

## CAPÍTULO 5. MEDIDAS REALIZADAS Y RESULTADOS

### 5.1 RELACIÓN DE PÉRDIDAS

Un esquema de la plataforma de medida es el representado en la Figura 51. Como se puede apreciar, la potencia que entra al transistor ( $P_{in}$ ) no es exactamente la potencia que sale del generador de señal ( $P_i$ ). Igual sucede con la potencia de salida del transistor ( $P_{out}$ ) y la que es medida por el analizador ( $P_o$ ).

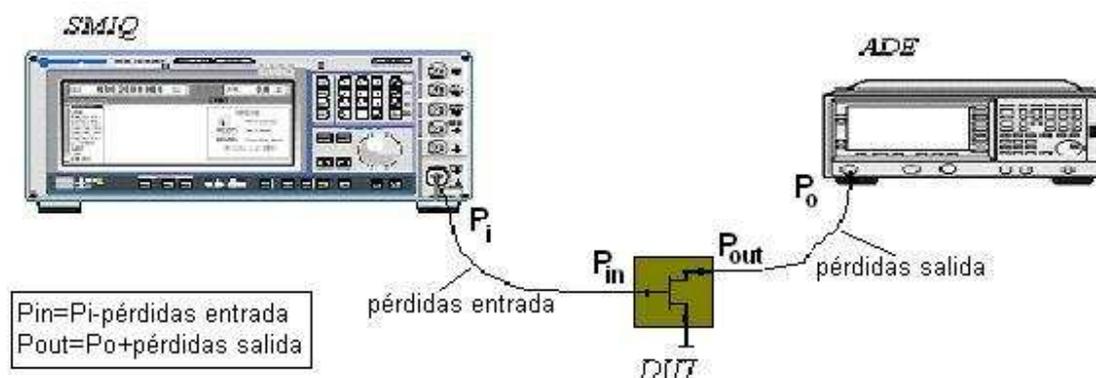


Figura 51. Esquema básico de la Plataforma de Medida

Lo primero que debemos hacer por tanto para realizar las medidas, es anotar las pérdidas que se producen en los cables, tanto de entrada como de salida del transistor. Estas pérdidas se han tenido que medir para cada frecuencia, ya que la respuesta del cable no es continua, de manera que cada valor de frecuencia presenta una atenuación diferente.

Estos valores serán los que después se introduzcan en cada interfaz si el usuario desea activar la corrección.

#### 5.1.2 Pérdidas a la entrada del transistor

Para medir las pérdidas que introduce el cable de entrada vamos a conectarlo entre el generador de señal y el analizador de espectros, con una potencia de 0dBm por comodidad y mirando en el ADE, tomaremos nota de las pérdidas que se producen para diferentes frecuencias.

El cable de entrada al transistor es un HP con conectores tipo N-m, que se acoplan directamente al generador de señal, más una transición SMA para conectarlo al analizador de espectros. No obstante, hay que añadir un elemento para polarizar el transistor llamado Bias-Tee, del fabricante Mini Circuits, con código: ZFBT- 6GW, que también provocará pérdidas.

A continuación se muestran los valores obtenidos de pérdidas para las diferentes frecuencias. Como podemos observar, al disminuir la frecuencia de excitación, disminuyen también las pérdidas en el cable.

<b>FRECUENCIA ENTRADA</b>	<b>PÉRDIDAS ENTRADA (dB)</b>
2 GHz	1.85
1.999995 GHz	1.8
2.000005 GHz	1.69
1.99995 GHz	1.7
2.00005 GHz	1.72
1.9995 GHz	1.73
2.0005 GHz	1.74
1.995 GHz	1.68
2.005 GHz	1.75
140 MHz	0.67
139.995 MHz	0.64
140.005 MHz	0.35
139.95 MHz	0.52
140.05 MHz	0.53
139 MHz	0.39
141 MHz	0.39
135 MHz	0.59
145 MHz	0.61

tabla 1. Pérdidas a la entrada

### 5.1.3 Pérdidas a la salida del transistor

Ahora colocamos el cable de salida (azul) entre el generador de señal y el analizador de espectros, con su correspondiente Bias-Tee.

Este cable SPECTRUM, consta de transiciones SMA por los dos extremos, es de mejor calidad por lo que nos va a dar pérdidas menores como podemos comprobar en la siguiente tabla.

- ★ En medidas de un tono: Para frecuencias mayores de 2 GHz hemos tenido que usar el generador de señal SMR 20 que nos proporciona un rango de frecuencias disponibles de hasta 20 GHz.

<b>TONO a 2 GHz</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Armónico fundamental	2	0.9
Segundo armónico	4	2.13
Tercer armónico	6	2.33
Cuarto armónico	8	3.33
Quinto armónico	10	3.69
<b>TONO a 140 MHz</b>	<b>FRECUENCIA (MHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Armónico fundamental	140	0.39
Segundo armónico	280	0.32
Tercer armónico	420	0.42
Cuarto armónico	560	0.46
Quinto armónico	700	0.51

tabla 2. Pérdidas de armónicos a la salida

★ En medidas de dos tonos: Vamos a realizar diferentes medidas en función de la separación de los tonos.

➤ Para dos tonos centrados en 2 GHz separados en frecuencia  $D_f$ :

<b>Df = 10 KHz</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	1.999995	0.84
Tono superior	2.000005	0.86
IM3 inferior	1.999985	0.81
IM3 superior	2.000015	0.7
IM5 inferior	1.999975	0.96
IM5 superior	2.000025	0.95
<b>Df = 100 KHz</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	1.99995	1
Tono superior	2.00005	0.99
IM3 inferior	1.99985	0.92
IM3 superior	2.00015	0.91
IM5 inferior	1.99975	0.91
IM5 superior	2.00025	0.90
<b>Df = 1 MHz</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	1.9995	0.92
Tono superior	2.0005	0.89
IM3 inferior	1.9985	1
IM3 superior	2.0015	0.99
IM5 inferior	1.9975	1.01
IM5 superior	2.0025	1.01
<b>Df = 10 MHz</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	1.995	1.12
Tono superior	2.005	1.10
IM3 inferior	1.985	0.98
IM3 superior	2.015	0.95
IM5 inferior	1.975	0.98
IM5 superior	2.025	0.96

tabla 3. Pérdidas a la salida para dos tonos centrados en 2GHz

➤ Para dos tonos centrados en 140 MHz separados en frecuencia  $D_f$ .

<b>Df = 10 KHz</b>	<b>FRECUENCIA (MHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	139.995	0.35
Tono superior	140.005	0.49
IM3 inferior	139.985	0.48
IM3 superior	140.015	0.49
IM5 inferior	139.975	0.49
IM5 superior	140.025	0.49
<b>Df = 100 KHz</b>	<b>FRECUENCIA (MHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	139.95	0.42
Tono superior	140.05	0.42
IM3 inferior	139.85	0.41
IM3 superior	140.15	0.42
IM5 inferior	139.75	0.41
IM5 superior	140.25	0.41
<b>Df = 1 MHz</b>	<b>FRECUENCIA (MHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	139	0.57
Tono superior	140	0.57
IM3 inferior	137	0.58
IM3 superior	143	0.58
IM5 inferior	135	0.59
IM5 superior	145	0.62
<b>Df = 10 MHz</b>	<b>FRECUENCIA (MHz)</b>	<b>PÉRDIDAS SALIDA (dB)</b>
Tono inferior	135	0.59
Tono superior	145	0.62
IM3 inferior	125	0.41
IM3 superior	155	0.42
IM5 inferior	115	0.40
IM5 superior	165	0.42

tabla 4. Pérdidas a la salida para dos tonos centrados en 140MHz

## 5.2 MEDIDAS REALIZADAS

Una vez que tenemos anotadas las pérdidas que introducen los cables, ya estamos en disposición de realizar las medidas que nos ocupan. Para ello procedemos a incluir el dispositivo de microondas (transistor funcionando como amplificador) entre los cables, el cual, por ser tipo MESFET, tendrá que llevar una Bias-Tee tanto a su entrada como a su salida. La plataforma de medida es la que ya ha sido comentada.

### 5.2.1 Medidas del barrido de potencia de un tono

En la primera medida vamos a aplicar a la entrada del amplificador un tono a una frecuencia  $f$ , y vamos a realizar medidas del nivel de potencia (en dBm) a la salida, a esta frecuencia y a la del segundo ( $2f$ ), tercero ( $3f$ ), cuarto ( $4f$ ) y quinto ( $5f$ ) armónico. Para ello haremos un barrido de potencia de entrada de  $-30$  dBm a  $10$  dBm.

Como el dispositivo de microondas que estamos estudiando funciona como amplificador, veremos que la potencia de entrada queda amplificada a la salida (recta con pendiente positiva), es decir, tendremos comportamiento lineal, hasta un punto tal de potencia de entrada en el que el transistor satura y empieza a comportarse de manera no lineal. Con los resultados logrados podemos obtener una curva de la ganancia del amplificador. El punto de saturación del transistor, como se comprueba en la Figura 52 se encuentra en torno a  $-3$  dBm de potencia a la entrada para el caso de un tono centrado en  $2$ GHz y para un tono centrado en  $140$  MHz, la potencia de salida deja de ser constante para un valor de potencia de entrada igual a  $-2$  dBm, como observamos en la Figura 53.

En las siguientes figuras, se observan las medidas que se han realizado, a la frecuencia fundamental y a la frecuencia del segundo, tercer, cuarto y quinto armónico. Podemos comprobar, que conforme aumenta el nivel de los armónicos superiores al fundamental, la relación  $P_{in}/P_{out}$  se va distorsionando.

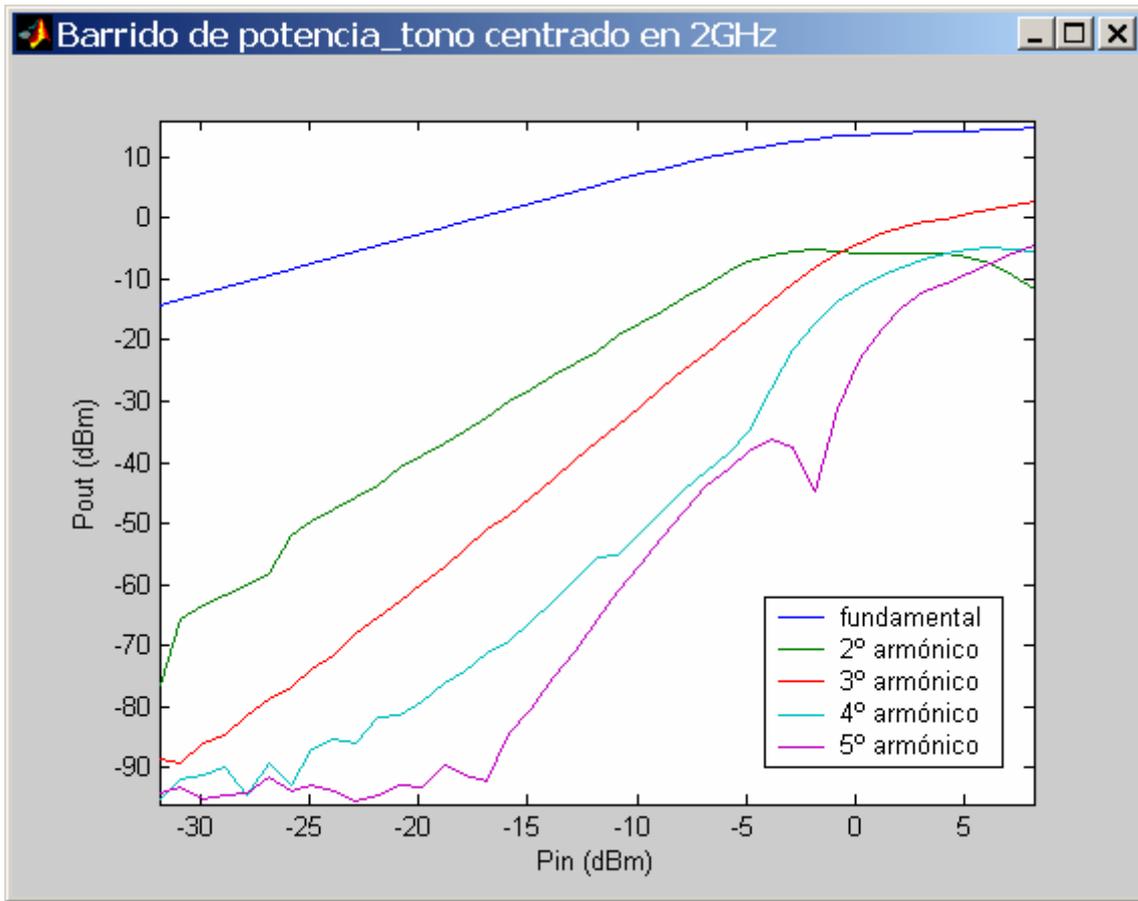


Figura 52. Barrido de potencia de un tono centrado en 2GHz

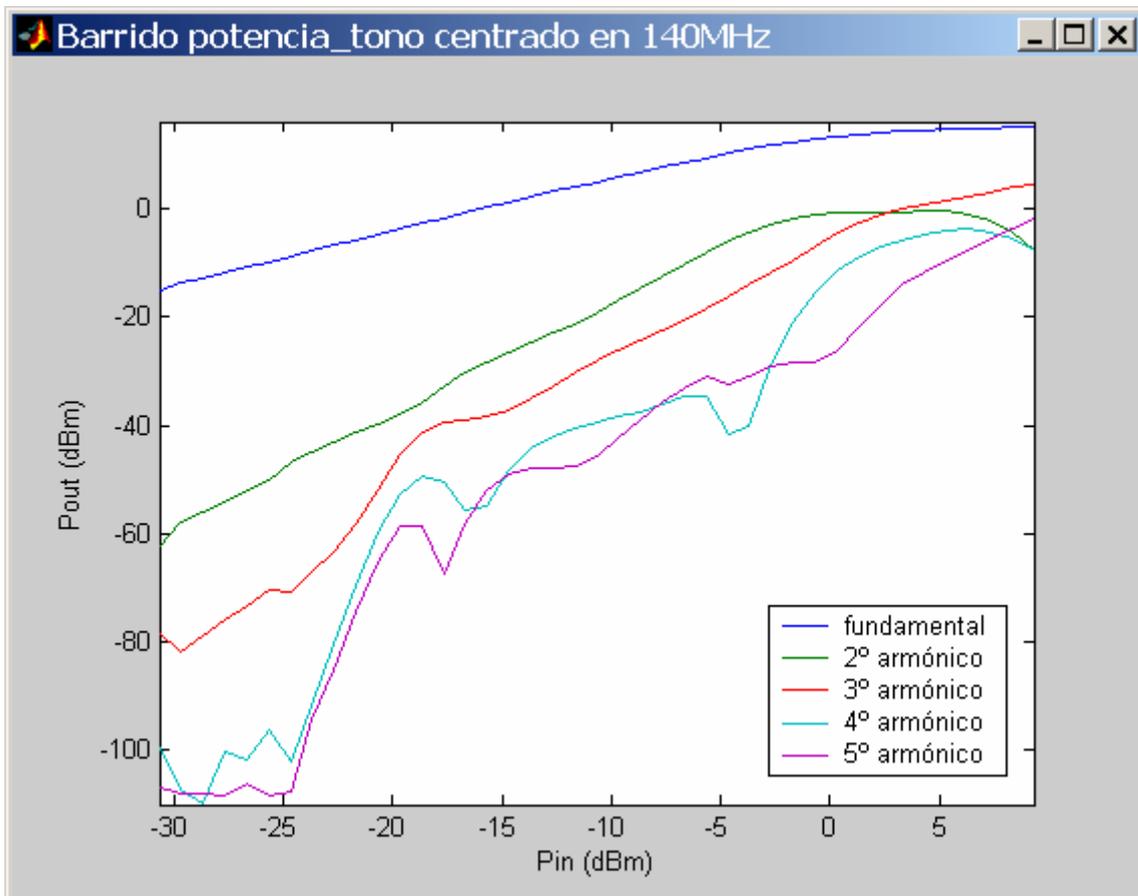


Figura 53. Barrido de potencia de un tono centrado en 140MHz

En las figuras que siguen a continuación, se representan las ganancias y sus armónicos fundamentales correspondientes para las dos frecuencias centrales del tono (2GHz y 140MHz). En ambas podemos ver que la ganancia permanece constante mientras existe comportamiento lineal y comienza a disminuir cuando la potencia de entrada es elevada.

En la Figura 56 se muestran las ganancias de ambos tonos donde comprobamos que para la frecuencia central de 2GHz la ganancia es mayor.

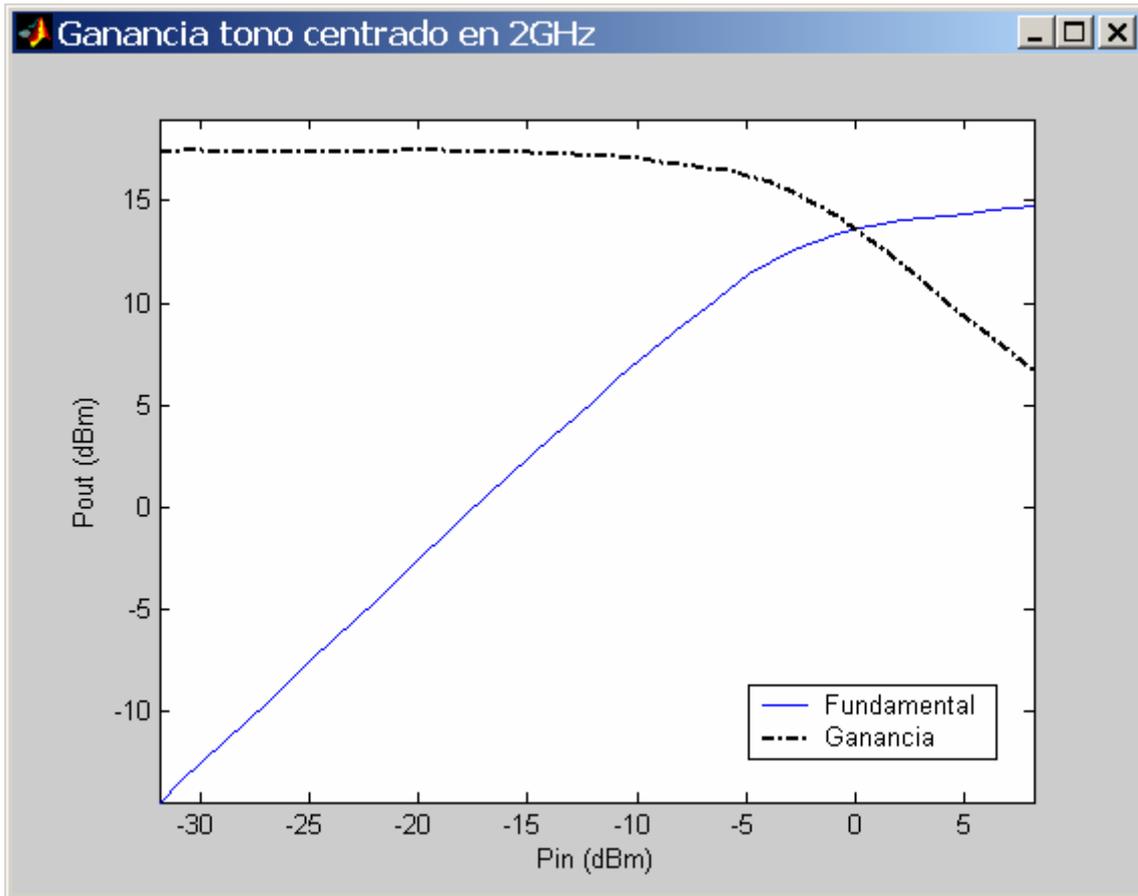


Figura 54. Ganancia de un tono centrado en 2GHz

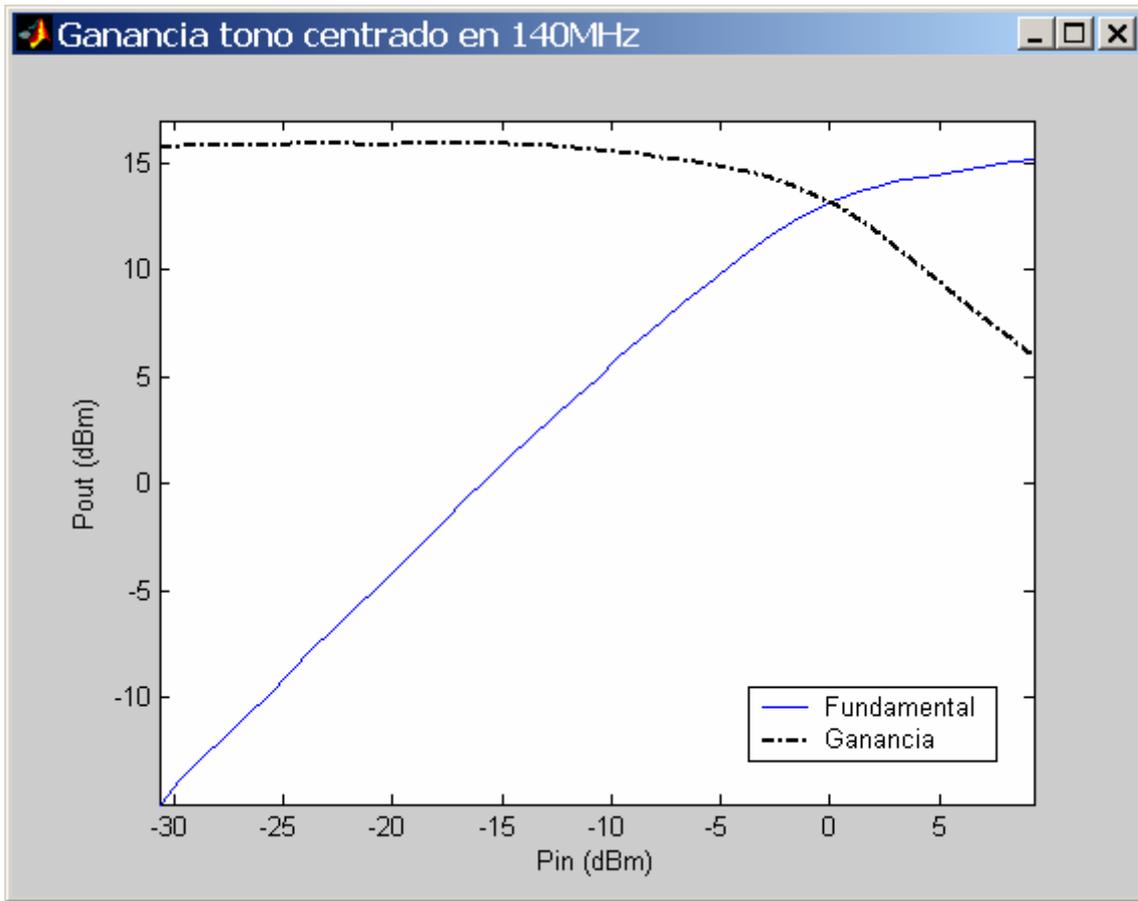


Figura 55. Ganancia de un tono centrado en 140MHz

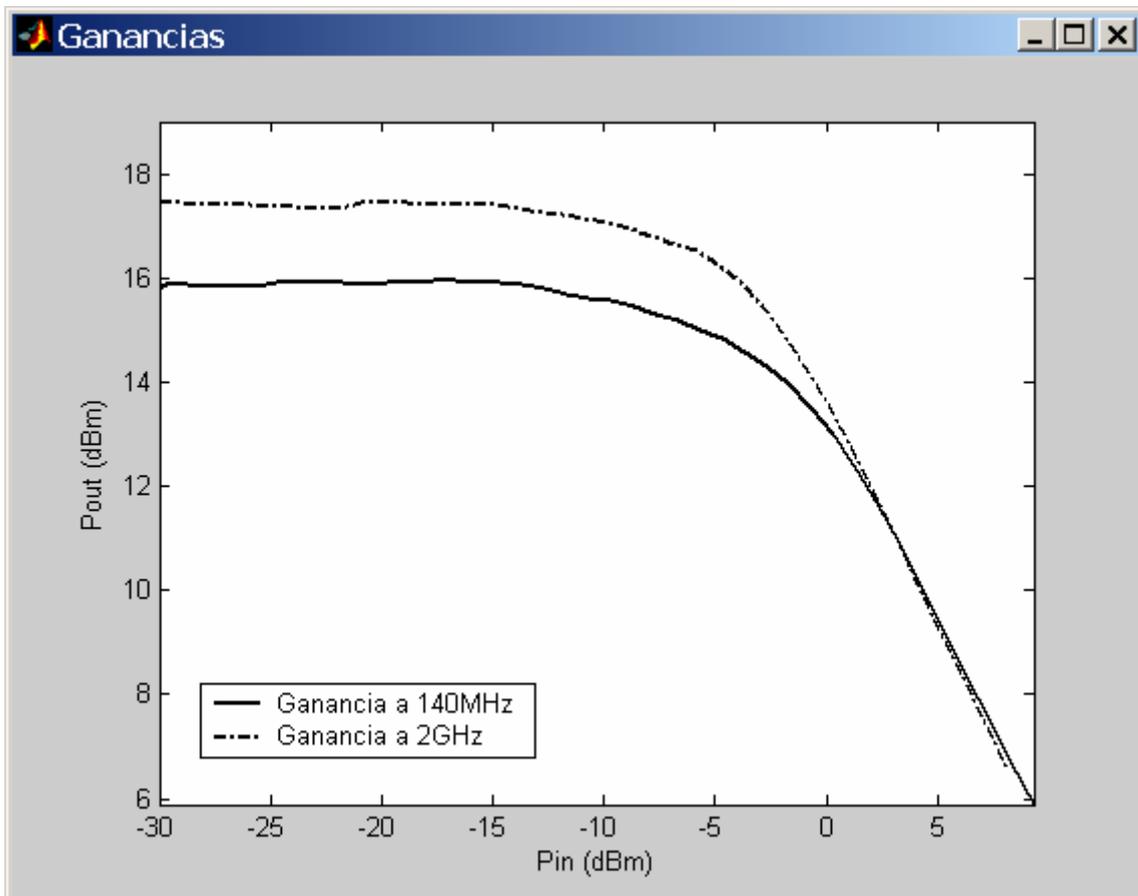


Figura 56. Ganancias

### **5.2.2 Medida del barrido de potencia de una señal de dos tonos**

Cuando aplicamos dos o más tonos a la entrada de un dispositivo no lineal, a la salida no sólo aparecen las componentes fundamentales y los armónicos de éstas, sino que también aparecen unas componentes de mezcla (*los productos de intermodulación*). En las medidas que se describen a continuación se intenta caracterizar la intermodulación a la salida del amplificador para dos tonos centrados en 2GHz y 140MHz con distinta separación entre tonos ( $Df$ ). En concreto, en esta tercera medida vamos a representar la potencia de salida en dBm para un barrido de potencia de entrada de -30 dBm a 10 dBm para los dos tonos de entrada así como los productos de intermodulación de tercer (IM3) y quinto (IM5) orden.

#### **5.2.2.1 Dos tonos centrados en 2GHz**

Cuando la separación entre los tonos es pequeña, de 10KHz, Figura 57, se aprecia el comportamiento ideal del amplificador para bajas potencias de entrada en los tonos inferior y superior, y en los productos de intermodulación de tercer orden, donde para un aumento de la potencia de entrada, la potencia de salida también sufre un aumento proporcional, hasta que el transistor satura (potencia de entrada en torno a -8 dBm) y los cambios de la potencia de salida ya no siguen a los cambios de la potencia de entrada. Cabe destacar en esta figura el efecto de los productos de intermodulación de quinto orden para potencias de entrada pequeñas. Esto es debido a que están inmersos en ruido, Lo que se está midiendo ahí es fondo de ruido. Obviamente al aumentar la potencia de entrada, la distorsión ya va tomando un valor considerable.

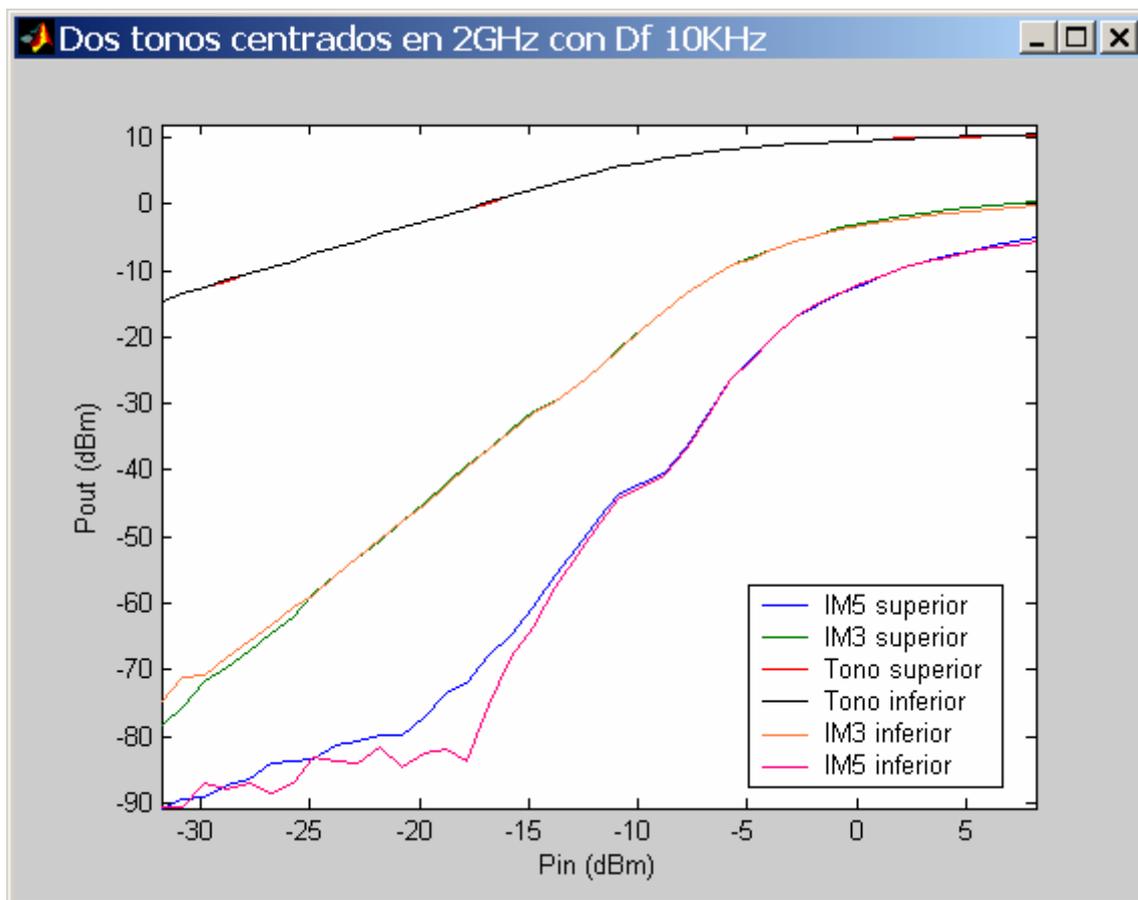


Figura 57. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 10KHz

En la Figura 58, se representa la ganancia de los tonos superior e inferior para una separación de 10KHz entre ellos. Vemos como la ganancia permanece aproximadamente constante e igual a 17 hasta que la potencia de entrada es de -8dBm, donde empieza a decrecer con una gran pendiente.

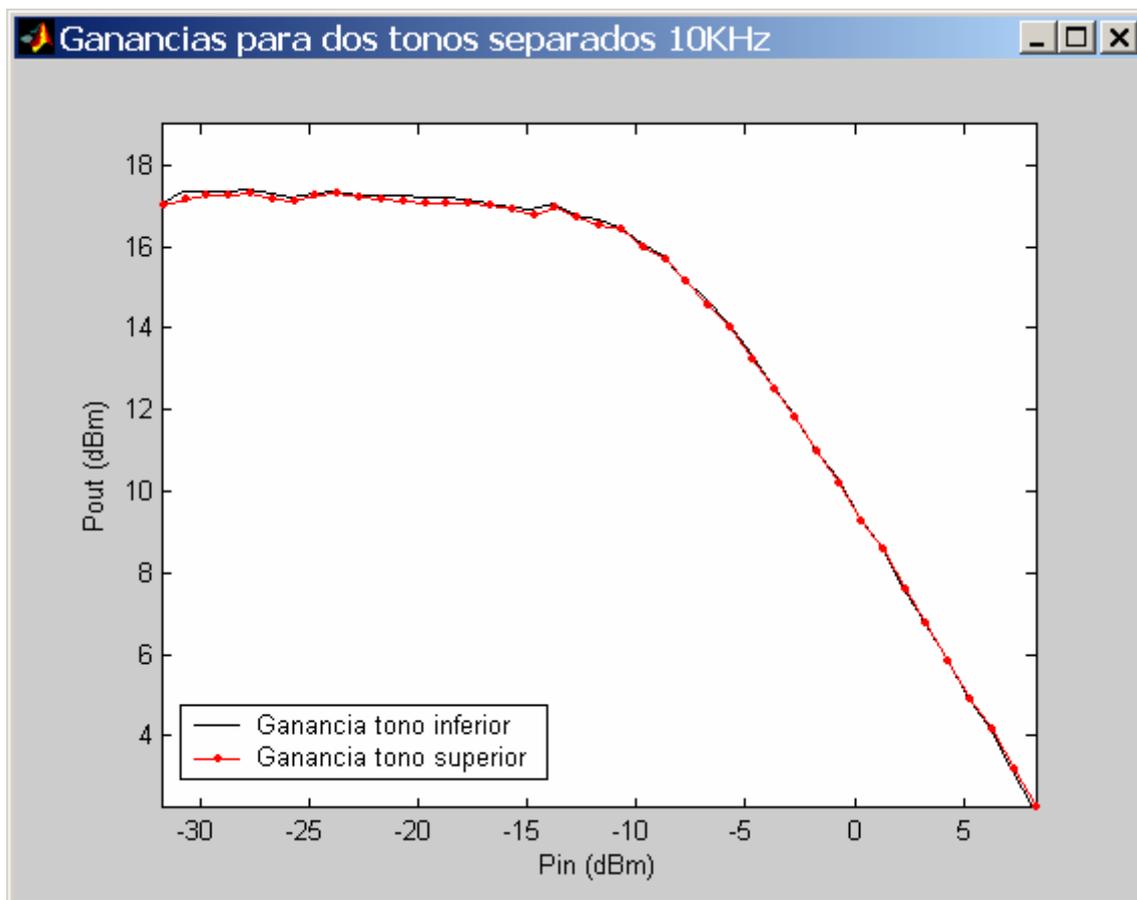


Figura 58. Ganancia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 10KHz

Al aumentar la separación de frecuencia entre los tonos, los IM5 están menos inmersos en ruido para potencias bajas, por lo que comienza a verse la pendiente como se comprueba en la Figura 59.

En la Figura 60 se reflejan las ganancias de los tonos inferior y superior de dos tonos separados 100KHz. Podemos observar que el valor de ganancia que permanece constante vuelve a ser de 17.

Las siguientes figuras corresponden a dos tonos centrados en 2GHz y separados 1MHz.

Cuando la separación de frecuencias es mayor, de 10MHz, como se ve en la Figura 63 y Figura 64, para potencias de entrada elevada, el comportamiento deja de ser lineal y se separan los tonos inferior y superior, observándose una asimetría entre ellos, así como los productos de intermodulación. También podemos apreciar el efecto de un llamado “sweet spot” de gran señal en IM5, valores discretos de potencias de entrada donde la potencia de salida no sigue la tendencia creciente, sino que presenta un mínimo inesperado.

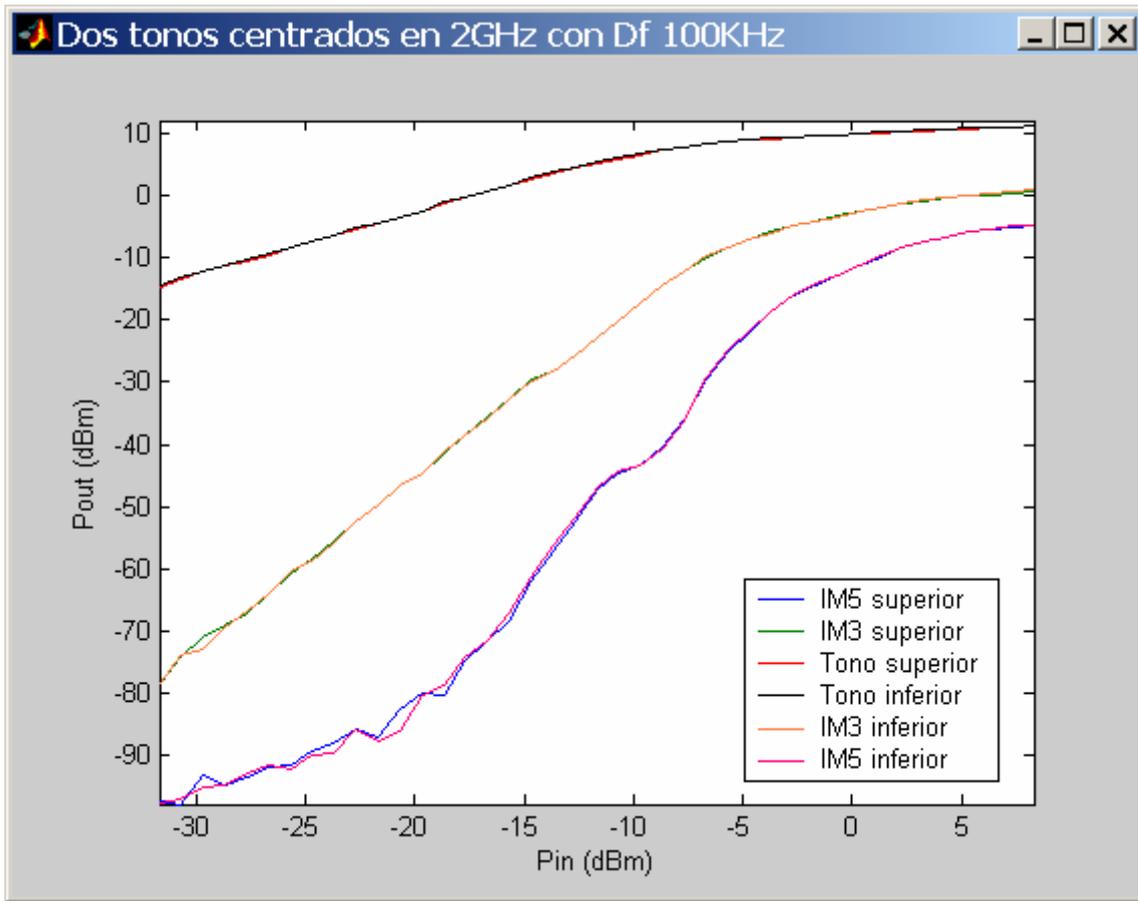


Figura 59. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 100KHz

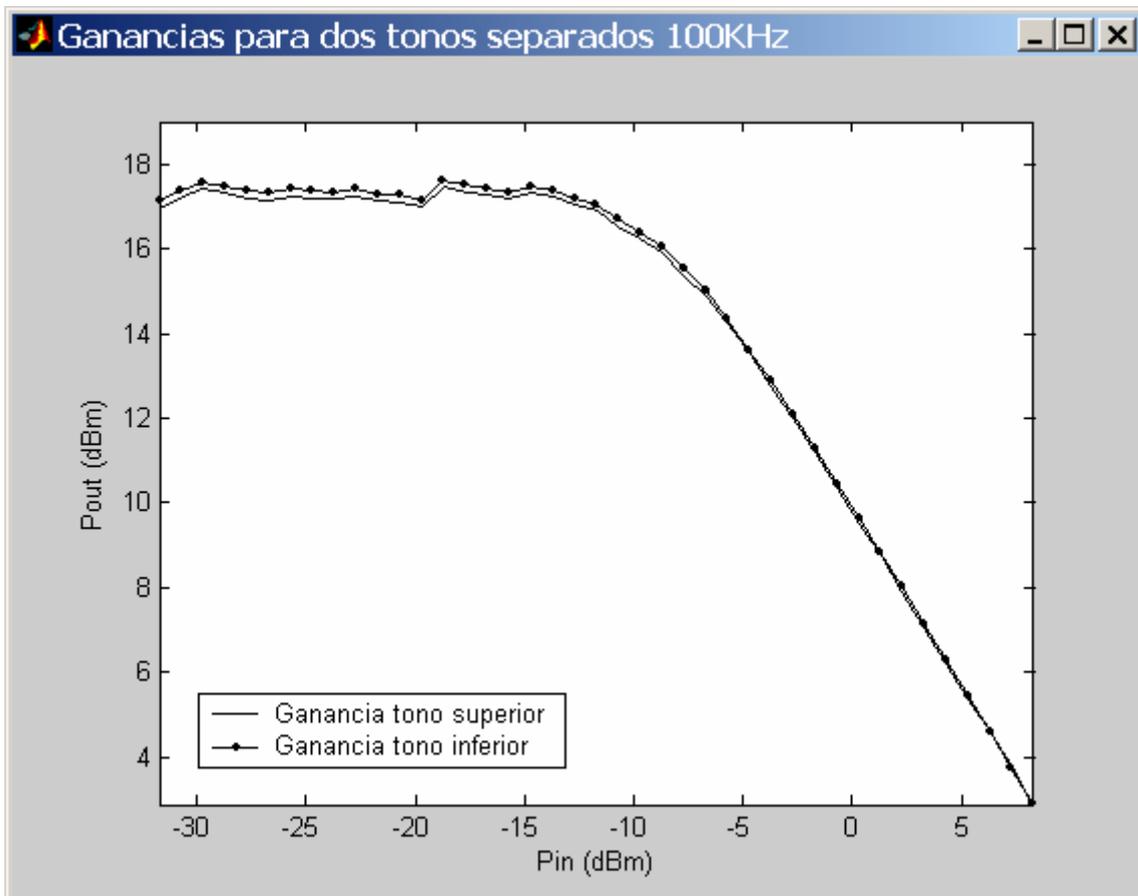


Figura 60. Ganancia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 100KHz

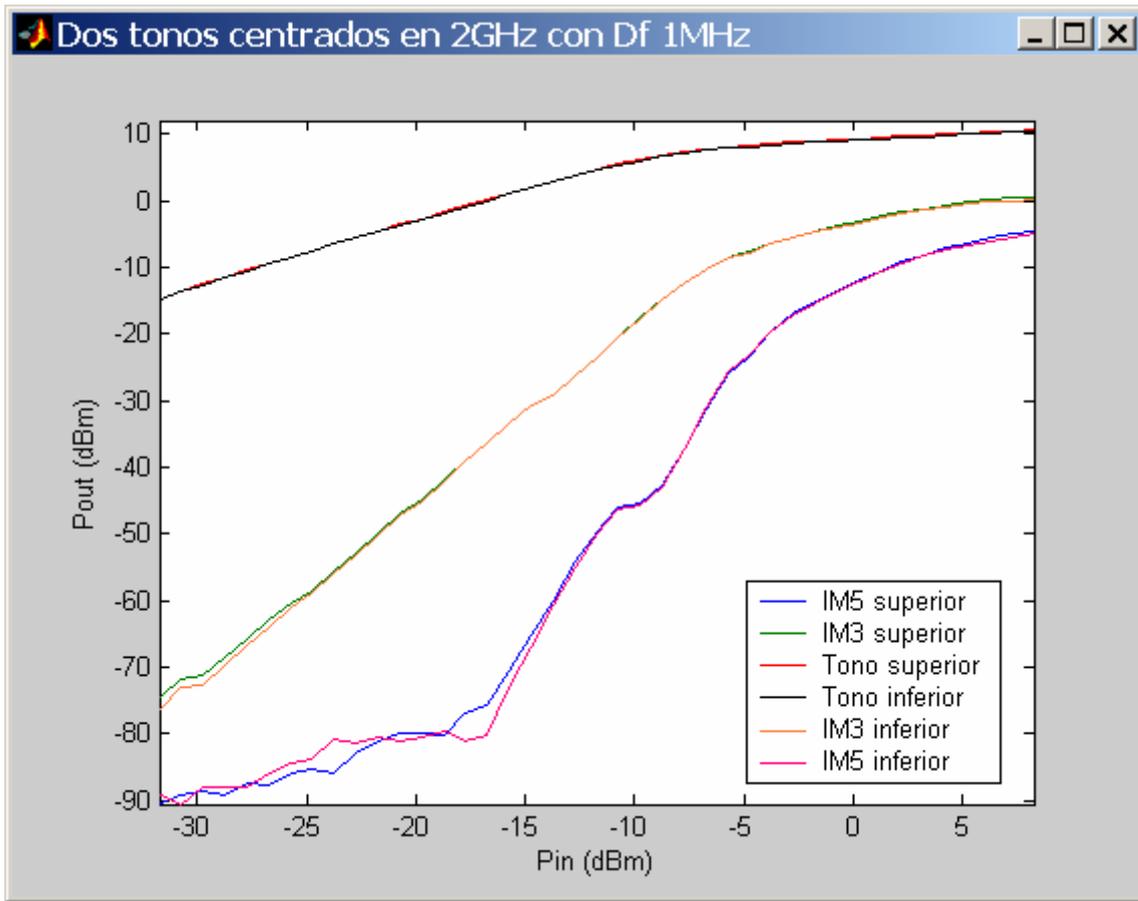


Figura 61. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 1MHz

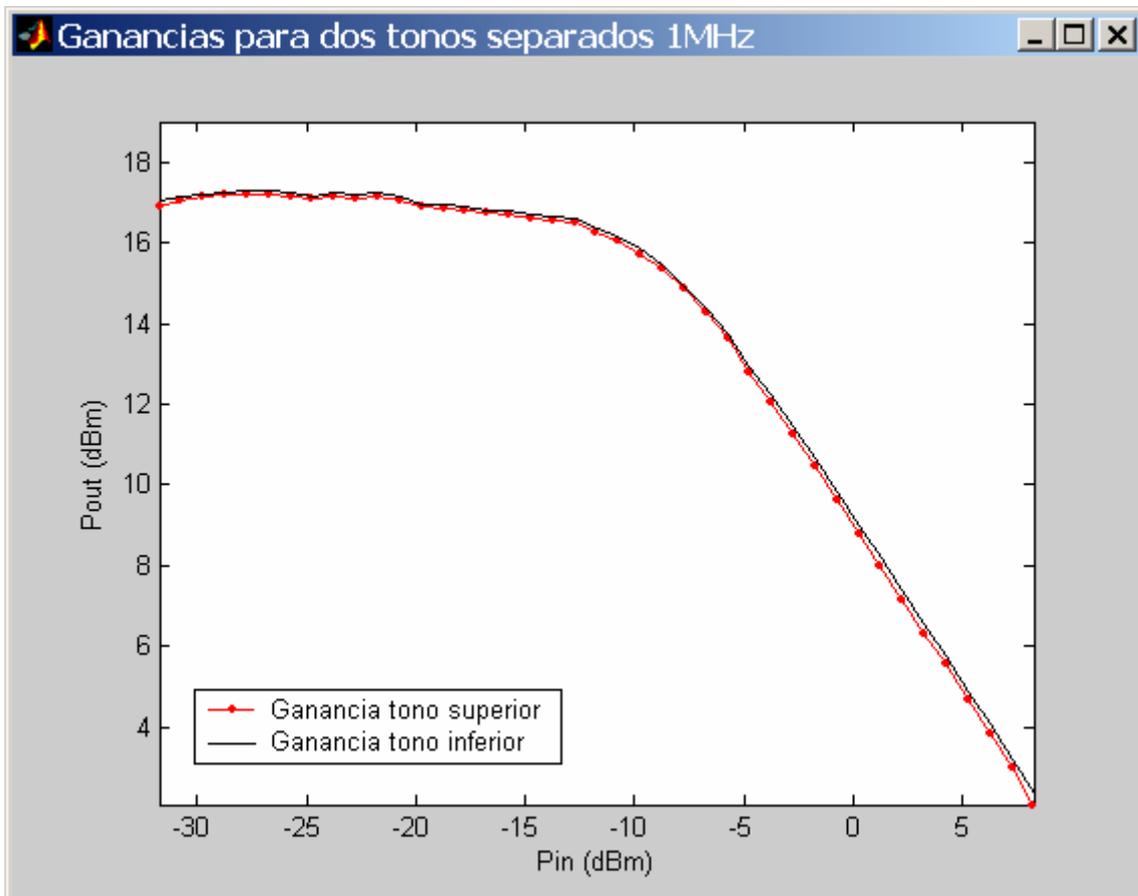


Figura 62. Ganancia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 1MHz

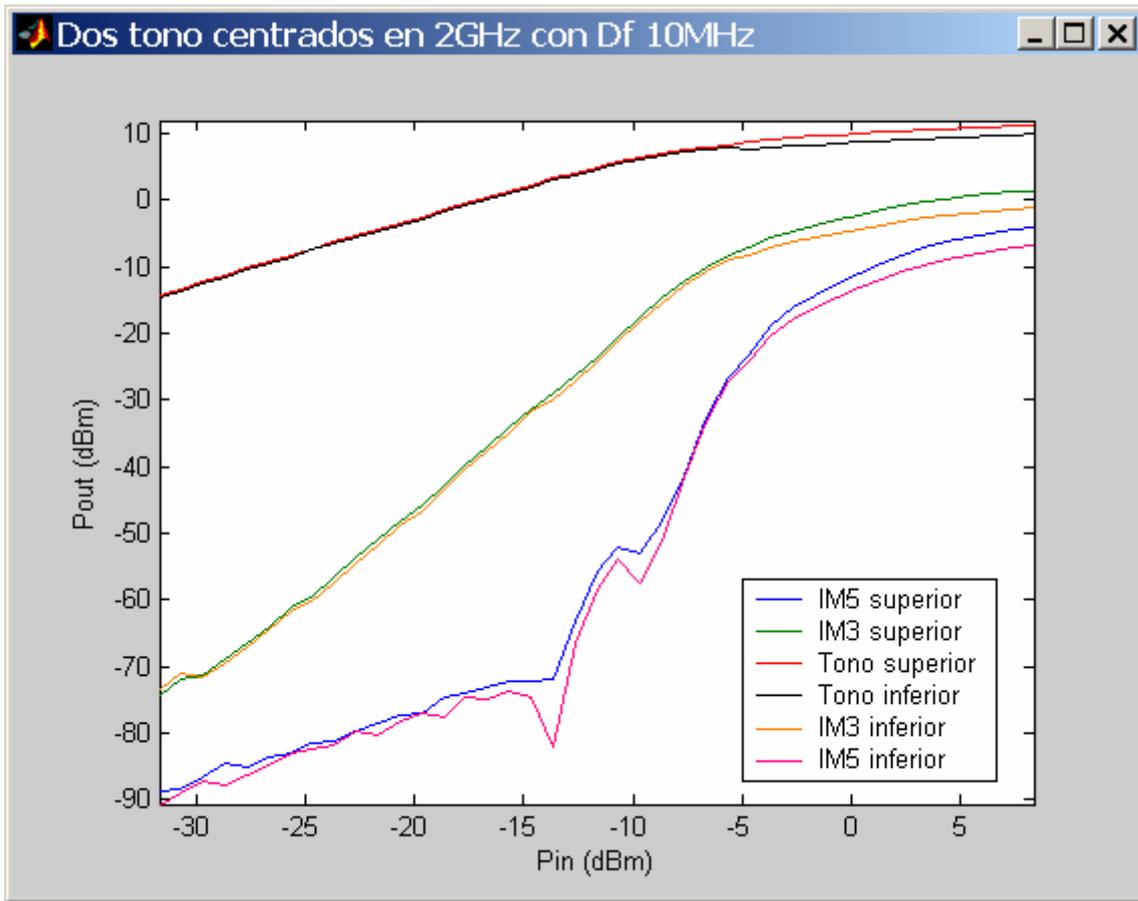


Figura 63. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 10MHz

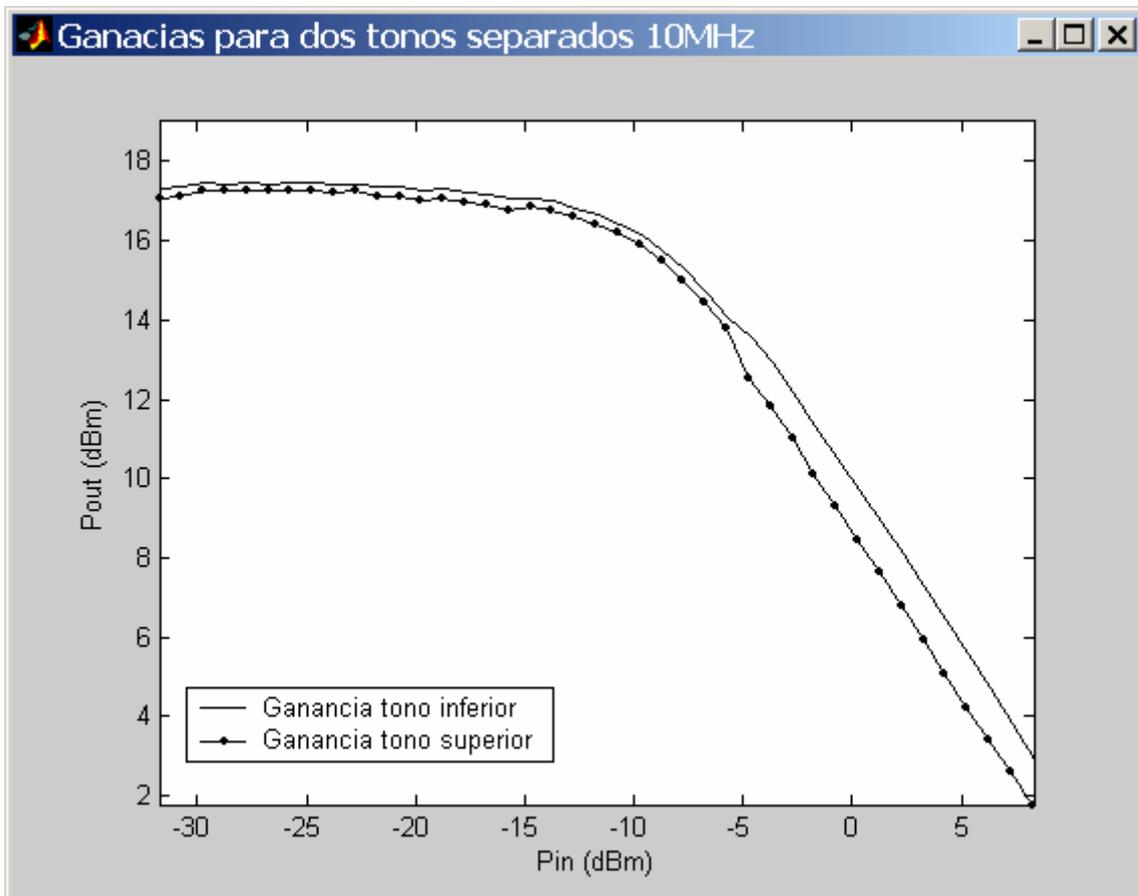
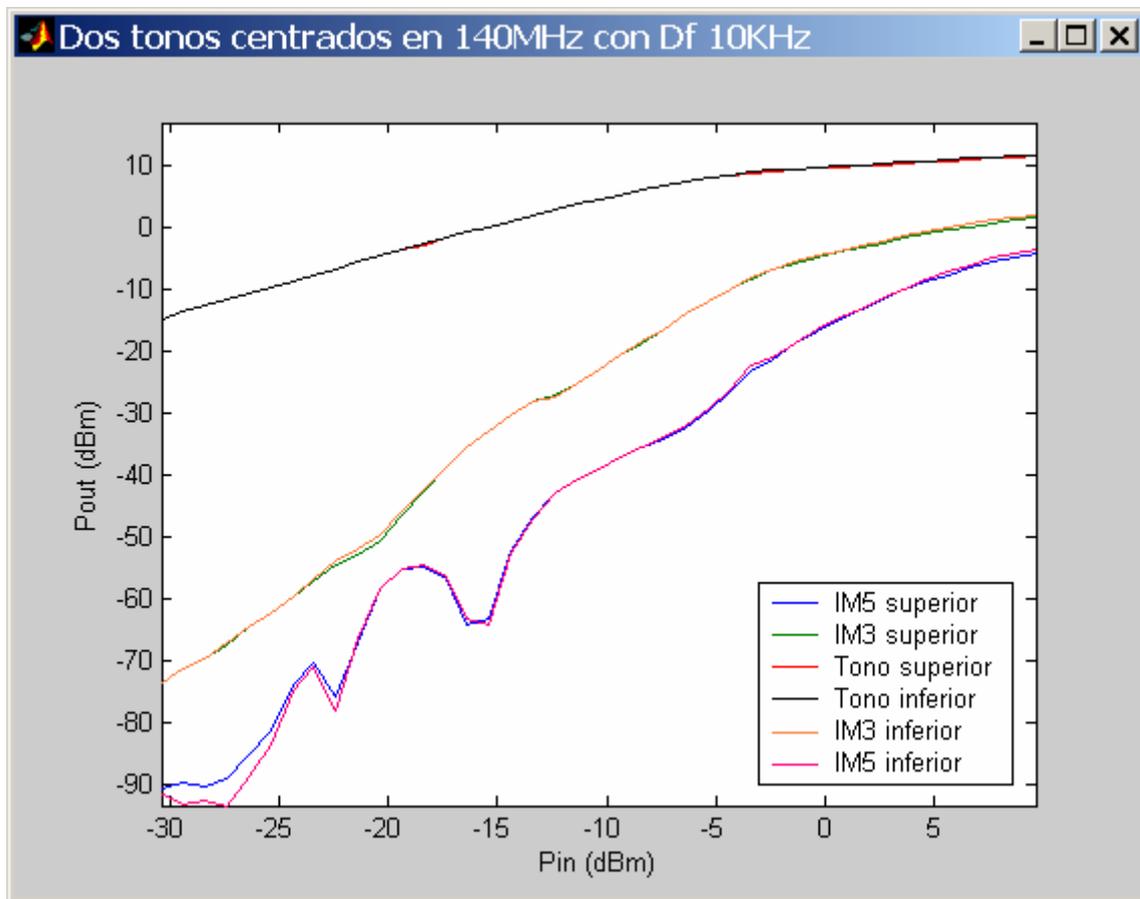


Figura 64. Ganancia de dos tonos centrados en 2GHz con Df 10MHz

**5.2.2.2 Dos tonos centrados en 140MHz**

Realizamos ahora la medida con dos tonos centrados en 140MHz separados 10KHz y 100KHz.

Para una separación de frecuencia de 10KHz, nos encontramos con una zona plana a bajas potencias de entrada, para los productos de intermodulación de quinto orden. Esto, como ya se ha comentado, puede ser debido a estar midiendo ruido, o bien, al efecto de asimetría, es decir, el IM5 superior y el IM5 inferior están separados en un intervalo de potencias. También se observa, la existencia de los llamados “sweet spot”, donde el comportamiento de los productos de intermodulación de quinto orden presentan un mínimo inesperado. Esto queda reflejado en la Figura 65.



**Figura 65. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 140MHz con Df 10KHz**

En la Figura 67, hemos separado los tonos 100KHz, seguimos observando los sweet spot en los IM5 y podemos apreciar una cierta asimetría entre IM3 inferior e IM3 superior para un intervalo de potencias de entrada relativamente bajo.

Por último, en la Figura 66 y Figura 68 están representadas las ganancias respectivas, que como se puede comprobar son menores que las correspondientes a tonos centrados en 2GHz anteriormente ilustradas.

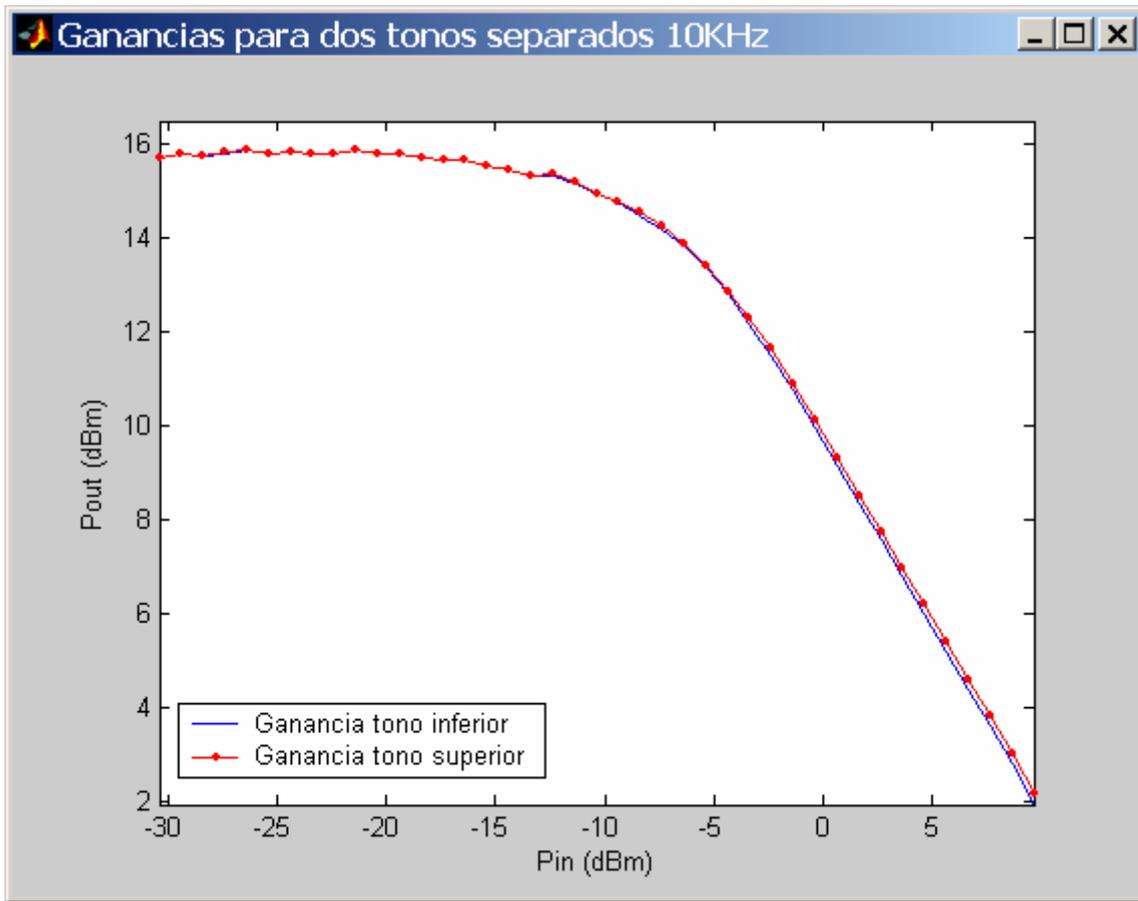


Figura 66. Ganancia de dos tonos centrados en 140MHz con Df 10KHz

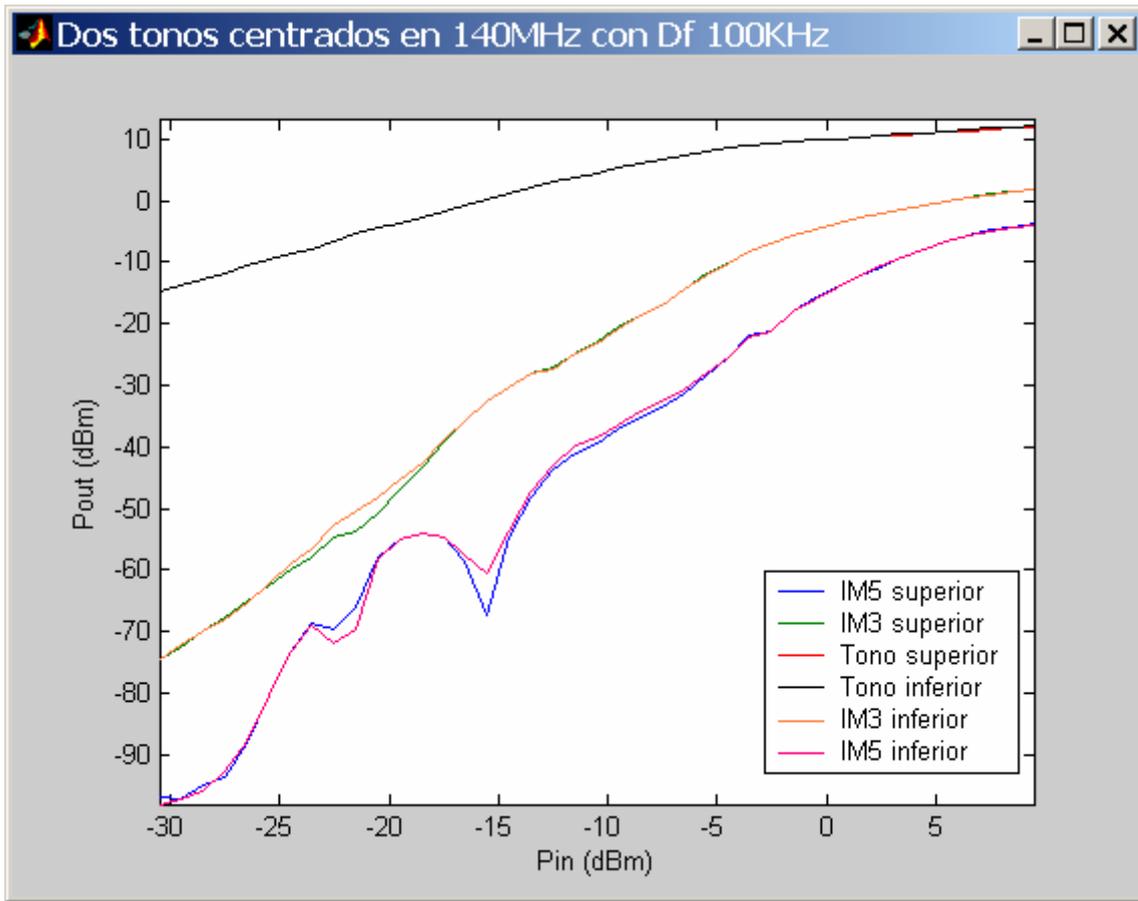


Figura 67. Barrido de potencia de dos tonos centrados en 140MHz con Df 100KHz

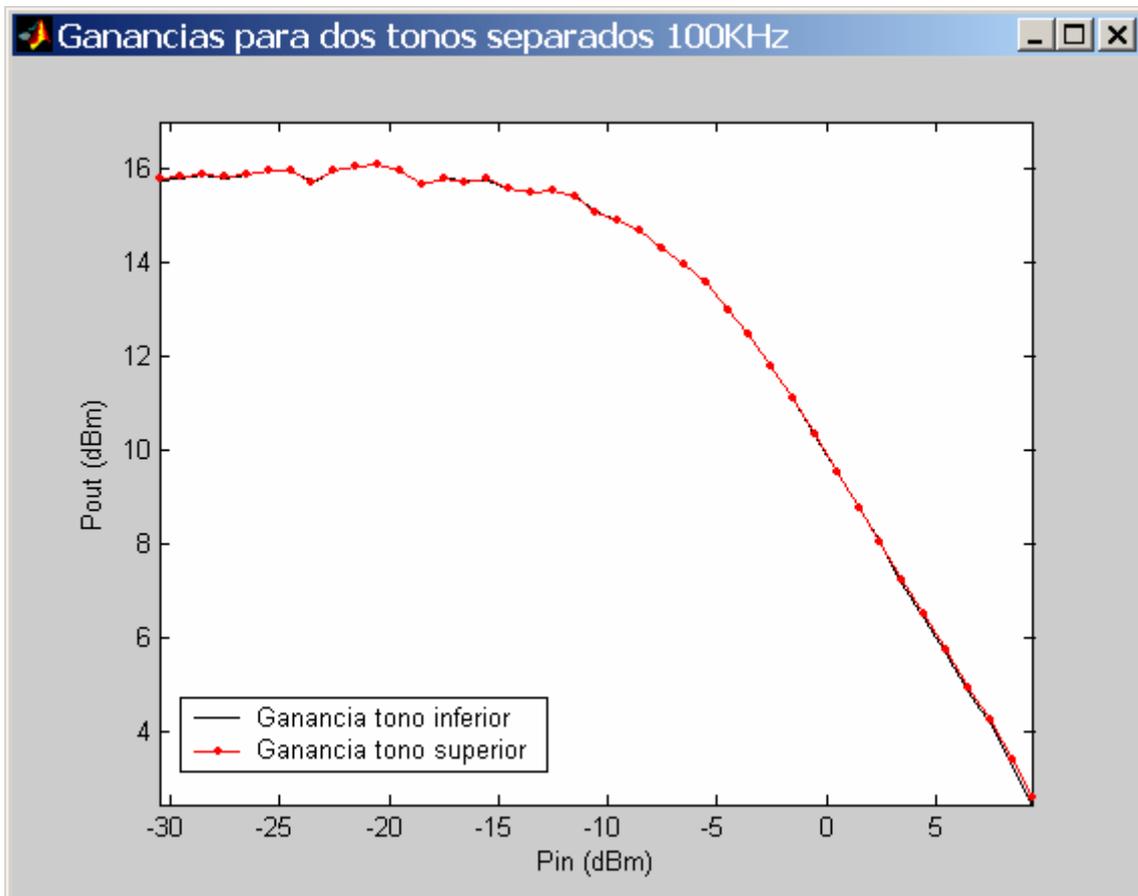


Figura 68. Ganancia de dos tonos centrados en 140MHz con Df 100KHz

### 5.2.3 Medida de la Captura de la Traza

En esta medida se pretende representar la densidad espectral de potencia de una señal, es decir, mostrar la relación existente entre la potencia de salida en dBm y la frecuencia en MHz para una señal de entrada determinada.

#### 5.2.3.1 Empezamos a medir una señal 3GPP-WCDMA

Vamos a realizar un barrido de potencia de -30 dBm a 0 dBm para una señal 3GPP-WCDMA centrada en 2GHz y posteriormente en 140MHz y vamos a ir observando y comentando los resultados obtenidos.

Los valores que hemos introducido en la interfaz gráfica son los siguientes:

Vgs	Vds	F central	F fundamental	Span
-0.24	2	2 GHz	2 GHz	30 MHz
-0.24	2	140 MHz	140 MHz	20 MHz

tabla 5. Valores dados en la interfaz

Y la variación del *Reference Level* irá en función de la potencia:

Potencia	Ref. Level
-30	-20
-25	-15
-20	-10
-15	-5
-10	0
-5	5
-2.5	10
0	10

tabla 6. Valores del Reference Level

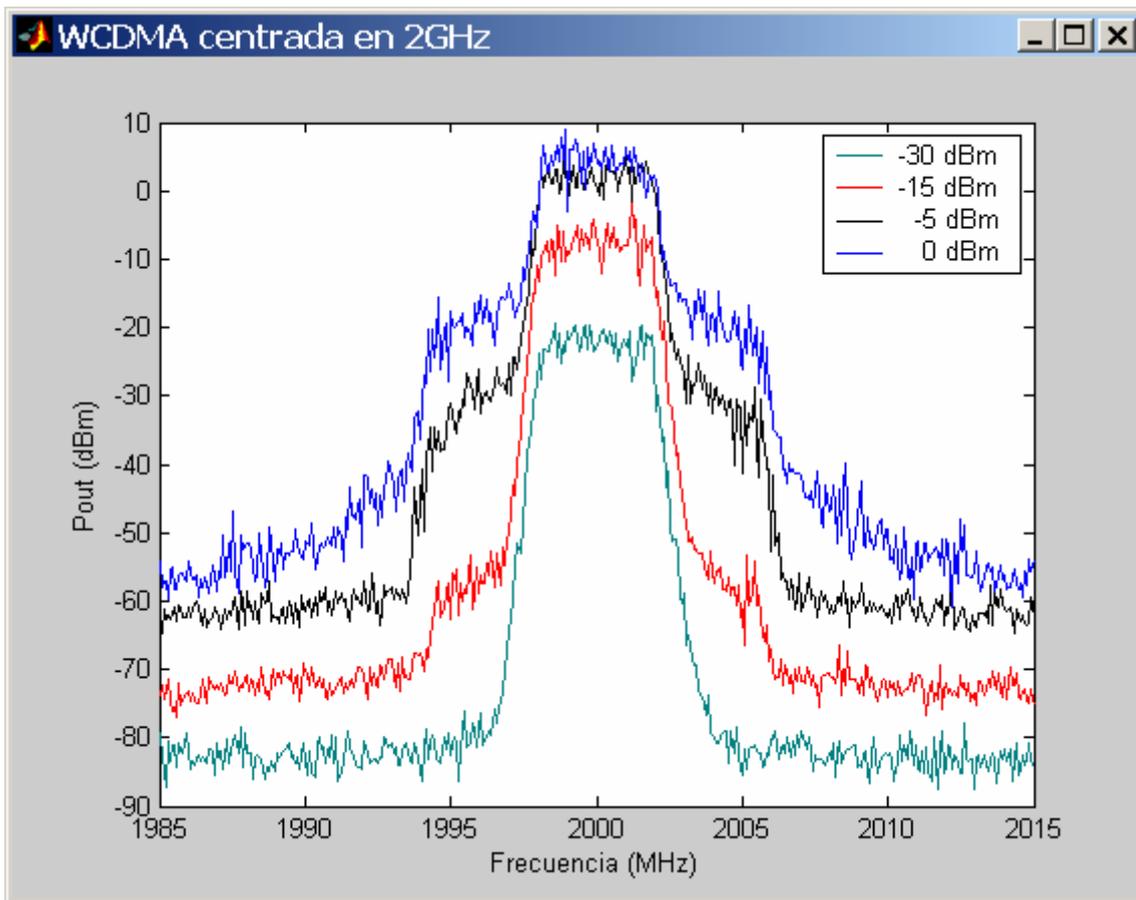


Figura 69. WCDMA centrada en 2GHz

En la Figura 69 tenemos representada la traza de una señal WCDMA centrada en 2GHz. Como se comprueba, a -15 dBm de potencia de entrada empieza a existir el efecto de regeneración espectral o aparición de “hombros” que explicábamos en la introducción teórica. Y a medida que se aumenta la potencia, estos efectos van aumentando su amplitud.

En la Figura 70 la señal WCDMA está centrada en 140MHz y observamos como a -20 dBm de potencia ya se pueden apreciar los “hombros” que se van aproximando al nivel del canal de interés a medida que se aumenta la potencia de entrada.

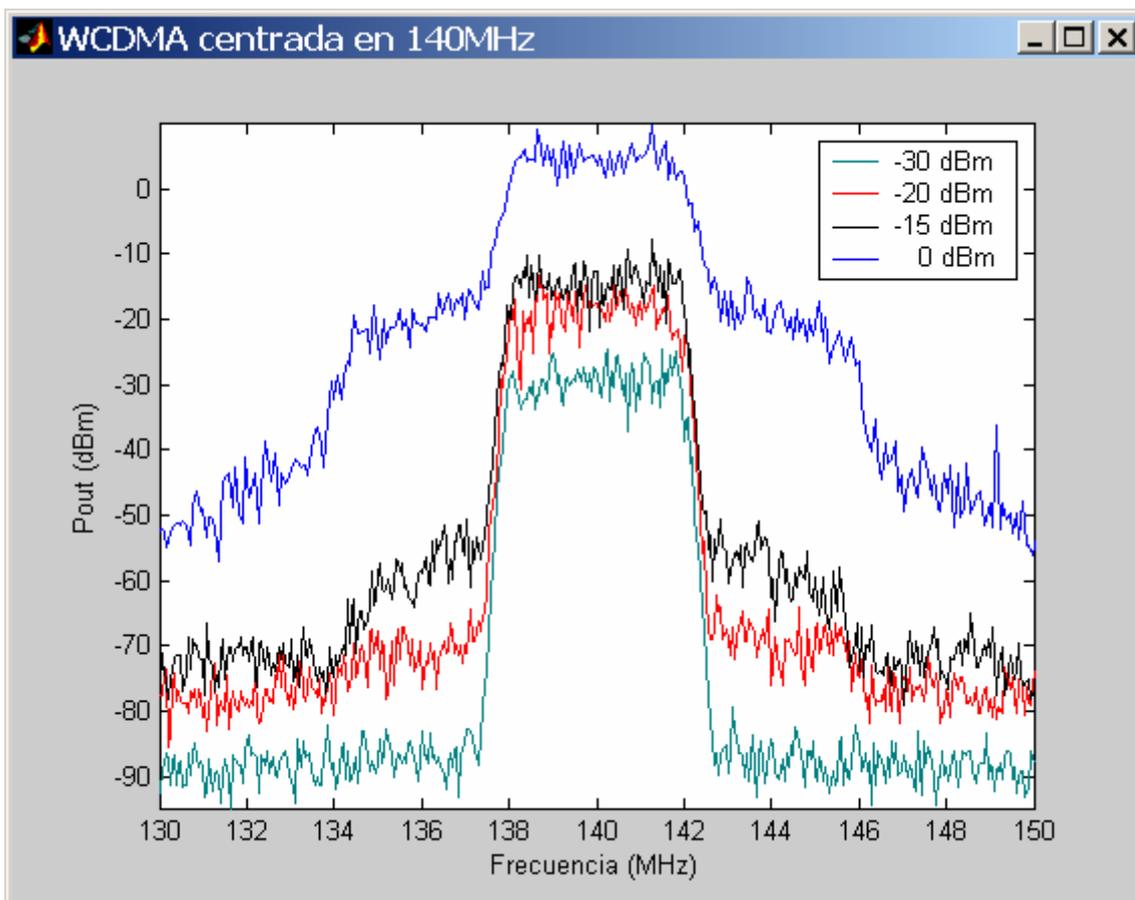


Figura 70. WCDMA centrada en 140MHz

### 5.2.3.2 Medida de una señal de un tono

Esta medida consiste en representar el espectro de potencia de un tono a la salida del amplificador para diferentes valores de potencia. En la Figura 71, se observa que para frecuencias bajas (-30dBm), sólo se aprecia el tono fundamental, centrado en 2GHz, sin embargo, conforme aumenta la potencia (-15dBm) empiezan a aparecer el segundo (4GHz) y tercer (6GHz) armónicos y a frecuencias elevadas (0dBm) adquiere mayor importancia el tercer armónico.

En la Figura 72, tenemos la traza de un tono centrado en 140MHz, la cual nos muestra que las no linealidades aparecen antes (a potencias menores de entrada) y con más amplitud que para un tono centrado en 2GHz.

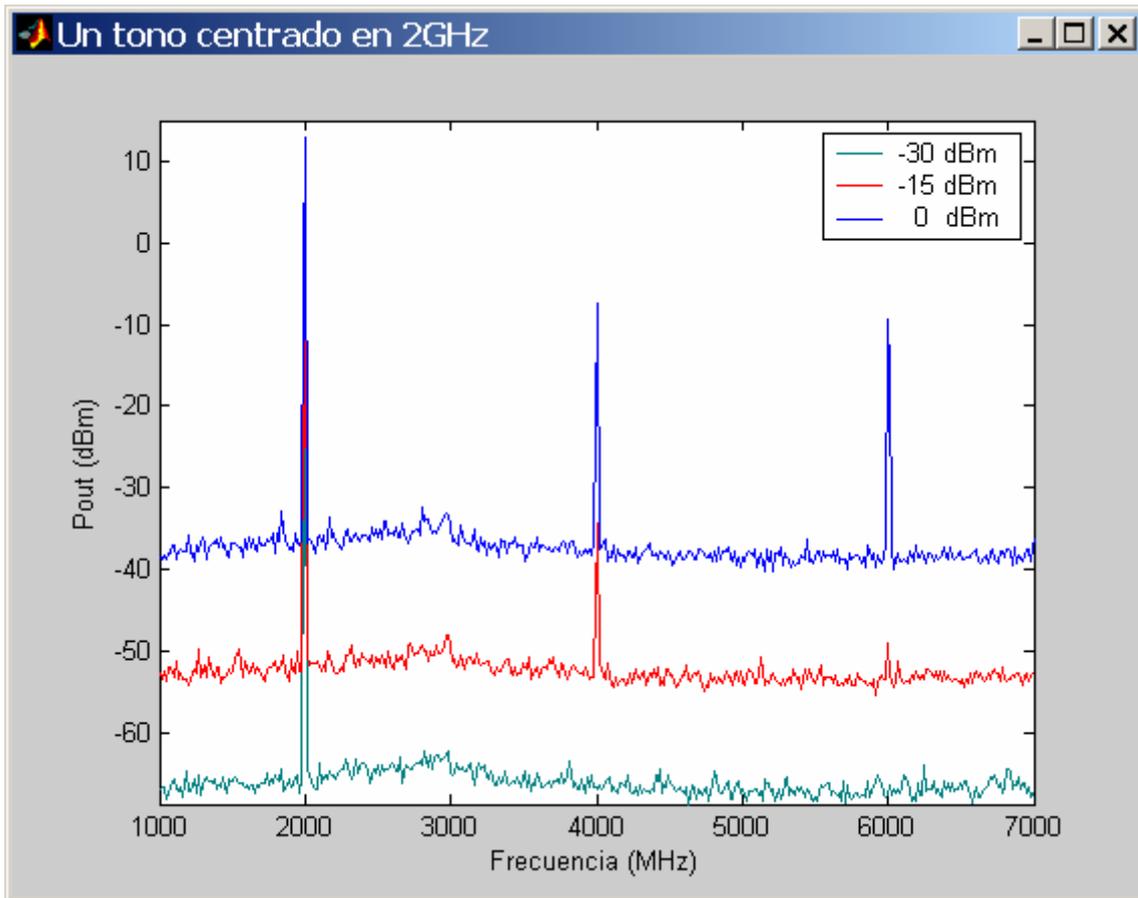


Figura 71. Tono centrado en 2GHz

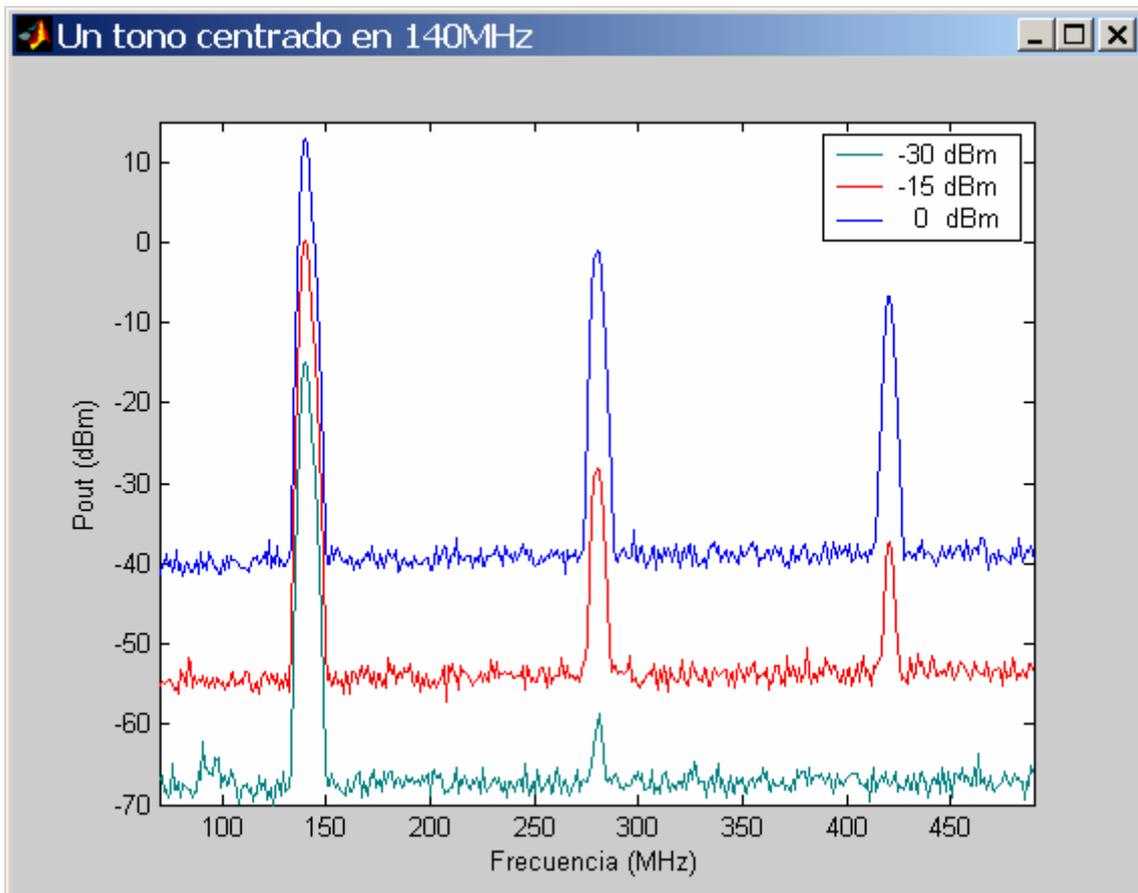


Figura 72. Tono centrado en 140MHz

### 5.2.3.3 Medida de la densidad espectral de dos tonos

Vamos a realizar la traza de dos tonos con diferente separación de frecuencias, para potencias bajas (-36dBm) y potencias altas (-6dBm).

#### (A) Dos tonos centrados en 2GHz

Empezamos con dos tonos centrados en 2GHz con una separación entre tonos ( $D_f$ ) pequeña, de 10KHz y 100KHz. Como vemos en las Figura 73 y Figura 74, a potencias bajas de entrada existe un comportamiento lineal (no aparecen efectos no lineales) y al aumentar la potencia aparecen los productos de intermodulación de tercer y quinto orden.

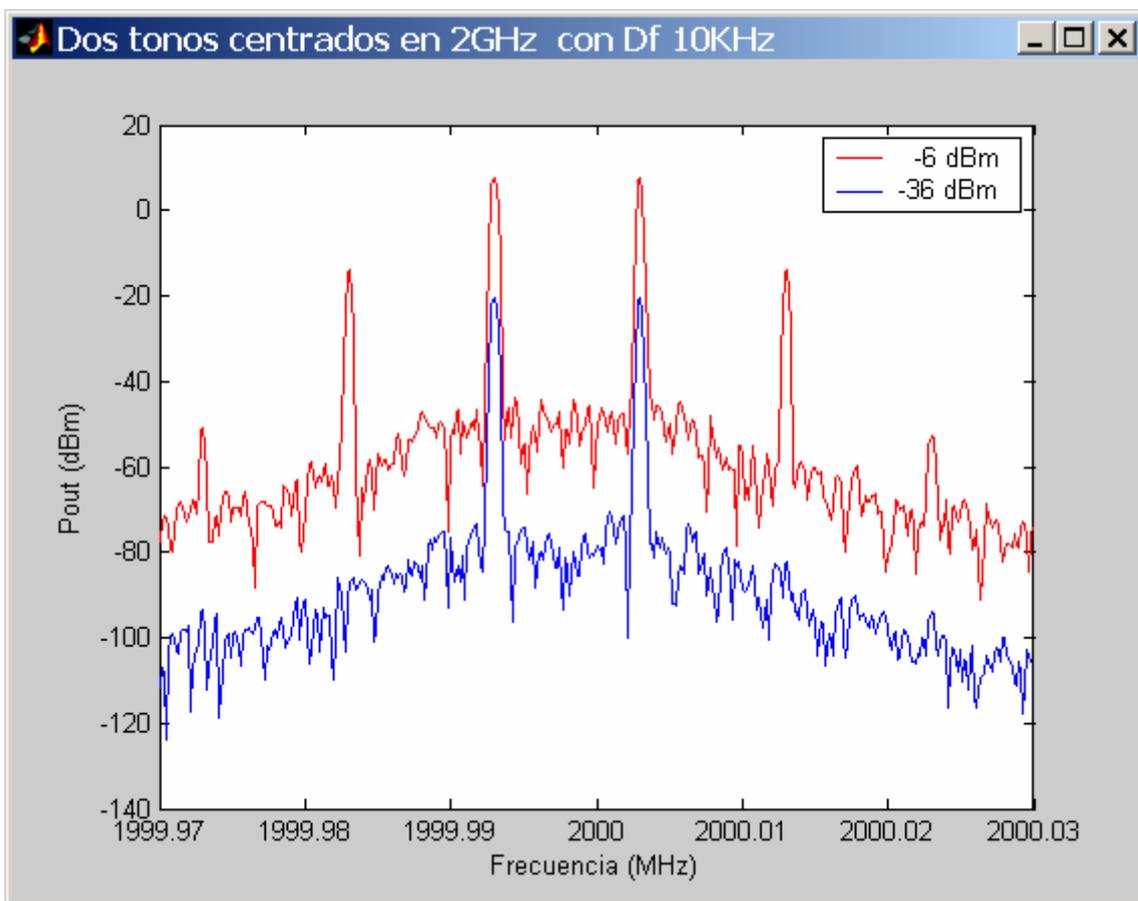


Figura 73. Dos tonos centrados en 2GHz con Df 10KHz

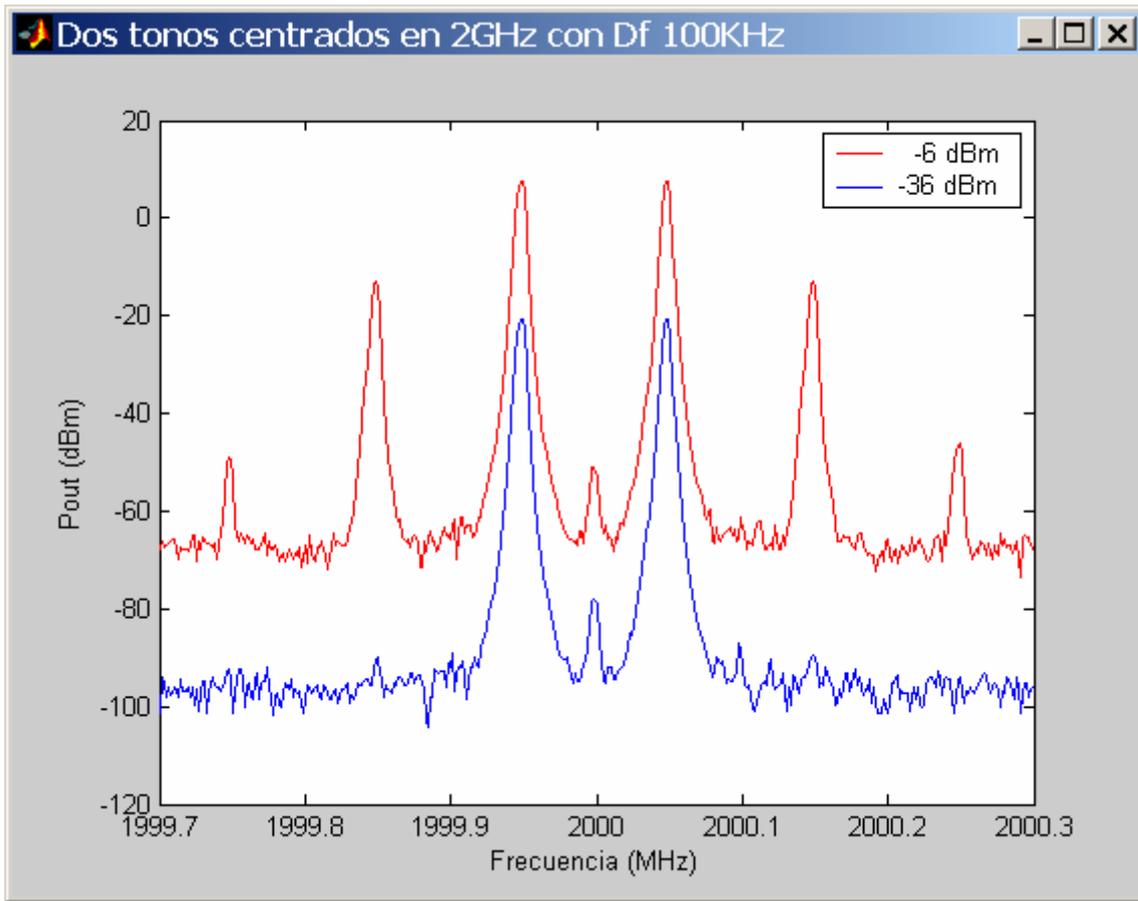


Figura 74. Dos tonos centrados en 2GHz con Df 100KHz

Como se puede observar en la Figura 75 y Figura 76, si la separación entre los tonos aumenta a 1MHz y a 10MHz, comprobamos que a potencias bajas el comportamiento sigue siendo lineal. Sin embargo, a potencias altas, de 0dBm, los productos de intermodulación van perdiendo importancia hasta el punto de desaparecer el IM5.

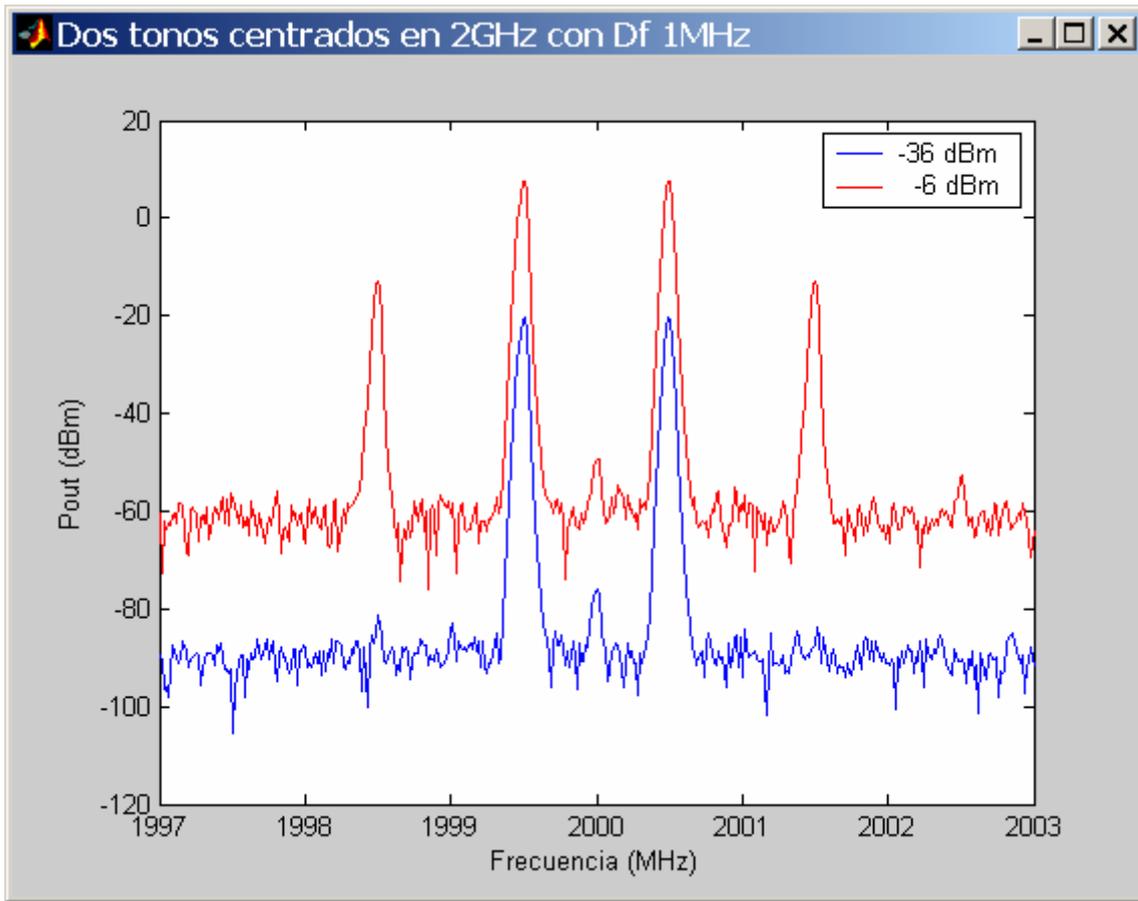


Figura 75. Dos tonos centrados en 2GHz con Df 1MHz

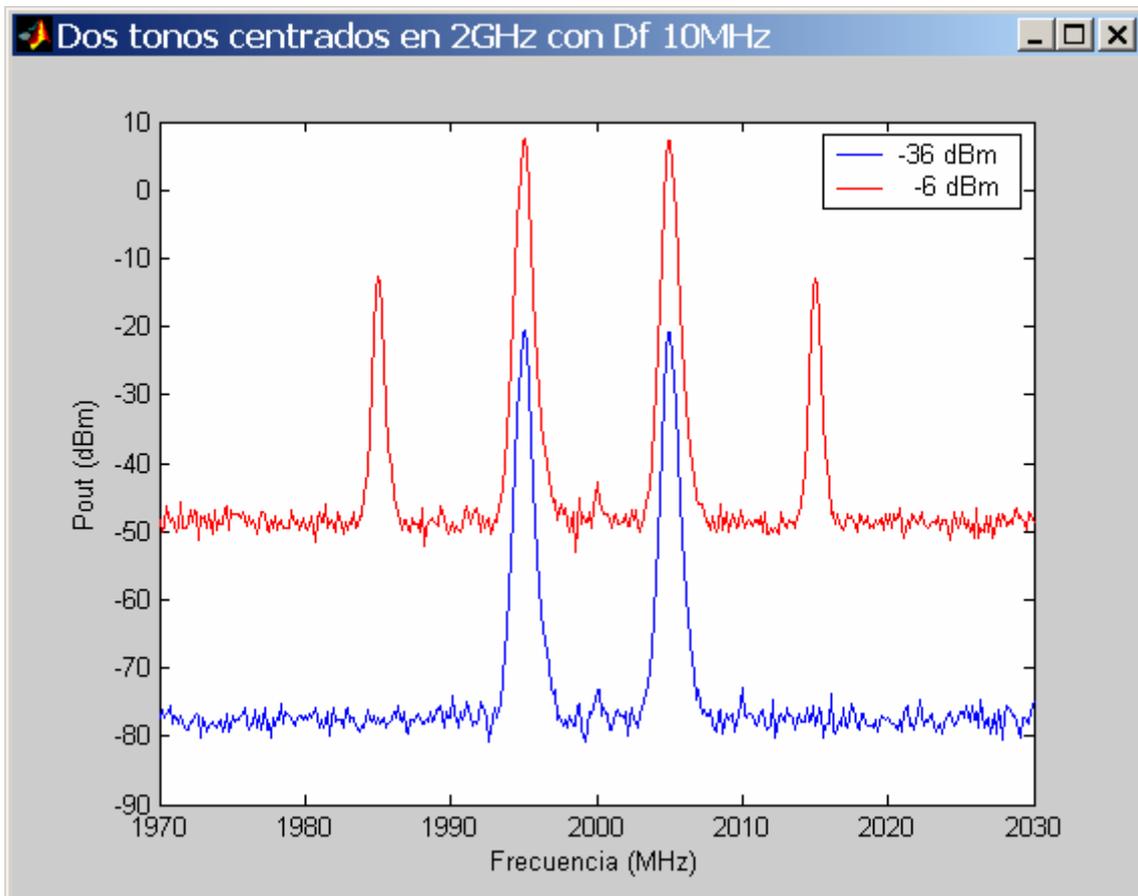
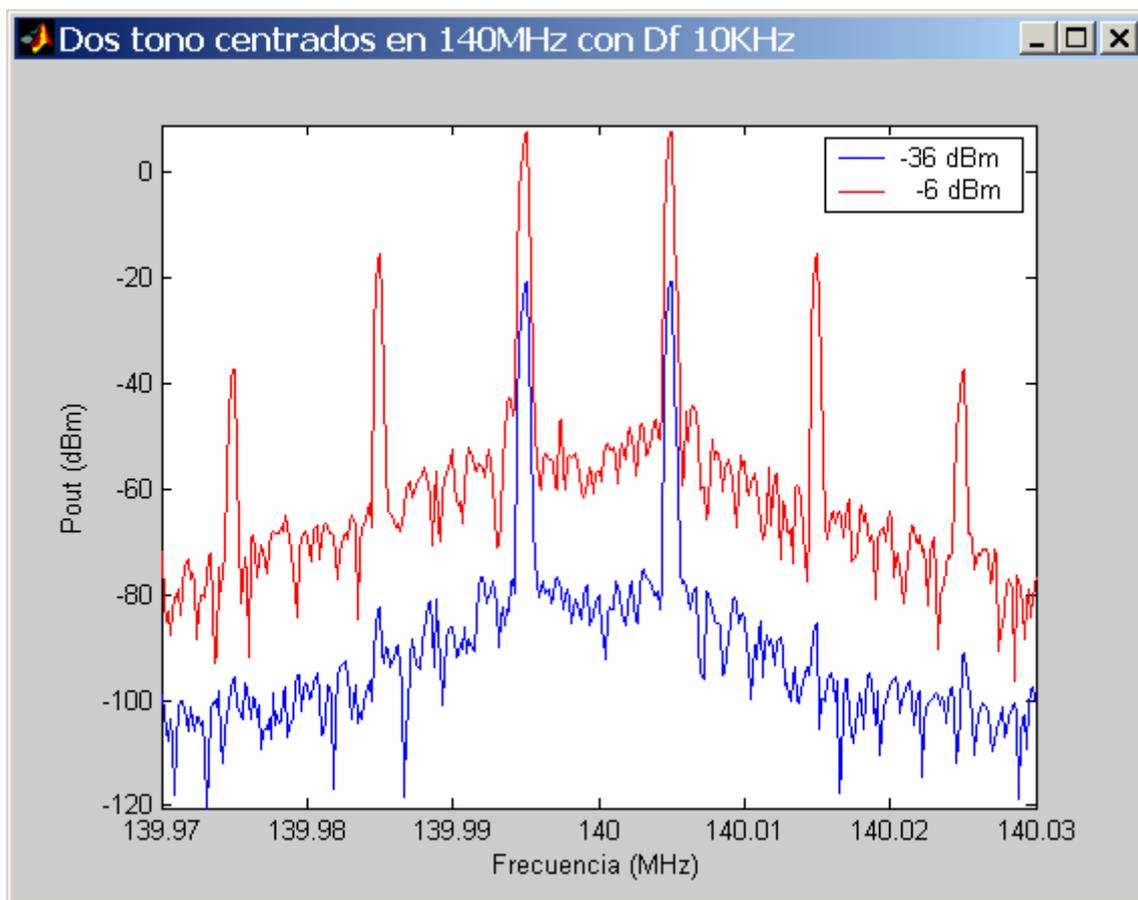


Figura 76. Dos tonos centrados en 2GHz con Df 10MHz

**(B) Dos tonos centrados en 140MHz**

Ahora hemos centrado los tonos en 140MHz y observamos que a potencias bajas, de -30dBm, sigue existiendo un comportamiento lineal independientemente de la separación de los tonos. Por el contrario, al introducir una potencia de entrada alta, de 0dBm, conforme vamos aumentando la separación de los tonos, los productos de intermodulación van perdiendo importancia, sin llegar a desaparecer los de quinto orden como ocurría en la traza de dos tonos centrados en 2GHz con separación de 10MHz ((A)Figura 76).



**Figura 77. Dos tonos centrados en 140MHz con Df 10KHz**

En la Figura 78 podemos apreciar la aparición de tonos a frecuencias espúreas en el espectro a potencias baja, debido a la forma de generar los tonos. No podemos afirmar si los tonos que aparecen a las frecuencias de los productos de intermodulación de tercer orden son también producidos por este efecto, o se trata de los IM3 realmente.

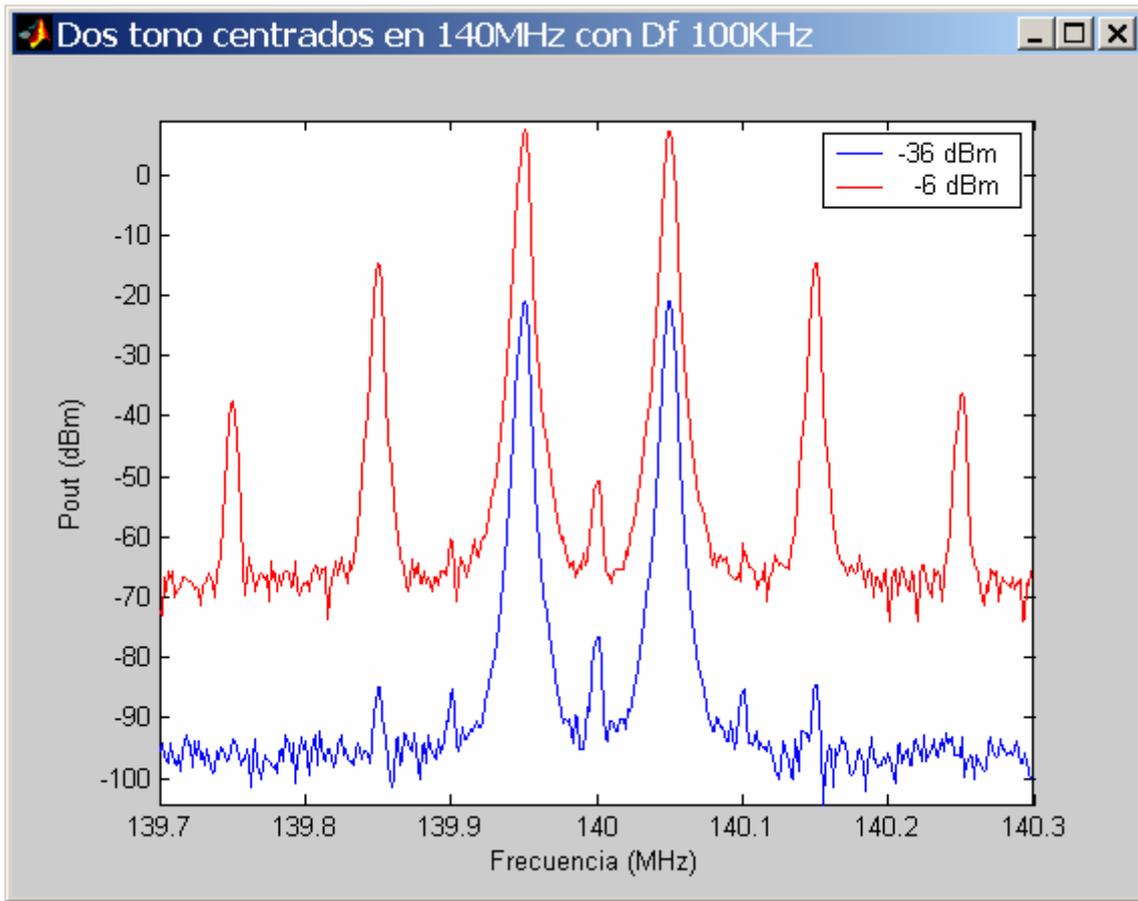


Figura 78. Dos tonos centrados en 140MHz con Df 100KHz

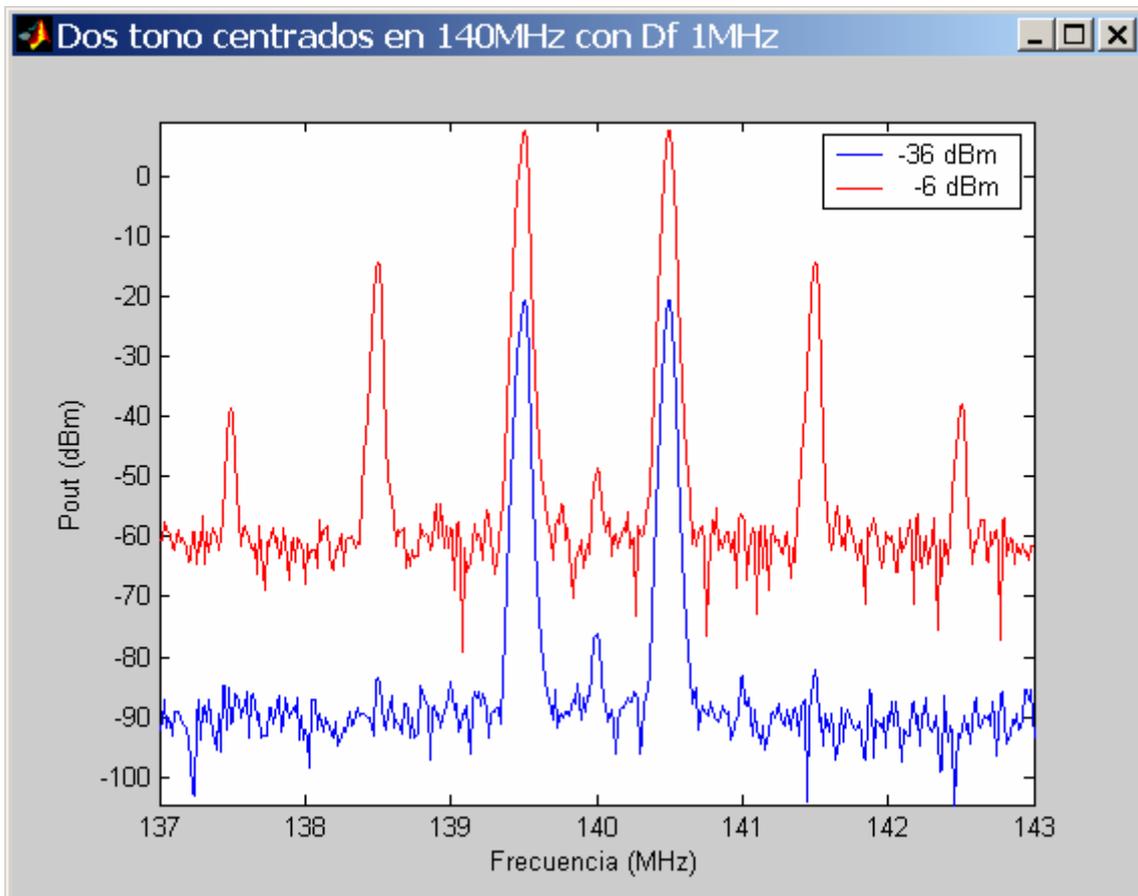


Figura 79. Dos tonos centrados en 140MHz con Df 1MHz

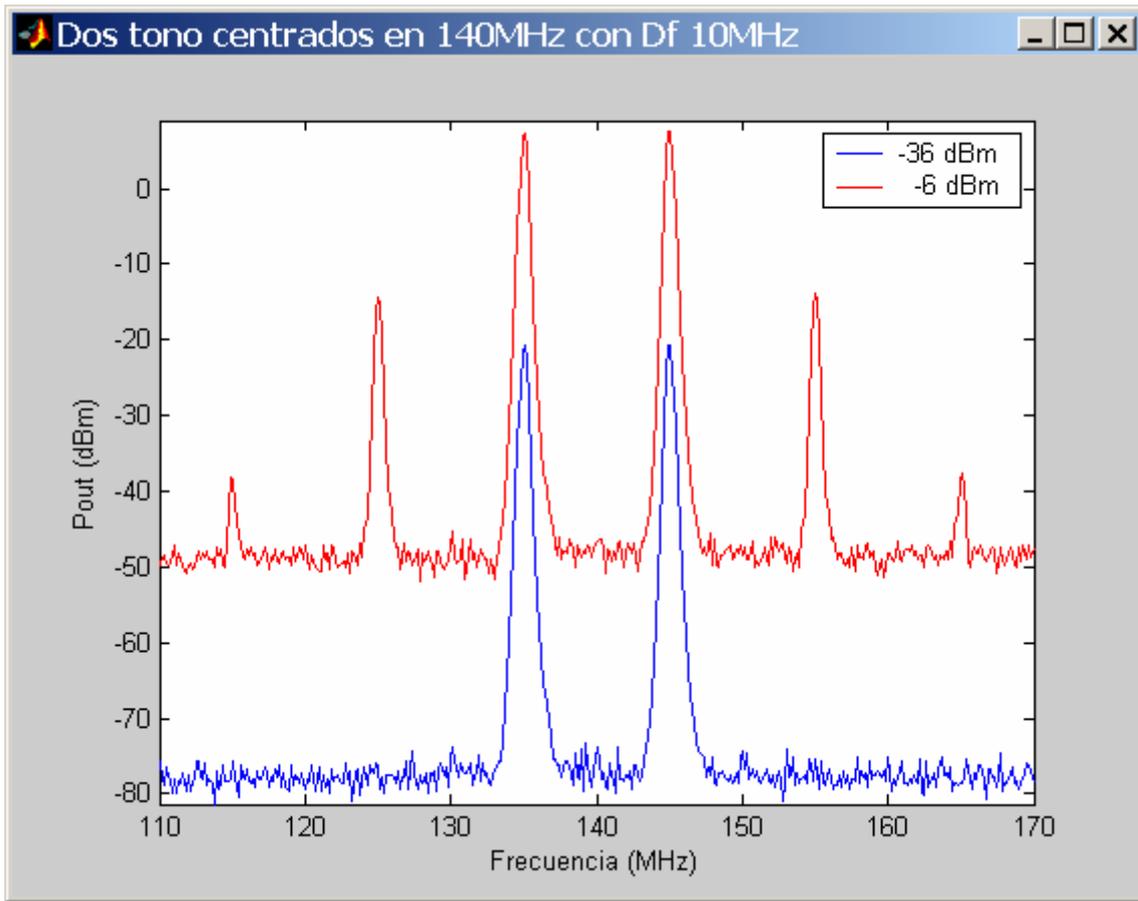


Figura 80. Dos tonos centrados en 140MHz con Df 10MHz