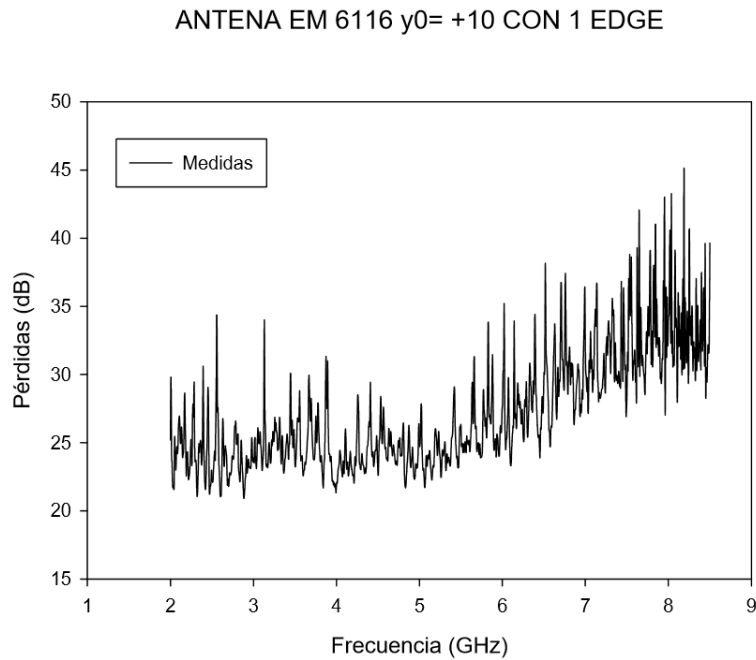


Figura 40. Antena EM 6116  $y_0 = +10$  con 1 edge

A continuación, realizamos el tratamiento de la medida con Matlab para obtener el PDP (*Power Delay Profile*) para la frecuencia central, en este caso  $f_0 = 5.25$  GHz:

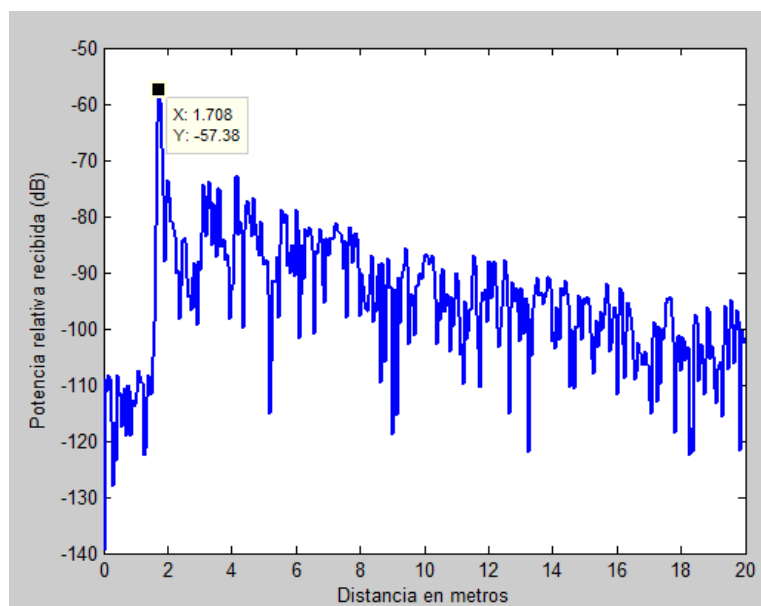


Figura 41- Perfil de retardo Antena EM 6116  $y_0 = +10$  con 1 edge

Realizamos los dos pasos anteriores para todas las alturas, les aplicamos el factor de corrección calculado en el apartado 2.4, le cambiamos el signo para representar las pérdidas:

$y_0$	Valor de la gráfica	- Valor – Factor de Corrección (5.5 dB)
-20	-67.1	61.6
-10	-63.79	58.29
0	-59.62	54.12
+ 10	-57.38	51.88
+ 20	-57.32	51.82

Tabla 3- Pérdidas Antena EM 6116 con 1 edge.

Y representamos las pérdidas en función de  $y_0$  y la simulación realizada:

**ANTENA EM 6116 f=5.25 GHz con 1 edge**

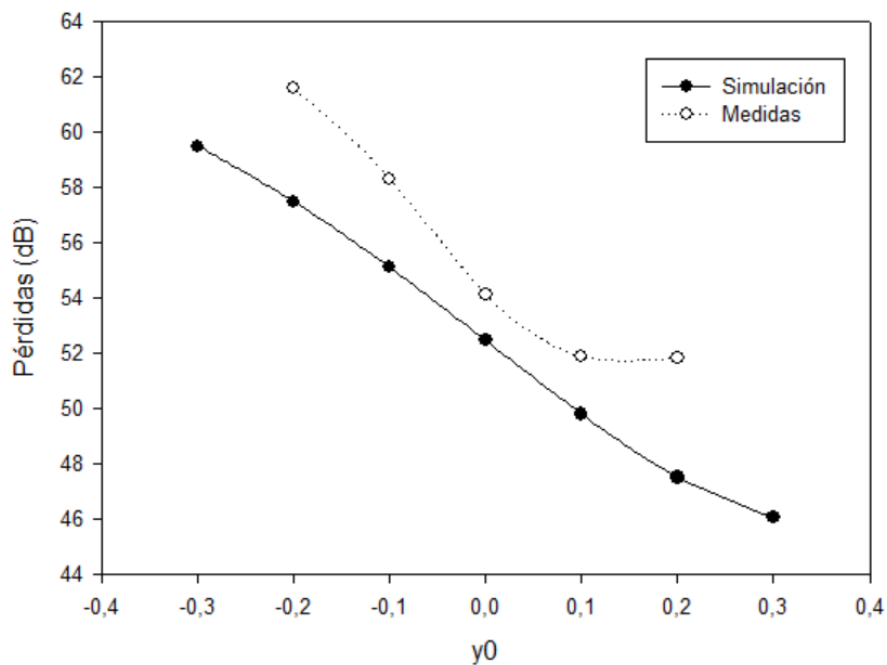


Figura 42- Pérdidas en función de  $y_0$  antena EM 6116 con 1 edge.



Y, para terminar, calculamos el error:

$y_0$	Error (e)
-20	4,1107
-10	3,1838
0	1,6611
+10	2,0806
+20	4,3045

*Tabla 4- Error Antena EM 6116 con 1 edge*

#### 4.2.- Resultados Difracción Doble.

Para este escenario utilizaremos dos aristas, un transmisor fijo y el receptor variará su altura de manera que quede a 10 y 20 centímetros por encima de la cuña, a 10 y 20 cm por debajo de las cuñas y a la misma altura que el transmisor. Por tanto, el entorno para la realización de las medidas quedará de la siguiente manera:

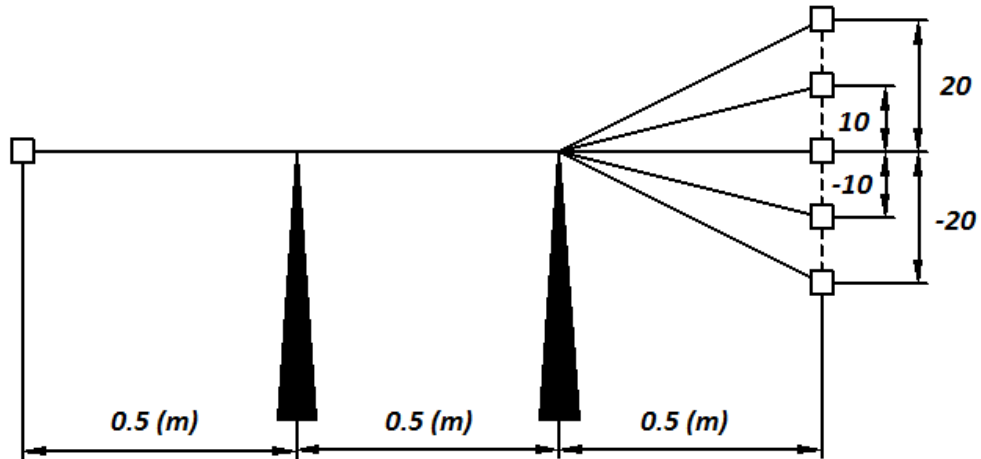


Figura 43- Esquema escenario con 2 edges

##### 4.2.1.- Antena Bicónica

Comenzamos por obtener las medidas. Ponemos la antena receptora a 10 cm por encima de la antena transmisora y realizamos una medida. Obtenemos la siguiente grafica que representa las pérdidas medidas en función de la frecuencia:

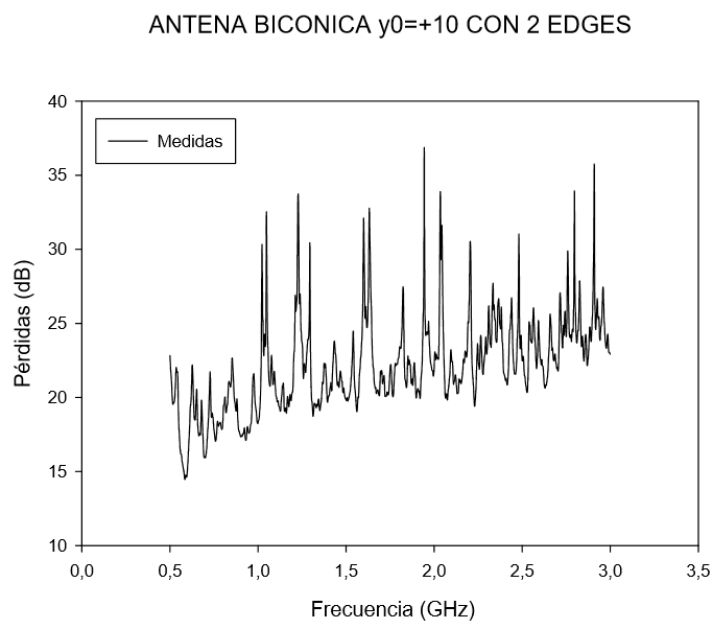


Figura 44- Antena Bicónica y0= +10 con 2 edges

A continuación, obtenemos el PDP (*Power Delay Profile*) para la frecuencia central, en este caso  $f_0 = 1.75$  GHz y nos quedamos con el valor de la contribución principal:

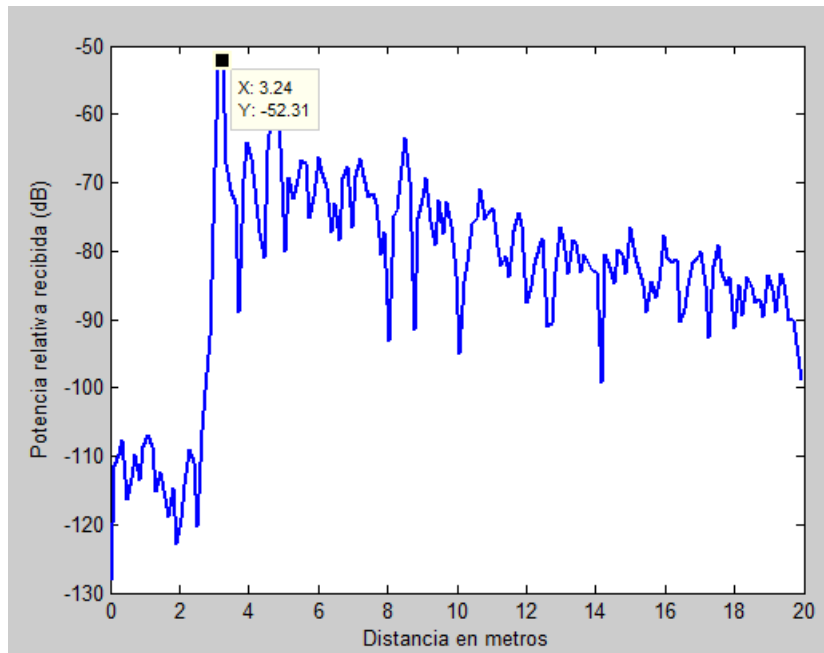


Figura 45-Perfil de retardo Antena Bicónica  $y_0=+10$  con 2 edges

Realizamos los dos pasos anteriores para todas las alturas, les aplicamos el factor de corrección calculado en el apartado 2.4, le cambiamos el signo para representar las pérdidas:

$y_0$	Valor de la gráfica	- Valor – Factor de Corrección (7.36 dB)
-20	-61.79	54.43
-10	-57.58	50.22
0	-54.26	46.9
+ 10	-52.31	44.95
+ 20	-48.12	40.76

Tabla 5- Pérdidas Antena Bicónica con 2 edges

Y representamos las pérdidas en función de  $y_0$  y la simulación realizada:

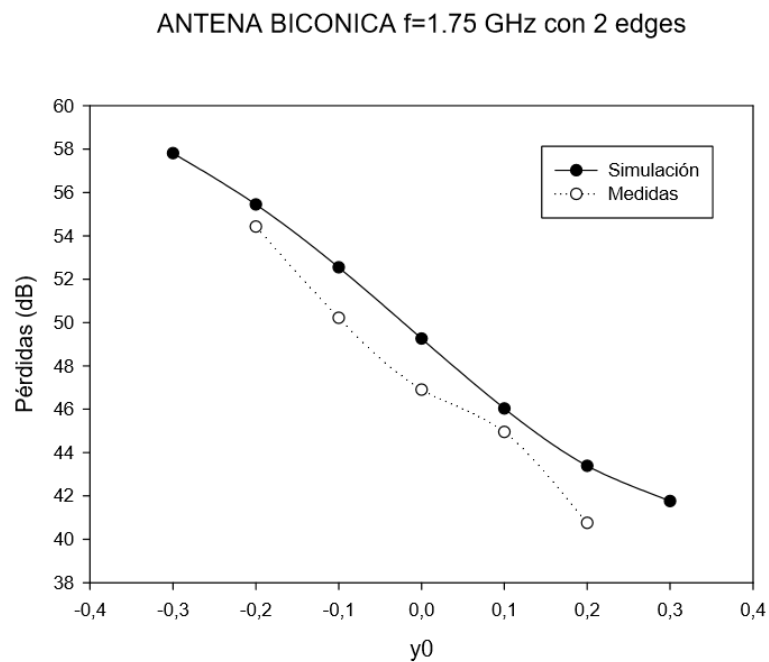


Figura 46-Pérdidas en función de  $y_0$  antena bicónica con 2 edges

Para finalizar calculamos el error, es decir, la diferencia entre el valor de la simulación y los valores obtenidos de las mediciones:

$y_0$	Error (e)
-20	-1,0182
-10	-2,323
0	-2,3627
+10	-1,0798
+20	-2,6248

Tabla 6- Error Antena Bicónica con 2 edges

#### 4.2.2.- Antena EM 6116.

Realizamos los mismos pasos que para el apartado anterior, pero cambiando la antena y para una altura de 10 cm por encima de la antena transmisora obtenemos:

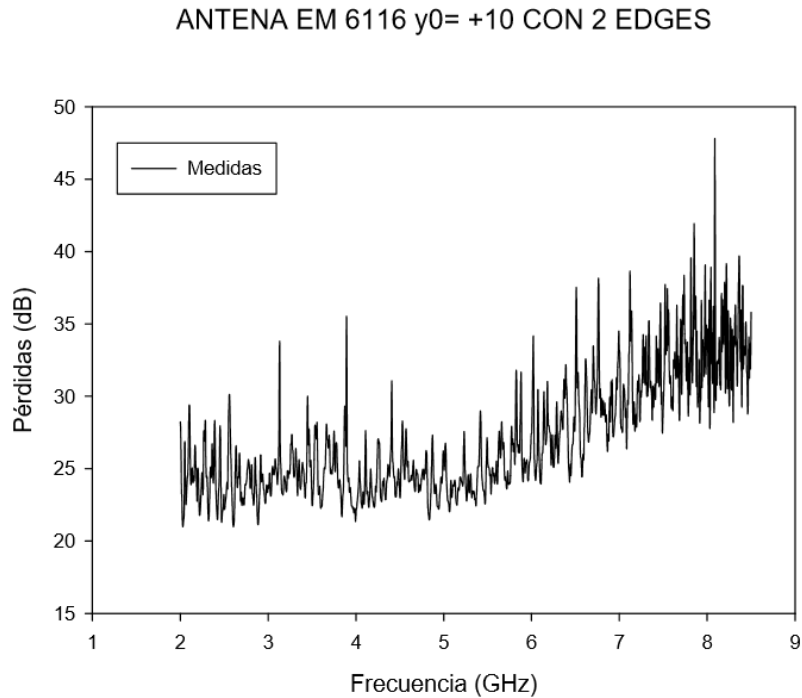


Figura 47- Antena EM 6116  $y_0 = +10$  con 2 edges

A continuación, realizamos el tratamiento de la medida con Matlab para obtener el PDP (*Power Delay Profile*) para la frecuencia central, en este caso  $f_0 = 5.25$  GHz:

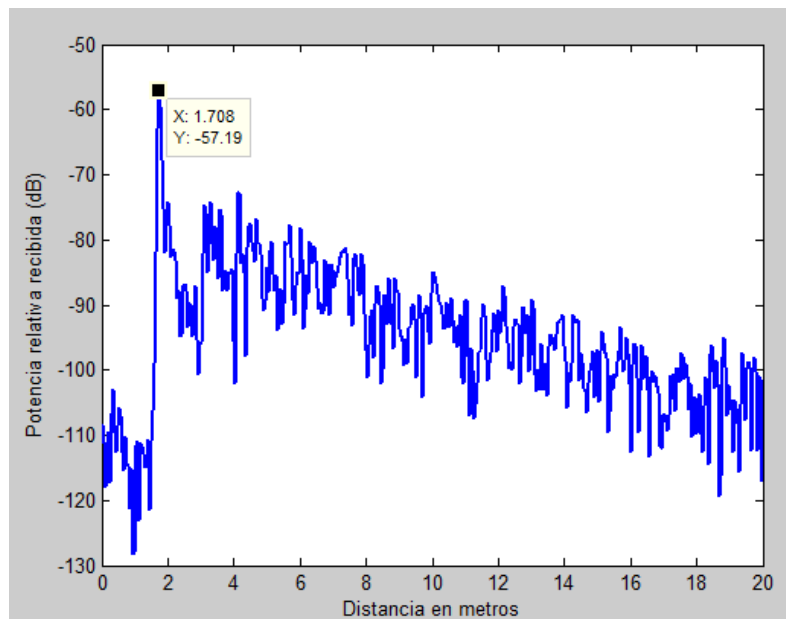


Figura 48-- Perfil de retardo Antena EM 6116  $y_0 = +10$  con 2 edges.

Realizamos los dos pasos anteriores para todas las alturas, les aplicamos el factor de corrección calculado en el apartado 2.4, le cambiamos el signo para representar las pérdidas:

$y_0$	Valor de la gráfica	- Valor – Factor de Corrección (7.36 dB)
-20	-76.2	70.7
-10	-69.43	63.93
0	-62.2	56.7
+ 10	-57.19	51.69
+ 20	-57.65	52.15

Tabla 7- Pérdidas Antena EM 6116 con 2 edges

Y representamos las pérdidas en función de  $y_0$  y la simulación realizada:

ANTENA EM 6116 f=5.25 GHz con 2 edges

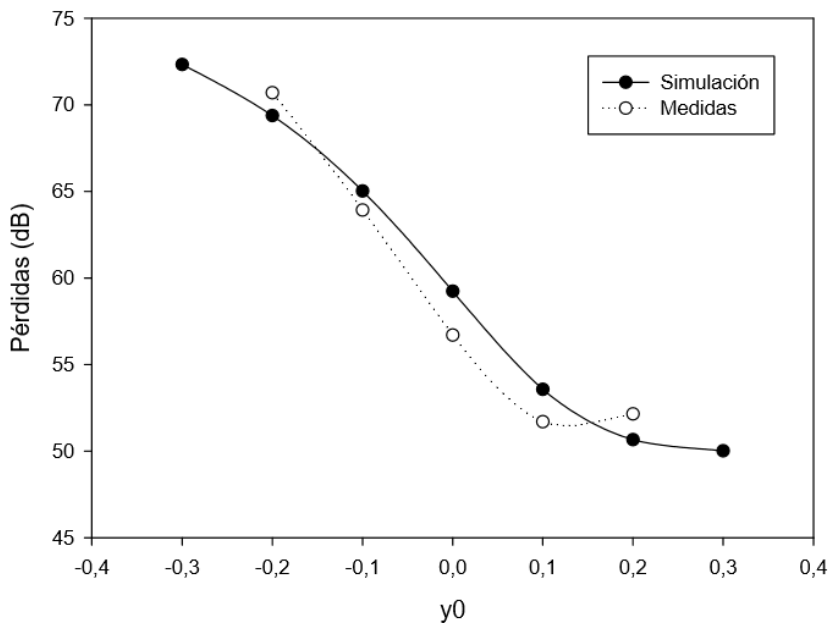


Figura 49- Pérdidas en función de  $y_0$  antena EM 6116 con 2 edges.

Y, para terminar, calculamos el error:

$y_0$	Error (e)
-20	1,3182
-10	-1,0991
0	-2,537
+10	-1,8758
+20	1,4922

*Tabla 8- Error Antena EM 6116 con 2 edges.*

## 5.- Conclusiones y Líneas Futuras



## 5.1.- Conclusiones.

Con este proyecto se ha realizado una comparación teórico-experimental de las pérdidas medidas y las obtenidas mediante modelos teóricos para difracción simple y doble de cuñas conductoras.

Para realizar las medidas se ha utilizado un sistema de medidas compuesto por analizador de redes, antenas, cables y conectores; y para su análisis programas en MATLAB.

Para los cálculos teóricos se han utilizado programas que implementan modelos electromagnéticos basados en la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD).

Se ha realizado una comparación del error tanto para difracción simple como para difracción doble para dos frecuencias diferentes con anchos de banda de resolución distintos. De los resultados obtenidos (resumidos en la Tabla 9) se concluye que:

- Para difracción doble, la diferencia entre el modelo teórico y las medidas es menor en ambos casos, siendo los resultados mejores para la antena EM 6116 (ver Tabla 9).
- Para difracción simple, los resultados son mejores para la antena bicónica SCHWARZBECK SBA 9113.

	$f_1= 1.75$ GHz (Bicónica) BWR = 2.5 GHz		$f_2=5.25$ GHz (EM 6116) BWR = 6.5 GHz	
	Simple	Doble	Simple	Doble
y0				
-20	1,7625	-1,0182	4,1107	1,3182
-10	3,5869	-2,323	3,1838	-1,0991
0	3,0865	-2,3627	1,6611	-2,537
+10	1,9433	-1,0798	2,0806	-1,8758
+20	2,0768	-2,6248	4,3045	1,4922

Tabla 9- Comparación error.

## 5.2.- Líneas Futuras.

Se proponen las siguientes líneas futuras:

- Realizar estudios a frecuencias superiores siguiendo el procedimiento de este TFM.
- Estudio de parámetros de banda ancha: ancho de banda de coherencia, dispersión del retardo, ...
- Realizar las medidas en una cámara anecoica y comparar los resultados con los obtenidos en este TFM.

## 6.- Referencias

[BER2000] Henry L. Bertoni, Radio propagation for modern Wireless systems, Ed. Prentice Hall PTR, 2000.

[CoGPI]: Agilent 82357A User's Guide.

[ENA5071B] [https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/Agilent\\_E5071B.pdf](https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/Agilent_E5071B.pdf)

[EM6116] <https://electro-metrics.com/product/omni-directional-antenna-em-6116-2-ghz-10-ghz/>

[HER2013] J.M. Hernando Rábanos, Transmisión por radio, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, 7ª ed. 2013.

[HOLM1996] Peter D. Holm, UTD-Diffraction Coefficients for Higher Order Wedge Diffracted Fields, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 44, NO. 6, p.879- 888, JUNE 1996.

[KOUY1974] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc. ZEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Ndv. 1974.

[MOL2004] Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo, José-Victor Rodríguez, and Leandro Juan-Llácer, Wide-Band Measurements and Characterization at 2.1 GHz While Entering in a Small Tunnel, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 53, NO. 6, pp. 1794-1799, NOVEMBER 2004

[ProLA] "Software para la automatización de medidas de un sistema MIMO de banda ancha", Proyecto fin de carrera. Rafael Antonio Lucas Ávila 2005.

[SCHW9113] <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9113.pdf>