

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Sistemas FDSS (Frequency Division Spread Spectrum)  
para mitigar las interferencias generadas por los  
Jammers**

**Miguel García López**

**Septiembre 2009**



**Sistemas FDSS (Frequency Division Spread Spectrum) para  
mitigar las interferencias generadas por los Jammers**

AUTOR: Miguel García López  
TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas  
(GSRCO)  
Dpto. de Ingeniería Informática  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Septiembre 2009



## **Agradecimientos**

Fundamentalmente quería agradecer a mi tutor, Bazil Taha Ahmed, por toda la ayuda prestada y el tiempo que me ha dedicado durante la realización del proyecto. Su apoyo ha sido imprescindible para la realización del mismo.

Asimismo quería agradecer a todos los profesores que he tenido durante la carrera por su contribución a mi formación y por la ayuda, más allá de sus obligaciones, que la mayoría de ellos prestan a los alumnos y que facilita en gran medida el estudio en la universidad. Por esto último, y por mi gran afinidad con él, quería destacar especialmente a José María Martínez.

A mis compañeros de la universidad, que se han convertido en grandísimos amigos después de todo el tiempo que hemos compartido juntos. Porque dentro de muchos años, cuando recuerde mis tiempos en la universidad, ellos serán lo primero que me venga a la mente. Podría nombrarlos uno a uno, pero no hace falta, saben quiénes son.

A mi familia, porque estos últimos meses que he estado en casa, han resultado especialmente duros para todos y me han aguantado y apoyado siempre.



**Palabras clave:**

- **FDSS**
- **Jammers**
- **JSR**
- **SJNR**
- **WCDMA**

**Resumen:**

Actualmente se emplea el sistema WCDMA para determinados entornos, como los sistemas celulares y las aplicaciones militares. En condiciones de elevada interferencia provocada por el ataque a las comunicaciones mediante señales de Jammer, este sistema no proporciona grandes prestaciones. Se presenta un sistema alternativo, FDSS (Frequency Division Spread Spectrum), que presenta la ventaja de la selectividad en frecuencia. Se estudia dicho sistema y se obtienen resultados para los entornos mencionados comparando dichos resultados con los que presenta WCDMA.

**Key words:**

- **FDSS**
- **Jammers**
- **JSR**
- **SJNR**
- **WCDMA**

**Abstract:**

At the moment, WCDMA is used in some scenarios such as cellular systems and military applications. In high interference conditions due to Communications attack by Jammer signals, this system does not provide high performance. In this project we show a different system, FDSS (Frequency Division Spread Spectrum) which has the main advantage of frequency selectivity. This system is studied and results are obtained for the scenarios mentioned comparing these results with those obtained with WCDMA.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Portada.....	I
Agradecimientos.....	V
Palabras clave:.....	VII
Resumen:.....	VII
Key words:.....	VII
Abstract:.....	VII
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Estructura.....	1
2. Introducción al sistema FDSS.....	3
2.1. Sistema FDSS.....	3
2.2. Generación de las señales de Jammer.....	5
2.3. Sistema MC-DS-CDMA.....	6
2.4. Sistema WCDMA.....	8
3. FDSS en Sistemas Celulares.....	9
3.1. Obtención de SNR, $E_b/N_o$ y capacidad del sistema FDSS.....	9
3.2. Transmisión de señales de voz.....	12
3.2.1. Señales de entrada empleadas.....	12
3.2.2 Sistema FDSS para las diferentes señales de entrada empleadas.....	16
3.2.3. Resultados obtenidos con el Jammer en el centro de la señal FDSS.....	21
3.2.4. Resultados obtenidos con el Jammer no centrado sobre la frecuencia central del sistema FDSS.....	43
3.2.5 Resultados obtenidos al aumentar la separación entre portadoras.....	50
3.3. Transmisión de señales de datos.....	53
3.3.1. Señales de entrada empleadas.....	53
3.3.2 Sistema FDSS para las diferentes señales de entrada empleadas.....	56
3.3.3. Resultados obtenidos con el Jammer en el centro de la señal FDSS.....	61
3.3.4. Resultados obtenidos con el Jammer no centrado sobre la frecuencia central del sistema FDSS.....	68
4. FDSS en aplicaciones militares Tierra-Tierra.....	77
4.1 Introducción.....	77
4.2. Transmisión de señales de voz.....	79
4.2.1 Cobertura en función de la posición del receptor.....	79
4.2.2 Cobertura en función de la posición del transmisor.....	88
4.2.3 Cobertura en función de la posición del Jammer.....	96
4.3. Transmisión de señales de datos.....	105
4.3.1 Cobertura en función de la posición del receptor.....	105
4.3.2 Cobertura en función de la posición del transmisor.....	113
4.3.3 Cobertura en función de la posición del Jammer.....	121
5. FDSS en aplicaciones militares Aire-Tierra.....	129
5.1. Introducción.....	129
5.2. Transmisión de señales de voz.....	131
5.3. Transmisión de señales de datos.....	147
6. Conclusiones.....	163
Referencias.....	165

Glosario de acrónimos .....	167
Anexos .....	169
A. Programación en Matlab .....	169
A.1. Capacidad del sistema celular con el sistema FDSS para la transmisión de señales de voz con interferencia centrada sobre la frecuencia central del sistema y señal de entrada rectangular .....	169
A.2 Capacidad del sistema celular con el sistema FDSS para la transmisión de señales de datos con interferencia no centrada sobre la frecuencia central del sistema y señal de entrada cosenoidal .....	172
A.3. Cálculo de la cobertura del enlace entre un transmisor y un receptor terrestre cuando las comunicaciones son atacadas por un Jammer con el empleo del sistema FDSS .....	176
A.4. Cálculo de la cobertura del enlace entre un transmisor y un receptor terrestre cuando las comunicaciones son atacadas por un Jammer con el empleo del sistema FDSS .....	181
BIBLIOGRAFIA .....	187
PRESUPUESTO .....	189
PLIEGO DE CONDICIONES .....	191

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Transmisor FDSS.....	4
<b>Figura 2.2:</b> Receptor FDSS .....	5
<b>Figura 2.3:</b> Generación de una señal de Jammer con un mezclador .....	6
<b>Figura 2.4:</b> Transmisor MC-DS-CDMA .....	7
<b>Figura 2.5:</b> Receptor MC-DS-CDMA.....	7
<b>Figura 2.6:</b> Transmisor WCDMA .....	8
<b>Figura 2.7:</b> Receptor WCDMA .....	8
<b>Figura 3.1</b> Espectro en banda base de la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.....	13
<b>Figura 3.2:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.....	14
<b>Figura 3.3:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz .....	15
<b>Figura 3.4:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz .....	15
<b>Figura 3.5:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.....	17
<b>Figura 3.6:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.....	18
<b>Figura 3.7:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	19
<b>Figura 3.8:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.....	20
<b>Figura 3.9:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	22
<b>Figura 3.10:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	24
<b>Figura 3.11:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	25
<b>Figura 3.12:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	26
<b>Figura 3.13:</b> Espectro de la señal recibida en el receptor para la señal de entrada cosenoidal con una señal de Jammer de 200 KHz de ancho de banda centrada sobre $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de voz .....	30
<b>Figura 3.14:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 2 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	31
<b>Figura 3.15:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 4 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	31
<b>Figura 3.16:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 6 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	32
<b>Figura 3.17:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 8 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	32
<b>Figura 3.18:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 10 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	33

<b>Figura 3.19:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 12 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	33
<b>Figura 3.20:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 14 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	34
<b>Figura 3.21:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 16 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	34
<b>Figura 3.22:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 18 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	35
<b>Figura 3.23:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 20 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	35
<b>Figura 3.24:</b> Espectro de la señal recibida en el receptor para la señal de entrada Gaussiana con una señal de Jammer de 200 KHz de ancho de banda centrada sobre $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de voz .....	38
<b>Figura 3.25:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 2 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	39
<b>Figura 3.26:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 4 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	39
<b>Figura 3.27:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 6 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	40
<b>Figura 3.28:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 8 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	40
<b>Figura 3.29:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 10 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	41
<b>Figura 3.30:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 12 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	41
<b>Figura 3.31:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 14 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	42
<b>Figura 3.32:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 16 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	42
<b>Figura 3.33:</b> Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 18 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer .....	43
<b>Figura 3.34:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz..	44
<b>Figura 3.35:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz..	46
<b>Figura 3.36:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz..	47
<b>Figura 3.37:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz..	49
<b>Figura 3.38:</b> Espectro del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con 128 portadoras .....	51
<b>Figura 3.39:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz al reducir la tasa binaria a la mitad.....	52
<b>Figura 3.40:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos .....	53
<b>Figura 3.41:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos .....	54
<b>Figura 3.42:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos .....	55

<b>Figura 3.43:</b> Espectro en banda base de la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos .....	56
<b>Figura 3.44:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos .....	57
<b>Figura 3.45:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos .....	58
<b>Figura 3.46:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos .....	59
<b>Figura 3.47:</b> Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos .....	60
<b>Figura 3.48:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	62
<b>Figura 3.49:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	64
<b>Figura 3.50:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	65
<b>Figura 3.51:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	67
<b>Figura 3.52:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos	69
<b>Figura 3.53:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos	70
<b>Figura 3.54:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos	72
<b>Figura 3.55:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la señal de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos	73
<b>Figura 4.1:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de su posición.....	80
<b>Figura 4.2:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz. ....	82
<b>Figura 4.3:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz. ....	83
<b>Figura 4.4:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	85
<b>Figura 4.5:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.....	86
<b>Figura 4.6:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del receptor .....	87
<b>Figura 4.7:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor .....	89
<b>Figura 4.8:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz. ....	90
<b>Figura 4.9:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz. ....	92
<b>Figura 4.10:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	93

<b>Figura 4.11:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz. ....	94
<b>Figura 4.12:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor.....	96
<b>Figura 4.13:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer.....	98
<b>Figura 4.14:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz. ....	99
<b>Figura 4.15:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz. ....	100
<b>Figura 4.16:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	102
<b>Figura 4.17:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz. ....	103
<b>Figura 4.18:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor de Jammer ..	104
<b>Figura 4.19:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de su posición.....	106
<b>Figura 4.20:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.....	107
<b>Figura 4.21:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.....	109
<b>Figura 4.22:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos. ....	110
<b>Figura 4.23:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos. ....	111
<b>Figura 4.24:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del receptor.....	113
<b>Figura 4.25:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor .....	114
<b>Figura 4.26:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.....	115
<b>Figura 4.27:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.....	117
<b>Figura 4.28:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos. ....	118
<b>Figura 4.29:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos. ....	119
<b>Figura 4.30:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor.....	121
<b>Figura 4.31:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer.....	122
<b>Figura 4.32:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.....	123
<b>Figura 4.33:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.....	125
<b>Figura 4.34:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos. ....	126
<b>Figura 4.35:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos. ....	127

<b>Figura 4.36:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor de Jammer	128
<b>Figura 5.1:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 400 Km de distancia ..	132
<b>Figura 5.2:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia. ....	134
<b>Figura 5.3:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia. ....	135
<b>Figura 5.4:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km .....	136
<b>Figura 5.5:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 300 Km de distancia ..	137
<b>Figura 5.6:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia. ....	139
<b>Figura 5.7:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia. ....	140
<b>Figura 5.8:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km .....	141
<b>Figura 5.9:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 200 Km de distancia ..	142
<b>Figura 5.10:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia. ....	144
<b>Figura 5.11:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia. ....	145
<b>Figura 5.12:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km .....	146
<b>Figura 5.13:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 400 Km de distancia	147
<b>Figura 5.14:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.....	149
<b>Figura 5.15:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.....	150
<b>Figura 5.16:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km .....	151
<b>Figura 5.17:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 300 Km de distancia	152
<b>Figura 5.18:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.....	153
<b>Figura 5.19:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.....	154
<b>Figura 5.20:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km .....	156
<b>Figura 5.21:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 200 Km de distancia	157
<b>Figura 5.22:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.....	158
<b>Figura 5.23:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.....	159
<b>Figura 5.24:</b> Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km .....	160

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 3.1:</b> Características de las señales de entrada empleadas para la transmisión de voz .....	16
<b>Tabla 3.2:</b> Características del sistema FDSS con las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz.....	20
<b>Tabla 3.3:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	23
<b>Tabla 3.4:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	24
<b>Tabla 3.5:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	25
<b>Tabla 3.6:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz .....	27
<b>Tabla 3.7:</b> Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en $(f_p+2.5)$ MHz y su anchura de banda es 200KHz.....	28
<b>Tabla 3.8:</b> Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en $(f_p+2.5)$ MHz y su anchura es banda de 1MHz. ....	29
<b>Tabla 3.9:</b> Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en $(f_p+2.5)$ MHz y su anchura de banda es 200KHz.....	36
<b>Tabla 3.10:</b> Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal Gaussiana para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en $(f_p+2.5)$ MHz y su anchura de banda es 200KHz.....	37
<b>Tabla 3.11:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz.....	45
<b>Tabla 3.12:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz.....	46
<b>Tabla 3.13:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz.....	48
<b>Tabla 3.14:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz.....	50
<b>Tabla 3.15:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de voz al reducir la tasa binaria a la mitad .....	52
<b>Tabla 3.16:</b> Características de las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos. ....	56

<b>Tabla 3.17:</b> Características del sistema FDSS con las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz.....	60
<b>Tabla 3.18:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	63
<b>Tabla 3.19:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	64
<b>Tabla 3.20:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	66
<b>Tabla 3.21:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en $(f_p+2.5)$ MHz para la transmisión de señales de datos.....	67
<b>Tabla 3.22:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos.....	69
<b>Tabla 3.23:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos.....	71
<b>Tabla 3.24:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos.....	72
<b>Tabla 3.25:</b> Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos.....	74
<b>Tabla 4.1:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de su posición.....	81
<b>Tabla 4.2:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.....	82
<b>Tabla 4.3:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.....	84
<b>Tabla 4.4:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	85
<b>Tabla 4.5:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.....	86
<b>Tabla 4.6:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del receptor.....	88
<b>Tabla 4.7:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor.....	89
<b>Tabla 4.8:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.....	91
<b>Tabla 4.9:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.....	92
<b>Tabla 4.10:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	93
<b>Tabla 4.11:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.....	95
<b>Tabla 4.12:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor.....	96

<b>Tabla 4.13:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer.....	98
<b>Tabla 4.14:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz. ....	99
<b>Tabla 4.15:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz. ....	101
<b>Tabla 4.16:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.....	102
<b>Tabla 4.17:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz. ....	103
<b>Tabla 4.18:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del Jammer.....	104
<b>Tabla 4.19:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de su posición.....	106
<b>Tabla 4.20:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos. ....	108
<b>Tabla 4.21:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos. ....	109
<b>Tabla 4.22:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.....	110
<b>Tabla 4.23:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.....	112
<b>Tabla 4.24:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del receptor.....	113
<b>Tabla 4.25:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor .....	114
<b>Tabla 4.26:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.....	116
<b>Tabla 4.27:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.....	117
<b>Tabla 4.28:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos. ....	118
<b>Tabla 4.29:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos. ....	119
<b>Tabla 4.30:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor.....	121
<b>Tabla 4.31:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer.....	122
<b>Tabla 4.32:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.....	124
<b>Tabla 4.33:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.....	125
<b>Tabla 4.34:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos. ....	126
<b>Tabla 4.35:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos. ....	127
<b>Tabla 4.36:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del Jammer. ....	128
<b>Tabla 5.1:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 400 Km de distancia....	133
<b>Tabla 5.2:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia. ....	134

<b>Tabla 5.3:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia. ....	135
<b>Tabla 5.4:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km .....	136
<b>Tabla 5.5:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 300 Km de distancia....	138
<b>Tabla 5.6:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia. ....	139
<b>Tabla 5.7:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia. ....	140
<b>Tabla 5.8:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km .....	141
<b>Tabla 5.9:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 200 Km de distancia....	143
<b>Tabla 5.10:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia. ....	144
<b>Tabla 5.11:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia. ....	145
<b>Tabla 5.12:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km .....	146
<b>Tabla 5.13:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 400 Km de distancia..	148
<b>Tabla 5.14:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.....	149
<b>Tabla 5.15:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.....	150
<b>Tabla 5.16:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km .....	151
<b>Tabla 5.17:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 300 Km de distancia..	152
<b>Tabla 5.18:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.....	153
<b>Tabla 5.19:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.....	155
<b>Tabla 5.20:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km .....	156
<b>Tabla 5.21:</b> Relación $(E_b/N_o)_{inicial}$ en el receptor con el caza a 200 Km de distancia..	157
<b>Tabla 5.22:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.....	158
<b>Tabla 5.23:</b> Relación $(E_b/N_o)_{final}$ en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.....	159
<b>Tabla 5.24:</b> Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km .....	160

# **1. Introducción**

## **1.1. Motivación**

En la actualidad WCDMA es una tecnología muy utilizada en diferentes tipos de entornos. Esta tecnología, basada en técnicas de espectro ensanchado, se emplea en entornos tales como las comunicaciones móviles así como en las aplicaciones militares. En función del entorno varía la probabilidad de que las comunicaciones estén sometidas a una interferencia intencionada. En estas condiciones, el sistema WCDMA no resulta eficiente dado que no es un sistema flexible en frecuencia. Por ello, se presenta un sistema alternativo, FDSS (Frequency Division Spread Spectrum). La principal ventaja del sistema FDSS respecto a WCDMA es la selectividad en frecuencia que presenta, que resulta en un comportamiento más efectivo frente al ataque provocado por los Jammers.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo de este proyecto es determinar la eficiencia del sistema FDSS cuando las comunicaciones son atacadas mediante Jammers. Estudiaremos la eficiencia de dicho sistema en comunicaciones celulares así como en entornos militares cuando las comunicaciones están sometidas a la acción de los Jammers.

En los sistemas celulares estudiaremos la capacidad del sistema en número de usuarios y su variación debido a la acción de la interferencia generada por los Jammers. Debido a la selectividad en frecuencia del sistema, resulta de especial importancia la señal de entrada empleada, por lo que estudiaremos la efectividad del sistema para diferentes señales de entrada. Obtendremos resultados para la transmisión de señales de voz así como para la transmisión de señales de datos. Compararemos los resultados obtenidos con el sistema FDSS con los que presenta el sistema WCDMA en las mismas condiciones.

Así mismo, estudiaremos la cobertura del enlace en las aplicaciones militares con el empleo del sistema FDSS. Distinguiremos nuevamente entre la transmisión de señales de voz y de datos y obtendremos resultados para las diferentes señales de entrada empleadas por el sistema. Se presentarán así mismo los resultados obtenidos con el empleo del sistema WCDMA comparando la eficiencia de ambos sistemas al estar sometidos al ataque de los Jammers.

## **1.3. Estructura**

El proyecto consta de cinco capítulos. En el primero de ellos se presentará el sistema FDSS, sistema sobre el cual se centra el estudio del proyecto. También se introducirán otros aspectos generales del proyecto como la generación de las señales de

Jammer así como la obtención de los diferentes tipos de señales de entrada que se van a emplear en el desarrollo del proyecto.

En los siguientes capítulos se obtendrán resultados para los diferentes entornos sobre los que se ha estudiado el sistema FDSS. En el capítulo 3 se presentará el sistema FDSS como sistema celular y se obtendrán resultados para la capacidad del sistema con el empleo de dicho sistema. En el capítulo 4 se obtendrán resultados en relación a la cobertura del enlace entre transmisor y receptor para comunicaciones militares terrestres mientras que en el capítulo 5 se realizará el mismo estudio de la cobertura del enlace para comunicaciones entre un transmisor aéreo y un receptor terrestre. Se comentarán los resultados obtenidos y se mostrarán los modelos de propagación empleados para caracterizar el enlace estudiado. Una vez se han mostrado los resultados obtenidos en los diferentes entornos estudiados se comentarán dichos resultados en una conclusión final del estudio centrándonos en la comparación entre el sistema FDSS y el sistema WCDMA.

Por último se mostrarán los programas empleados para la obtención de los resultados mostrados así como la documentación consultada para el desarrollo del estudio.

## 2. Introducción al sistema FDSS

### 2.1. Sistema FDSS

El objeto de este proyecto es el estudio del sistema FDSS tanto en sistemas celulares como en comunicaciones militares en presencia de señales interferentes o de Jammer. En el estudio para comunicaciones militares vamos a distinguir entre comunicaciones entre un transmisor y un receptor terrestre y entre un transmisor aéreo y un receptor terrestre.

El sistema FDSS funciona de la siguiente manera:

Al transmisor llega un bit de duración  $T_b$  el cual se replica en  $M$  copias. Cada una de estas copias es multiplicada por un chip que forma parte de un código de la misma longitud que el número de réplicas hayamos generado. El producto de la multiplicación del dato de entrada y el chip es modulado en cada una de las  $M$  ramas por una portadora utilizando la modulación en fase BPSK. Las  $M$  portadoras que componen el sistema están separadas de las portadoras adyacentes  $1/T_b$ . Finalmente se suman las salidas de las  $M$  ramas y tras trasladar la señal a la frecuencia deseada, se transmite la señal.

Con este proceso generamos una señal multiportadora en la cual todas las subportadoras contienen el mismo dato, con una ganancia de proceso del sistema FDSS de  $M$ , siendo la anchura principal de banda del sistema FDSS aproximadamente igual a  $M \cdot \text{Tasa binaria}$ .

En el receptor demodulamos la señal, y multiplicamos nuevamente por el código obteniendo nuevamente los datos transmitidos junto con perturbaciones debidas al ruido y la interferencia. En cada uno de los subcanales la señal es multiplicada por un factor de ganancia que depende de la relación SJNR de cada portadora. Este hecho nos permite eliminar aquellos subcanales con una relación SJNR muy baja para mejorar de manera global las prestaciones del sistema FDSS. Finalmente sumamos la combinación de los  $M$  canales obteniendo la señal de salida.

## Transmisor y receptor

En la Figura 2.1 se muestra el transmisor empleado en el sistema FDSS. A partir de la misma observamos que lo primero que hacemos con la señal de entrada es un filtrado. Esto es debido a que empleamos diferentes señales de entrada.

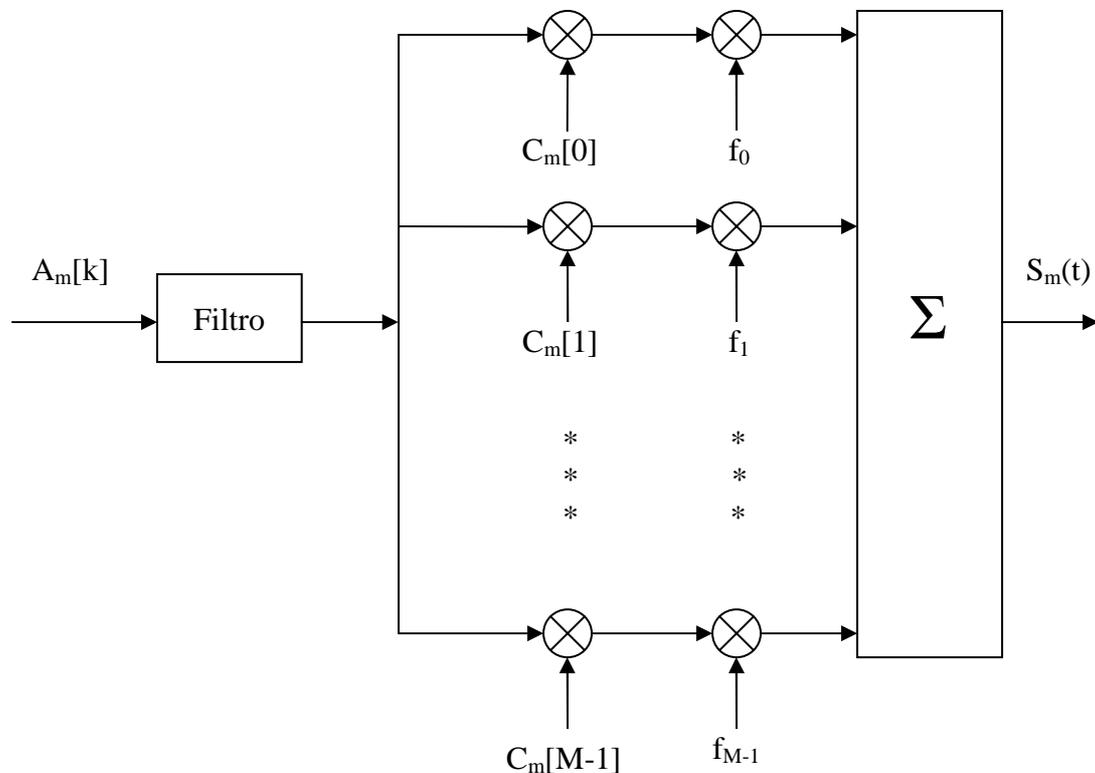
En el estudio realizado empleamos como señales de entrada la rectangular, la cosenoidal, triangular y Gaussiana.

Dado que la secuencia de pulsos rectangulares es periódica, su transformada de Fourier es un tren de impulsos a las frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental  $f_0$ . Realizando diferentes filtrados obtenemos el resto de las señales empleadas.

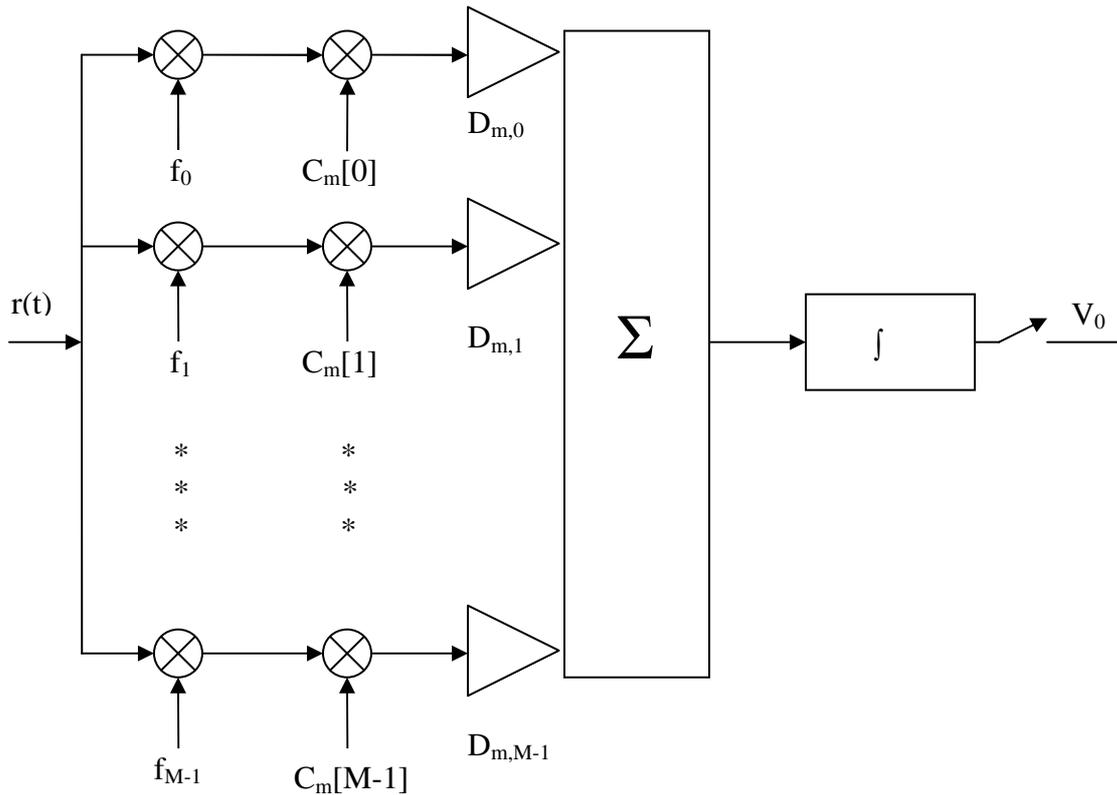
La señal cosenoidal se obtiene mediante un filtrado alrededor de la frecuencia fundamental del desarrollo en serie de Fourier de la onda cuadrada periódica.

La señal triangular se obtiene a partir de la integración de la potencia de la señal rectangular.

La señal Gaussiana resulta la más complicada de obtener. Se utiliza un filtro con respuesta al impulso Gaussiana como los empleados en GSM.



**Figura 2.1:** Transmisor FDSS



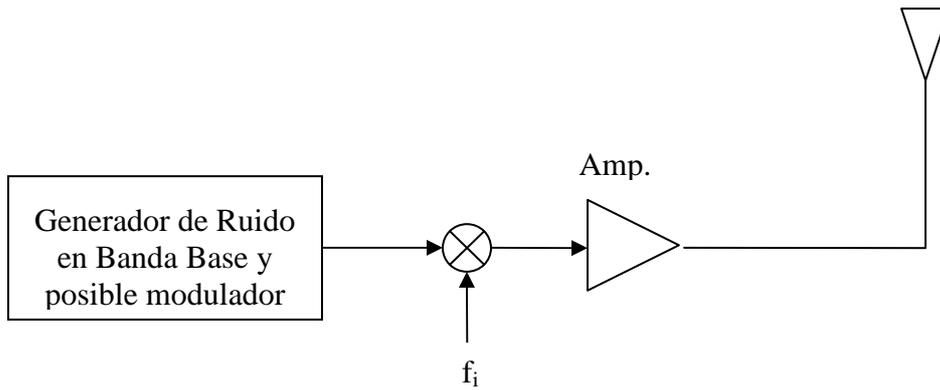
**Figura 2.2:** Receptor FDSS

## 2.2. Generación de las señales de Jammer

En la Figura 2.3 se muestra como generar una señal de Jammer. El generador de ruido en banda base es un diodo de ruido, a partir del cual se obtiene ruido en una banda de varios KHz.

Dicho ruido es modulado a la frecuencia central del sistema que queremos atacar y posteriormente amplificado y transmitido.

La frecuencia de operación del oscilador es variable de forma que se pueda atacar cualquier banda de frecuencias. Sin embargo, podemos fijarla si se conoce la frecuencia a la que transmite el enemigo su señal de RF.



**Figura 2.3:** Generación de una señal de Jammer con un mezclador

### 2.3. Sistema MC-DS-CDMA

En las Figuras 2.4 y 2.5 se muestra el transmisor y el receptor del sistema MC-DS-WCDMA, que es un sistema muy similar al sistema FDSS. Sin embargo, presenta una diferencia fundamental. En este caso, existe una conversión serie-paralelo de los datos de entrada, por lo que se transmite distinta información en cada una de las portadoras del sistema. Esto implica que este sistema tiene una tasa binaria  $N$  veces mayor que el sistema FDSS. La desventaja es que presenta mucha menor robustez que el sistema FDSS en presencia de señales interferentes, y si la interferencia presenta una anchura de banda alta respecto a la banda de paso del sistema, esto es, un 10% de la misma, se pierde gran parte de la información transmitida siendo imposible su recuperación con técnicas de codificación de canal.

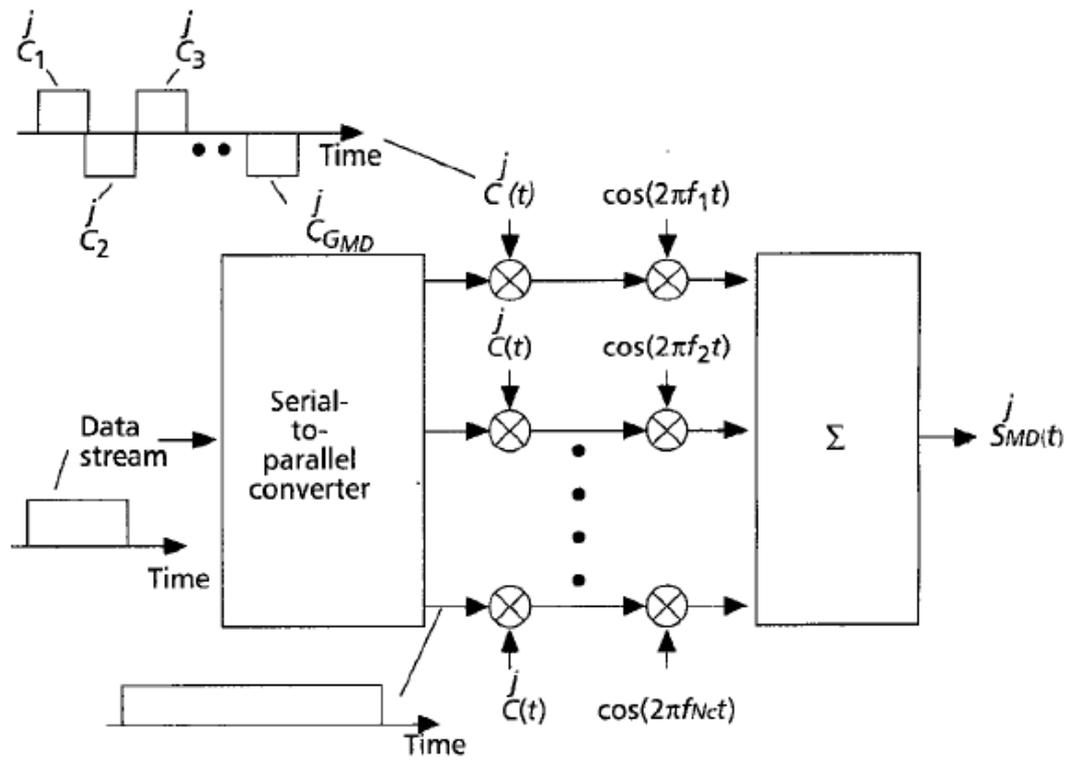


Figura 2.4: Transmisor MC-DS-CDMA

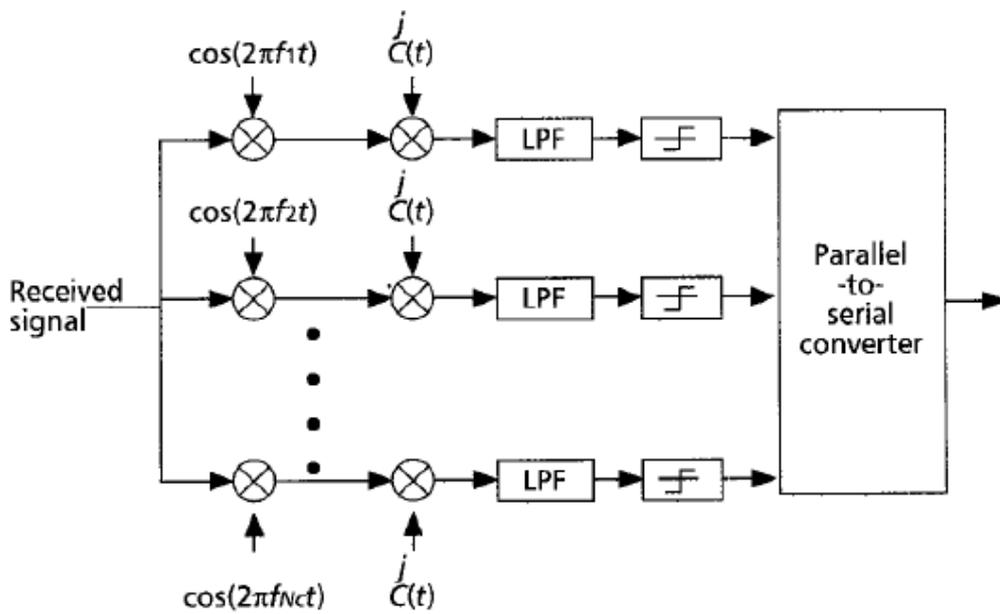


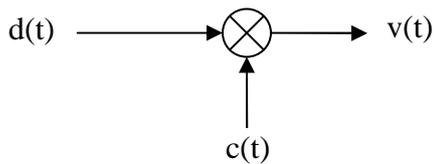
Figura 2.5: Receptor MC-DS-CDMA

## 2.4. Sistema WCDMA

En la Figura 2.6 mostramos el diagrama de bloques para la consecución de una señal de espectro ensanchado, que es el diagrama empleado por WCDMA, sistema que nos interesa pues es el vigente en los sistemas que vamos a estudiar.

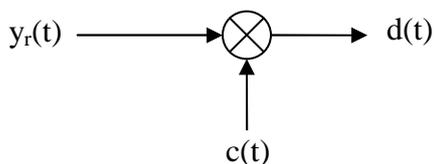
El sistema UMTS se basa en técnicas de espectro ensanchado al emplear WCDMA en su interfaz radio. La señal de información,  $d(t)$  es multiplicada por una señal pseudoaleatoria,  $c(t)$ . El periodo de chip ( $T_c$ ) es menor que el periodo de símbolo ( $T_b$ ) provocando un ensanchamiento en frecuencia.

En WCDMA emplea un periodo de chip fijo, de tal forma que la velocidad de chip sea  $v_c=3.84$  Mcps. De esta manera, el espectro de la señal  $v(t)$  presentará una anchura de banda de 5 MHz como resultado del producto de  $d(t)$  y  $c(t)$ . Es destacable que en función del periodo de símbolo empleado la ganancia del sistema será diferente.



**Figura 2.6:** Transmisor WCDMA

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de bloques del receptor WCDMA. Una vez que la señal llega al receptor se produce la misma operación. Se multiplica la señal recibida por la secuencia código y se obtiene la señal deseada al provocar un estrechamiento en frecuencia al multiplicar por la misma secuencia que en el transmisor.



**Figura 2.7:** Receptor WCDMA

## 3. FDSS en Sistemas Celulares

### 3.1. Obtención de SNR, $E_b/N_0$ y capacidad del sistema FDSS

Dado que una de las principales ventajas del sistema FDSS es su resistencia a entornos de altas interferencias vamos a analizar los diferentes tipos de interferencia que vamos a encontrarnos en el estudio realizado.

Este sistema presenta interferencias de distinto tipo:

- 1.- Debidas a otros usuarios de la célula (Interferencia intracelular)
- 2.- Debidas a usuarios de otras células (Interferencia intercelular)
- 3.- Señal de Jammer. (J)

Los dos primeros tipos de interferencias son inherentes a cualquier sistema celular que no emplee multiplexación por división en frecuencia, mientras que la interferencia provocada con señales de Jammer es intencionada.

Para cada usuario, se recibe la información en la estación base. La señal recibida consiste en la suma de  $M$  señales. Así mismo, se reciben señales de otros usuarios de la misma célula, los usuarios de células adyacentes, así como una señal de Jammer, de potencia  $J_{init}$ .

El receptor FDSS consiste en  $T$  bloques de recepción en paralelo, cada uno de ellos como el mostrado en la Figura 2.2. Cada uno de ellos contendrá el código de un usuario, de manera que únicamente la señal del usuario que tenga el mismo código será la señal deseada, mientras que el resto serán tratadas como interferencia.

El receptor FDSS trata de reducir la potencia de la señal de Jammer recibida,  $J_{init}$ , con el fin de encontrar el punto de mayor capacidad en usuarios del sistema FDSS para cada relación  $(J/S)_{ini}$ . Para ello, eliminará portadoras del sistema FDSS. De esta manera, la potencia inicial de Jammer,  $J_{init}$ , es reducida a un valor residual,  $J_{res}$ .

Para un único usuario la relación SNR será:

$$SNR_s = \frac{\left(\frac{M - N}{M}\right) \cdot S}{J_{res} + ICI} \quad (3.1)$$

Y la relación  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$  viene dada por:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_s = (M - N) \cdot SNR_s \quad (3.2)$$

En el caso de IFDSS como sistema celular, la relación señal a ruido  $SNR_{\text{celula,IFDSS}}$  viene dada por:

$$SNR_{\text{celula,IFDSS}} = \frac{\left(\frac{M - N}{M}\right) \cdot S}{\left(\frac{M - N}{M}\right) \cdot S \cdot (1 + F) \cdot N_{\text{usuarios}} \cdot \alpha \cdot F_s + J_{\text{res}} + ICI} \quad (3.3)$$

Y la relación  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}}$  viene dada por:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}} = (M - N) \cdot SNR_{\text{celula,IFDSS}} \quad (3.4)$$

Donde:

- $N_{\text{usuarios}}$  = Número de usuarios del sistema IFDSS por célula.
- $1+F$  = Factor de interferencia intracelular e intercelular. En el caso de la interferencia intracelular el factor de interferencia es 1 mientras que en el caso de interferencia intercelular es 0.66.
- $\alpha$  = Factor de actividad del usuario del sistema IFDSS. Para señales de voz se emplea  $\alpha=0.5$  mientras que para señales de datos  $\alpha=1$ .
- $F_s$  = Es el factor de reducción por sectorización. Dado que la célula es trisectorizada el valor empleado de  $F_s=0.4$ . Idealmente sería  $1/3$ , pero suponemos que hay una cierta superposición en los diagramas de radiación de las antenas.
- $M$  = Es el número de copias paralelas generadas en el transmisor FDSS y por tanto el número de portadoras totales. Empleamos  $M=256$  para señales de voz y  $M=32$  para señales de datos.
- $N$  = Es el número de portadoras eliminadas en el receptor FDSS.

A partir de las expresiones (3.3) y (3.4) podemos obtener la fórmula de la capacidad.

Despejando  $\text{SNR}_{\text{celula,IFDSS}}$  de (3.4) obtenemos:

$$\text{SNR}_{\text{celula,IFDSS}} = \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}} \cdot \left( \frac{1}{M - N} \right) \quad (3.5)$$

Igualando las expresiones (3.3) y (3.5) obtenemos:

$$\left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}} \cdot \frac{1}{(M - N)} = \frac{\left( \frac{M - N}{M} \right) \cdot S}{\left( \frac{M - N}{M} \right) \cdot S \cdot (1 + F) \cdot N_{\text{usuarios}} \cdot \alpha \cdot F_s + J_{\text{res}} + \text{ICI}} \quad (3.6)$$

Despejando de la expresión (3.6)  $N_{\text{usuarios}}$  obtenemos:

$$N_{\text{usuarios}} = \frac{\frac{(M - N)^2}{M} \cdot S - J_{\text{res}} \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}} - \text{ICI} \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}}}{\left( \frac{M - N}{M} \right) \cdot S \cdot (1 + F) \cdot \alpha \cdot F_s \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}}} \quad (3.7)$$

Llamando  $G_p$  al número de portadoras del sistema y  $W_{sn}$  a la proporción de banda eliminada del sistema FDSS respecto de su ancho de banda total podemos decir:

$$M - N = G_p \cdot (1 - W_{sn}) \quad (3.8)$$

$$M = G_p \quad (3.9)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.7) obtenemos:

$$N_{\text{usuarios}} = \frac{G_p \cdot (1 - W_{sn})^2 \cdot S - J_{\text{res}} \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}} - \text{ICI} \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}}}{(1 - W_{sn}) \cdot S \cdot (1 + F) \cdot \alpha \cdot F_s \cdot \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}}} \quad (3.10)$$

Mediante esta ecuación obtenemos la capacidad del sistema FDSS.

En la expresión (3.6) vemos la relación entre  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}}$  y  $N_{\text{usuarios}}$  de la célula. Podemos ver que sería posible mantener la capacidad de la célula en número de usuarios a costa de disminuir  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}}$ , sin embargo esto aumentaría la BER a medida que disminuyera  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}}$ . Por eso hemos fijado un valor para  $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{celula,IFDSS}}$  limitando por tanto la capacidad del sistema.

## 3.2. Transmisión de señales de voz

Inicialmente hemos simulado la transmisión de señales de voz para ver la capacidad que presenta el sistema celular FDSS al ser atacado por señales de Jammer.

El periodo de bit de la señal de voz es:  $T_b = \frac{1}{15 \cdot 10^3}$  (s).

Es destacable que se transmiten  $15 \cdot 10^3$  bits cada segundo, es decir, los mismos que se transmiten con el sistema WCDMA, vigente actualmente, para este tipo de señales.

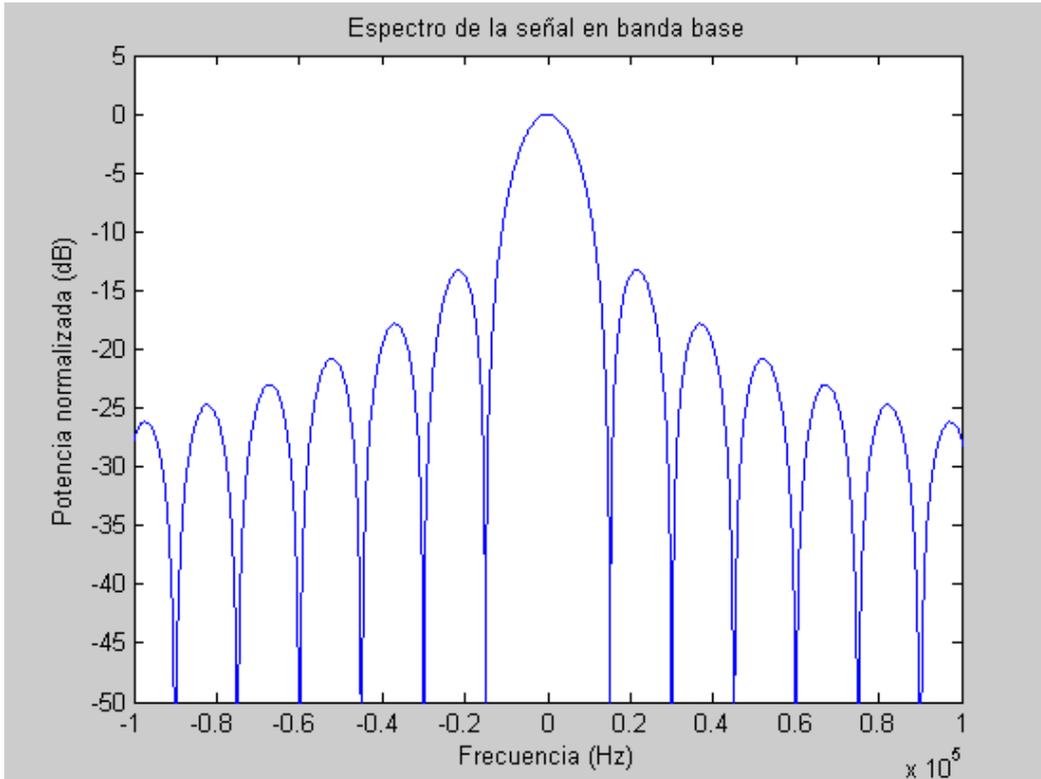
### 3.2.1. Señales de entrada empleadas

A su vez, hemos empleado distintos tipos de señales de entrada para ver como las distintas características de estas influyen en la capacidad de transmisión del sistema FDSS. Las señales de entrada empleadas son las siguientes:

- Rectangular
- Cosenoidal
- Triangular
- Gaussiana

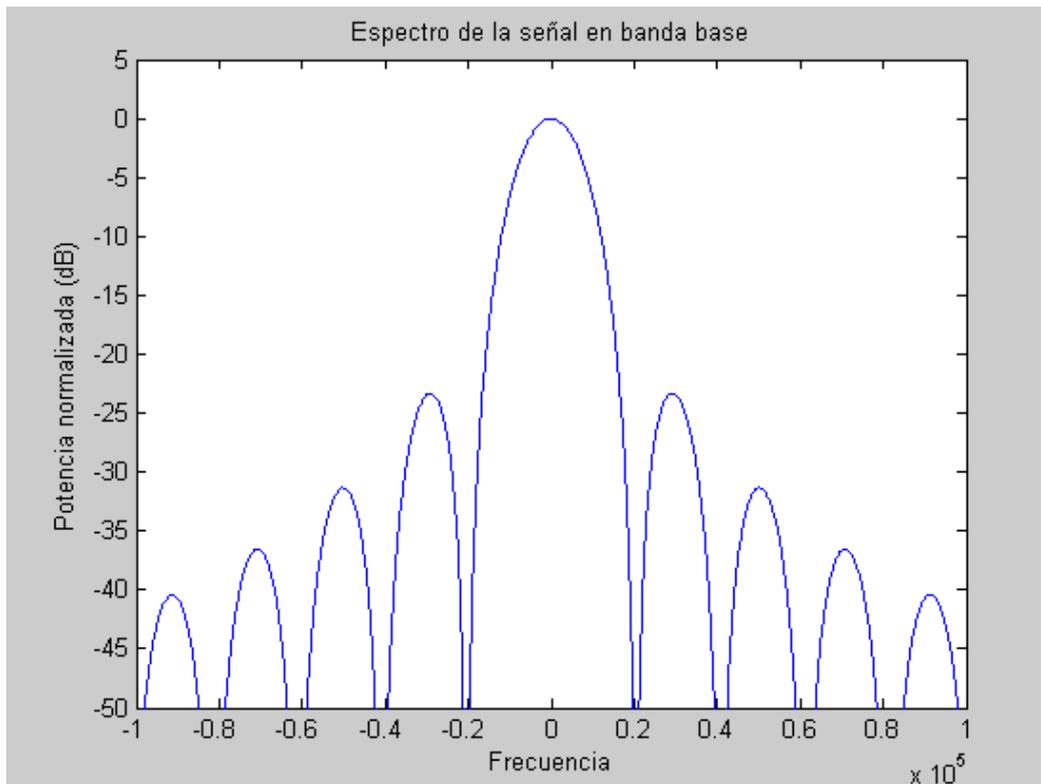
Vamos a analizar los resultados del sistema FDSS para la transmisión de señales de voz, a partir de los espectros de cada una de las señales empleadas.

En la Figura 3.1 se muestra el espectro en banda base de la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz. Se observa a partir de la Tabla 3.1 que el lóbulo principal presenta una anchura de banda de 30 KHz mientras que el primer lóbulo secundario presenta una atenuación de 13.2 dB respecto al lóbulo principal. Al no ser la atenuación en sus lóbulos secundarios elevada, una gran parte de la potencia no se encuentra en el lóbulo principal, lo que constituye la principal desventaja del empleo de esta señal.



**Figura 3.1** Espectro en banda base de la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz

Mostramos el espectro en banda base de la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz en la Figura 3.2. Observamos que la anchura de su lóbulo principal es de 40 KHz y la atenuación de su primer lóbulo secundario respecto al principal es de 23.3 dB según se observa en la Tabla 3.1. El incremento en la anchura de banda del lóbulo principal respecto a la señal rectangular supone una desventaja ya que implica una mayor interferencia entre los diferentes canales del sistema al ser la separación en frecuencia de las portadoras de 15 KHz en el sistema FDSS, sin embargo, la mayor atenuación en sus lóbulos secundarios resulta muy beneficiosa al concentrarse una mayor potencia en el lóbulo principal.

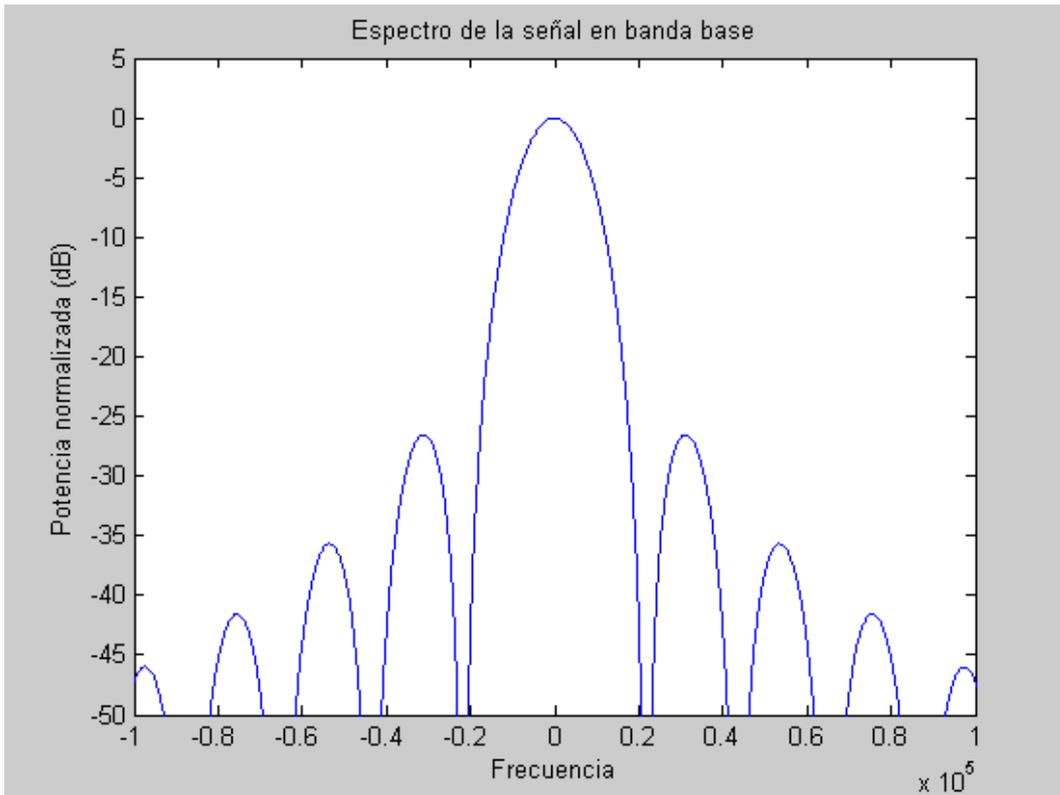


**Figura 3.2:** Espectro en banda base de la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz

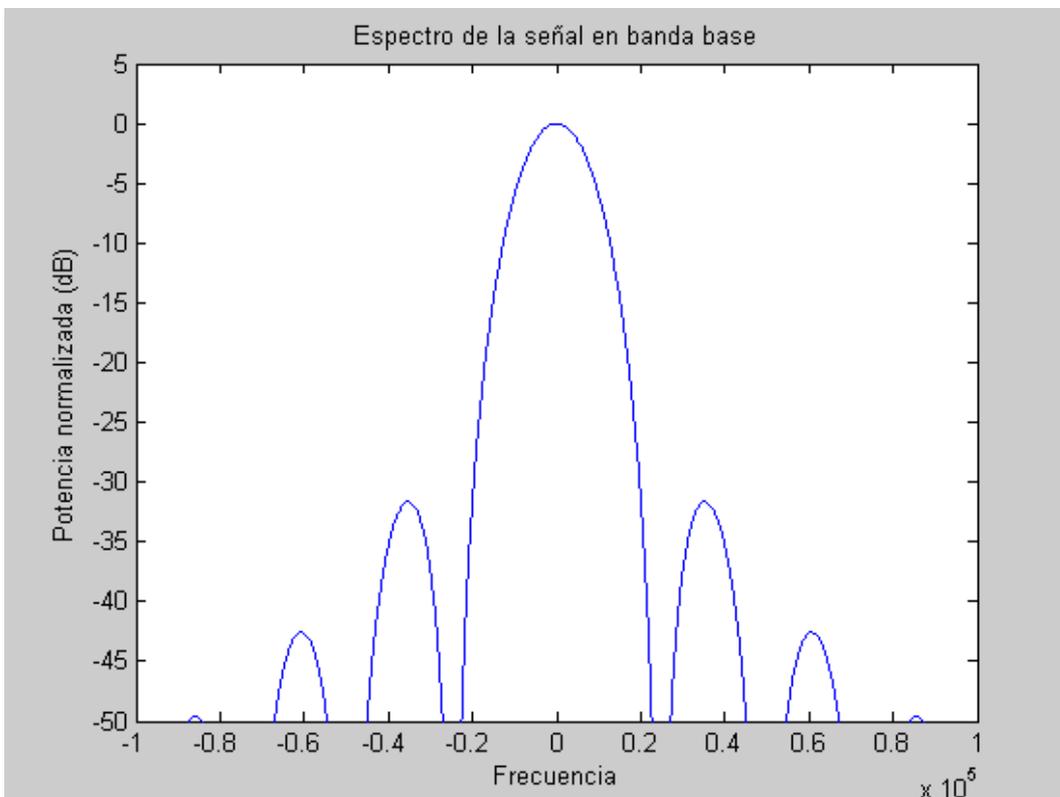
En la Figura 3.3 se muestra el espectro en banda base de la señal de entrada triangular en la transmisión de señales de voz. A partir de la Tabla 3.1 observamos como la anchura del lóbulo principal se incrementa frente a la señal rectangular y cosenoidal. La anchura del lóbulo principal es de 42.5 KHz, mientras que la atenuación del primer lóbulo secundario es de 26.4 dB respecto al lóbulo principal.

Finalmente mostramos el espectro en banda base de la señal Gaussiana en la Figura 3.4. Esta señal de entrada es la que presenta una mayor atenuación en sus lóbulos secundarios, siendo la atenuación del primero de ellos de 31.5 dB respecto al lóbulo principal según se observa en la Tabla 3.1. Así mismo, es la que presenta una mayor anchura en su lóbulo principal, siendo dicha anchura de banda de 47 KHz.

Es destacable que la señal de entrada ideal sería aquella que permitiera separar los subcanales del sistema sin que existiera interferencia entre ellos y presentara una amplitud constante en la banda en que se encuentra. Sería por tanto, una señal de amplitud constante y anchura de banda de 15 KHz donde los lóbulos secundarios tuvieran una atenuación infinita.



**Figura 3.3:** Espectro en banda base de la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz



**Figura 3.4:** Espectro en banda base de la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.1:** Características de las señales de entrada empleadas para la transmisión de voz

Señal de entrada	Anchura lóbulo principal	Atenuación primer lóbulo secundario
Rectangular	30 KHz	13.2 dB
Cosenoidal	40 KHz	23.3 dB
Triangular	42.5 KHz	26.4 dB
Gaussiana	47 KHz	31.5 dB

### 3.2.2 Sistema FDSS para las diferentes señales de entrada empleadas

En el caso de la señal de voz el sistema FDSS cuenta de 256 portadoras. Las portadoras están situadas en las siguientes frecuencias:

- $f_0 = 587.5\text{KHz}$

Siendo la separación de frecuencias:

- $f_{i+1} - f_i = 15\text{KHz}$

A partir de la posición de las portadoras en el sistema podemos decir que la anchura de la banda de paso del sistema FDSS es de 3.84 MHz.

En esta simulación cabe destacar los siguientes parámetros empleados:

- El tiempo de bit es:  $T_b = \frac{1}{15 \cdot 10^3}$  (s)
- La ganancia por sectorización es  $G_s = 2.5$ , donde  $G_s = F_s^{-1}$ .
- Factor de actividad del usuario del sistema IFDSS es  $\alpha=0.5$  para señales de voz.
- Factor de interferencia intercelular. Lo definimos por F y su valor es 0.66.
- $\left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{\text{celula,IFDSS}} = 6\text{dB}$

Se muestra el espectro del sistema FDSS para las diferentes señales de entrada empleadas.

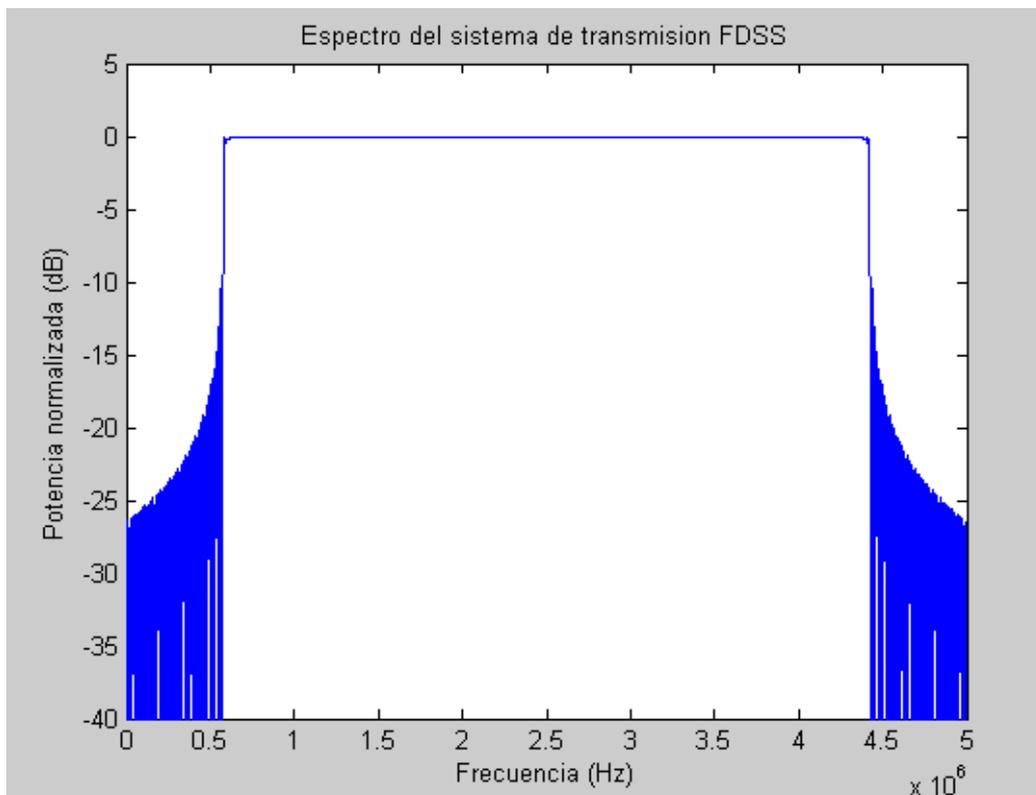
En la Figura 3.5 podemos observar el espectro del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular. Cabe destacar que para este tipo de señal de entrada se cumple la propiedad de ortogonalidad.

La propiedad de ortogonalidad nos permite obtener las muestras de cada subcanal aún cuando existe un solapamiento en frecuencia como en el caso de nuestro sistema. La condición de ortogonalidad es:  $f_j - f_i = \frac{j-i}{T_b}$

Esta propiedad se cumple para una señal de entrada de amplitud constante y longitud  $T_b$  como es el caso para la señal de entrada rectangular.

En la Figura 3.1 se observa que el primer lóbulo secundario es únicamente 13.2 dB menor que el lóbulo principal. Debido a la elevada potencia de los lóbulos secundarios para esta señal de entrada la atenuación del sistema FDSS fuera de la banda de paso no es muy elevada como se observa en la Figura 3.5.

Respecto al rizado en la banda de paso es de 0.08 dB de diferencia entre máximo y mínimo. Este rizado es mayor en los extremos de dicha banda.

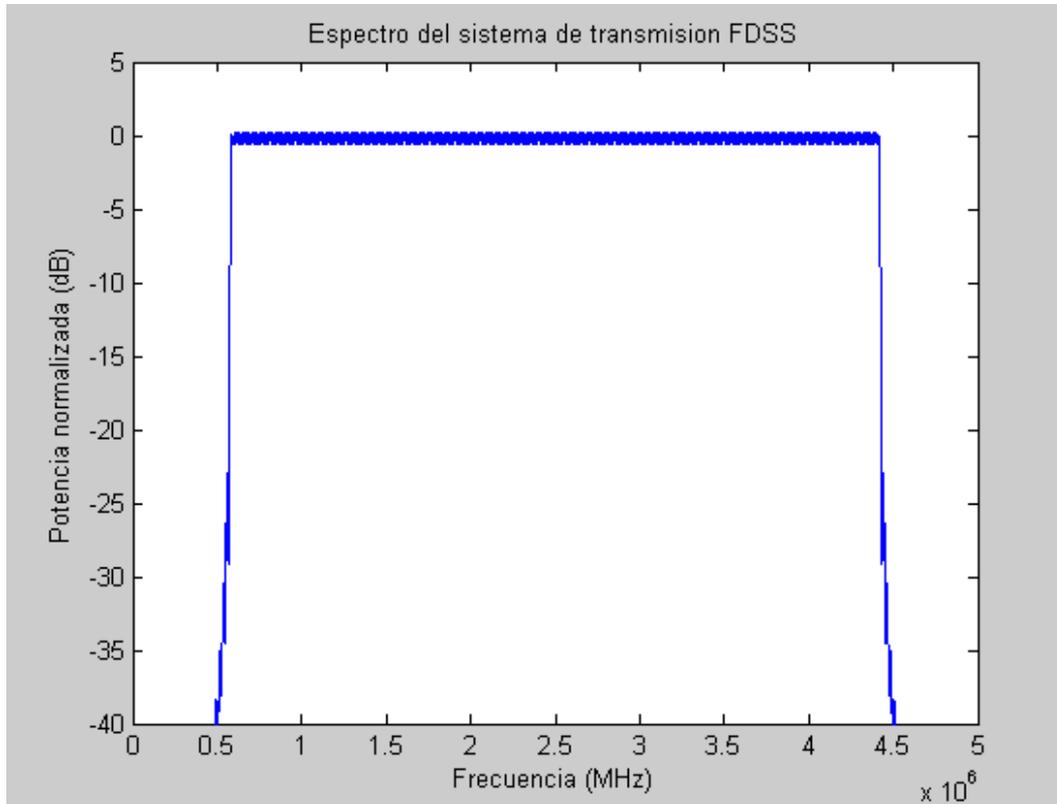


**Figura 3.5:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz

En la Figura 3.6 se muestra el espectro del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal. La señal de entrada cosenoidal no presenta ortogonalidad. Gráficamente se observa a partir de la anchura del lóbulo principal que presenta esta señal de entrada en banda base. Dado que la separación en frecuencia de las portadoras es de 15 KHz, la anchura del lóbulo principal debe ser 30 KHz para que las muestras de los subcanales se anulen en la frecuencia  $f_j$  y podamos obtener las muestras de ese subcanal sin que interfiera con los adyacentes. Lo mismo se puede decir de los lóbulos secundarios que deben presentar una anchura de banda de 15 KHz para evitar este fenómeno.

La no existencia de ortogonalidad resulta en la existencia de ICI (Inter Carrier Interference). La ICI es la interferencia generada sobre cada portadora del sistema resultado de la interferencia de las otras portadoras. A lo largo del estudio se trabaja con el valor medio de la ICI, es decir, se calcula el efecto de la ICI sobre cada portadora del sistema FDSS y se calcula la media de las M portadoras. Para este tipo de señal de entrada el valor medio de la ICI sobre las 256 portadoras es de  $0.046 \cdot P_p$ .

Es destacable que debido a la menor potencia confinada en sus lóbulos secundarios, el sistema FDSS presenta una mayor atenuación fuera de la banda de paso.



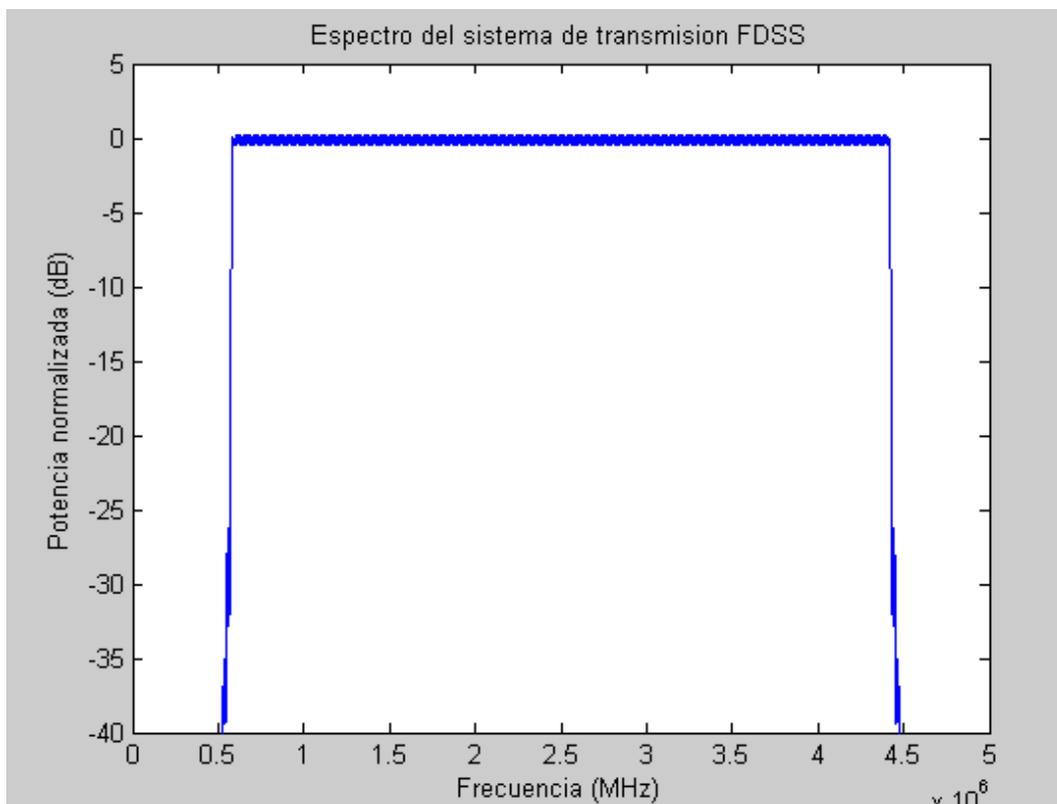
**Figura 3.6:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz

En la Figura 3.7 se muestra el espectro del sistema FDSS cuando la señal de entrada es la triangular.

A partir de los resultados expuestos en la Tabla 3.1, donde se muestra la anchura del lóbulo principal, comprobamos que esta señal de entrada tampoco cumple las propiedades de ortogonalidad. Pese a que la separación de portadoras es proporcional al tiempo de bit, al no ser una señal que presente amplitud constante no se cumple esta propiedad. A partir de la anchura del lóbulo principal de la señal en banda base se puede observar la no existencia de ortogonalidad de manera gráfica. Esto provoca la existencia de ICI, cuyo valor medio a lo largo de todas las portadoras del sistema es de  $0.047 \cdot P_p$  (Potencia de portadora).

Respecto al rizado que presenta el sistema FDSS con esta señal de entrada, decir que es más pronunciado que para la señal rectangular, existiendo una diferencia entre máximo y mínimo en la banda de paso de 0.75 dB.

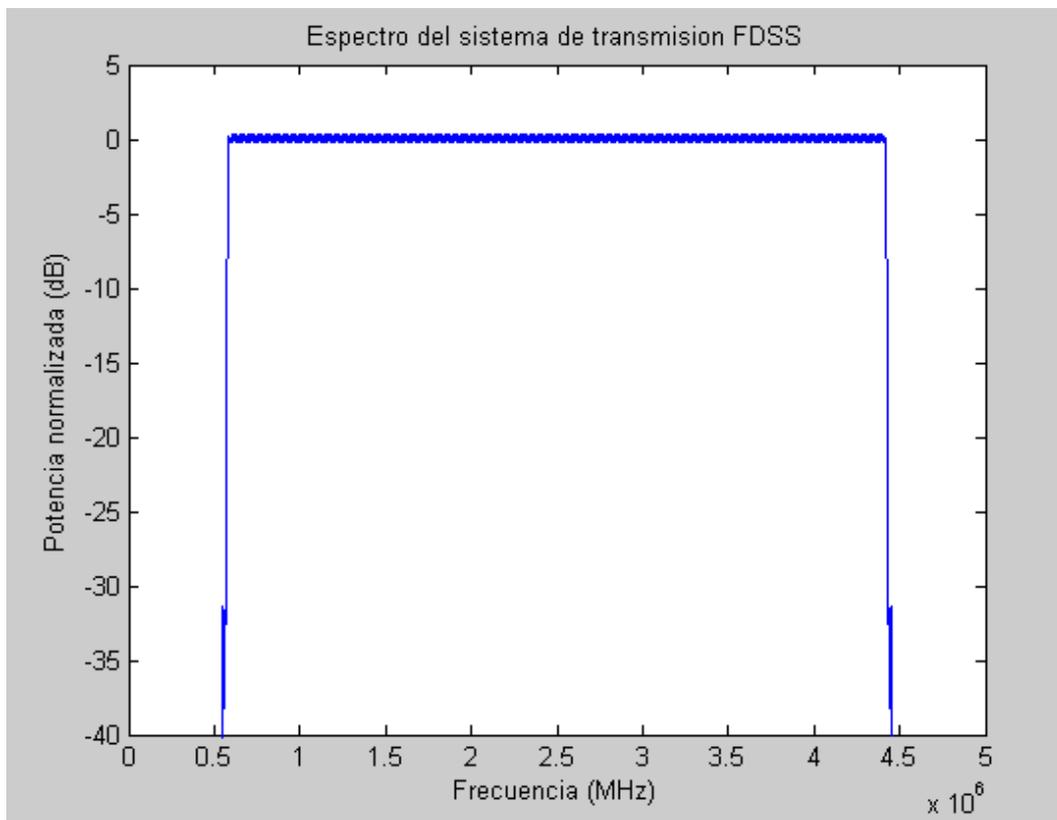
Sin embargo, presenta una elevada atenuación fuera de la banda de paso del sistema como consecuencia de la menor potencia que presentan sus lóbulos secundarios respecto a la señal rectangular y cosenoidal.



**Figura 3.7:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz

Finalmente se muestra el espectro del sistema FDSS con la señal de entrada Gaussiana en la Figura 3.8. Al igual que ocurría con las señales cosenoidal y triangular, tampoco existe ortogonalidad como consecuencia de la anchura de los lóbulos principal y secundarios que presenta este tipo de señal de entrada. Por lo tanto se da la existencia de ICI, que con esta señal presenta un valor medio  $0.069 \cdot P_p$ .

El rizado en la banda de paso es de 0.55 dB entre máximo y mínimo de la señal, mientras que respecto a la atenuación fuera de la banda de paso obtenemos las mejores prestaciones al ser sus lóbulos secundarios los menores de todas las señales de entrada empleadas.



**Figura 3.8:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.2:** Características del sistema FDSS con las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz

Señal de entrada	ICI/ $P_p$	Rizado en la banda de paso
Rectangular	0	0.08 dB
Cosenoidal	0.046	0.75 dB
Triangular	0.047	0.75 dB
Gaussiana	0.069	0.55 dB

### 3.2.3. Resultados obtenidos con el Jammer en el centro de la señal FDSS

En las simulaciones hemos variado distintos parámetros para ver la influencia de los mismos en el sistema FDSS.

Dado que el estudio se basa en la capacidad del sistema en entornos de alta interferencia hemos generado una señal de Jammer dentro del espectro principal del sistema FDSS. Hemos variado algunos parámetros de ella tales como su potencia, su anchura de banda y la posición dentro del ancho de banda del sistema FDSS para ver el efecto que tienen sobre el mismo.

En un primer escenario hemos generado una señal de Jammer de anchura de banda variable centrada sobre la frecuencia central del sistema FDSS, que es:  $(f_p+2.5)$  MHz.

En este escenario hemos empleado las siguientes anchuras de banda para la señal de Jammer:

- $B_w = 0.2\text{MHz}$
- $B_w = 0.4\text{MHz}$
- $B_w = 0.6\text{MHz}$
- $B_w = 0.8\text{MHz}$
- $B_w = 1.0\text{MHz}$

A su vez variamos la potencia de la señal de Jammer. Definimos JSR (Jammer to Signal Ratio) y vamos aumentando la potencia de la señal de Jammer respecto de la potencia del sistema FDSS para ver la potencia interferente que admite el sistema FDSS.

Cabe destacar que la JSR se calcula a partir de toda la potencia de señal en el ancho de banda de paso del sistema, por lo tanto si hablamos de una JSR de 20 dB para dos señales de Jammer con diferente anchura de banda, la potencia de Jammer será la misma siendo la densidad de potencia de Jammer lo que varíe.

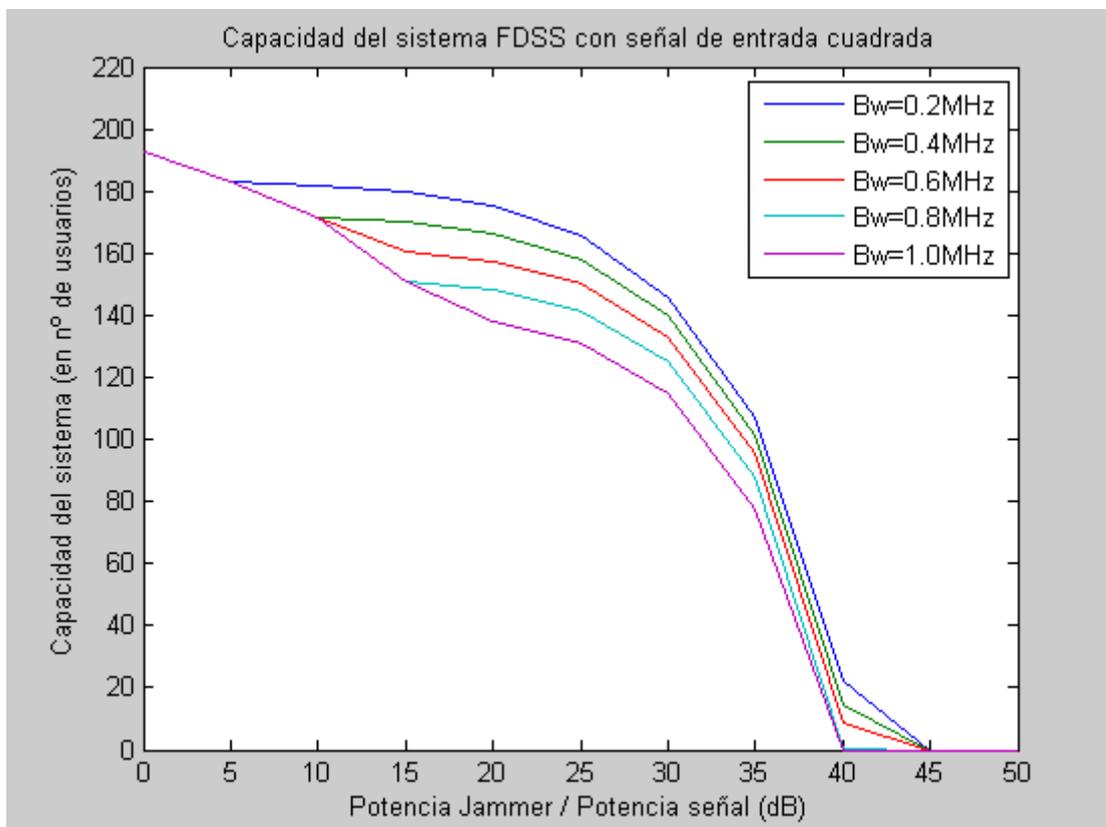
También es destacable que la amplitud de la señal de Jammer es constante en el ancho de banda en que se encuentra dicha señal para todas las simulaciones.

A partir de la Figura 3.9 y de los resultados de la simulación, vemos la capacidad del sistema en número de usuarios para señales de Jammer de distinto ancho de banda y para las distintas relaciones JSR empleadas.

Al aumentar la potencia de Jammer disminuye la capacidad del sistema. De la Tabla 3.3 podemos apreciar que para una JSR de 45 dB el sistema FDSS no tiene ninguna capacidad para una señal de entrada rectangular.

El efecto del ancho de banda es bastante significativo. Se observa que para una señal con un ancho de banda de 1MHz el sistema FDSS no proporciona ninguna capacidad cuando la potencia de Jammer es 40 dB mayor que la potencia del sistema mientras que para un ancho de banda de 200 KHz el sistema es capaz de proporcionar una capacidad de 22 usuarios. Por tanto, es más dañino distribuir una misma potencia en un ancho de banda mayor que distribuirla sobre anchos de banda menores.

Así mismo, para potencias interferentes de 15-20 dB mayores que la potencia del sistema si dicha interferencia presenta un ancho de banda menor la capacidad del sistema FDSS es de casi 40 usuarios más que cuando dicha potencia afecta a 1 MHz de la banda de paso del sistema.



**Figura 3.9:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.3:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

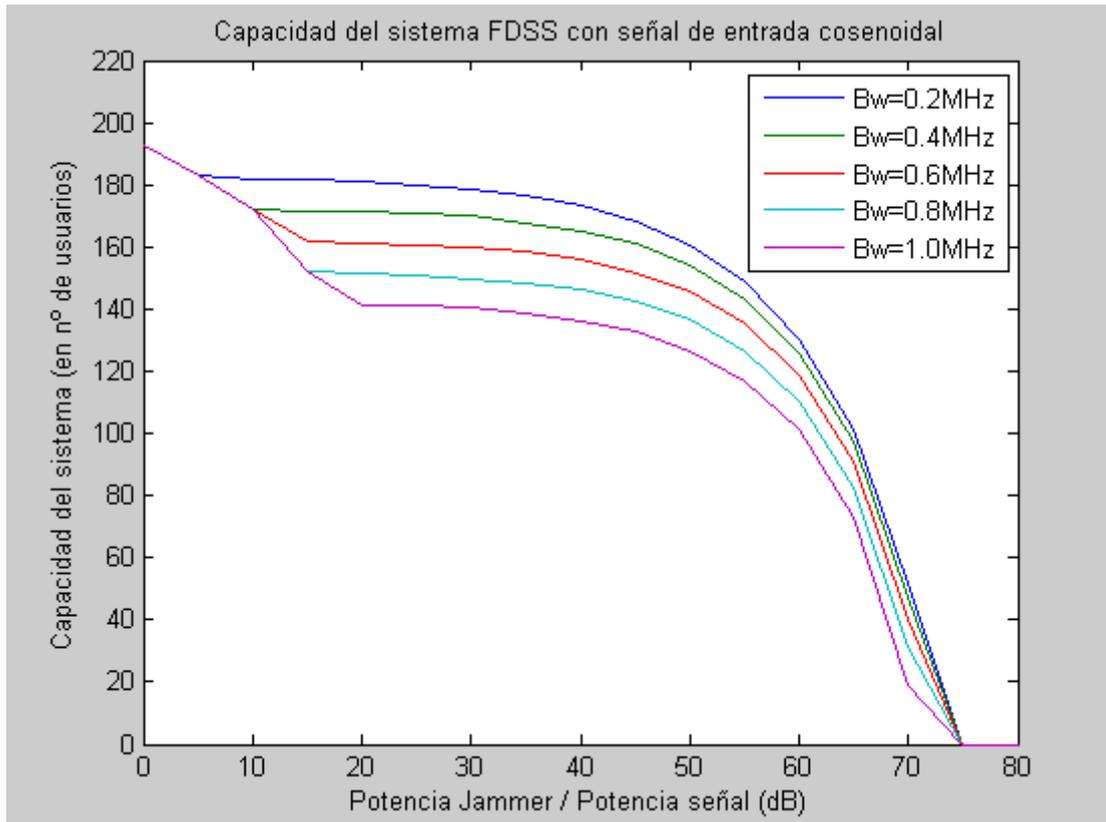
JSR (dB)	BWjammer (MHz)				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Sin interferencia	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77
5dB	183,25	183,25	183,25	183,25	183,25
10dB	181,44	171,74	171,74	171,74	171,74
15dB	179,73	170,05	160,75	150,90	150,90
20dB	175,09	166,51	157,45	148,29	138,03
25dB	165,33	158,11	150,04	141,21	131,17
30dB	145,84	139,79	132,94	124,85	114,98
35dB	106,79	101,02	95,31	87,73	77,43
40dB	22,50	14,58	8,85	0,17	0
45dB	0	0	0	0	0
50dB	0	0	0	0	0

Para una señal de entrada cosenoidal la resistencia del sistema FDSS frente al Jammer aumenta considerablemente como observamos en la Figura 3.10. El sistema es capaz de proporcionarnos una cierta capacidad para relaciones JSR de hasta 70 dB aumentando en 30 dB el punto de saturación obtenido cuando la señal rectangular era la entrada del sistema FDSS.

Respecto al ancho de banda se mantiene el efecto comentado, es más perjudicial para el sistema distribuir una misma potencia interferente en un ancho de banda mayor que concentrarla en una anchura de banda menor donde afectaría directamente a menos portadoras. A partir de los datos de la Tabla 3.4 se aprecia que la concentración de potencia en una anchura de banda menor permite dar servicio a 40 usuarios más cuando la relación JSR es de 20 dB.

En la Figura 3.11 mostramos la capacidad del sistema en número de usuarios con el empleo de una señal de entrada triangular. La señal de entrada triangular presenta mayores ventajas que la rectangular y la cosenoidal. El sistema es capaz de soportar interferencias donde la relación JSR es de 80 dB, introduciendo por tanto una mejora de 10 dB sobre la señal cosenoidal según se observa a partir de los resultados mostrados en la Tabla 3.5.

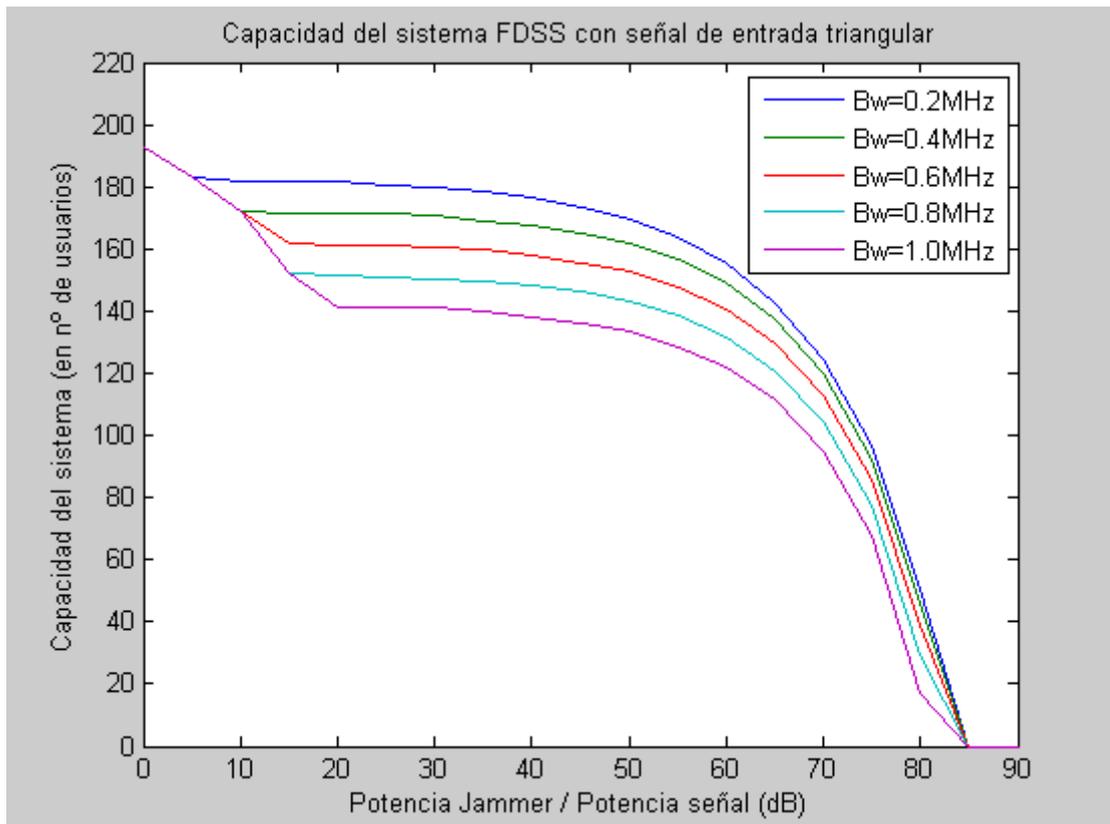
La relación entre la anchura de banda de la señal de Jammer y la capacidad en número de usuarios que soporta el sistema FDSS se mantiene como ocurría para los otros tipos de señales de entrada, siendo mayor la capacidad para anchuras de banda menores de la señal interferente.



**Figura 3.10:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.4:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
<b>Sin interferencia</b>	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63
<b>5dB</b>	183,17	183,11	183,11	183,11	183,11
<b>10dB</b>	182,00	172,12	172,12	172,12	172,12
<b>15dB</b>	181,83	171,48	161,85	151,84	151,84
<b>20dB</b>	181,28	171,37	160,88	151,64	141,28
<b>25dB</b>	179,95	171,03	160,65	151,01	141,08
<b>30dB</b>	178,60	169,95	159,95	149,70	140,44
<b>35dB</b>	176,79	167,88	158,33	148,12	138,59
<b>40dB</b>	173,55	164,86	155,86	146,18	136,09
<b>45dB</b>	168,26	160,83	151,62	142,42	132,68
<b>50dB</b>	160,39	153,83	145,43	136,38	126,63
<b>55dB</b>	148,64	142,94	135,22	126,54	117,04
<b>60dB</b>	130,38	125,56	118,67	110,27	101,06
<b>65dB</b>	101,45	97,17	90,75	82,63	72,98
<b>70dB</b>	51,53	47,20	40,32	30,92	19,15
<b>75dB</b>	0	0	0	0	0



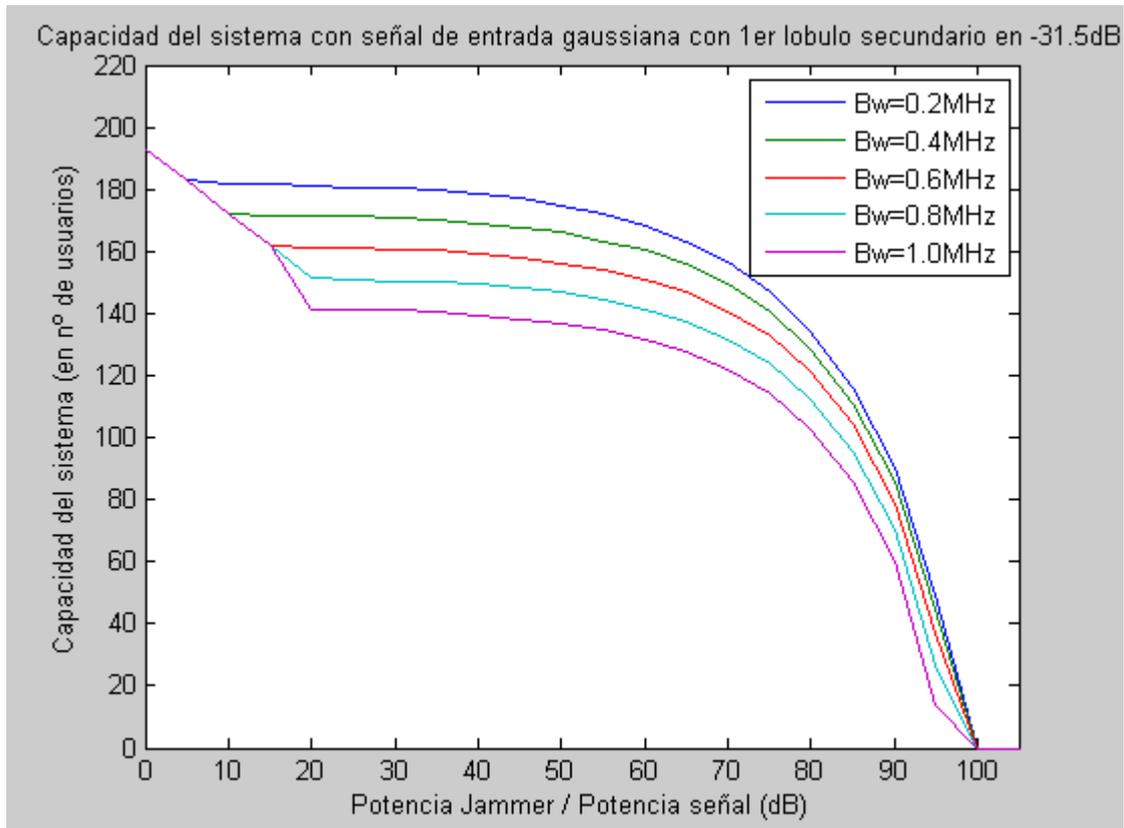
**Figura 3.11:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.5:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
Sin interferencia	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63
5dB	183,15	183,10	183,10	183,10	183,10
10dB	182,01	172,12	172,12	172,12	172,12
15dB	181,87	171,50	161,86	151,85	151,85
20dB	181,41	171,45	160,93	151,69	141,33
25dB	180,29	171,29	160,84	151,16	141,23
30dB	179,67	170,78	160,54	150,10	140,93
35dB	178,33	169,16	159,61	149,39	139,98
40dB	176,74	167,32	158,19	148,05	138,04
45dB	173,66	165,18	155,59	146,20	136,11
50dB	169,63	161,63	152,50	142,81	133,36
55dB	163,67	156,48	147,58	138,46	128,59
60dB	155,15	148,70	140,41	131,51	121,78
65dB	142,68	137,07	129,59	120,84	111,44
70dB	124,44	119,65	112,73	104,31	94,98
75dB	96,62	92,32	85,78	77,39	67,59
80dB	50,44	46,07	38,85	29,19	16,97
85dB	0	0	0	0	0

Por último se muestran los resultados obtenidos con la señal de entrada Gaussiana en la Figura 3.12. Este tipo de señal de entrada proporciona los mejores resultados. El sistema FDSS es capaz de soportar interferencias con una relación JSR de hasta 95 dB siendo capaz de proporcionar cierta capacidad para las distintas señales de Jammer estudiadas. Son destacables las diferentes prestaciones que presenta el sistema en función de la señal de entrada empleada. Mientras que utilizando como entrada del sistema una señal rectangular el punto de saturación se alcanzaba a 40-45 dB en función de la anchura de banda que presentara la señal de Jammer, con el empleo de la señal Gaussiana como entrada del sistema el punto de saturación se alcanza cuando la relación JSR es de 100 dB.

Nuevamente se observa la importancia de la distribución de potencia en frecuencia de la señal de Jammer en la capacidad del sistema. A partir de los resultados se observa que para una misma JSR el sistema FDSS llega a dar una diferencia de capacidad de hasta 40 usuarios en función de los diferentes anchos de banda empleados para la señal de Jammer.



**Figura 3.12:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.6:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
Sin interferencia	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56
5dB	183,04	183,04	183,04	183,04	183,04
10dB	181,93	172,00	172,00	172,00	172,00
15dB	181,75	171,44	161,69	161,69	161,69
20dB	181,20	171,41	160,88	151,55	141,26
25dB	180,41	171,33	160,85	150,92	141,21
30dB	180,22	171,05	160,76	150,24	141,04
35dB	179,63	170,17	160,45	150,02	140,53
40dB	178,43	168,66	159,49	149,34	139,02
45dB	177,20	167,68	157,84	148,18	137,81
50dB	174,72	166,03	156,31	146,77	136,84
55dB	172,06	163,39	154,30	144,33	134,47
60dB	168,34	160,34	150,98	141,43	131,58
65dB	163,28	155,69	146,72	137,45	127,52
70dB	156,32	149,44	140,82	131,68	121,95
75dB	146,93	140,71	132,75	123,63	114,17
80dB	133,98	128,59	121,07	112,30	102,88
85dB	116,07	111,25	104,23	95,71	86,15
90dB	90,07	85,58	78,82	70,15	59,94
95dB	49,11	44,47	36,89	26,69	13,59
100dB	0	0	0	0	0

A continuación se muestra para la señal de entrada cosenoidal datos relativos al número de portadoras eliminadas junto con el ancho de banda eliminado ( $W_{sn}$ ) en función de la anchura de banda de la señal de Jammer y de la potencia de Jammer. Para comparar los resultados mostramos los dos casos extremos utilizados en cuanto a anchura de banda de la señal de Jammer, esto es, 0.2 y 1.0 MHz. Se muestran los resultados en las Tablas 3.7 y 3.8.

Es destacable que en las simulaciones se busca la posición central en frecuencia de la señal de Jammer con objeto de tener un punto de partida a la hora de eliminar portadoras para reducir así la potencia interferente. A partir de ahí, y dado que en este caso la señal de Jammer está centrada sobre  $(f_p+2.5)$  MHz, que es también la frecuencia central del sistema FDSS, el sistema va eliminando portadoras de dos en dos, hasta alcanzar el punto de máxima capacidad del sistema.

Podemos ver como el sistema FDSS reacciona de una forma muy distinta en función de la potencia interferente y de la anchura de banda de la misma.

Para una señal de Jammer de 200 KHz de ancho de banda, el sistema FDSS elimina portadoras aún para valores JSR bajos y va progresivamente eliminando más y

más portadoras a medida que la potencia de Jammer se incrementa. Esto es así porque a medida que aumenta la potencia de Jammer necesitamos que el filtrado que realiza el sistema FDSS en la banda donde se encuentra el Jammer sea mejor, y esto se consigue eliminando un mayor número de portadoras aunque estas se encuentren fuera de la zona de la banda de paso del sistema donde se encuentra el Jammer.

Cuando tenemos la potencia interferente distribuida en una anchura de banda mayor, el sistema FDSS proporciona su máxima capacidad para relaciones JSR bajas cuando no elimina ninguna portadora. Sin embargo, si la potencia de Jammer presenta un valor de potencia mayor que un cierto umbral (15 dB) el sistema FDSS mejora sus prestaciones eliminando las portadoras que se encuentran sobre la banda de paso y eliminando gran parte de la señal de Jammer. En este caso la anchura de banda del Jammer es de 1 MHz y para una JSR de 20 dB se eliminan 68 portadoras, correspondientes a una anchura de banda de 1.02 MHz. Para relaciones JSR mayores, el sistema FDSS requiere mejorar el filtro sobre la banda atacada eliminando para ello portadoras que no se encuentran sobre la banda que ocupa la señal interferente.

Para relaciones JSR elevadas la banda eliminada es mayor cuanto mayor sea la anchura de banda que presente la señal de Jammer, sin embargo para relaciones JSR bajas se eliminan más portadoras cuando menor sea la anchura de banda del Jammer por ser mayor la densidad de potencia de Jammer sobre la banda atacada.

**Tabla 3.7:** Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz y su anchura de banda es 200KHz.

$(J/S)_{ini}$ (dB)	$N_p$	$W_{sn}$
5	2	0,0078
10	14	0,0547
15	14	0,0547
20	14	0,0547
25	16	0,0625
30	16	0,0625
35	18	0,0703
40	20	0,0781
45	26	0,1016
50	32	0,1250
55	42	0,1641
60	56	0,2188
65	80	0,3125
70	110	0,4297

**Tabla 3.8:** Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz y su anchura es banda de 1MHz.

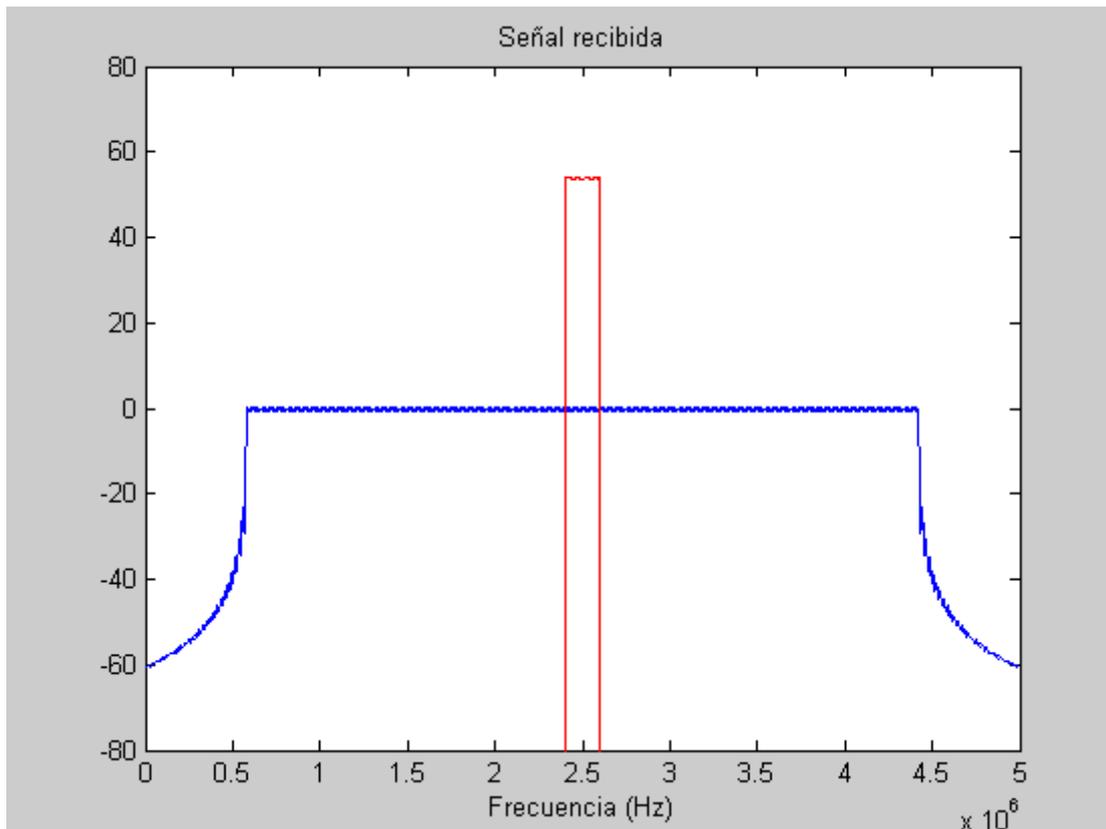
$(J/S)_{ini}(dB)$	$N_p$	$W_{sn}$
5	0	0
10	0	0
15	2	0,0078
20	68	0,2656
25	68	0,2656
30	68	0,2656
35	70	0,2734
40	72	0,2813
45	74	0,2891
50	78	0,3047
55	86	0,3359
60	98	0,3828
65	114	0,4453
70	142	0,5547

### 3.2.3.1 Eliminación de portadoras del sistema FDSS para la señal cosenoidal

A continuación se muestra el proceso de eliminación de portadoras del sistema a fin de optimizar la capacidad del mismo. Se muestra el proceso cuando la señal de entrada del sistema FDSS es la cosenoidal y la señal de Jammer presenta un ancho de banda de 0.2 MHz, siendo la relación de potencia inicial:  $\left(\frac{J}{S}\right)_{ini} = 40dB$

En la Figura 3.13 se muestra el espectro de la señal recibida inicialmente en el receptor. Dado que la relación  $\left(\frac{J}{S}\right)_{ini}$  se calcula sobre la totalidad del ancho de banda del sistema, la potencia de Jammer es 40 dB mayor que la potencia del sistema, sin embargo, sobre el ancho de banda sobre el que se encuentra será mayor, siendo la diferencia relativa al ancho de banda del sistema sobre el que se encuentra la señal de Jammer respecto al ancho de banda total del sistema FDSS. Esto es:

$$10 \cdot \log_{10} \left( \frac{Bw_{FDSS}}{Bw_{jammer}} \right)$$



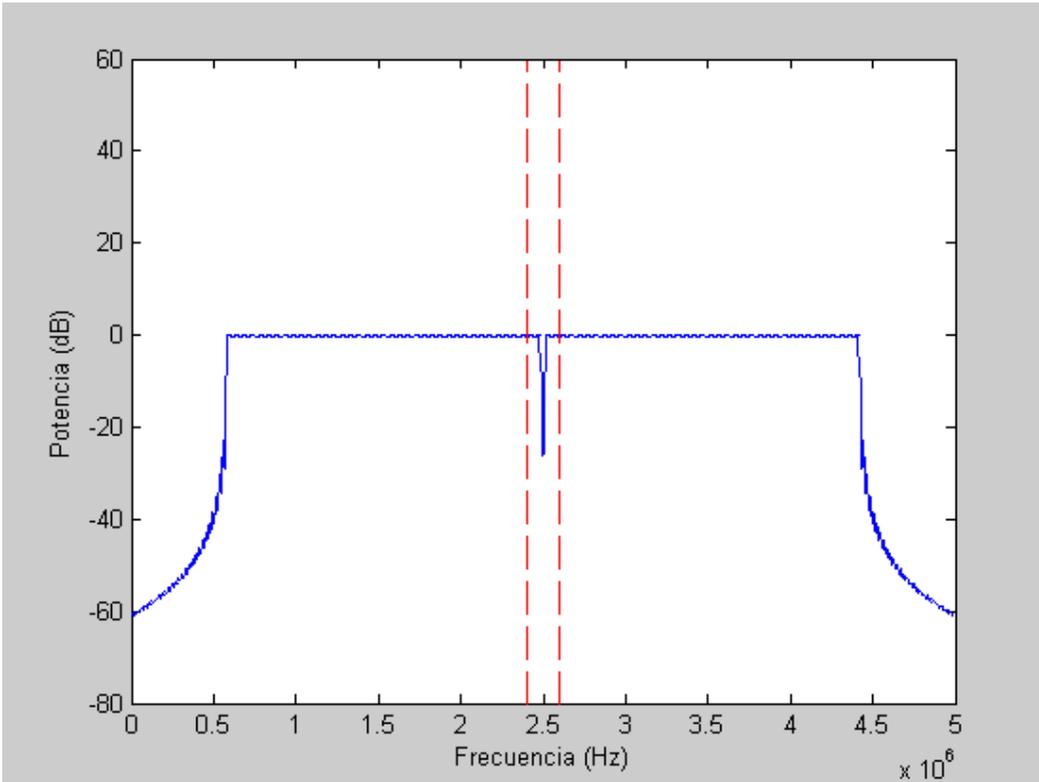
**Figura 3.13:** Espectro de la señal recibida en el receptor para la señal de entrada cosenoidal con una señal de Jammer de 200 KHz de ancho de banda centrada sobre  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de voz

En las Figuras 3.14 a 3.23 se muestra el proceso que tiene lugar en el receptor FDSS con el fin de maximizar la capacidad del sistema.

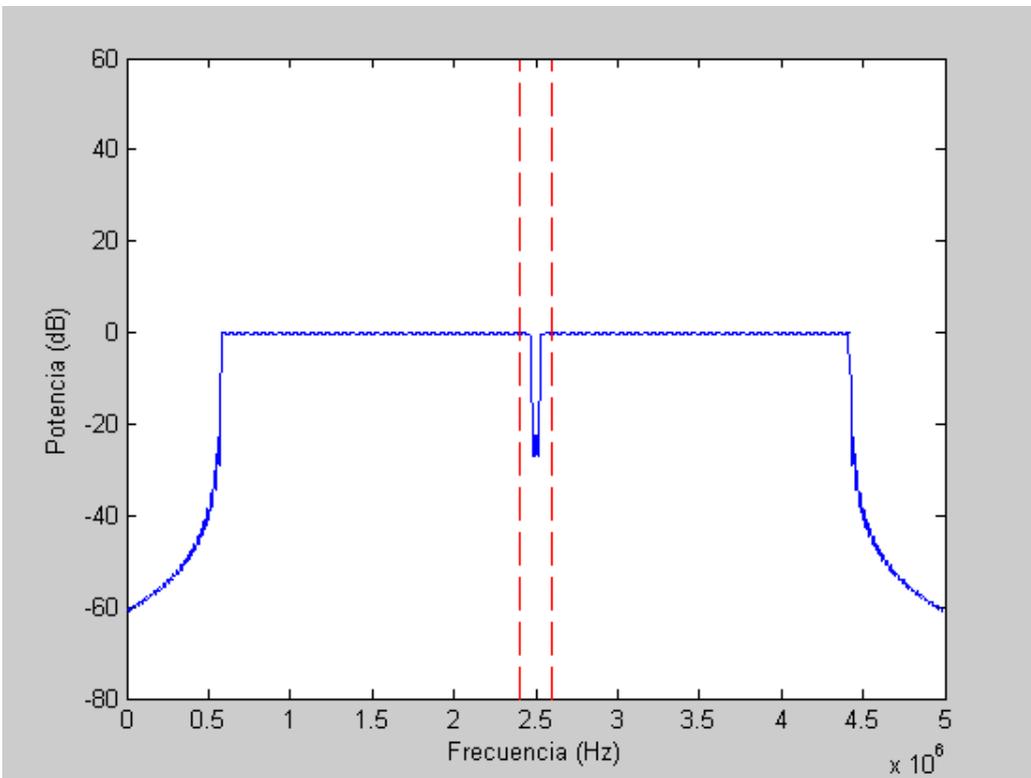
La Figura 3.23 nos muestra como quedaría finalmente el espectro del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal, atacada por una señal de Jammer de potencia 40 dB mayor que la potencia del sistema FDSS una vez que en el receptor se han eliminado las portadoras necesarias para obtener el máximo de capacidad del sistema. Las líneas discontinuas marcan la banda en la que se encuentra el Jammer dentro de la banda de paso del sistema FDSS.

A lo largo del proceso de eliminación de las portadoras se aprecia como al ir eliminando más portadoras el filtrado que se hace sobre la banda en que se encuentra el Jammer es mejor.

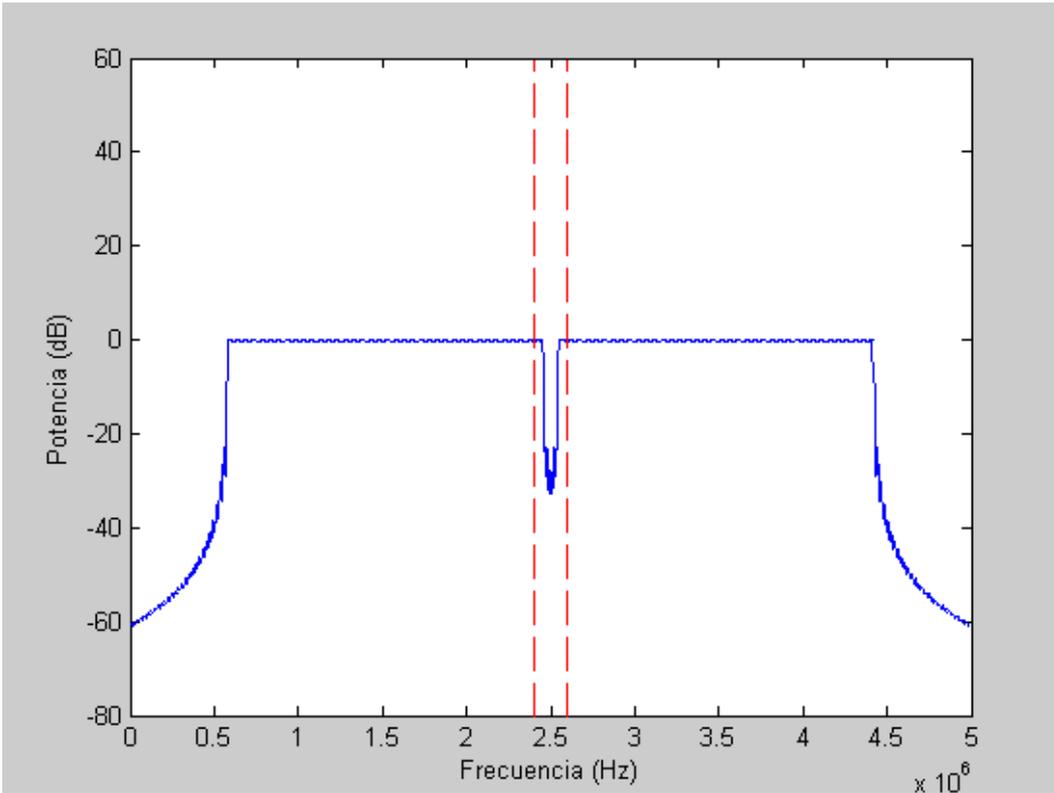
Cuanto mayor sea la potencia de Jammer más dificultad tendrá el sistema FDSS para eliminarla. Lo hará a costa de la eliminación de un mayor número de portadoras con el fin de mejorar el filtrado dentro de la zona de la banda de paso donde se encuentra la señal interferente.



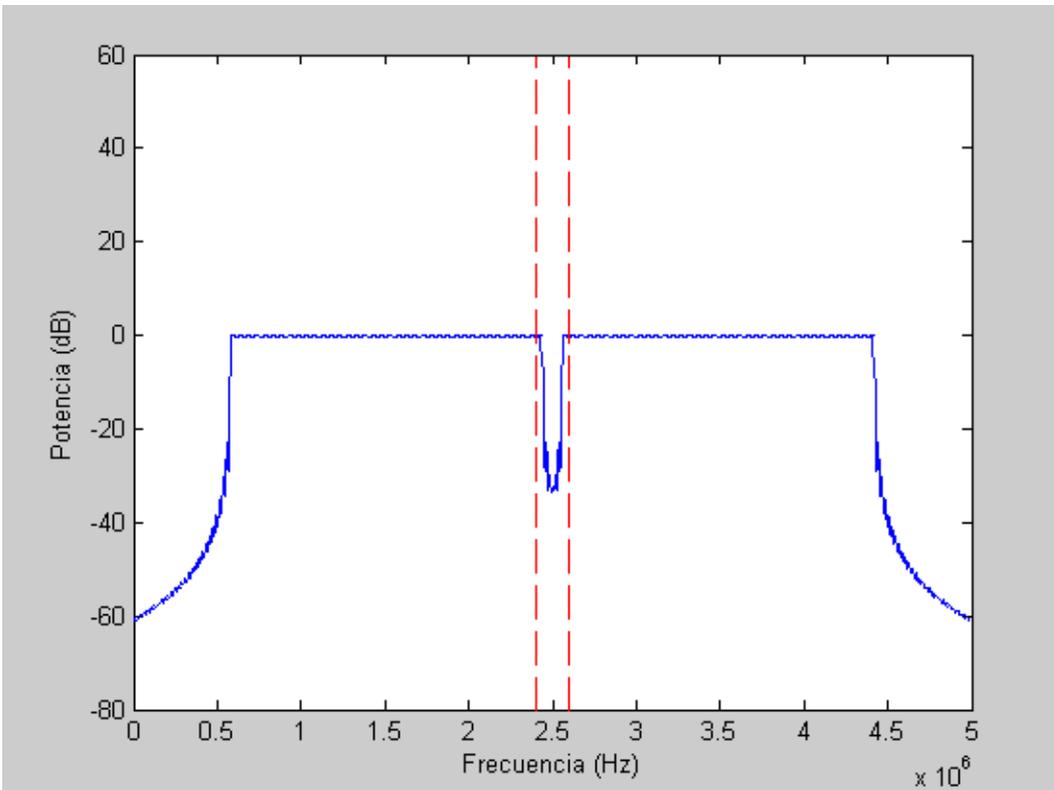
**Figura 3.14:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 2 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



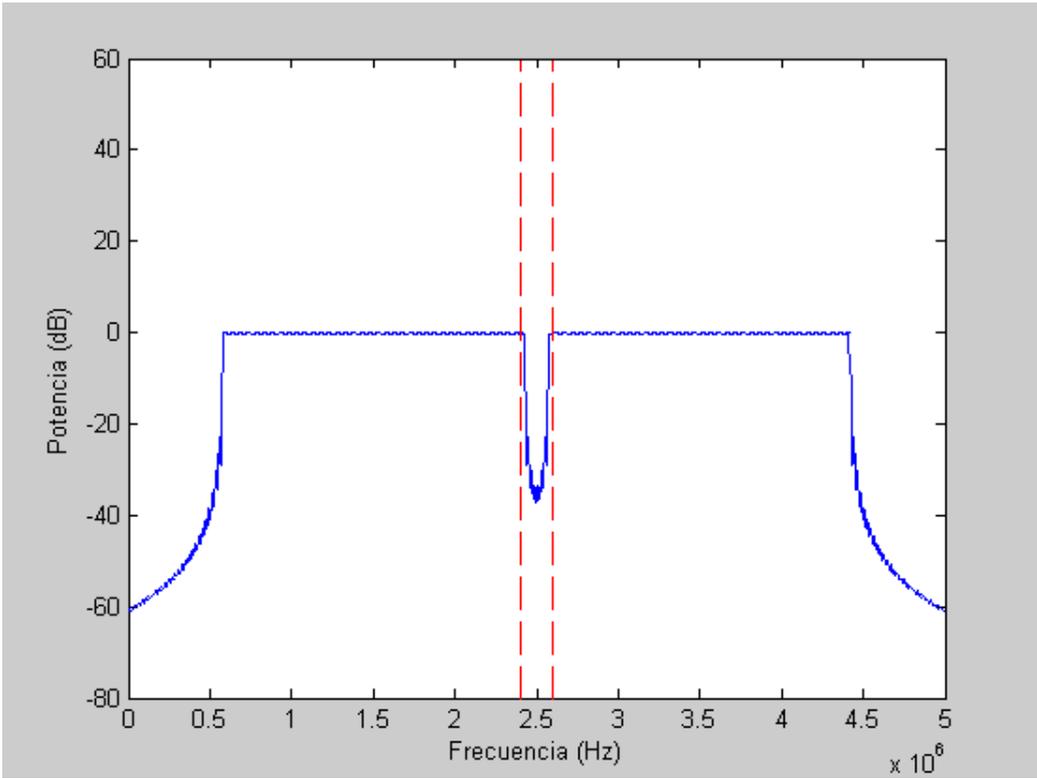
**Figura 3.15:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 4 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



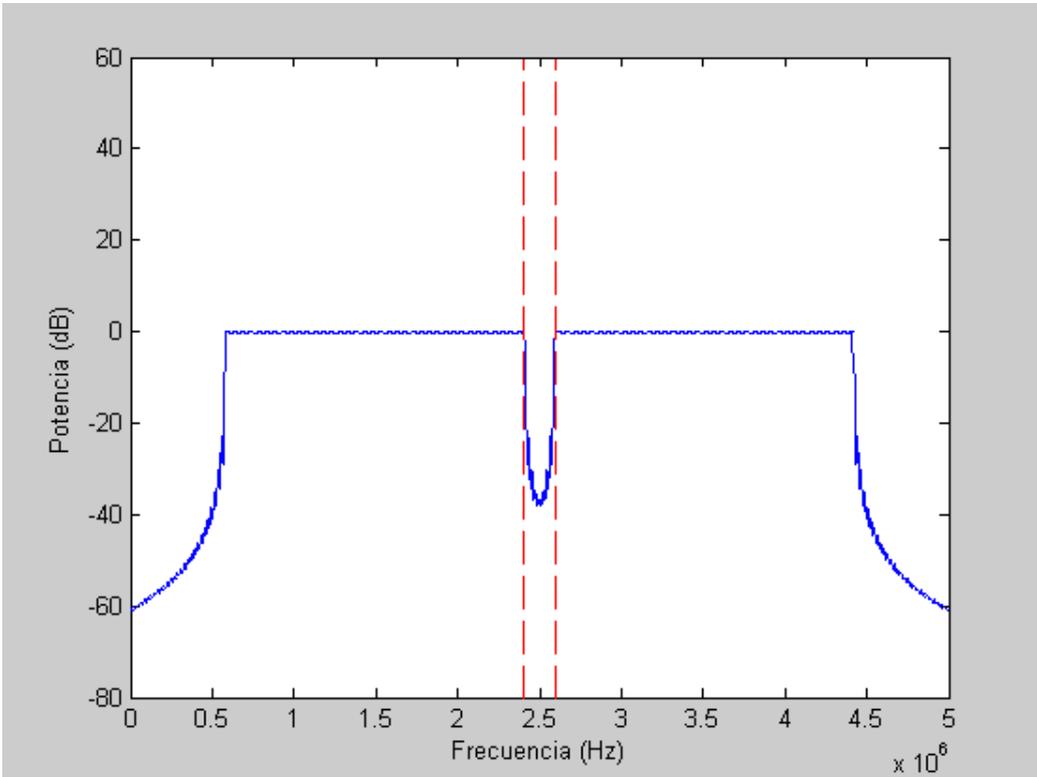
**Figura 3.16:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 6 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



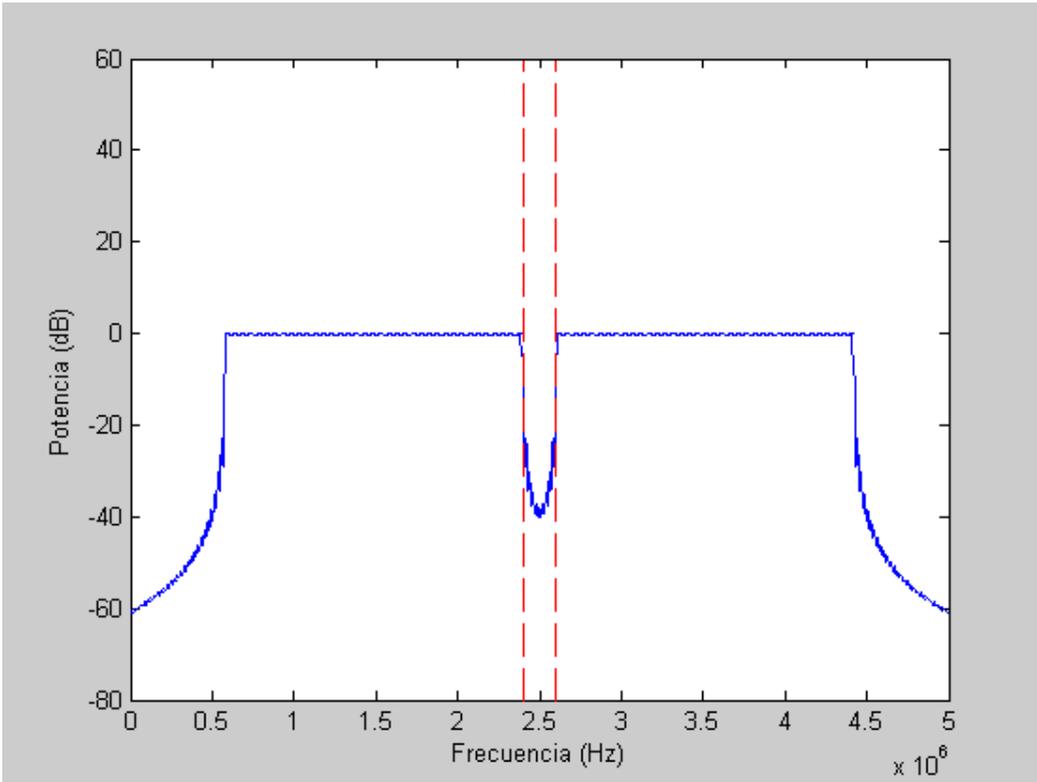
**Figura 3.17:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 8 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



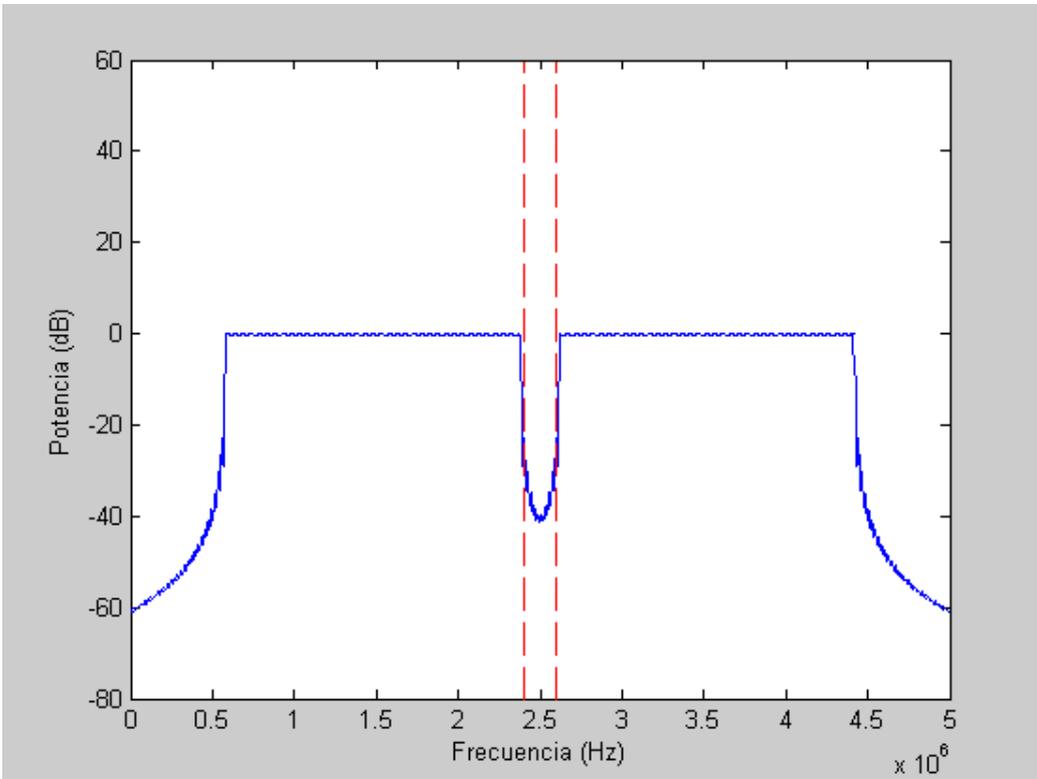
**Figura 3.18:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 10 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



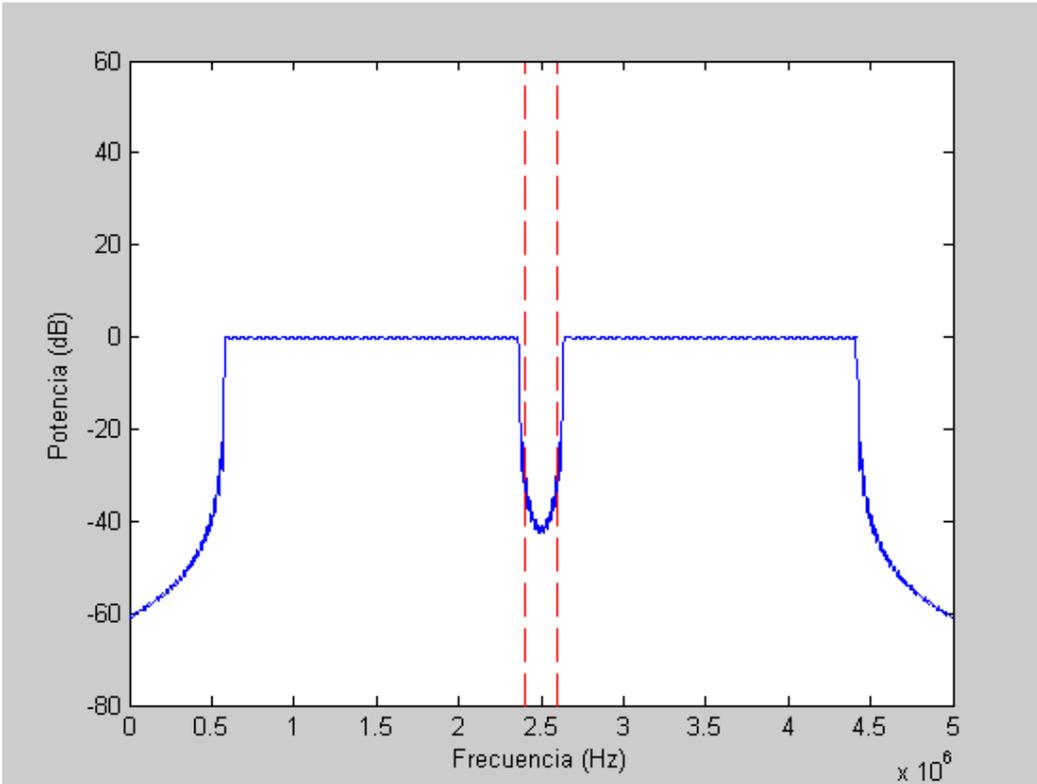
**Figura 3.19:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 12 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



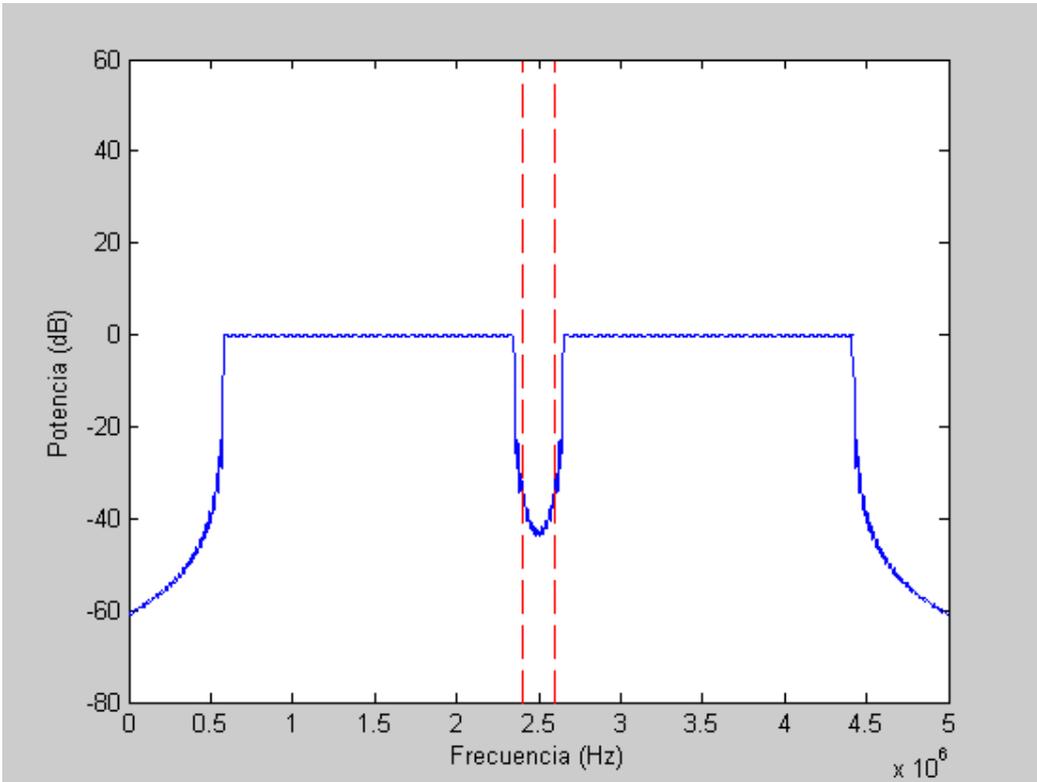
**Figura 3.20:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 14 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.21:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 16 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.22:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 18 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.23:** Espectro del sistema FDSS para la señal cosenoidal al eliminar las 20 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer

Vamos a comparar la eliminación de portadoras para la señal de entrada cosenoidal y para la señal Gaussiana cuando la señal de Jammer tiene una anchura de banda de 200 KHz. Presentamos los resultados para ambos tipos de señales para relaciones  $(J/S)_{ini}$  a las cuales el sistema FDSS presente capacidad.

A partir de las Tablas 3.9 y 3.10 se observa que para relaciones  $(J/S)_{ini}$  bajas se eliminan únicamente aquellas portadoras que se encuentran afectadas directamente por el Jammer, esto es, se encuentran dentro del ancho de banda del Jammer. A medida que  $(J/S)_{ini}$  aumenta, la potencia interferente sobre la banda atacada es mayor, por lo que es necesario eliminar una mayor proporción de esta potencia de Jammer. Esto se consigue realizando un filtrado más exhaustivo sobre dicha banda de frecuencias, para lo cual necesitan eliminarse portadoras que no se encuentran afectadas directamente por la potencia del Jammer. Debido a las mejores prestaciones de la señal Gaussiana en cuanto a que concentra una potencia mucho menor en sus lóbulos secundarios, empleando esta señal como entrada del sistema FDSS es posible realizar un filtrado semejante al que se consigue con la señal cosenoidal eliminando un menor número de portadoras del sistema. Es por ello por lo que el sistema FDSS presenta una mayor capacidad para valores  $(J/S)_{ini}$  elevados y es capaz de soportar relaciones  $(J/S)_{ini}$  mayores presentando cierta capacidad con el empleo de la señal Gaussiana.

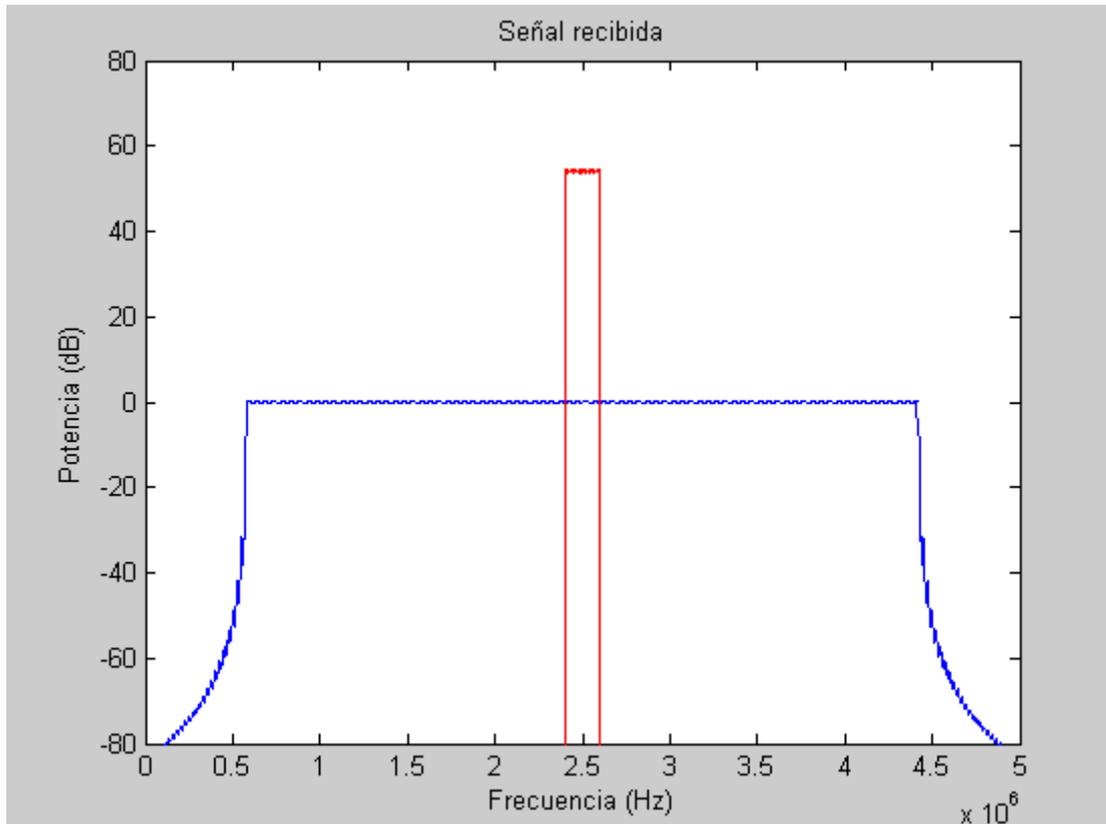
**Tabla 3.9:** Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal cosenoidal para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz y su anchura de banda es 200KHz.

$(J/S)_{ini}$ (dB)	$N_p$	$W_{sn}$
5	2	0,0078
10	14	0,0547
15	14	0,0547
20	14	0,0547
25	16	0,0625
30	16	0,0625
35	18	0,0703
40	20	0,0781
45	26	0,1016
50	32	0,1250
55	42	0,1641
60	56	0,2188
65	80	0,3125
70	110	0,4297

**Tabla 3.10:** Portadoras y ancho de banda eliminado del sistema FDSS en función de la potencia de Jammer para una señal Gaussiana para la transmisión de señales de voz. La interferencia de Jammer está centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz y su anchura de banda es 200KHz.

$(J/S)_{ini}$ (dB)	Np	Wsn
5	0	0
10	14	0,0547
15	14	0,0547
20	14	0,0547
25	16	0,0625
30	16	0,0625
35	16	0,0625
40	18	0,0703
45	18	0,0703
50	22	0,0859
55	24	0,0938
60	28	0,1094
65	32	0,1250
70	38	0,1484
75	48	0,1875
80	60	0,2344
85	78	0,3047
90	100	0,3906
95	130	0,5078

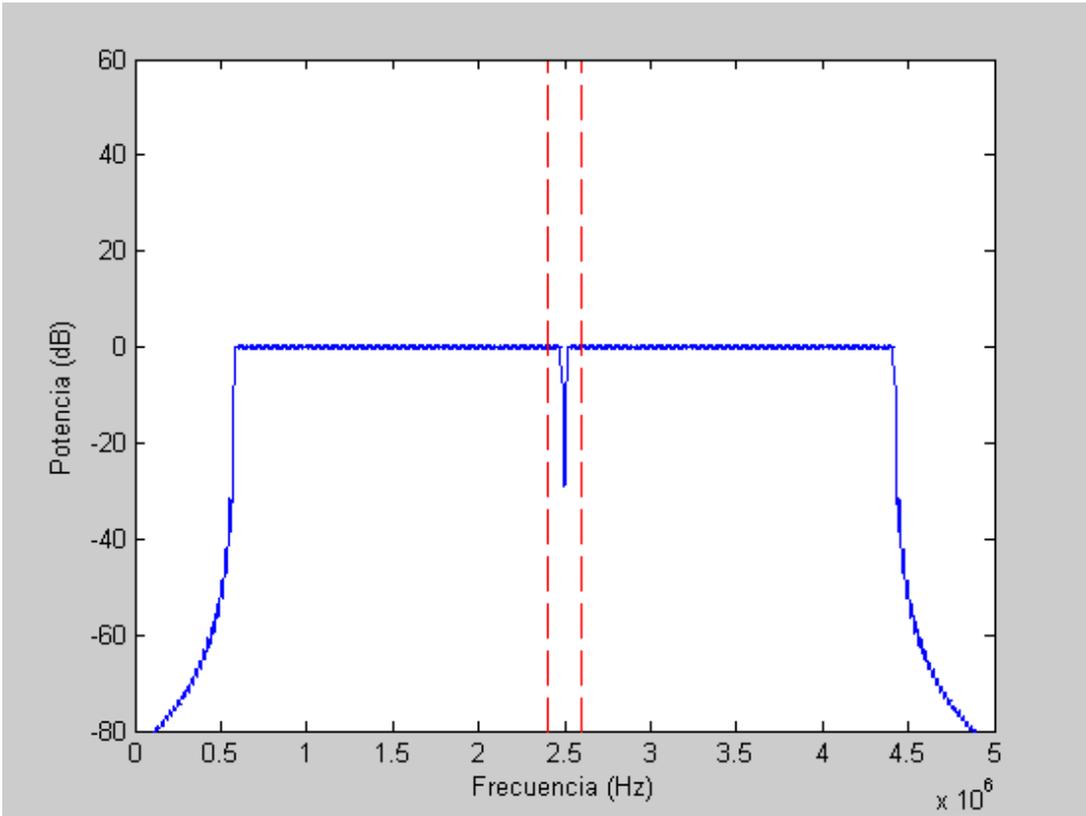
A continuación se muestra gráficamente el funcionamiento del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana para una anchura del Jammer de 0.2 MHz con la siguiente relación inicial  $\left(\frac{J}{S}\right)_{ini} = 40dB$ . En la Figura 3.24 se muestra la señal recibida inicialmente en el receptor.



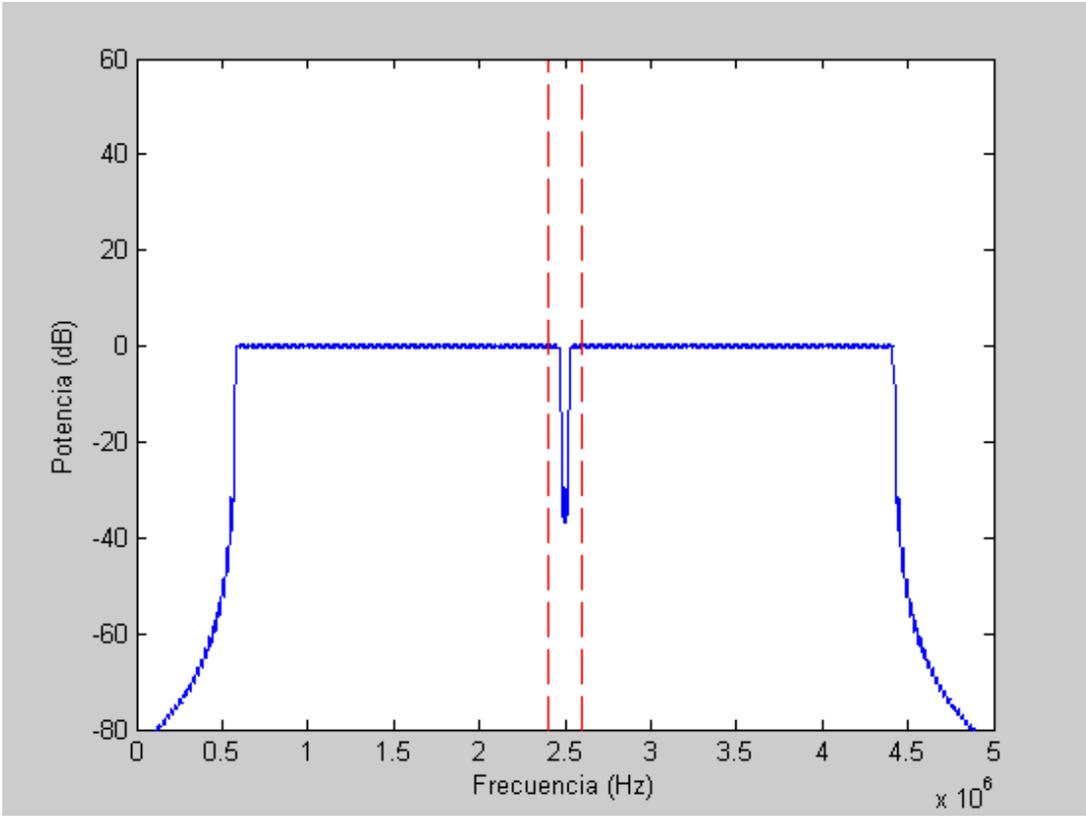
**Figura 3.24:** Espectro de la señal recibida en el receptor para la señal de entrada Gaussiana con una señal de Jammer de 200 KHz de ancho de banda centrada sobre  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de voz

En las Figuras 3.25 a 3.33 mostramos el funcionamiento del sistema FDSS para maximizar la capacidad del sistema. La Figura 3.33 nos muestra el óptimo de capacidad del sistema para la potencia interferente empleada en un ancho de banda de 0.2 MHz.

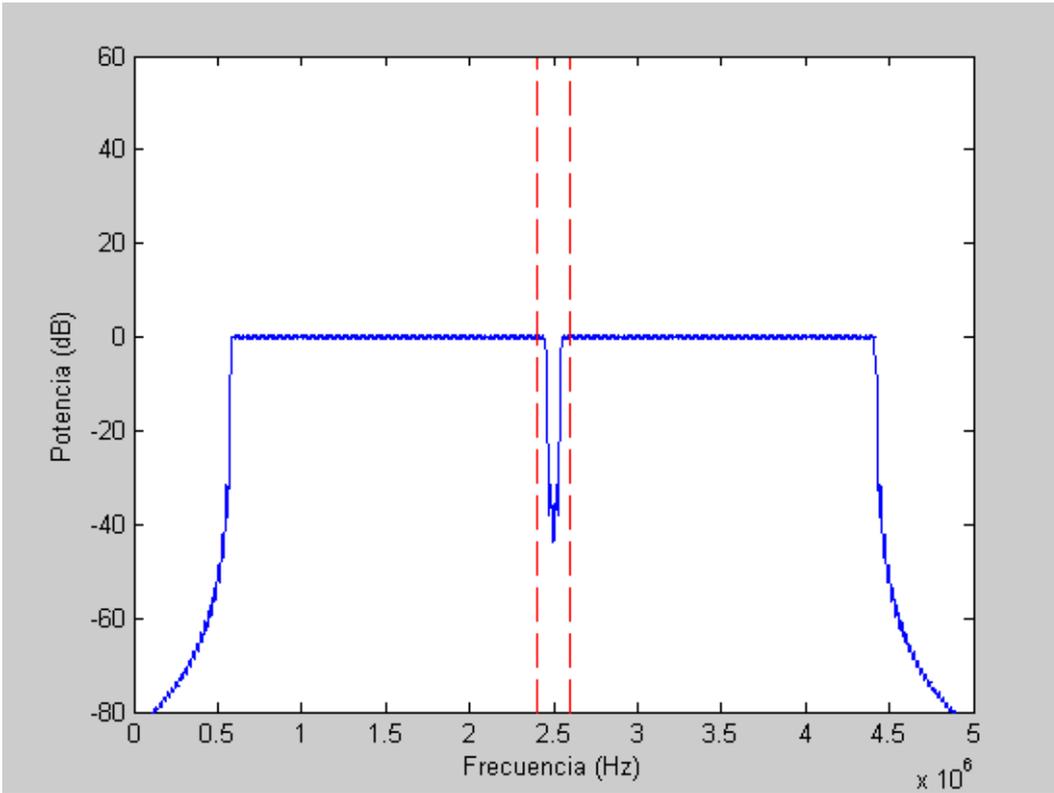
A partir de las Figuras 3.22 y 3.33 se observan las diferencias en el filtrado con el empleo de la señal cosenoidal y la Gaussiana cuando el sistema FDSS ha eliminado 18 portadoras. Para la señal Gaussiana el filtrado realizado por el sistema en la banda donde se encuentra el Jammer al eliminar estas 18 portadoras es mayor que el filtrado realizado para la señal cosenoidal. Existen varios decibelios de diferencia, esto permite una reducción de la potencia interferente mayor para el caso de la señal Gaussiana eliminando el mismo número de portadoras del sistema, lo que se traduce en una mayor capacidad del mismo para idénticas señales de Jammer.



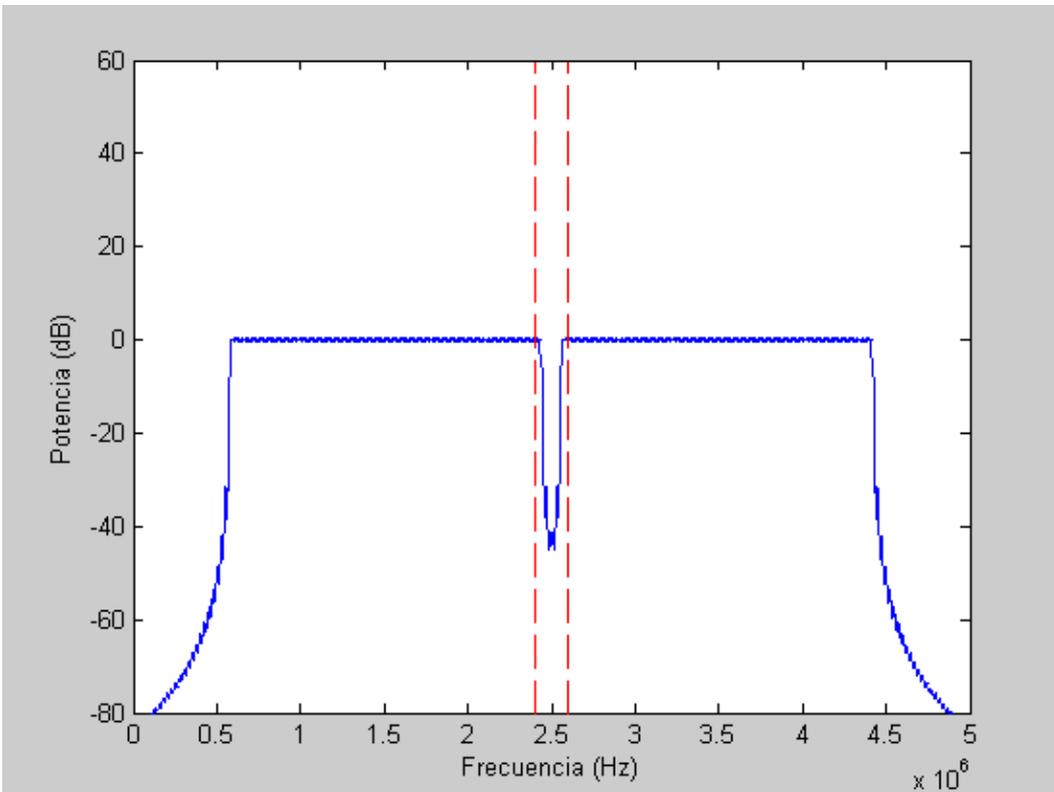
**Figura 3.25:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 2 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



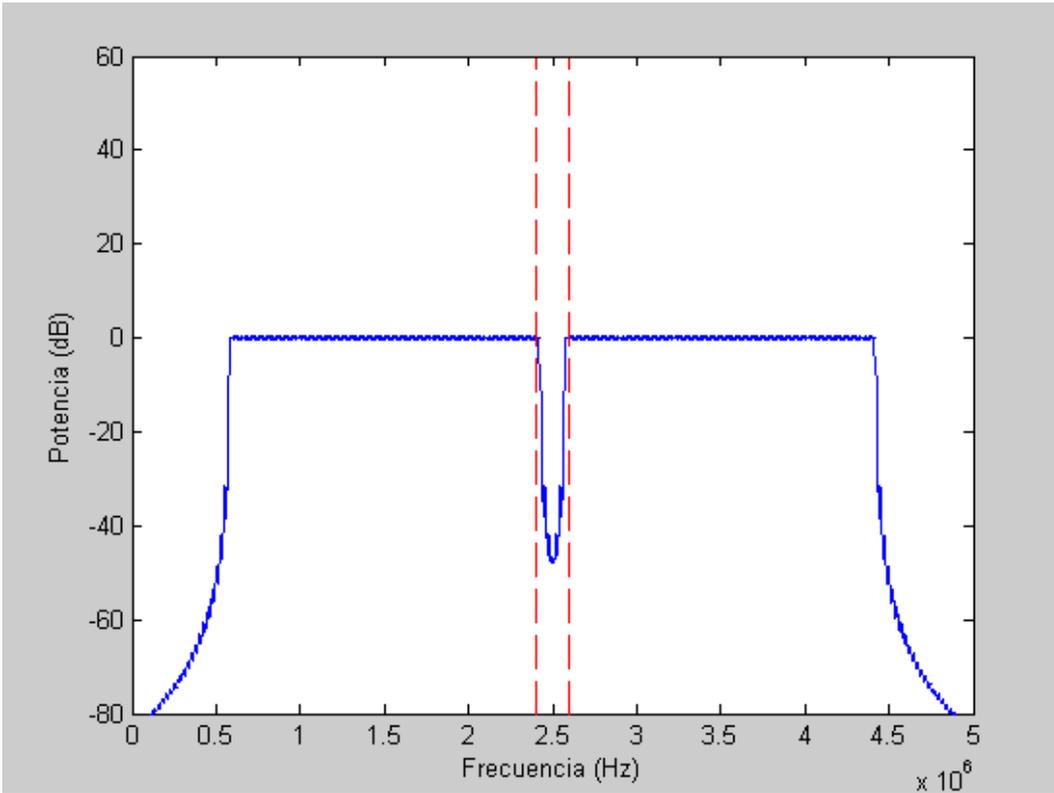
**Figura 3.26:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 4 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



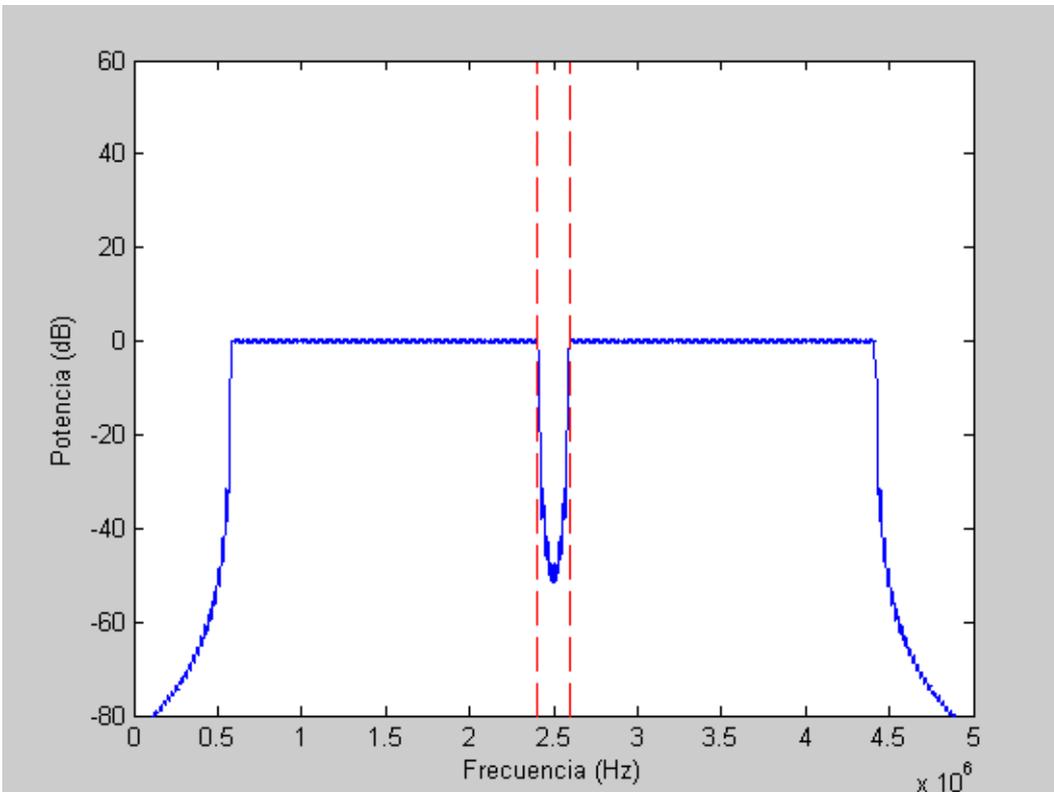
**Figura 3.27:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 6 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



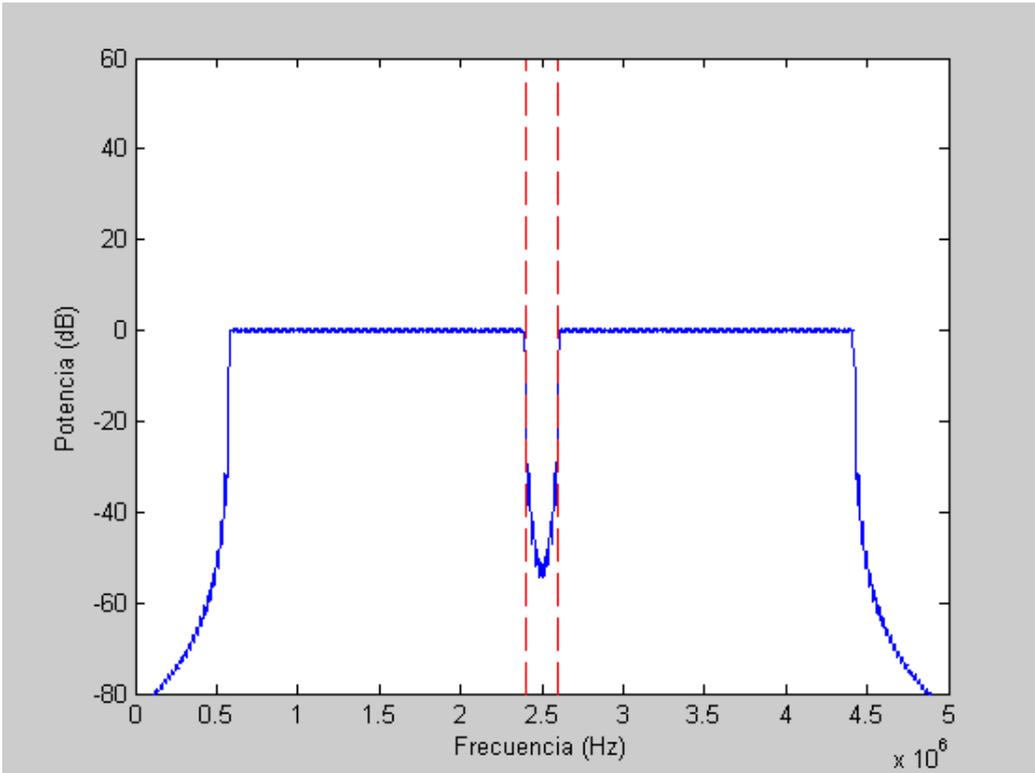
**Figura 3.28:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 8 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



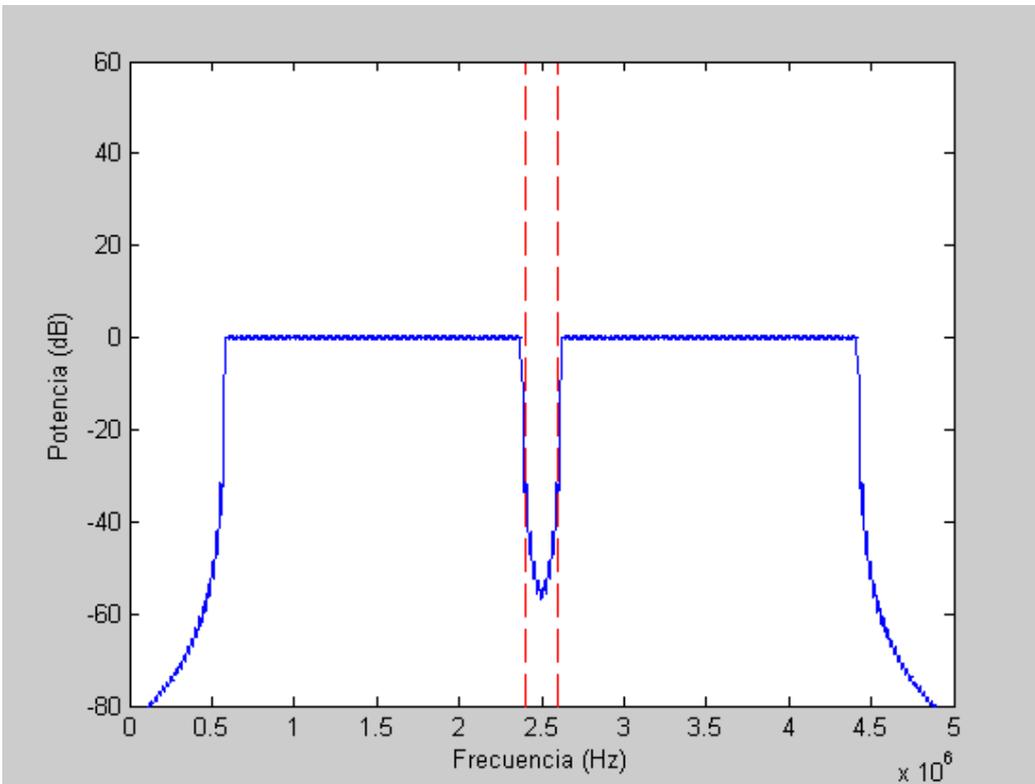
**Figura 3.29:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 10 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



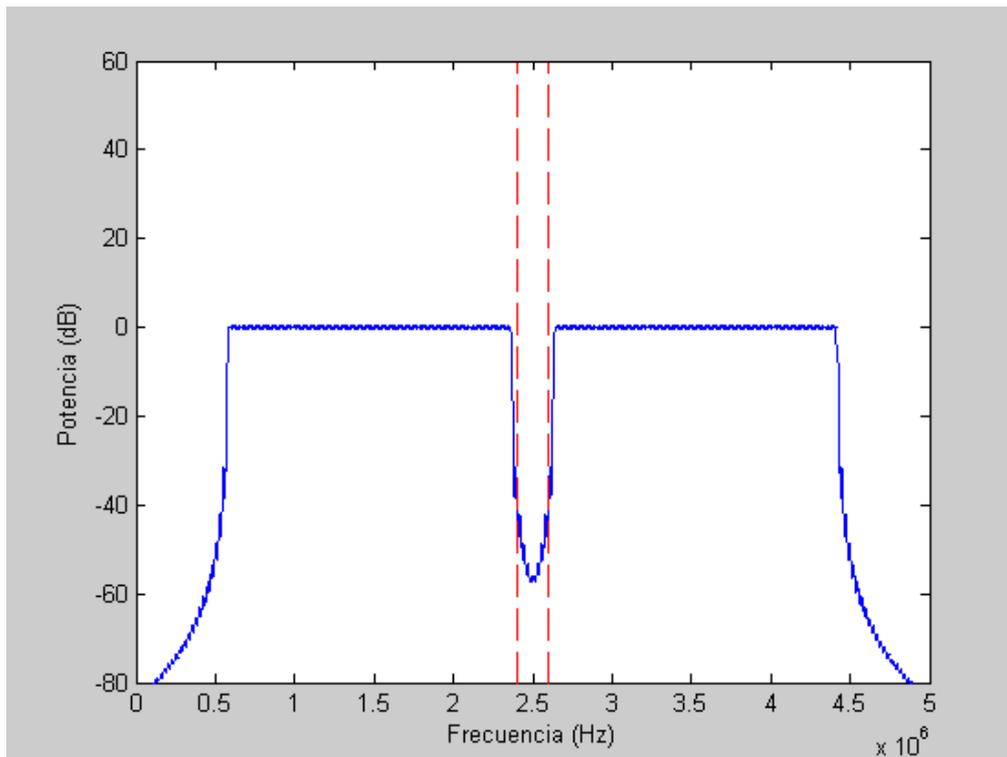
**Figura 3.30:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 12 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.31:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 14 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.32:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 16 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer



**Figura 3.33:** Espectro del sistema FDSS para la señal Gaussiana al eliminar las 18 portadoras centrales. Se muestra con líneas discontinuas la posición del Jammer

### 3.2.4. Resultados obtenidos con el Jammer no centrado sobre la frecuencia central del sistema FDSS

En un segundo escenario hemos atacado el sistema con una señal de Jammer de anchura de banda constante y la hemos situado en diferentes posiciones a lo largo del ancho de banda del sistema FDSS. Se muestran las frecuencias inferior y superior donde se encuentra la señal de Jammer una vez trasladada a banda base en el receptor:

- $f_{inf} = 0MHz$  y  $f_{sup} = 0.2MHz$
- $f_{inf} = 0.4MHz$  y  $f_{sup} = 0.6MHz$
- $f_{inf} = 1.6MHz$  y  $f_{sup} = 1.8MHz$
- $f_{inf} = 2.0MHz$  y  $f_{sup} = 2.2MHz$
- $f_{inf} = 2.4MHz$  y  $f_{sup} = 2.6MHz$
- $f_{inf} = 2.8MHz$  y  $f_{sup} = 3.0MHz$
- $f_{inf} = 3.2MHz$  y  $f_{sup} = 3.4MHz$
- $f_{inf} = 4.4MHz$  y  $f_{sup} = 4.6MHz$
- $f_{inf} = 4.8MHz$  y  $f_{sup} = 5.0MHz$

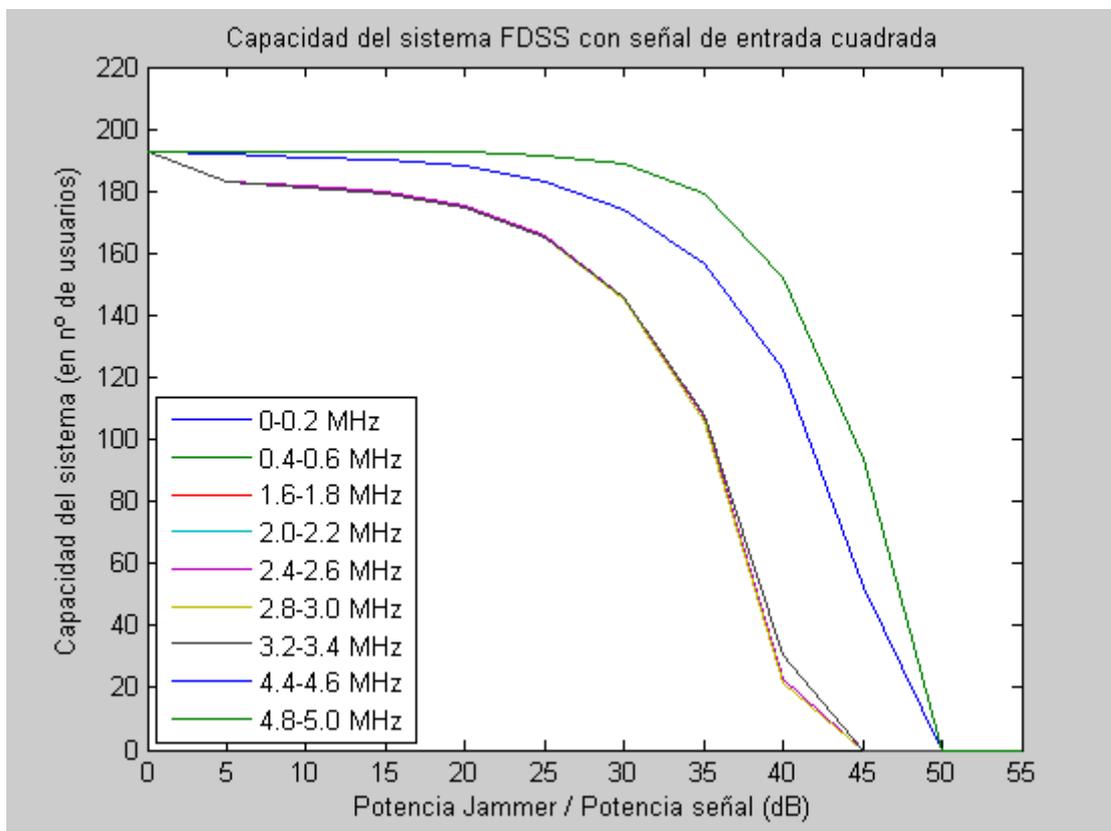
A partir de la Figura 3.34 y de los resultados obtenidos, podemos ver que a 50 dB el sistema FDSS no tiene ninguna capacidad independientemente de a que frecuencias esté situada la señal de Jammer con el empleo de una entrada rectangular.

De los resultados de la simulación se aprecia que la capacidad es menor cuanto más centrada esté la señal de Jammer respecto de la frecuencia central del sistema FDSS.

Podemos ver que existe simetría respecto a la frecuencia central del sistema FDSS. De esta manera, en la Figura 3.34 hay superposición de curvas.

Dentro del ancho de banda de paso del sistema no se observan grandes diferencias en función de donde se encuentra el Jammer, aumentando ligeramente la capacidad a medida que la señal interferente se encuentra menos centrada dentro de la banda de paso.

Otro hecho destacable es que el sistema FDSS se satura antes cuando la señal de Jammer se encuentra sobre la banda de paso que cuando el ataque se produce fuera de la misma. Es consecuencia de que el propio sistema se comporta como un filtro paso banda, reduciendo la interferencia fuera de su ancho de banda de paso.



**Figura 3.34:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

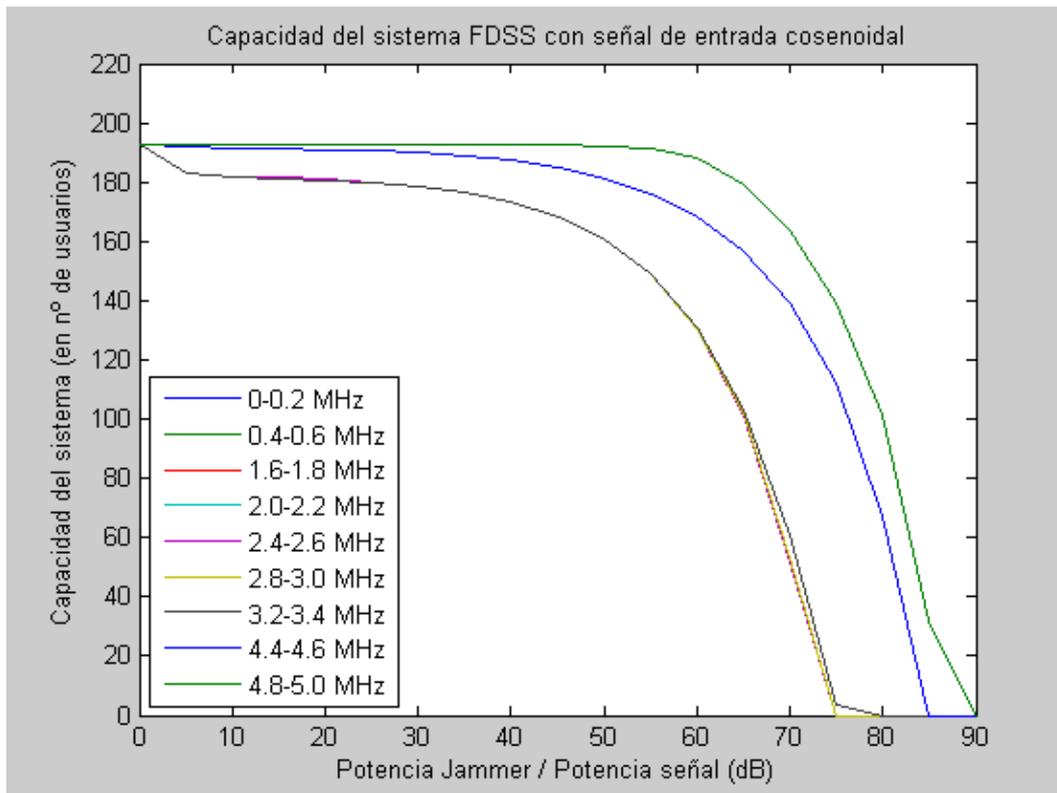
**Tabla 3.11:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77	192,77
<b>5dB</b>	192,76	191,75	183,25	183,25	183,25	183,25	183,25	191,74	192,76
<b>10dB</b>	192,73	190,91	181,24	181,24	181,44	181,24	181,25	190,91	192,73
<b>15dB</b>	192,64	190,14	179,10	179,11	179,73	179,10	179,12	190,13	192,64
<b>20dB</b>	192,35	187,93	174,65	174,62	175,09	174,61	174,66	187,93	192,35
<b>25dB</b>	191,44	183,30	164,96	164,82	165,34	164,81	164,97	183,30	191,44
<b>30dB</b>	188,55	174,15	145,65	145,15	145,85	145,13	145,66	174,15	188,55
<b>35dB</b>	179,44	156,66	107,72	105,77	106,80	105,74	107,75	156,66	179,44
<b>40dB</b>	152,13	122,79	30,30	21,40	22,53	21,34	30,34	122,80	152,12
<b>45dB</b>	93,53	52,48	0	0	0	0	0	52,52	93,52
<b>50dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 3.35 se muestra la capacidad del sistema en número de usuarios con una entrada cosenoidal en función de una potencia de Jammer que situamos en distintas posiciones sobre la banda del sistema FDSS. Para esta señal de entrada, independientemente de la posición del Jammer, la capacidad del sistema es mayor respecto a la capacidad que presenta el sistema con la señal de entrada rectangular.

Podemos ver que el filtrado inicial que realiza el sistema FDSS fuera de la banda de paso resulta en que el sistema es capaz de soportar interferencias de una potencia de hasta 15 dB superior a lo que resiste el sistema cuando la señal de Jammer está centrada en la frecuencia central del sistema. Si comparamos estos resultados con los obtenidos con el empleo de la señal rectangular cuando el Jammer está fuera de la banda de paso del sistema FDSS, este es capaz de proporcionar mejores prestaciones. Esto es debido a que el filtrado que realiza el sistema fuera de la banda de paso para la señal cosenoidal es mejor como consecuencia de la menor potencia de los lóbulos secundarios de esta señal frente a los de la señal rectangular.

Sobre la banda de paso del sistema también existen diferencias, si bien la capacidad no varía mucho, es destacable que el sistema FDSS se satura 5 dB antes cuando la señal está centrada en la frecuencia central que cuando se encuentra sobre una banda de 1.6-1.8 MHz. Nuevamente se observa la superposición de curvas como consecuencia de la simetría existente respecto la frecuencia central del mismo, ( $f_p+2.5$ ) MHz.



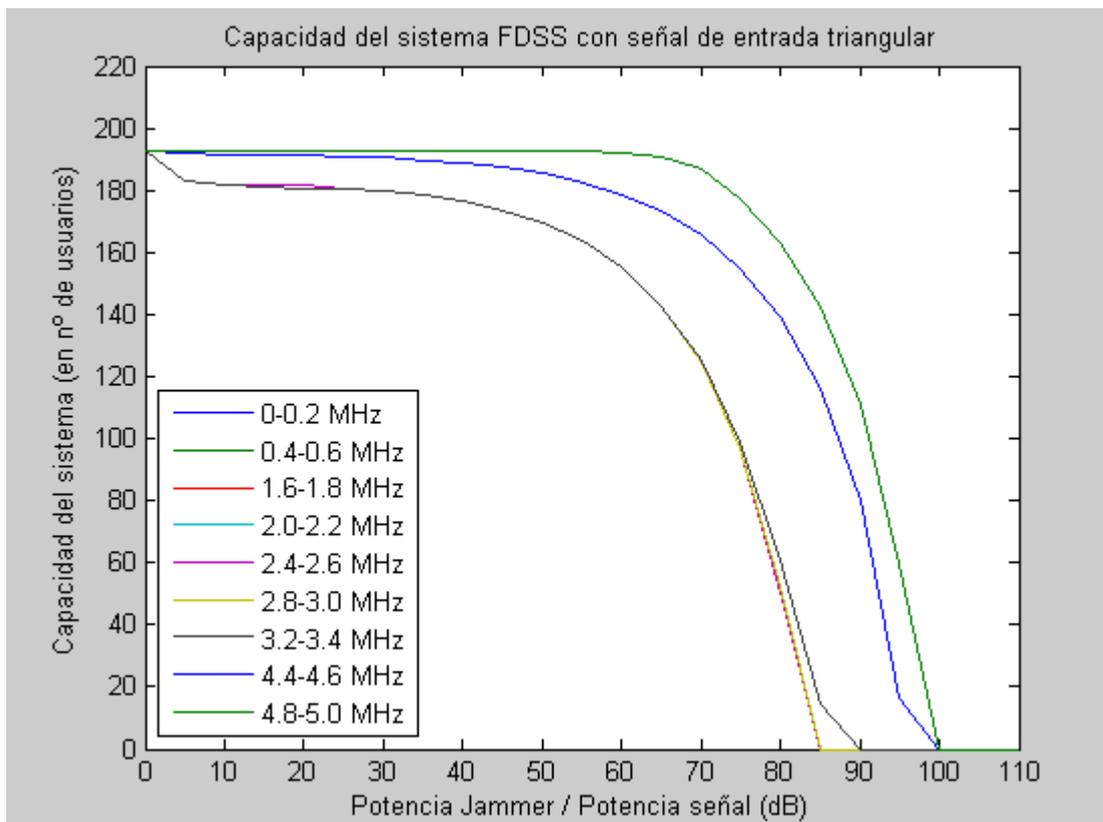
**Figura 3.35:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.12:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bw <sub>jammer</sub> (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63
<b>5dB</b>	192,63	191,72	183,20	183,20	183,17	183,20	183,20	191,72	192,63
<b>10dB</b>	192,63	191,11	181,83	181,83	182,00	181,83	181,83	191,11	192,63
<b>15dB</b>	192,63	191,09	181,27	181,30	181,83	181,28	181,29	191,09	192,63
<b>20dB</b>	192,63	191,00	180,40	180,40	181,29	180,40	180,40	191,00	192,63
<b>25dB</b>	192,63	190,73	180,01	180,01	179,95	180,01	180,01	190,73	192,63
<b>30dB</b>	192,63	189,87	178,78	178,78	178,60	178,78	178,78	189,86	192,63
<b>35dB</b>	192,62	188,72	176,75	176,76	176,79	176,76	176,76	188,71	192,62
<b>40dB</b>	192,59	187,28	173,26	173,27	173,55	173,26	173,27	187,28	192,59
<b>45dB</b>	192,49	184,84	168,21	168,20	168,26	168,20	168,21	184,84	192,49
<b>50dB</b>	192,20	181,30	160,48	160,45	160,40	160,45	160,48	181,30	192,20
<b>55dB</b>	191,26	175,92	148,72	148,61	148,65	148,61	148,72	175,91	191,26
<b>60dB</b>	188,28	168,11	130,84	130,45	130,39	130,45	130,84	168,11	188,28
<b>65dB</b>	179,24	156,58	103,38	101,79	101,46	101,79	103,38	156,57	179,23
<b>70dB</b>	163,49	139,26	60,77	53,15	51,55	53,15	60,77	139,26	163,48
<b>75dB</b>	139,48	112,42	3,45	0	0	0	3,44	112,41	139,47
<b>80dB</b>	101,04	67,52	0	0	0	0	0	67,52	101,04
<b>85dB</b>	31,99	0	0	0	0	0	0	0	31,98
<b>90dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 3.36 se muestra la capacidad del sistema FDSS cuando la señal de entrada empleada es la triangular en función de la potencia interferente para Jammers situados en distintas bandas de frecuencia. Se observa a partir de los resultados que el sistema FDSS se satura entre los 85 y los 100 dB en función de la banda de frecuencias que ataca la señal de Jammer.

A partir de la Tabla 3.13 podemos apreciar que existe un aumento de 15 dB en la resistencia del sistema a la interferencia de Jammer cuando dicha señal está fuera de la banda de paso, respecto a aquella que se encuentra sobre la frecuencia central del sistema. Nuevamente, este hecho es una consecuencia del filtrado paso banda que realiza el propio sistema FDSS. Entre los Jammers que están en la zona donde se encuentran las portadoras del sistema, cuanto más centrado esté el Jammer menor será la capacidad. Sin embargo, esto es únicamente apreciable en situaciones de muy alta interferencia. Para entornos donde la señal de Jammer no tenga una potencia mayor de 70 dB de la del sistema tenemos capacidades similares independientemente de la posición de la señal de Jammer siempre que esta se encuentre sobre la banda de paso.



**Figura 3.36:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.13:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)									
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0	
<b>Sin interferencia</b>	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63	192,63
<b>5dB</b>	192,63	191,72	183,18	183,18	183,16	183,18	183,18	183,18	191,71	192,63
<b>10dB</b>	192,63	191,12	181,84	181,84	182,01	181,84	181,84	181,84	191,12	192,63
<b>15dB</b>	192,63	191,10	181,31	181,33	181,87	181,32	181,33	181,33	191,10	192,63
<b>20dB</b>	192,63	191,06	180,49	180,49	181,42	180,49	180,49	180,49	191,06	192,63
<b>25dB</b>	192,63	190,93	180,32	180,32	180,29	180,33	180,32	180,32	190,93	192,63
<b>30dB</b>	192,63	190,52	179,79	179,79	179,68	179,79	179,79	179,79	190,52	192,63
<b>35dB</b>	192,63	189,60	178,26	178,27	178,33	178,27	178,27	178,27	189,60	192,63
<b>40dB</b>	192,62	188,69	176,53	176,54	176,75	176,54	176,54	176,54	188,69	192,62
<b>45dB</b>	192,61	187,48	173,61	173,61	173,67	173,61	173,61	173,61	187,48	192,61
<b>50dB</b>	192,57	185,39	169,53	169,53	169,63	169,53	169,53	169,53	185,39	192,57
<b>55dB</b>	192,45	182,67	163,65	163,64	163,68	163,64	163,65	163,65	182,67	192,45
<b>60dB</b>	192,06	178,71	155,12	155,09	155,16	155,09	155,12	155,12	178,70	192,06
<b>65dB</b>	190,83	173,26	142,77	142,66	142,68	142,66	142,77	142,77	173,26	190,83
<b>70dB</b>	186,95	165,51	124,90	124,49	124,45	124,49	124,91	124,91	165,50	186,94
<b>75dB</b>	177,16	154,60	98,67	96,95	96,63	96,95	98,67	98,67	154,59	177,16
<b>80dB</b>	162,85	139,05	60,65	52,13	50,47	52,13	60,64	60,64	139,05	162,84
<b>85dB</b>	142,17	116,12	14,21	0	0	0	14,21	14,21	116,12	142,17
<b>90dB</b>	110,98	80,26	0	0	0	0	0	0	80,25	110,97
<b>95dB</b>	59,71	16,62	0	0	0	0	0	0	16,61	59,70
<b>100dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

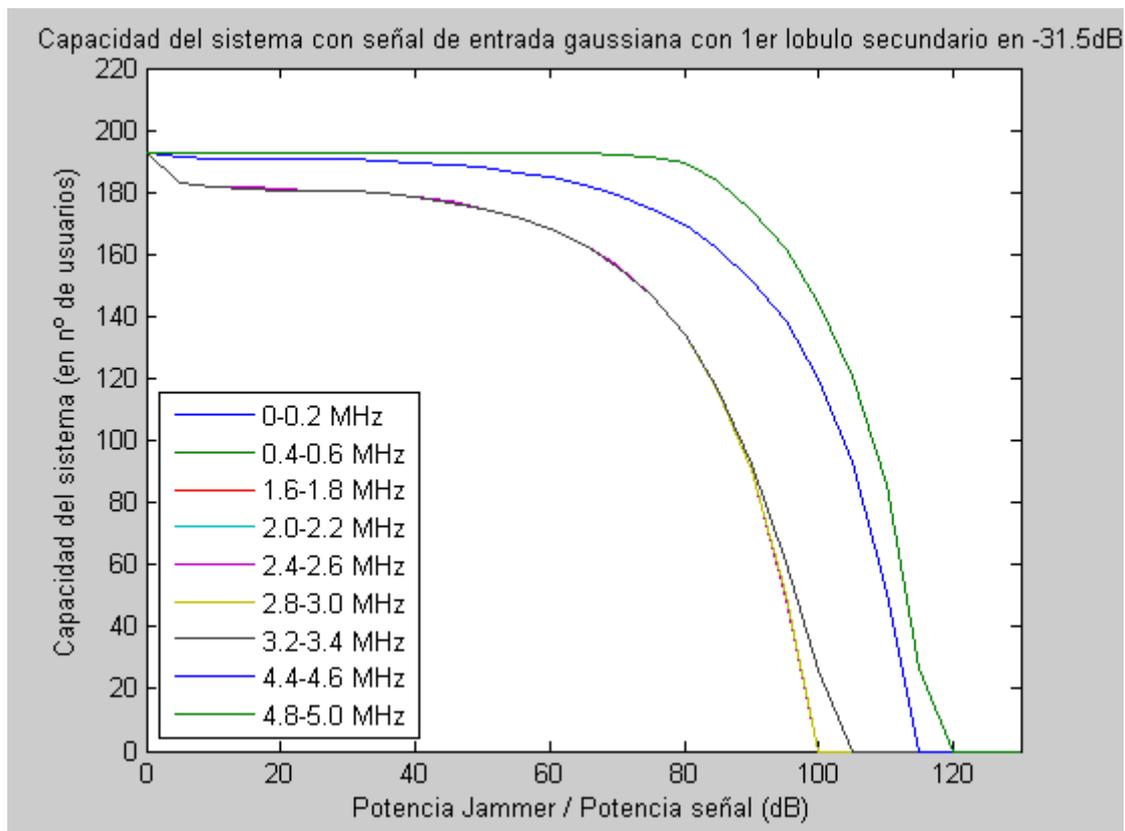
En la Figura 3.37 y la Tabla 3.14 se muestra la capacidad del sistema FDSS en número de usuarios para una señal de entrada Gaussiana en función de la potencia de Jammer para señales interferentes situadas en distintas posiciones de la banda de frecuencias empleada por el sistema FDSS.

Al igual que para el resto de las señales de entrada, se cumplen los mismos patrones para este tipo de señal.

En este caso, el sistema FDSS es capaz de proporcionar capacidad para relaciones JSR de hasta 115 dB.

Fuera del ancho de banda de paso del sistema, este es capaz de soportar interferencias de hasta 20 dB mayores que cuando la señal de Jammer está dentro de la banda de paso. Comprobamos nuevamente la importancia de los lóbulos secundarios, cuya menor potencia resulta en un mejor filtrado fuera de la banda de paso del sistema.

También vemos que para señales interferentes de elevada potencia la capacidad del sistema aumenta según el Jammer se encuentra menos centrado dentro de la banda de paso del sistema.



**Figura 3.37:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz

**Tabla 3.14:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de voz

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56	192,56
<b>5dB</b>	192,56	191,61	183,04	183,04	183,04	183,04	183,04	191,61	192,56
<b>10dB</b>	192,56	191,05	181,74	181,74	181,93	181,74	181,74	191,05	192,56
<b>15dB</b>	192,56	191,05	181,15	181,17	181,76	181,16	181,17	191,05	192,56
<b>20dB</b>	192,56	191,02	180,47	180,47	181,21	180,47	180,47	191,02	192,56
<b>25dB</b>	192,56	190,95	180,41	180,41	180,41	180,41	180,41	190,95	192,56
<b>30dB</b>	192,56	190,74	180,22	180,22	180,22	180,22	180,22	190,73	192,56
<b>35dB</b>	192,56	190,04	179,61	179,61	179,63	179,61	179,61	190,02	192,56
<b>40dB</b>	192,56	189,36	178,20	178,21	178,43	178,21	178,21	189,36	192,56
<b>45dB</b>	192,56	188,95	176,57	176,57	177,21	176,57	176,57	188,95	192,56
<b>50dB</b>	192,56	187,86	174,66	174,66	174,72	174,66	174,66	187,86	192,56
<b>55dB</b>	192,55	186,50	171,93	171,93	172,06	171,93	171,93	186,50	192,55
<b>60dB</b>	192,53	184,66	168,26	168,26	168,35	168,26	168,26	184,66	192,53
<b>65dB</b>	192,47	182,36	163,20	163,20	163,28	163,20	163,20	182,36	192,47
<b>70dB</b>	192,26	179,15	156,27	156,27	156,33	156,27	156,28	179,15	192,26
<b>75dB</b>	191,61	174,88	146,94	146,91	146,94	146,91	146,94	174,87	191,61
<b>80dB</b>	189,56	169,25	134,12	134,00	133,99	134,00	134,12	169,25	189,56
<b>85dB</b>	183,50	161,76	116,60	116,12	116,08	116,12	116,60	161,76	183,50
<b>90dB</b>	174,18	151,80	92,35	90,39	90,08	90,39	92,35	151,80	174,17
<b>95dB</b>	161,66	138,33	60,92	50,81	49,13	50,81	60,92	138,33	161,66
<b>100dB</b>	144,67	119,75	25,77	0	0	0	25,76	119,75	144,66
<b>105dB</b>	120,87	92,99	0	0	0	0	0	92,99	120,87
<b>110dB</b>	85,67	51,10	0	0	0	0	0	51,10	85,66
<b>115dB</b>	26,98	0	0	0	0	0	0	0	26,97
<b>120dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

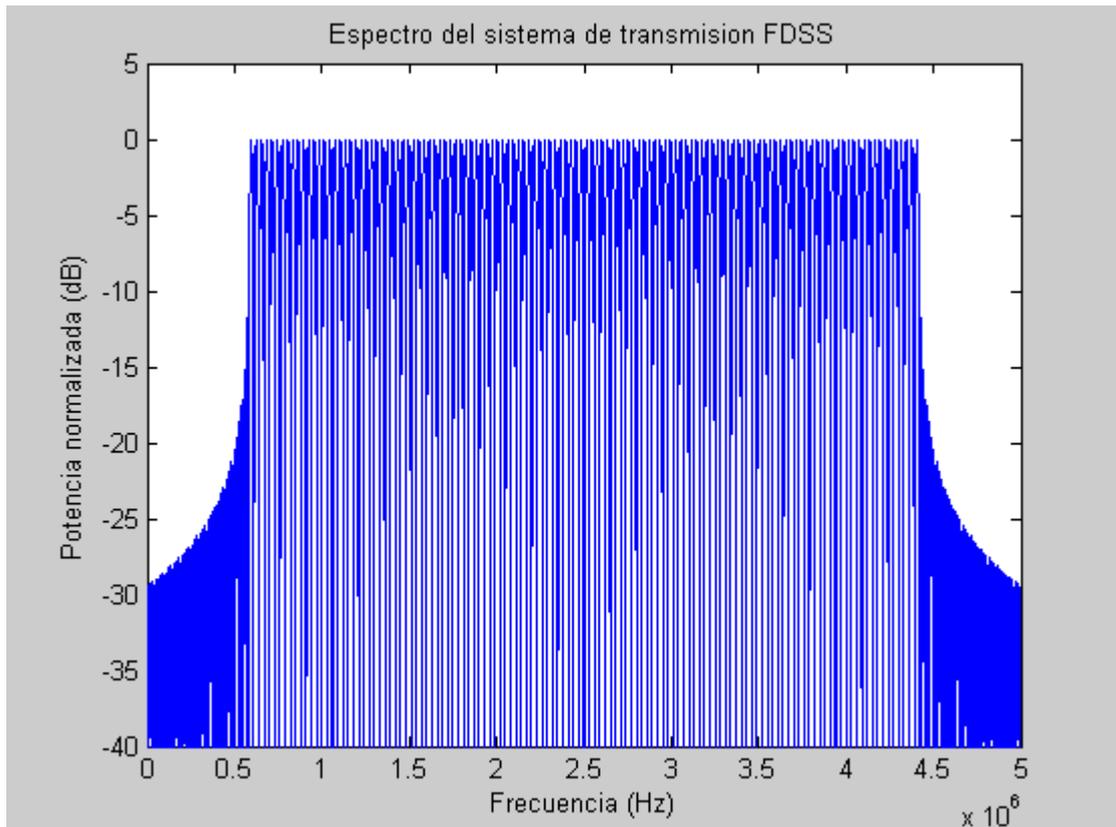
### 3.2.5 Resultados obtenidos al aumentar la separación entre portadoras

Para tratar de aumentar la resistencia del sistema frente al Jammer, se ha aumentado la separación entre portadoras. Para ello, se ha reducido el número de portadoras empleadas por el sistema FDSS, eliminando una de cada dos, es decir, modificando el valor de  $G_p$ , que sería de 128 y manteniendo por tanto la duración del tiempo de bit. De esta forma, la capacidad inicial del sistema se reduce a la mitad.

En la Figura 3.38 se muestra el espectro del sistema FDSS después de haber reducido el número de portadoras empleadas a la mitad.

Al eliminar la mitad de las portadoras el espectro del sistema FDSS presenta un gran rizado en la banda de paso.

La anchura de la banda de paso del sistema es la misma, 3.84 MHz, sin embargo la ganancia del sistema es la mitad al haber modificado  $G_p$ .

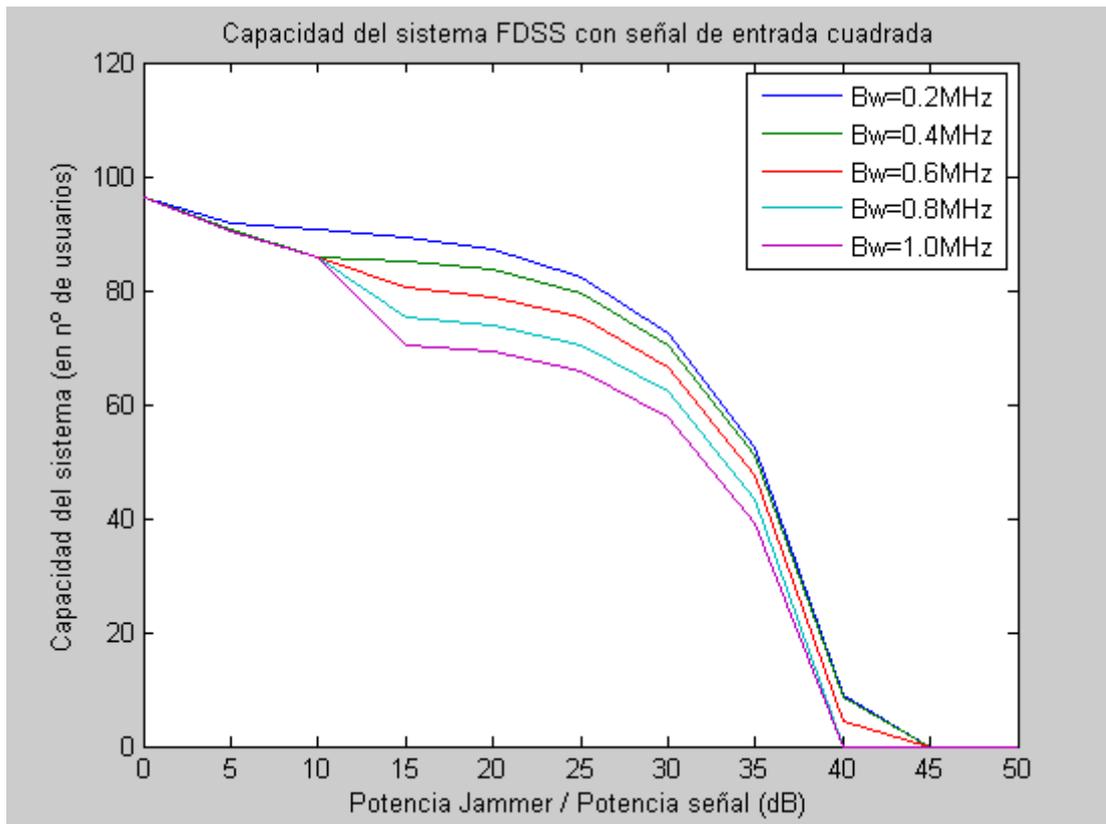


**Figura 3.38:** Espectro del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con 128 portadoras

En la Figura 3.39 mostramos los resultados de capacidad del sistema FDSS para la transmisión de una señal de voz tras haber reducido a la mitad el número de portadoras empleadas.

A partir de los resultados podemos comprobar que inicialmente la capacidad es la mitad. Esto es una consecuencia de la reducción de la ganancia del sistema al haber reducido a la mitad el valor de  $G_p$ . Sin embargo, esta relación en cuanto a la capacidad se mantiene una vez introducida la señal de Jammer.

Por lo tanto el incremento de la separación entre las portadoras del sistema con el fin de obtener mayor resistencia al Jammer no se produce.



**Figura 3.39:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz al reducir la tasa binaria a la mitad

**Tabla 3.15:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de voz al reducir la tasa binaria a la mitad

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
<b>Sin interferencia</b>	96,39	96,39	96,39	96,39	96,39
<b>5dB</b>	91,62	90,60	90,46	90,39	90,22
<b>10dB</b>	90,56	85,62	85,62	85,62	85,62
<b>15dB</b>	89,40	85,12	80,55	75,17	70,28
<b>20dB</b>	87,33	83,56	78,88	73,75	69,19
<b>25dB</b>	82,30	79,33	75,09	70,39	65,76
<b>30dB</b>	72,37	70,27	66,50	62,13	57,78
<b>35dB</b>	52,34	51,11	47,66	43,43	39,14
<b>40dB</b>	8,85	8,56	4,47	0	0
<b>45dB</b>	0	0	0	0	0
<b>50dB</b>	0	0	0	0	0

### 3.3. Transmisión de señales de datos

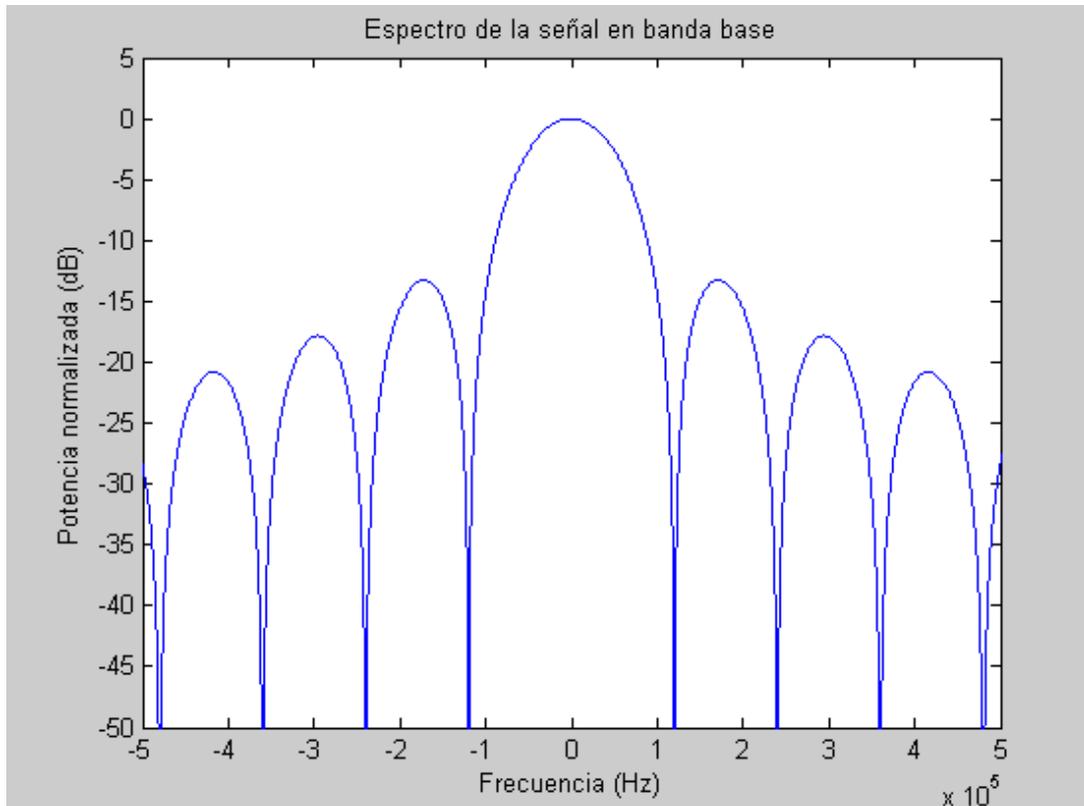
#### 3.3.1. Señales de entrada empleadas

Las mismas simulaciones se han realizado para la transmisión de una señal de datos.

Se ha partido de un pulso rectangular de duración  $T_b = \frac{1}{120 \cdot 10^3}$  (s) y a partir de este se han generado los otros 3 tipos de señales de entrada a través de un filtrado.

En la Figura 3.40 se observa el espectro de la señal rectangular en banda base para la transmisión de señales de datos.

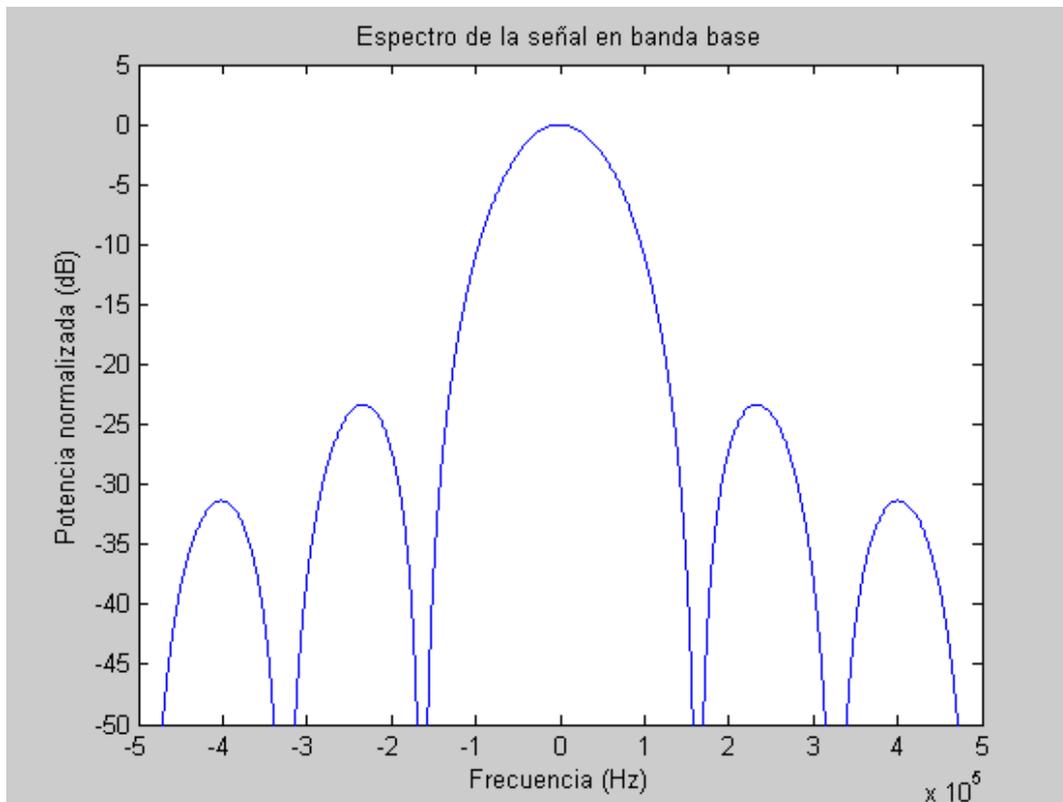
Esta señal presenta un lóbulo principal de anchura 240 KHz, mientras que sus lóbulos secundarios presentan una anchura de banda de 120 KHz. Así mismo, presenta una atenuación en su primer lóbulo secundario de 13.2 dB respecto al lóbulo principal según se observa en la Tabla 3.16. Al igual que ocurría para este tipo de señal de entrada en la transmisión de señales de voz, la elevada potencia en sus lóbulos secundarios constituye la principal desventaja de este tipo de señal.



**Figura 3.40:** Espectro en banda base de la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos

En la Figura 3.41 se muestra el espectro de la señal cosenoidal empleada para el servicio de datos.

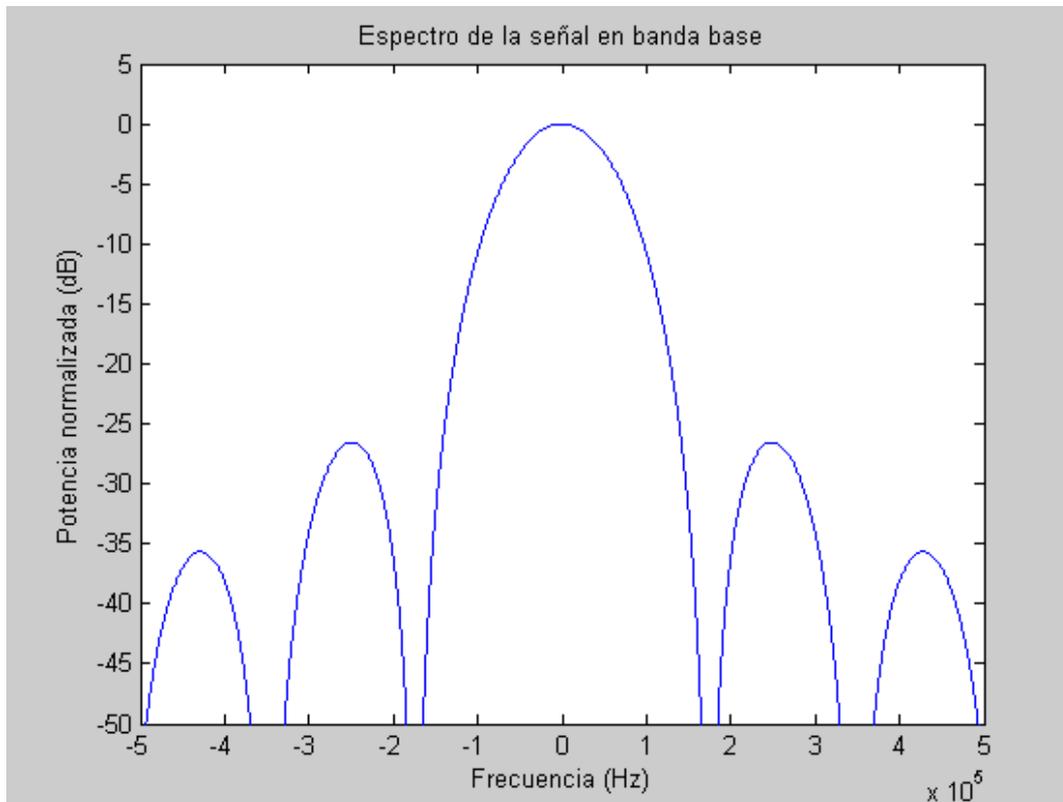
A partir de los resultados de la Tabla 3.16 se observa que la anchura del lóbulo principal es de 320 KHz, y la potencia del primer lóbulo secundario es 23.3 dB menor que la del principal. El incremento en la anchura del lóbulo principal supone una desventaja respecto a la señal rectangular al suponer una mayor interferencia entre las diferentes portadoras. Esto es debido a la propia constitución del sistema FDSS para el servicio de datos, donde dos portadoras consecutivas se encuentran separadas 120 KHz. Sin embargo, la mayor atenuación en sus lóbulos secundarios respecto de la señal rectangular constituye una importante ventaja al concentrarse una mayor potencia en el lóbulo principal.



**Figura 3.41:** Espectro en banda base de la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos

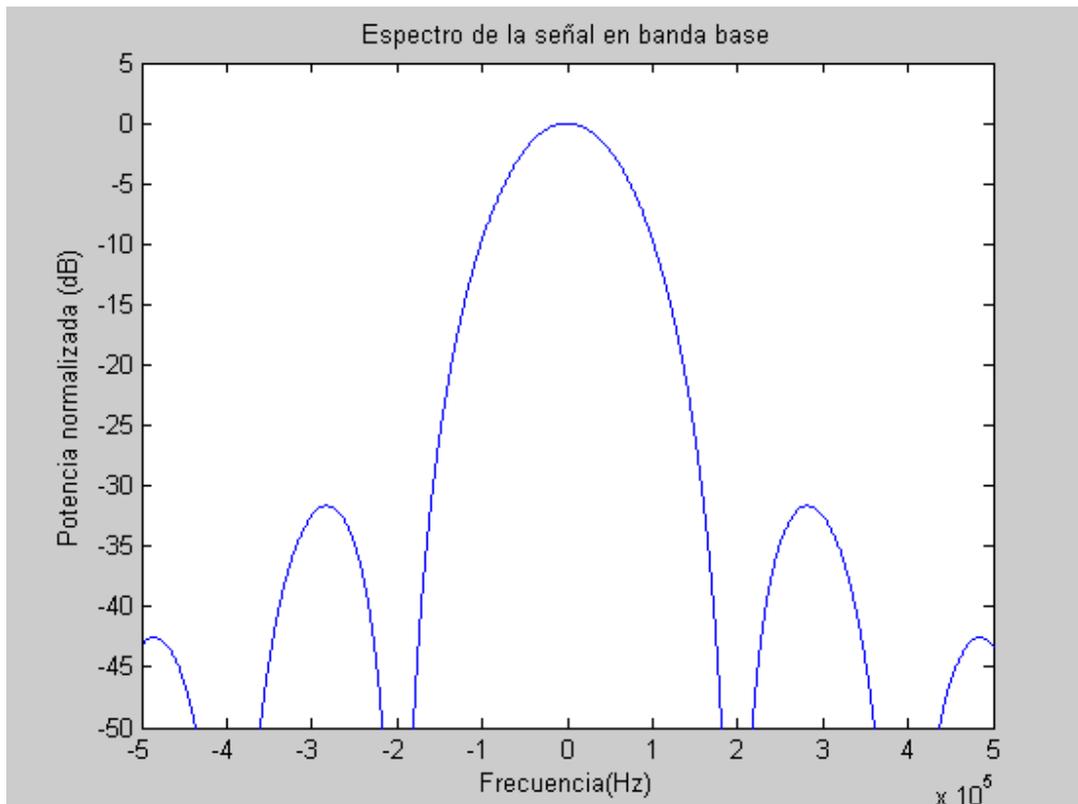
En la Figura 3.42 se observa el espectro en banda base de la señal triangular empleada como entrada del sistema FDSS en el servicio de datos. La anchura de banda del lóbulo principal es de 340 KHz mientras que la atenuación de su primer lóbulo secundario es de 26.4 dB. Pese a que el aumento en el ancho de banda del lóbulo

principal supone una desventaja por la mayor interferencia entre las portadoras del sistema FDSS presenta la ventaja de la menor potencia en sus lóbulos secundarios.



**Figura 3.42:** Espectro en banda base de la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos

Finalmente se muestra el espectro de la señal Gaussiana en banda base empleada para el servicio de datos en la Figura 3.43. Esta señal es la que presenta un lóbulo principal de mayor anchura de banda. Según se observa en la Tabla 3.16 esta anchura es de 376 KHz. Este aumento en la anchura de banda del lóbulo principal supone una desventaja al afectar la potencia de un canal a los adyacentes como consecuencia de la separación de las portadoras del sistema, de 120 KHz para el servicio de datos. Sin embargo, la interferencia generada por los lóbulos secundarios es la menor al presentar estos una potencia inferior al resto de señales de entrada empleadas. Para esta señal la atenuación de su primer lóbulo secundario es de 31.5 dB respecto al principal.



**Figura 3.43:** Espectro en banda base de la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.16:** Características de las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos.

Señal de entrada	Anchura lóbulo principal	Atenuación primer lóbulo secundario
Rectangular	240 KHz	13.2 dB
Cosenoidal	320 KHz	23.3 dB
Triangular	340 KHz	26.4 dB
Gaussiana	376 KHz	31.5 dB

### 3.3.2 Sistema FDSS para las diferentes señales de entrada empleadas

En las simulaciones realizadas para la transmisión de una señal de datos se han empleado los siguientes valores:

- La ganancia por sectorización es  $G_s = 2.5$ , donde  $G_s = F_s^{-1}$ .
- Factor de actividad del sistema IFDSS es  $\alpha=1$ .
- Factor de interferencia intercelular es  $F = 0.66$
- $\left(\frac{Eb}{No}\right)_{\text{celula,IFDSS}} = 3dB$
- $N_{\text{portadoras}} = 32$

Las portadoras del sistema se encuentran a las siguientes frecuencias:

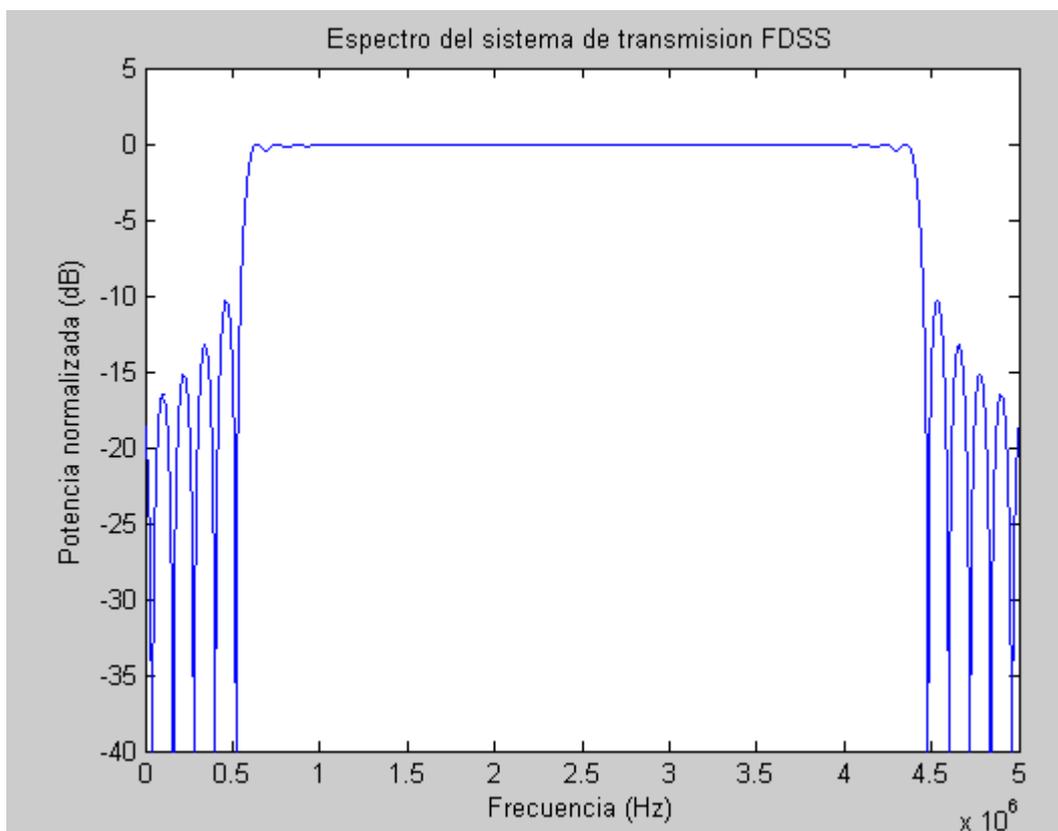
- $f_0 = 640\text{KHz}$

Siendo la separación de frecuencias:

- $f_{i+1} - f_i = 120\text{KHz}$

De esta manera, al igual que en el caso anterior,  $Bw_{FDSS} = 3.84\text{MHz}$ .

En la Figura 3.44 se muestra el espectro del sistema FDSS cuando la entrada del sistema es la señal rectangular. Con el empleo de la señal de entrada rectangular se cumple la propiedad de ortogonalidad. Esto se observa a partir de la anchura del lóbulo principal y de los lóbulos secundarios que presenta este tipo de señal. Al cumplirse esta propiedad no existe ICI. Es destacable que existe muy poco rizado en la banda de paso, únicamente de 0.055 dB. En los extremos, sin embargo, este rizado es superior. Según se observa en la Figura 3.44, existe muy poca atenuación fuera de la banda de paso del sistema como consecuencia de la elevada potencia que presentan los lóbulos secundarios para este tipo de señal de entrada.



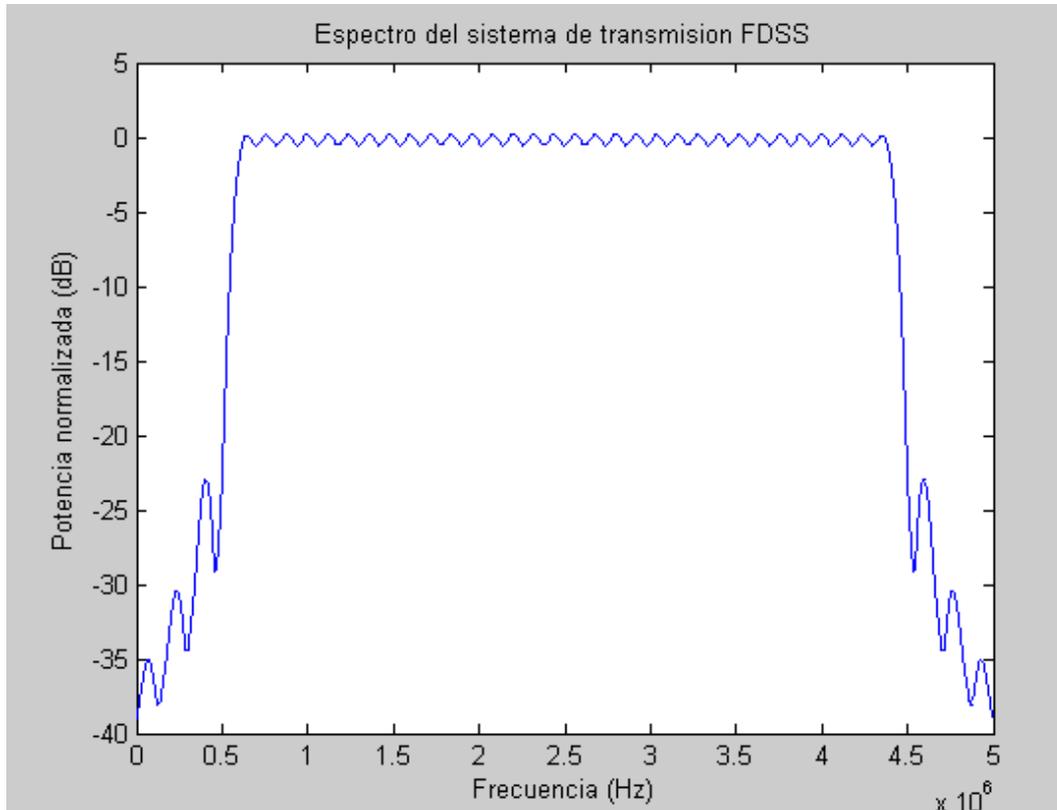
**Figura 3.44:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos

En la Figura 3.45 se muestra el espectro del sistema FDSS en banda base para la transmisión de señales de datos cuando la entrada del sistema es una señal cosenoidal.

Con este tipo de señal de entrada no se cumple la propiedad de ortogonalidad. Dado que la separación entre las portadoras es de 120 KHz para el servicio de datos y la anchura del lóbulo principal es de 320 KHz según se muestra en la Tabla 3.16 se observa el solapamiento entre los canales. Es por ello por lo que con este tipo de señal de entrada existe ICI. El valor medio de la ICI sobre cada portadora del sistema es de  $0.044 \cdot P_p$ .

Respecto al rizado en la banda de paso, es más pronunciado que el existente para el sistema FDSS con la señal de entrada rectangular. La diferencia entre máximo y mínimo es de 0.72 dB según se observa en la Tabla 3.17.

Otra característica importante del espectro del sistema FDSS con la señal cosenoidal es la mayor atenuación fuera de la banda de paso respecto a la rectangular como consecuencia de la menor potencia de los lóbulos secundarios para este tipo de señal. Podemos ver que a una frecuencia de 5 MHz la atenuación es de aproximadamente 38 dB. Esta mayor atenuación constituye una importante ventaja frente al ataque de señales interferentes en esa banda.



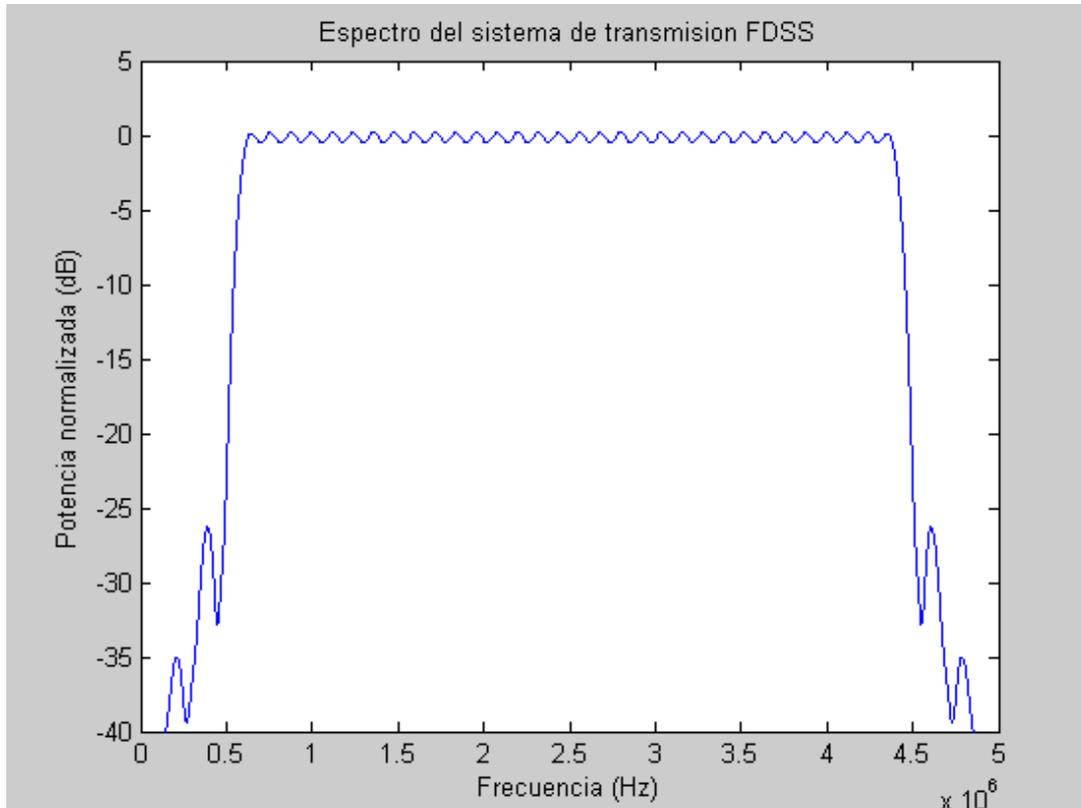
**Figura 3.45:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos

En la Figura 3.46 se muestra el espectro del sistema FDSS empleado en el servicio de datos cuando la señal de entrada es la triangular.

Con el empleo de esta señal de entrada tampoco se cumple la propiedad de ortogonalidad. Pese a que la separación de las portadoras es proporcional al periodo de bit, al no ser una señal de entrada de amplitud constante en el tiempo no se cumple esta propiedad. Este hecho se puede observar gráficamente. Dado que la anchura del lóbulo principal y de los lóbulos secundarios de esta señal en banda base no son proporcionales a la separación entre las portadoras del sistema, de 120 KHz, existe interferencia entre los diferentes canales. El valor medio de la ICI es de  $0.046 \cdot P_p$  según se muestra en la Tabla 3.17.

Sin embargo es destacable la gran atenuación del sistema fuera de la banda de paso debido a la reducida potencia que presentan los lóbulos secundarios para esta señal de entrada y es un factor importante al constituir el sistema FDSS un filtro paso banda de mejor calidad que para las señales de entrada rectangular y cosenoidal.

Respecto al rizado que presenta en la banda paso es de 0.72 dB como se observa en la Tabla 3.17.

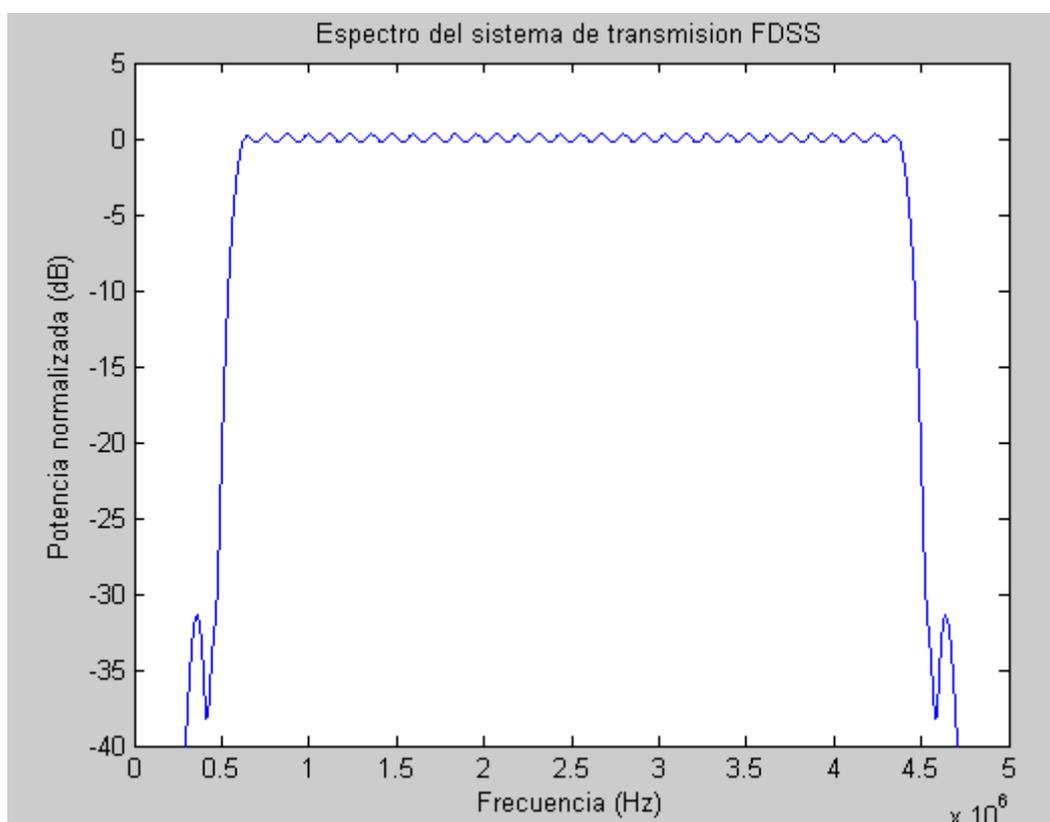


**Figura 3.46:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos

Finalmente se muestra el espectro del sistema FDSS con el empleo de una señal Gaussiana para la transmisión de señales de datos en la Figura 3.47.

Según se observa en la Figura 3.43, la señal Gaussiana presenta una importante atenuación en sus lóbulos secundarios, es por ello por lo que fuera de la banda de paso existe una gran atenuación.

Al igual que ocurría con la señal cosenoidal y triangular existe ICI debido a que no se cumple la propiedad de ortogonalidad. El valor de la ICI es de  $0.067 \cdot P_p$  según se observa en la Tabla 3.17. Esta interferencia es mayor con este tipo de señal de entrada que con la cosenoidal y triangular debido a que la señal Gaussiana es la que presenta un lóbulo principal de mayor anchura de banda. Respecto al rizado en la banda de paso es de 0.53 dB.



**Figura 3.47:** Espectro del sistema FDSS con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.17:** Características del sistema FDSS con las señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz

Señal de entrada	ICI/ $P_p$	Rizado en la banda de paso
Rectangular	0	0.055 dB
Cosenoidal	0.044	0.74 dB
Triangular	0.046	0.72 dB
Gaussiana	0,067	0.53 dB

### 3.3.3. Resultados obtenidos con el Jammer en el centro de la señal FDSS

Una vez mostrados las señales de entradas que se van a emplear en frecuencia así como el espectro del sistema FDSS al que da lugar cada una, vamos a mostrar los resultados de las simulaciones realizadas.

En un primer escenario, al igual que hacíamos para la transmisión de señales de voz, hemos utilizado una señal de Jammer variable en ancho de banda centrada sobre la frecuencia central del sistema FDSS, que es  $f_p+2.5$  MHz. Las anchuras de banda empleadas son las siguientes:

- $Bw_{jammer} = 0.2MHz$
- $Bw_{jammer} = 0.4MHz$
- $Bw_{jammer} = 0.6MHz$
- $Bw_{jammer} = 0.8MHz$
- $Bw_{jammer} = 1.0MHz$

Destacamos de nuevo, para este primer escenario, que la densidad de potencia de Jammer es mayor cuanto menor sea la anchura de banda donde esté el Jammer, ya que la potencia interferente introducida es la misma en los 5 casos, variando su densidad de potencia sobre la banda de frecuencias en que se encuentre.

En la Figura 3.48 se observa la capacidad del sistema en función de la potencia interferente para diferentes anchos de banda de las señales de Jammer cuando la señal de entrada empleada es la rectangular.

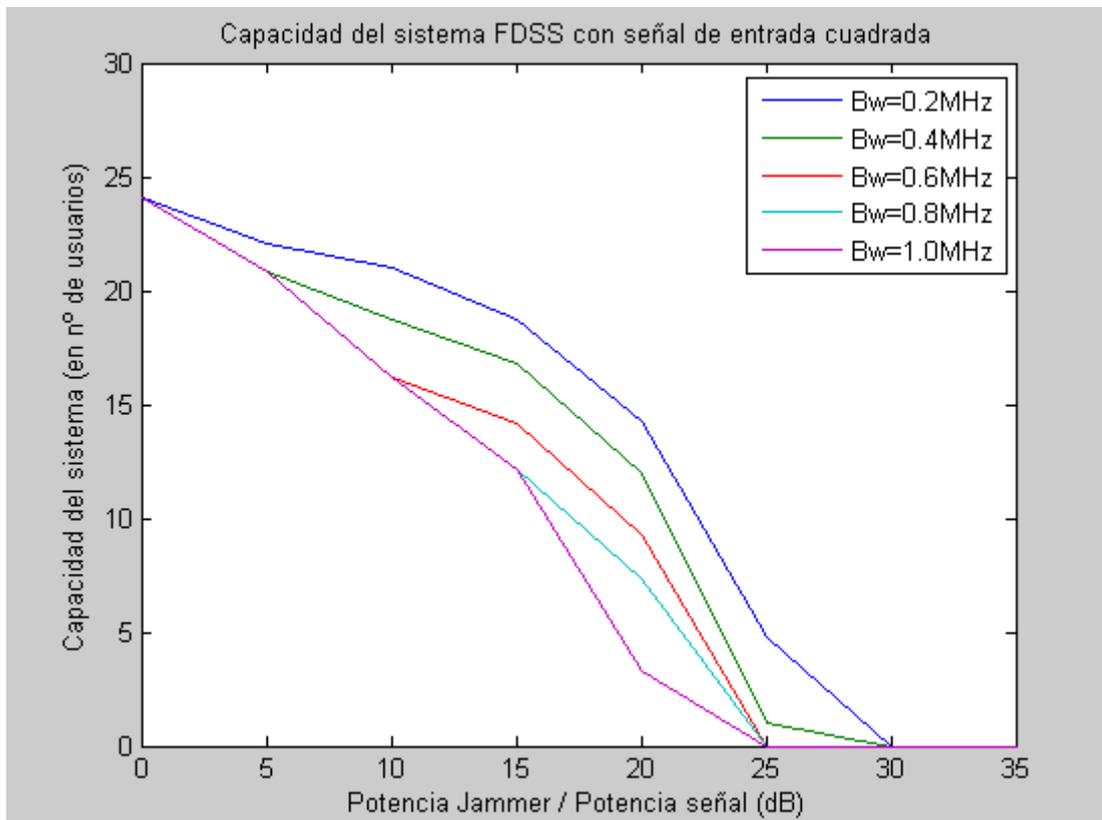
Podemos observar que la capacidad máxima del sistema en ausencia de señal interferente es de 24 usuarios de datos. A partir de ese punto la capacidad del sistema comienza a disminuir a medida que introducimos la señal de Jammer y aumentamos su potencia. Cuando esta potencia es 25-30 dB mayor que la potencia del sistema FDSS, este deja de funcionar al no poder dar servicio a ningún usuario de datos.

El efecto de la distribución de potencia interferente en diferentes anchos de banda se observa a partir de los resultados obtenidos. Es preferible tener una mayor potencia concentrada sobre un número pequeño de portadoras, que esa misma potencia en un ancho de banda mayor. A partir de una determinada densidad de potencia de

Jammer el sistema FDSS reacciona eliminando portadoras con el fin de maximizar la capacidad de usuarios a los que puede dar servicio. Cuando la señal de Jammer presenta una mayor anchura de banda, el número de portadoras eliminadas es mayor disminuyendo la capacidad del sistema al depender directamente de la ganancia del mismo según se observa en la expresión 3.10.

Se observa que para una relación  $P_{jammer} = P_{FDSS} + 5dB$  los resultados obtenidos son iguales para 4 de los 5 anchos de banda empleados. Esto es debido a que en esas 4 situaciones el sistema FDSS alcanza el máximo de capacidad sin eliminar ninguna portadora, siendo la potencia de Jammer residual la misma que la inicial, obteniendo el mismo valor de capacidad según la fórmula 3.10.

Es destacable el hecho de que el sistema FDSS es capaz de dar capacidad a un pequeño número de usuarios cuando  $P_{jammer} = P_{FDSS} + 25dB$  si dicha potencia presenta una anchura de banda de 0.2 ó 0.4 MHz mientras que para Jammers de mayor anchura de banda no proporciona ninguna capacidad. Por lo tanto, la distribución en frecuencia de la potencia de Jammer varía el punto de saturación del sistema.



**Figura 3.48:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_P+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.18:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

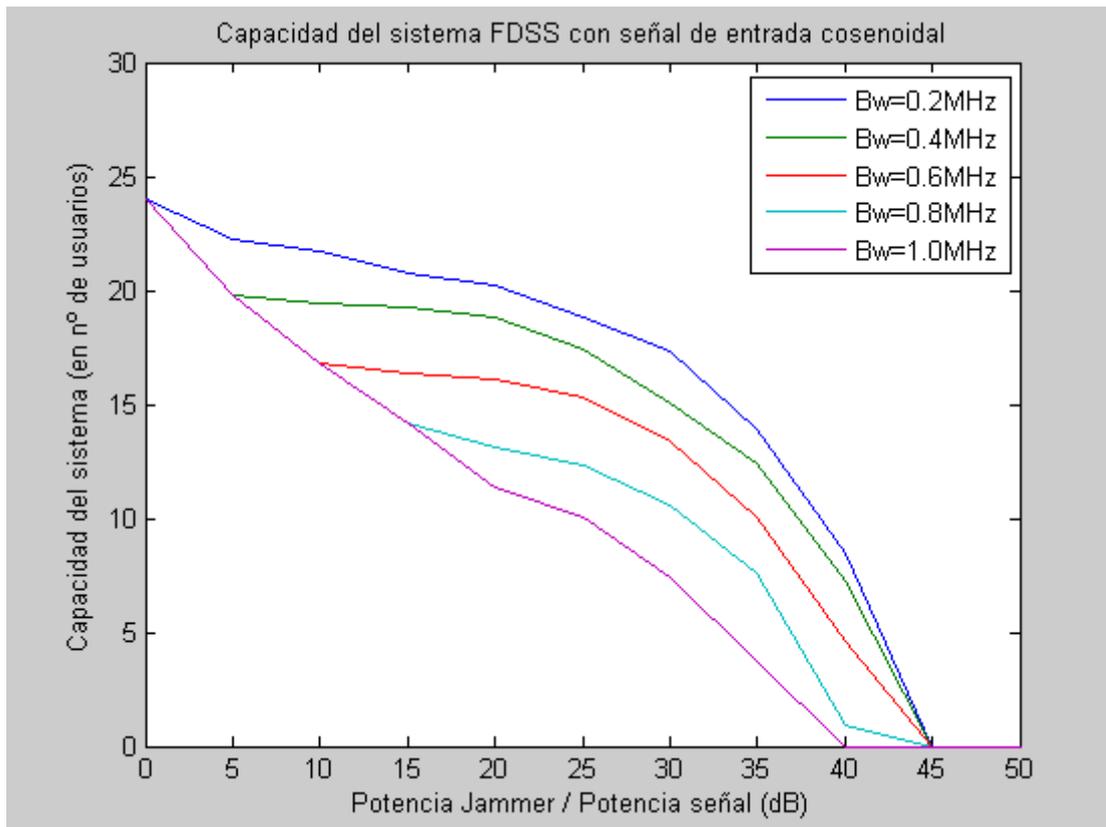
JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
<b>Sin interferencia</b>	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10
<b>5 dB</b>	22,10	20,85	20,85	20,85	20,85
<b>10 dB</b>	21,05	18,69	16,16	16,16	16,16
<b>15 dB</b>	18,71	16,77	14,15	12,16	12,16
<b>20 dB</b>	14,28	11,96	9,24	7,29	3,33
<b>25 dB</b>	4,77	1,02	0	0	0
<b>30 dB</b>	0	0	0	0	0

En la Figura 3.49 se muestra la capacidad del sistema FDSS para Jammers que presentan anchos de banda diferentes en función de la potencia de dichos Jammers cuando la señal de entrada empleada es la cosenoidal.

En la Tabla 3.19 vemos que el sistema FDSS deja de tener capacidad para una relación JSR de 40-45 dB en función de la anchura de banda de la señal de Jammer. Esta señal de entrada proporciona una resistencia a la interferencia de 15 dB superior que la señal rectangular.

Al igual que ocurría para la señal rectangular, vemos que para relaciones JSR de 5 y 10 dB la capacidad que presenta el sistema para distintos anchos de banda es la misma. Esto es debido a que el sistema no elimina ninguna portadora al alcanzarse la capacidad máxima en número de usuarios de datos sin necesidad de filtrar la señal de Jammer.

Es destacable también que el punto al cual el sistema FDSS se satura varía en función de la anchura de banda del Jammer. En este caso concreto, para el paso elegido de 5 dB de potencia de Jammer respecto a la del sistema, se observa la variación en el punto de saturación en la Tabla 3.19. Podemos apreciar que para una JSR de 40 dB el sistema es capaz de dar servicio a 8 usuarios cuando el Jammer presenta una anchura de banda de 200 KHz a no tener capacidad para ningún usuario cuando el ancho de banda es de 1MHz. Por tanto, se observa nuevamente que es más perjudicial para el sistema FDSS ser atacado por una señal que presenta su potencia distribuida en una mayor anchura de banda que por una señal que presente esa misma potencia distribuida sobre un menor ancho de banda.



**Figura 3.49:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.19:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

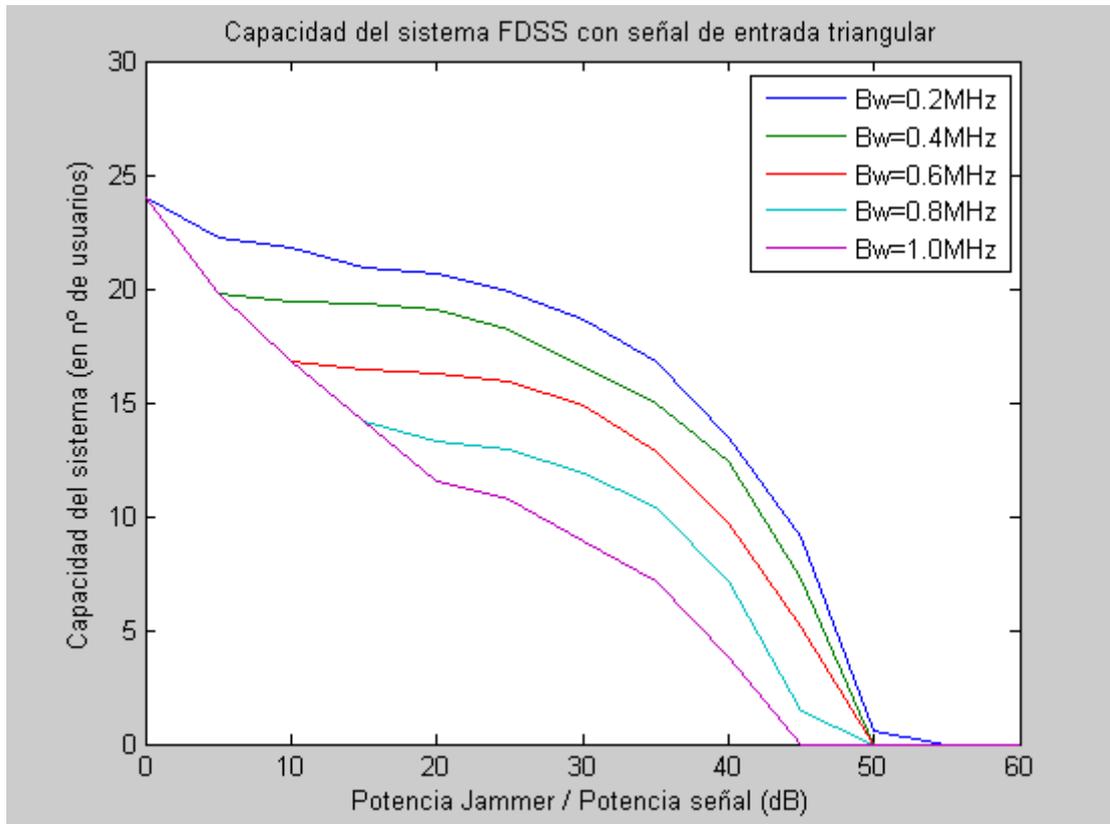
JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
Sin interferencia	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03
5 dB	22,27	19,79	19,79	19,79	19,79
10 dB	21,74	19,43	16,77	16,77	16,77
15 dB	20,76	19,29	16,35	14,12	14,12
20 dB	20,22	18,85	16,10	13,08	11,32
25 dB	18,80	17,44	15,31	12,33	10,05
30 dB	17,30	15,06	13,41	10,55	7,38
35 dB	13,87	12,37	10,07	7,59	3,74
40 dB	8,50	7,25	4,58	0,89	0
45 dB	0	0	0	0	0

La Figura 3.50 nos muestra 5 curvas con la capacidad del sistema FDSS en función de la anchura de banda que presente el Jammer en cada una de ellas cuando se emplea una señal de entrada triangular. Dicha capacidad se representa en función de la potencia de Jammer respecto de la potencia de señal.

Para este tipo de señal de entrada, el sistema FDSS es capaz de soportar interferencias que presenten una relación JSR de hasta 45 dB si la anchura de banda del Jammer es inferior a 1MHz y 40 dB si esta presenta una anchura de banda de 1MHz.

Al igual que ocurría para las otras señales de entrada, la distribución de una misma potencia interferente en diferentes anchos de banda, presenta mejores resultados en cuanto a capacidad cuanto menor sea la anchura de banda del Jammer. Esto no solo afecta al punto de saturación del sistema, sino al número de usuarios a los que puede dar servicio para distintos valores de JSR en los que el sistema presenta capacidad. Es por tanto preferible una mayor densidad de potencia interferente sobre un ancho de banda menor de la señal de RF transmitida que una menor densidad de potencia repartida sobre una mayor anchura de banda de la señal de información.

Así mismo se observa las mejores prestaciones que se obtienen con esta señal de entrada al ser el sistema FDSS capaz de dar servicio a un cierto número de usuarios en situaciones donde no era posible con la señal rectangular y cosenoidal dada la elevada relación JSR.



**Figura 3.50:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.20:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

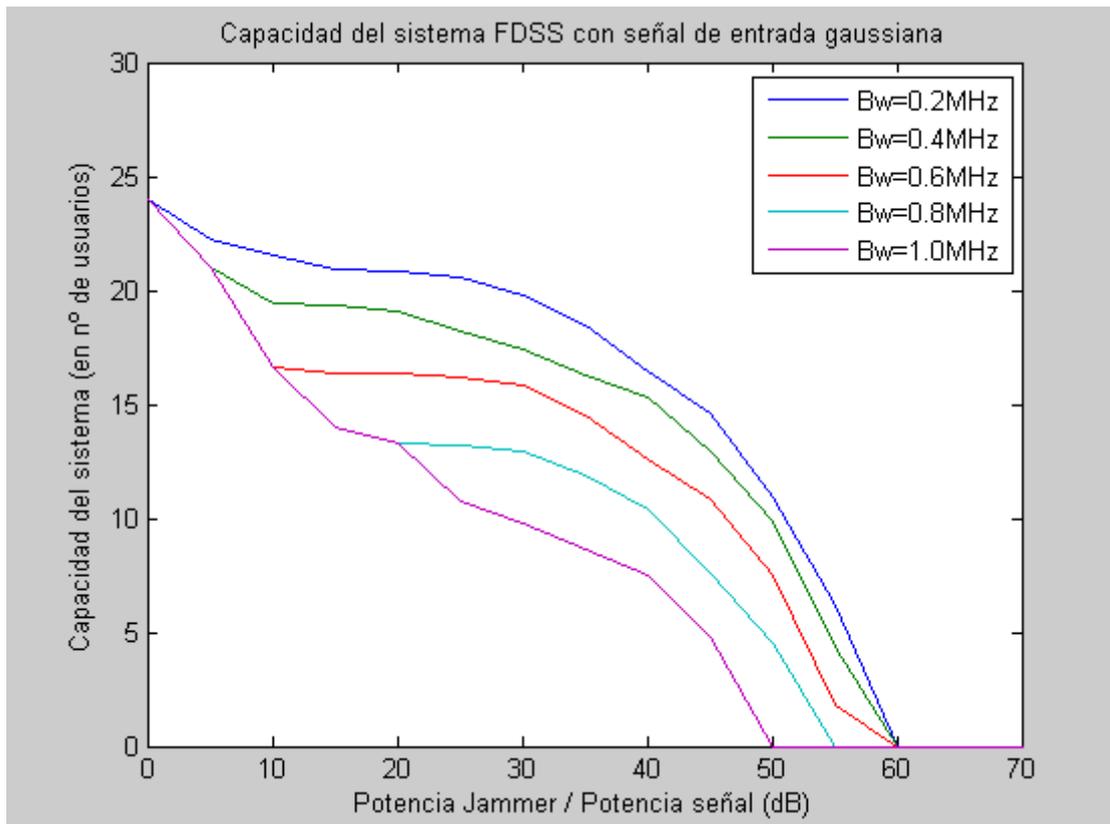
JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
<b>Sin interferencia</b>	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03
<b>5 dB</b>	22,28	19,79	19,79	19,79	19,79
<b>10 dB</b>	21,76	19,45	16,77	16,77	16,77
<b>15 dB</b>	20,89	19,36	16,41	14,17	14,17
<b>20 dB</b>	20,64	19,08	16,30	13,28	11,54
<b>25 dB</b>	19,86	18,18	15,95	12,95	10,74
<b>30 dB</b>	18,63	16,51	14,83	11,90	8,92
<b>35 dB</b>	16,77	14,98	12,86	10,40	7,12
<b>40 dB</b>	13,42	12,38	9,73	7,12	3,80
<b>45 dB</b>	9,12	7,27	5,16	1,41	0
<b>50 dB</b>	0,60	0	0	0	0
<b>55 dB</b>	0	0	0	0	0

En la Figura 3.51 se representa la capacidad del sistema FDSS para la transmisión de datos empleando una señal de entrada Gaussiana en función de la potencia de Jammer recibida en el receptor. Cada una de las curvas representa la capacidad para señales de Jammer que presentan distinta anchura de banda.

Para la señal de entrada Gaussiana se obtienen los mejores resultados. El sistema se satura para valores de JSR de 50-55 dB en función de la anchura de banda que presente la señal de Jammer. Esto supone una mejora de 10 dB en la resistencia al Jammer respecto a los resultados obtenidos con la señal de entrada triangular y de 30 dB respecto a aquellos obtenidos con la señal rectangular.

Al igual que ocurría para el resto de las señales empleadas como entrada del sistema FDSS la distribución en frecuencia de la potencia de Jammer no afecta únicamente al punto de saturación del sistema. A partir de los resultados mostrados en la Tabla 3.21 se observa que el sistema proporciona mayor capacidad cuanto menor sea la anchura de banda del Jammer.

También se observa de la Tabla 3.21 que para relaciones JSR inferiores a 20 dB el sistema presenta la misma capacidad para señales de Jammer que presentan diferente anchura de banda. Dado que la densidad de potencia de Jammer es diferente al distribuir una misma potencia sobre diferentes bandas de frecuencia, esto únicamente puede producirse cuando el sistema proporciona su máxima capacidad de usuarios de datos sin eliminar ninguna de las portadoras del sistema.



**Figura 3.51:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.21:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)				
	0.2 MHz	0.4 MHz	0.6 MHz	0.8 MHz	1.0 MHz
<b>Sin interferencia</b>	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
<b>5 dB</b>	22,19	20,97	20,97	20,97	20,97
<b>10 dB</b>	21,57	19,41	16,62	16,62	16,62
<b>15 dB</b>	20,93	19,32	16,40	13,96	13,96
<b>20 dB</b>	20,85	19,04	16,36	13,33	13,33
<b>25 dB</b>	20,59	18,16	16,23	13,23	10,70
<b>30 dB</b>	19,79	17,40	15,81	12,91	9,78
<b>35 dB</b>	18,49	16,25	14,50	11,90	8,64
<b>40 dB</b>	16,46	15,32	12,56	10,38	7,51
<b>45 dB</b>	14,60	12,95	10,81	7,61	4,80
<b>50 dB</b>	10,89	9,83	7,46	4,51	0
<b>55 dB</b>	6,17	4,37	1,81	0	0
<b>60 dB</b>	0	0	0	0	0

### 3.3.4. Resultados obtenidos con el Jammer no centrado sobre la frecuencia central del sistema FDSS

Así mismo se han realizado diferentes simulaciones para ver el efecto en el número de usuarios para el servicio de datos en función de la banda atacada por el Jammer. El Jammer presenta una anchura de 200 KHz, sin embargo el ataque se produce sobre diferentes bandas de frecuencia del sistema. Las frecuencias inferior y superior de la señal de Jammer una vez trasladada la señal FDSS a banda base en el receptor se muestran a continuación:

- $f_{\text{inf}} = 0\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 0.2\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 0.4\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 0.6\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 1.6\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 1.8\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 2.0\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 2.2\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 2.4\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 2.6\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 2.8\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 3.0\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 3.2\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 3.4\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 4.4\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 4.6\text{MHz}$
- $f_{\text{inf}} = 4.8\text{MHz}$  y  $f_{\text{sup}} = 5.0\text{MHz}$

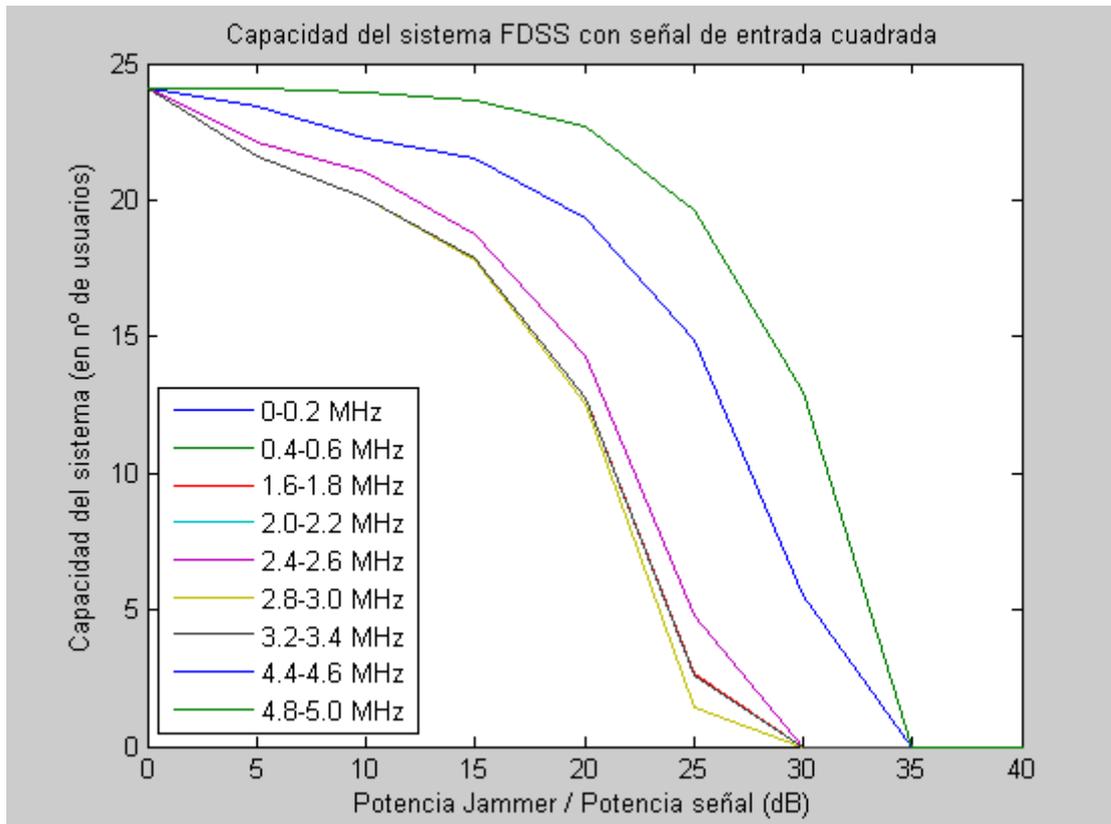
La Figura 3.52 nos muestra la capacidad del sistema para el servicio de datos con una señal de entrada rectangular en función de la potencia de Jammer recibida en el receptor. Cada una de las curvas de la figura representa la capacidad para distintas posiciones en frecuencia de la señal de Jammer que presenta un ancho de banda de 200 KHz.

En primer lugar destacar que los resultados son prácticamente simétricos respecto de la frecuencia central del sistema FDSS, de  $(f_p+2.5)$  MHz.

Por otro lado se aprecia que el sistema es capaz de soportar señales interferentes de distinta potencia en función de donde se encuentre situada la señal de Jammer. Las mayores relaciones JSR que resiste el sistema se producen cuando la señal de Jammer se encuentra fuera del ancho de banda del sistema, donde para la relación de potencia

$P_{jammer} = P_{señal} + 30dB$  el sistema FDSS es capaz de ofrecer servicio de transmisión de datos a 12 usuarios en la célula.

Dentro de la propia banda de paso del sistema, las mayores capacidades son proporcionadas cuando la señal de Jammer está centrada sobre la frecuencia central del sistema de  $(f_p+2.5)$  MHz.



**Figura 3.52:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.22:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada rectangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos

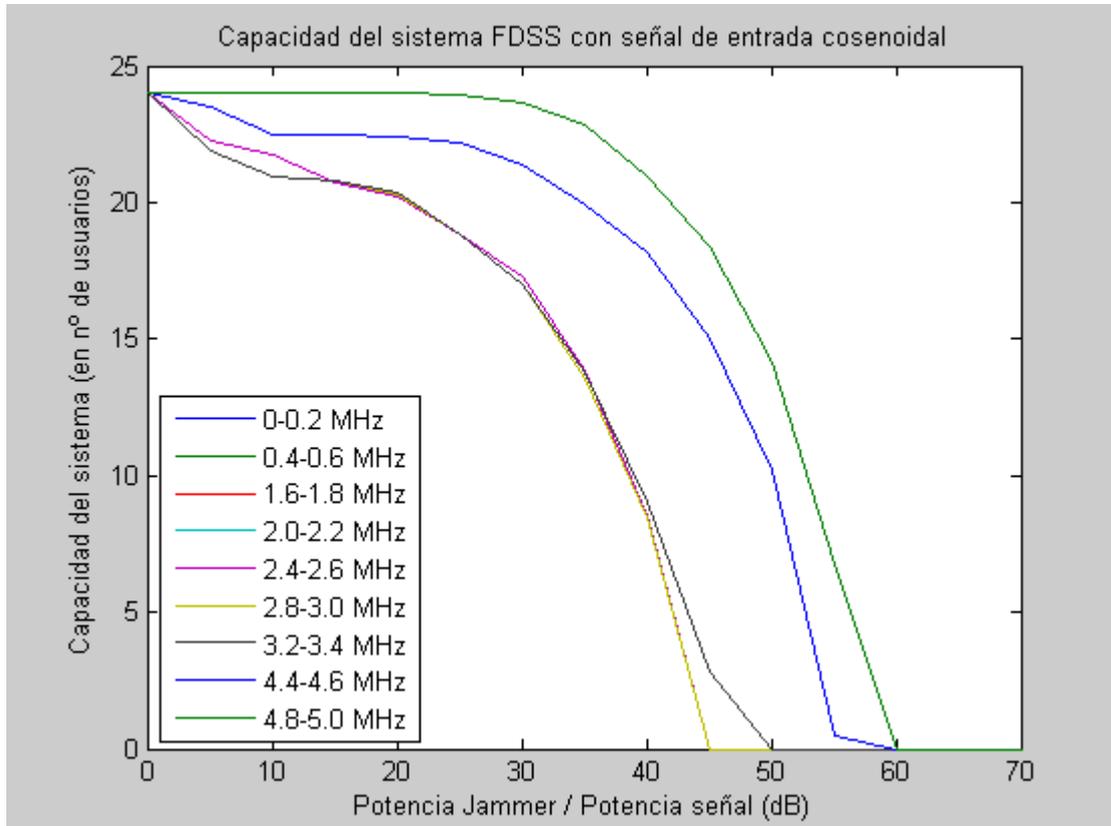
JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10	24,10
<b>5 dB</b>	24,05	23,42	21,63	21,62	22,10	21,62	21,63	23,42	24,05
<b>10 dB</b>	23,95	22,25	20,06	20,04	21,05	20,04	20,06	22,25	23,95
<b>15 dB</b>	23,65	21,50	17,85	17,78	18,71	17,79	17,85	21,50	23,65
<b>20 dB</b>	22,67	19,30	12,79	12,54	14,28	12,55	12,79	19,30	22,67
<b>25 dB</b>	19,59	14,85	2,64	1,39	4,78	1,40	2,63	14,85	19,59
<b>30 dB</b>	12,99	5,52	0	0	0	0	0	5,52	12,99
<b>35 dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 3.53 y la Tabla 3.23 se representa la capacidad del sistema FDSS para la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de datos en función de la potencia interferente recibida en el receptor.

De los resultados podemos destacar como el efecto de filtrado realizado por el propio sistema FDSS permite resistir interferencias muy próximas en frecuencia a la banda de paso del sistema de hasta 15 dB de mayor potencia que aquellas interferencias centradas sobre la banda de paso.

Dentro de la propia banda de paso del sistema, por el efecto de la posición de la señal interferente, vemos que para una relación JSR de 44 dB, el sistema es capaz de proporcionar capacidad para 3 usuarios cuando para aquellas señales más centradas en esa banda de paso la capacidad es nula. Por tanto, en función de la posición del Jammer dentro de la banda de paso se aprecian mejoras de 5 dB en cuanto a relación JSR para la cual el sistema FDSS permite proveer servicio de datos a los usuarios.

Es destacable además que hasta que la potencia de Jammer no es de un valor considerable, unos 40 dB en este caso, la capacidad proporcionada por el sistema FDSS cuando el Jammer se encuentra dentro de la banda de paso es la misma.



**Figura 3.53:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.23:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada cosenoidal con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos

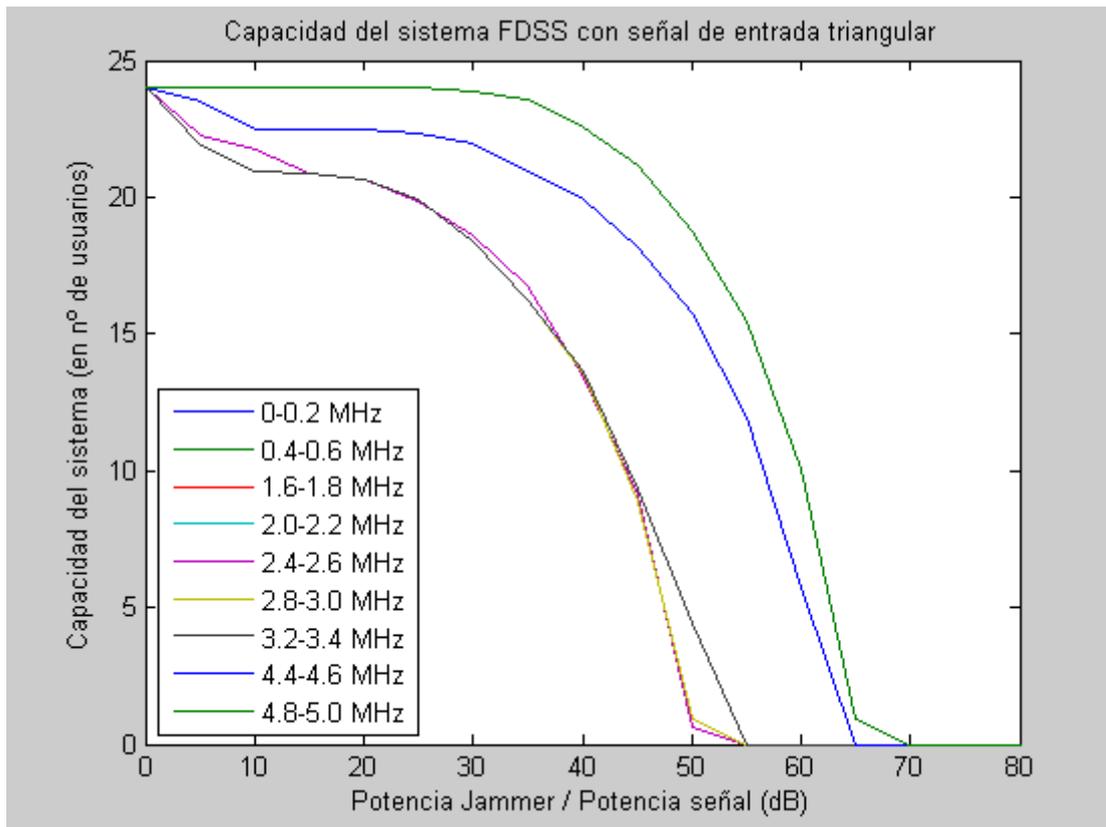
JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03
<b>5 dB</b>	24,03	23,50	21,89	21,89	22,27	21,89	21,89	23,50	24,03
<b>10 dB</b>	24,03	22,51	20,94	20,94	21,74	20,94	20,94	22,51	24,03
<b>15 dB</b>	24,02	22,48	20,79	20,79	20,76	20,79	20,79	22,48	24,02
<b>20 dB</b>	23,99	22,40	20,32	20,32	20,22	20,32	20,32	22,40	23,99
<b>25 dB</b>	23,91	22,16	18,85	18,84	18,80	18,84	18,85	22,16	23,91
<b>30 dB</b>	23,65	21,37	17,01	16,97	17,30	16,98	17,01	21,37	23,65
<b>35 dB</b>	22,84	19,89	13,74	13,59	13,88	13,59	13,74	19,89	22,84
<b>40 dB</b>	20,94	18,15	9,04	8,42	8,50	8,42	9,04	18,15	20,94
<b>45 dB</b>	18,36	15,05	2,80	0	0	0	2,80	15,05	18,36
<b>50 dB</b>	14,16	10,17	0	0	0	0	0	10,17	14,16
<b>55 dB</b>	6,79	0,49	0	0	0	0	0	0,49	6,79
<b>60 dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 3.54 tenemos los resultados obtenidos de capacidad del sistema en número de usuarios de datos por célula para la señal de entrada triangular. Con este tipo de señal de entrada, dadas sus mejores prestaciones respecto a la señal rectangular y cosenoidal, el funcionamiento del sistema es posible en situaciones donde con las otras señales el sistema FDSS no presentaba capacidad, llegando a soportar relaciones JSR de casi 65 dB.

Al igual que en los otros casos analizados, el sistema proporciona la misma capacidad para relaciones JSR bajas sobre Jammer situados dentro de la banda de paso del sistema.

Para Jammers situados en la banda de paso sobre 1.6-1.8 MHz el sistema es capaz de resistir relaciones JSR de 5 dB más que cuando la potencia interferente se encuentra centrada sobre la frecuencia central del sistema.

Fuera de la banda de paso del sistema, gracias al filtrado inicial, el sistema FDSS es capaz de soportar interferencias de hasta 15 dB mayores que sobre la banda de paso. En este caso resulta de gran importancia la elección de la señal de entrada del sistema, ya que cuanto menores sean los lóbulos secundarios de dicha señal mejor será el filtrado que realice el sistema sobre la señal de Jammer.



**Figura 3.54:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

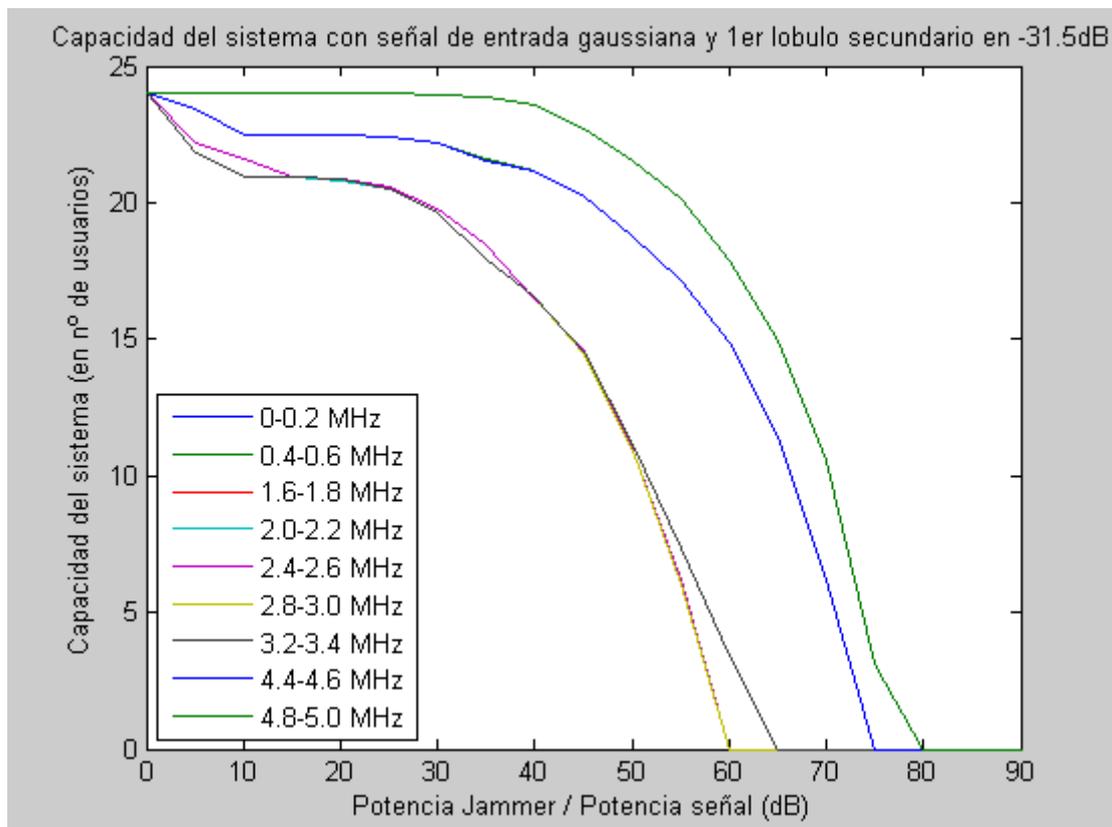
**Tabla 3.24:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada triangular con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03	24,03
<b>5 dB</b>	24,03	23,50	21,90	21,90	22,28	21,90	21,90	23,50	24,03
<b>10 dB</b>	24,03	22,51	20,97	20,97	21,76	20,97	20,97	22,51	24,03
<b>15 dB</b>	24,02	22,50	20,90	20,90	20,89	20,90	20,90	22,50	24,02
<b>20 dB</b>	24,01	22,46	20,66	20,66	20,64	20,66	20,66	22,46	24,01
<b>25 dB</b>	23,98	22,34	19,92	19,92	19,86	19,92	19,92	22,34	23,98
<b>30 dB</b>	23,88	21,96	18,41	18,41	18,63	18,41	18,41	21,96	23,88
<b>35 dB</b>	23,55	20,94	16,29	16,25	16,77	16,25	16,28	20,94	23,55
<b>40 dB</b>	22,53	19,95	13,65	13,53	13,42	13,53	13,65	19,95	22,52
<b>45 dB</b>	21,15	18,18	9,34	8,86	9,12	8,86	9,33	18,18	21,15
<b>50 dB</b>	18,74	15,73	4,42	0,90	0,60	0,90	4,42	15,73	18,74
<b>55 dB</b>	15,46	11,98	0	0	0	0	0	11,98	15,46
<b>60 dB</b>	10,07	5,75	0	0	0	0	0	5,75	10,07
<b>65 dB</b>	0,88	0	0	0	0	0	0	0	0,88
<b>70 dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La Figura 3.55 y la Tabla 3.25 nos muestran la capacidad del sistema en número de usuarios de datos cuando el ataque del Jammer se produce sobre diferentes bandas de frecuencia siendo la entrada del sistema la señal Gaussiana.

Para este tipo de señal de entrada el sistema es capaz de soportar potencias de Jammer que sean hasta 75 dB mayores que la potencia de señal. La mejora respecto a los resultados obtenidos cuando la entrada del sistema es la señal triangular es de 10 dB.

La banda de frecuencias atacada por el Jammer condiciona la capacidad del sistema, pasando este de soportar potencias de Jammer donde la JSR es de 55 a otras en las que la JSR llega hasta los 75 dB en función de la posición de la misma dentro del espectro del sistema FDSS. Debido a la poca potencia en sus lóbulos secundarios que presenta esta señal de entrada el filtrado inicial que realiza el sistema sobre la potencia de Jammer cuando esta se encuentra fuera de la banda de paso es muy importante y es lo que permite soportar relaciones JSR tan elevadas. Así mismo es destacable que el sistema también se satura en puntos diferentes en función de la banda atacada por el Jammer dentro de la banda de paso.



**Figura 3.55:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la señal de Jammer no centrada en  $(f_p+2.5)$  MHz para la transmisión de señales de datos

**Tabla 3.25:** Capacidad del sistema FDSS para una señal de entrada Gaussiana con la interferencia de Jammer no centrada en la frecuencia central del sistema para la transmisión de señales de datos

JSR (dB)	Bwjammer (MHz)								
	0-0.2	0.4-0.6	1.6-1.8	2.0-2.2	2.4-2.6	2.8-3.0	3.4-3.6	4.4-4.6	4.8-5.0
<b>Sin interferencia</b>	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
<b>5 dB</b>	24,00	23,41	21,81	21,81	22,19	21,81	21,81	23,41	24,00
<b>10 dB</b>	24,00	22,48	20,96	20,96	21,57	20,96	20,96	22,48	24,00
<b>15 dB</b>	23,99	22,47	20,93	20,93	20,93	20,93	20,93	22,47	23,99
<b>20 dB</b>	23,99	22,45	20,83	20,83	20,85	20,83	20,83	22,45	23,99
<b>25 dB</b>	23,98	22,39	20,54	20,54	20,60	20,54	20,54	22,39	23,98
<b>30 dB</b>	23,95	22,19	19,61	19,61	19,79	19,61	19,61	22,19	23,95
<b>35 dB</b>	23,86	21,56	17,95	17,95	18,49	17,95	17,95	21,56	23,86
<b>40 dB</b>	23,58	21,15	16,58	16,57	16,46	16,57	16,58	21,15	23,58
<b>45 dB</b>	22,68	20,21	14,52	14,46	14,60	14,46	14,52	20,21	22,68
<b>50 dB</b>	21,56	18,77	11,16	10,91	10,89	10,91	11,16	18,77	21,56
<b>55 dB</b>	20,15	17,18	7,36	6,00	6,17	6,00	7,36	17,17	20,15
<b>60 dB</b>	17,88	14,90	3,42	0	0	0	3,42	14,90	17,88
<b>65 dB</b>	14,96	11,43	0	0	0	0	0	11,43	14,96
<b>70 dB</b>	10,54	6,18	0	0	0	0	0	6,17	10,54
<b>75 dB</b>	3,11	0	0	0	0	0	0	0	3,11
<b>80 dB</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A modo de conclusión, podemos decir que el sistema FDSS cuando es empleado como sistema celular proporciona grandes prestaciones en presencia de señal interferente si lo comparamos con otros sistemas celulares como WCDMA.

A partir de las simulaciones realizadas, comprobamos que para la señal de entrada Gaussiana se obtienen los mejores resultados en cuanto a la capacidad que proporciona el sistema en entornos de elevada interferencia.

La señal triangular ofrece también buenos resultados, seguida de la señal cosenoidal siendo la señal rectangular la que tiene peores resultados de los 4 tipos de señales de entrada empleadas.

Las características de la señal de entrada son las que determinan este comportamiento siendo la potencia de los lóbulos secundarios y la anchura del lóbulo principal los factores determinantes.

Respecto a la anchura de banda de la señal de Jammer, podemos decir que influye notablemente sobre la capacidad del sistema. Se obtienen mejores resultados cuando se concentra la potencia interferente en un ancho de banda menor, que cuando esa misma potencia se distribuye sobre una banda mayor de la banda de paso del sistema. Este efecto es especialmente apreciable cuando el sistema se encuentra

sometido a señales de Jammer de elevada potencia, es decir, potencias interferentes cercanas al punto de saturación del sistema. Respecto al efecto que produce la posición en frecuencia dentro de la banda donde se encuentra el sistema FDSS, es también destacable. El propio sistema actúa como un filtro por lo que fuera de la banda de paso del sistema FDSS es donde el sistema es capaz de proveer servicio soportando señales de mayor potencia de interferencia (hasta 20 dB mayor respecto al caso donde la señal de Jammer está centrada en la frecuencia central del sistema).

Aquellas señales que se encuentran dentro de la banda de paso pero alejadas de esa frecuencia central del sistema proporcionan una cierta capacidad para señales de Jammer de hasta 5 dB más de potencia respecto a la que es capaz de soportar el sistema cuando dicha señal interferente se encuentra centrada sobre  $(f_p+2.5)$  MHz.

Como hemos comprobado, el sistema no mejora su eficacia frente al Jammer al aumentar la separación entre las portadoras, por lo que no se obtiene ninguna ventaja de este hecho.



## 4. FDSS en aplicaciones militares Tierra-Tierra

### 4.1 Introducción

Dado que el sistema FDSS es un sistema que ofrece ventajas en entornos de elevada interferencia, las aplicaciones militares es una situación donde puede ser un sistema muy válido.

Hemos diseñado diferentes escenarios con el fin de comprobar la validez de dicho sistema para este entorno. Realizamos este estudio sobre una región de  $(10 \times 10)$  Km<sup>2</sup>. En esta región, se encuentra un transmisor que envía la información a un receptor, mientras que el enemigo intenta perturbar las comunicaciones mandando una señal de Jammer utilizando una ‘whip tactical antenna’ que transmite de forma omnidireccional.

Suponemos que el transmisor lo lleva físicamente un soldado que se encuentra en el frente, y el Jammer es trasladado en un jeep. El sistema receptor, al igual que el transmisor es trasladado por un soldado.

Tenemos, por tanto, 2 enlaces de interés, el que forman transmisor y receptor y el del transmisor interferente con el receptor. Tanto el transmisor como el receptor utilizan el sistema FDSS para neutralizar la señal interferente.

Simulamos estos escenarios tanto para la transmisión de señales de datos como para la transmisión de señales de voz.

Para la transmisión de señales de voz el sistema FDSS presenta las siguientes características:

- $T_b = \frac{1}{15 \cdot 10^3}$  (s)
- $G_p = 256$

En los diferentes escenarios simulados, utilizamos los siguientes valores:

- $f = 50\text{MHz}$ . La frecuencia de transmisión utilizada es 50 MHz, propia de los sistemas militares en comunicaciones entre transmisor y receptor terrestres.
- $P_{tx} = 10\text{W}$
- $P_{txjammer} = 500\text{W}$

Respecto a la señal de Jammer, hemos supuesto una anchura de banda de 200 KHz centrada sobre el sistema FDSS modulado por la frecuencia de transmisión utilizada.

Las ganancias de las antenas empleadas serán 2 dB para las 3 antenas, la del transmisor, transmisor de Jammer y receptor. Para las alturas hemos supuesto 2 metros tanto para transmisor, receptor como para el transmisor de Jammer. Para el estudio de los dos enlaces que se presentan hemos utilizado el modelo de las dos pendientes. Este modelo nos permite caracterizar las pérdidas básicas del enlace. La ecuación que define dicho modelo es la siguiente:

$$L_b(dB) = \begin{cases} L_{ref} + 10n_1 \log_{10}\left(\frac{d}{d_{ref}}\right) & d \leq R_b \\ L_{R_b} + 10n_2 \log_{10}\left(\frac{d}{R_b}\right) & d > R_b \end{cases}$$

Donde:

- $n_1 = 2,00$
- $n_2 = 4,00$
- $R_b = \frac{4 h_t h_r}{\lambda}$
- $L_{ref}(dB) = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_{ref}}{\lambda}\right)$
- $d_{ref} = 1\text{m}$
- $h_t = 2\text{m}$
- $h_r = 2\text{m}$
- $\lambda = 6\text{m}$

## 4.2. Transmisión de señales de voz

Hemos simulado tres escenarios distintos, en cada uno de ellos hemos fijado o bien los dos transmisores, o bien uno de ellos y el receptor variando la posición del restante a través del plano de estudio. A lo largo de los escenarios suponemos que la recepción es posible cuando la relación  $E_b/N_o$  es superior a 7dB.

### 4.2.1 Cobertura en función de la posición del receptor

Vamos a analizar el primer escenario de los descritos, en el que tanto la posición del transmisor como la del transmisor de Jammer son fijas mientras que variamos la posición del receptor a lo largo del plano bajo estudio. En este primer escenario la posición del transmisor y del transmisor de Jammer son las siguientes:

- Transmisor:  $(x_1, y_1) = (0, 0)$  m.
- Transmisor de Jammer:  $(x_2, y_2) = (10000, 10000)$  m.

Implementamos el sistema FDSS con las mismas 4 señales de entrada que utilizábamos para el sistema celular.

Es destacable que el modelo de receptor empleado en las simulaciones es un receptor que maximiza la relación  $E_b/N_o$  en lugar de en lugar de limitarse a intentar cumplir las especificaciones necesarias en el valor de la SJNR en la recepción de la señal.

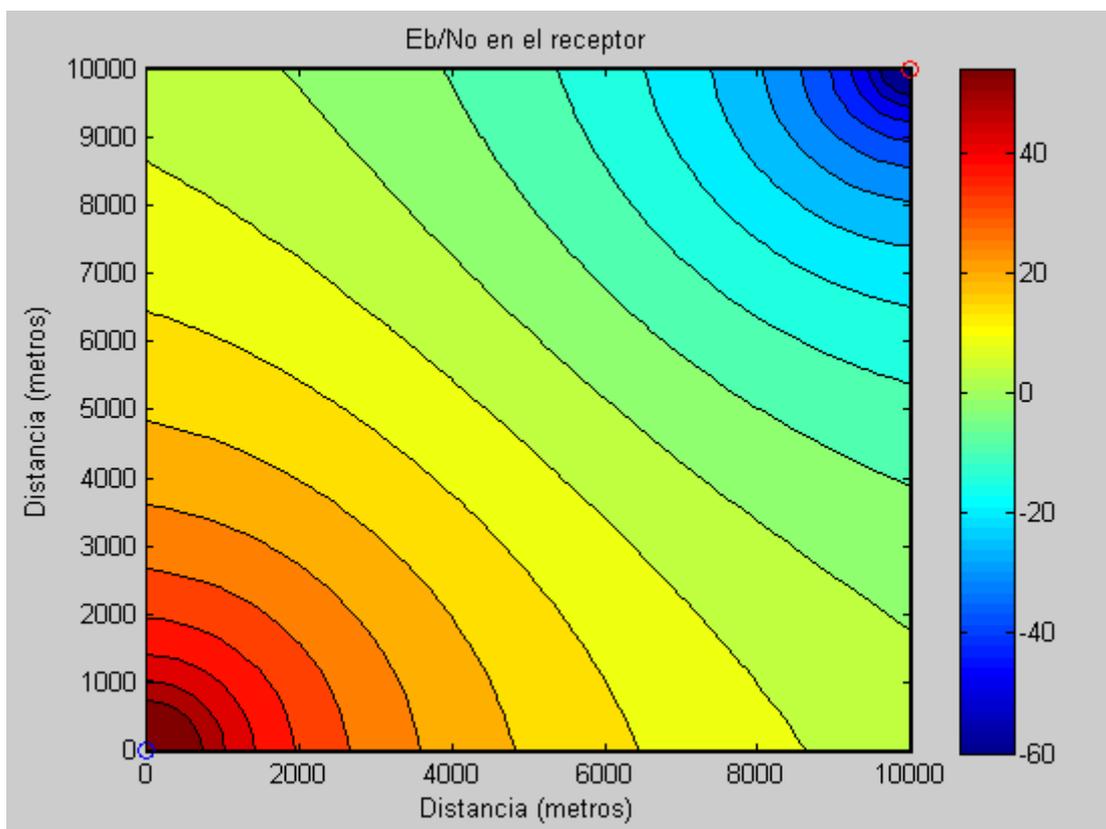
En la Figura 4.1 se muestra la relación  $E_b/N_o$  del enlace entre transmisor y receptor en presencia de un ataque a las comunicaciones mediante un Jammer.

La Figura 4.1 muestra el efecto del Jammer sobre las comunicaciones cuando no se hace uso de la selectividad en frecuencia del sistema FDSS. Esta situación es equivalente a emplear el sistema WCDMA dado que ambos sistemas presentan la misma ganancia de proceso. Se aprecia que inicialmente el Jammer es capaz de impedir una correcta recepción de la señal desde distancias superiores a los 10 Km respecto de la posición del receptor como observamos a partir de la Tabla 4.1. Dado que la relación  $E_b/N_o$  se obtiene a partir de la ganancia del sistema,  $G_p$ , y la relación SJNR (Signal to Jammer and Noise Ratio) según la expresión:

$$E_b/N_o \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10}(G_p) + \text{SJNR (dB)}$$

Es posible una recepción de la señal que satisfaga los criterios de calidad con el receptor a distancias de hasta 7.15 Km del Jammer. Esto es debido a que pese a la mayor potencia interferente que llega al receptor como consecuencia de la disminución de la distancia entre este y el Jammer, también se recibe con mayor potencia la señal deseada al encontrarse el receptor más próximo al transmisor. Por tanto, en función de la posición del receptor respecto al transmisor y al Jammer, el radio de acción del Jammer varía entre los 7.15 Km y los 10.02 Km, que es aproximadamente igual a  $(2^{0.5} \cdot 7.15)$  Km.

Se observa por tanto, como el Jammer es capaz de interrumpir las comunicaciones a grandes distancias del receptor. Resulta por tanto una situación muy peligrosa al poder ser atacadas las comunicaciones mediante Jammers de forma efectiva desde grandes distancias.



**Figura 4.1:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{inicial}}$  en el receptor en función de su posición

**Tabla 4.1:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de su posición

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	60.00	49.19	36.71	29.19	23.71	19.35	15.74	12.67	10.05	7.81	5.92
1000	49.19	42.67	34.15	27.54	22.31	18.00	14.35	11.22	8.54	6.27	4.37
2000	36.71	34.15	29.38	24.42	19.89	15.88	12.32	9.21	6.51	4.23	2.35
3000	29.19	27.54	24.42	20.68	16.84	13.16	9.75	6.66	3.95	1.66	-0.17
4000	23.71	22.31	19.89	16.84	13.49	10.07	6.74	3.63	0.86	-1.46	-3.24
5000	19.35	18.00	15.88	13.16	10.07	6.77	3.42	0.18	-2.76	-5.20	-6.97
6000	15.74	14.35	12.32	9.75	6.74	3.42	-0.09	-3.62	-6.94	-9.70	-11.53
7000	12.67	11.22	9.21	6.66	3.63	0.18	-3.62	-7.67	-11.71	-15.20	-17.30
8000	10.05	8.54	6.51	3.95	0.86	-2.76	-6.94	-11.71	-17.00	-22.16	-25.17
9000	7.81	6.27	4.23	1.66	-1.46	-5.20	-9.70	-15.20	-22.16	-31.08	-38.06
10000	5.92	4.37	2.35	-0.17	-3.24	-6.97	-11.53	-17.30	-25.17	-38.06	-60.00

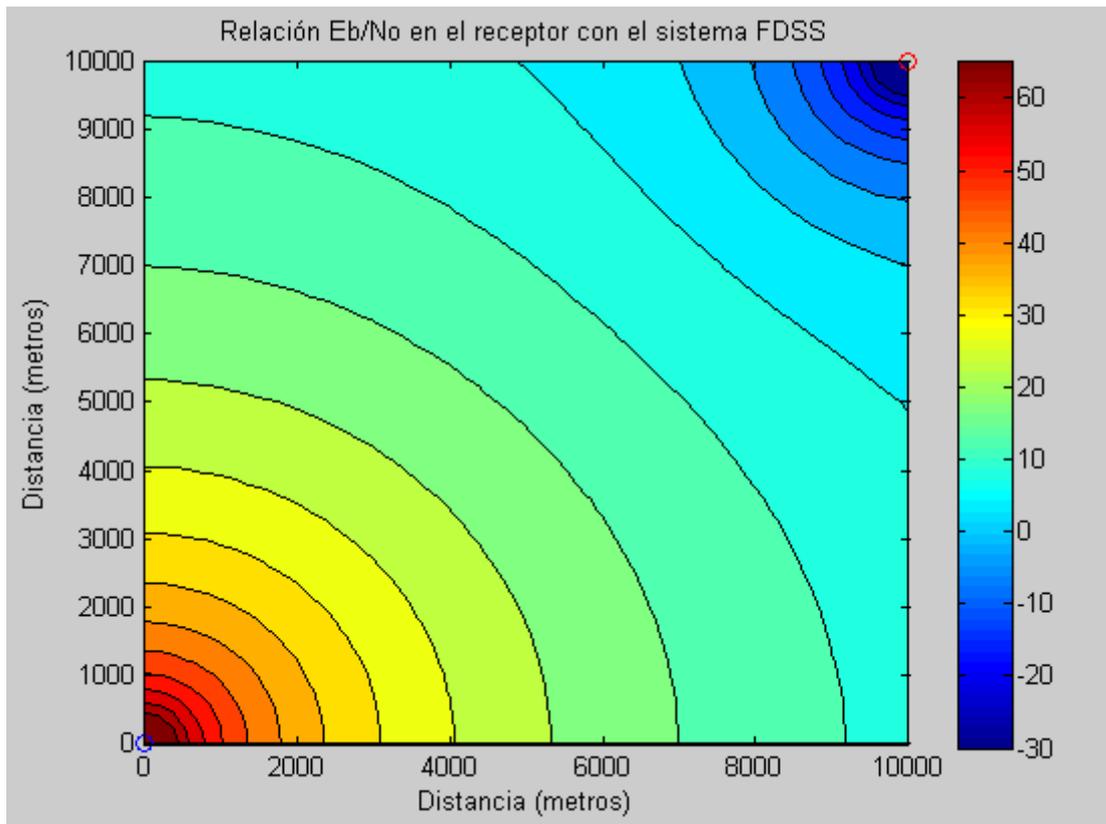
En la Figura 4.2 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) en el receptor con el sistema FDSS empleando una entrada rectangular para la transmisión de señales de voz en función de la posición del receptor en el plano estudiado.

El receptor FDSS, una vez recibe la señal deseada junto con la señal de Jammer, intenta maximizar la calidad de la señal deseada, es decir, la relación  $E_b/N_o$ , eliminando portadoras del sistema.

El empleo del sistema FDSS proporciona grandes mejoras al aumentar notablemente la cobertura del enlace entre transmisor y receptor. En este caso la distancia máxima a la que el Jammer impide las comunicaciones es de 4.4 Km, distancia muy inferior a los más de 10 Km iniciales.

A partir de los resultados obtenidos se observa que dicho receptor introduce mejoras más importantes cuando la relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  es menor dado que el sistema es más efectivo cuanto peor sean las condiciones en las que se encuentra.

Mientras que en la zona de cobertura la mejora introducida por el empleo del sistema FDSS es de un máximo de 9 dB para una situación del receptor a 6400 metros del transmisor, si el receptor se encuentra en las proximidades del transmisor de Jammer el sistema FDSS es capaz de aumentar hasta 25 dB la relación  $(E_b/N_o)$  como se observa a partir de los resultados. Sin embargo, pese a esta importante mejora, no es aprovechable dado que dicha relación no satisface las condiciones necesarias en la calidad de la señal recibida.



**Figura 4.2:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.2:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

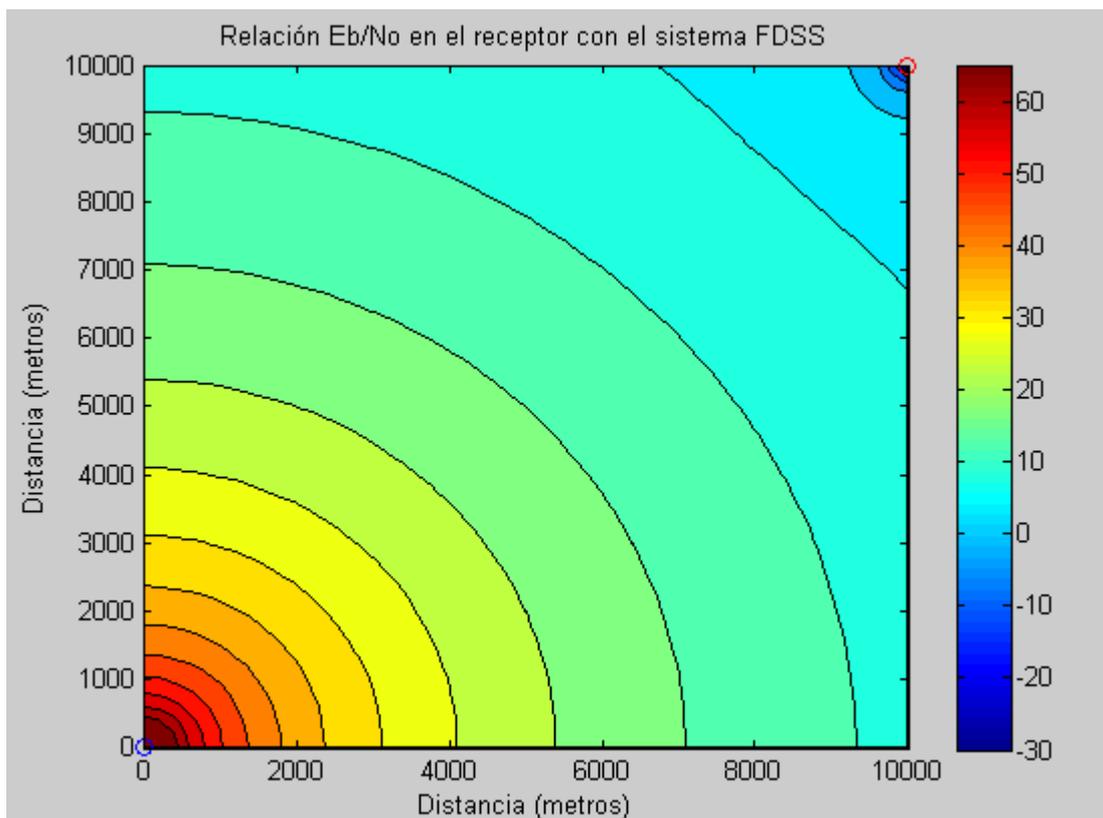
Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	70.00	51.57	39.51	32.44	27.41	23.51	20.31	17.61	15.27	13.21	11.37
1000	51.57	45.53	37.54	31.48	26.83	23.10	20.00	17.34	15.03	12.99	11.18
2000	39.51	37.54	33.41	29.14	25.35	22.07	19.21	16.71	14.50	12.52	10.76
3000	32.44	31.48	29.14	26.26	23.33	20.57	18.05	15.75	13.67	11.79	10.11
4000	27.41	26.83	25.35	23.33	21.08	18.80	16.60	14.50	12.56	10.78	9.19
5000	23.51	23.10	22.07	20.57	18.80	16.90	14.94	13.01	11.15	9.43	7.92
6000	20.31	20.00	19.21	18.05	16.60	14.94	13.15	11.27	9.38	7.60	6.13
7000	17.61	17.34	16.71	15.75	14.50	13.01	11.27	9.29	7.10	4.93	3.31
8000	15.27	15.03	14.50	13.67	12.56	11.15	9.38	7.10	4.11	0.60	-1.82
9000	13.21	12.99	12.52	11.79	10.78	9.43	7.60	4.93	0.60	-6.62	-13.19
10000	11.37	11.18	10.76	10.11	9.19	7.92	6.13	3.31	-1.82	-13.19	-30.00

En la Figura 4.3 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) del enlace entre transmisor y receptor con el empleo del sistema FDSS cuando la señal de entrada empleada es la cosenoidal para la transmisión de voz.

El empleo de esta señal de entrada mejora los resultados obtenidos con la señal rectangular, dadas las mejores prestaciones de la señal cosenoidal. En este caso el

Jammer impide las comunicaciones a distancias de hasta 2.4 Km, lo que supone una importante mejora respecto a las prestaciones obtenidas cuando se emplea una entrada rectangular. El radio de acción del Jammer, como se ha comentado, depende no solo de la distancia entre este y el receptor, también de la distancia entre transmisor y receptor, por lo que el Jammer resulta efectivo a distancias que van de los 1.7 Km a los 2.4 Km en función de la distancia entre transmisor y receptor. En cualquier caso, a distancias inferiores a los 1.7 Km el sistema FDSS con el empleo de una entrada cosenoidal no permite una recepción correcta de la señal de información.

Resulta destacable que es en las proximidades del Jammer donde se advierte una mejora más importante en la calidad de la señal recibida. Las diferencias resultan más notables en condiciones desfavorables debido a que el sistema FDSS elimina un mayor número de portadoras a fin de reducir la potencia de Jammer, siendo el filtrado más efectivo cuando menor sea la interferencia entre los canales. Esta interferencia es menor para la señal cosenoidal por la menor potencia de sus lóbulos secundarios.



**Figura 4.3:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

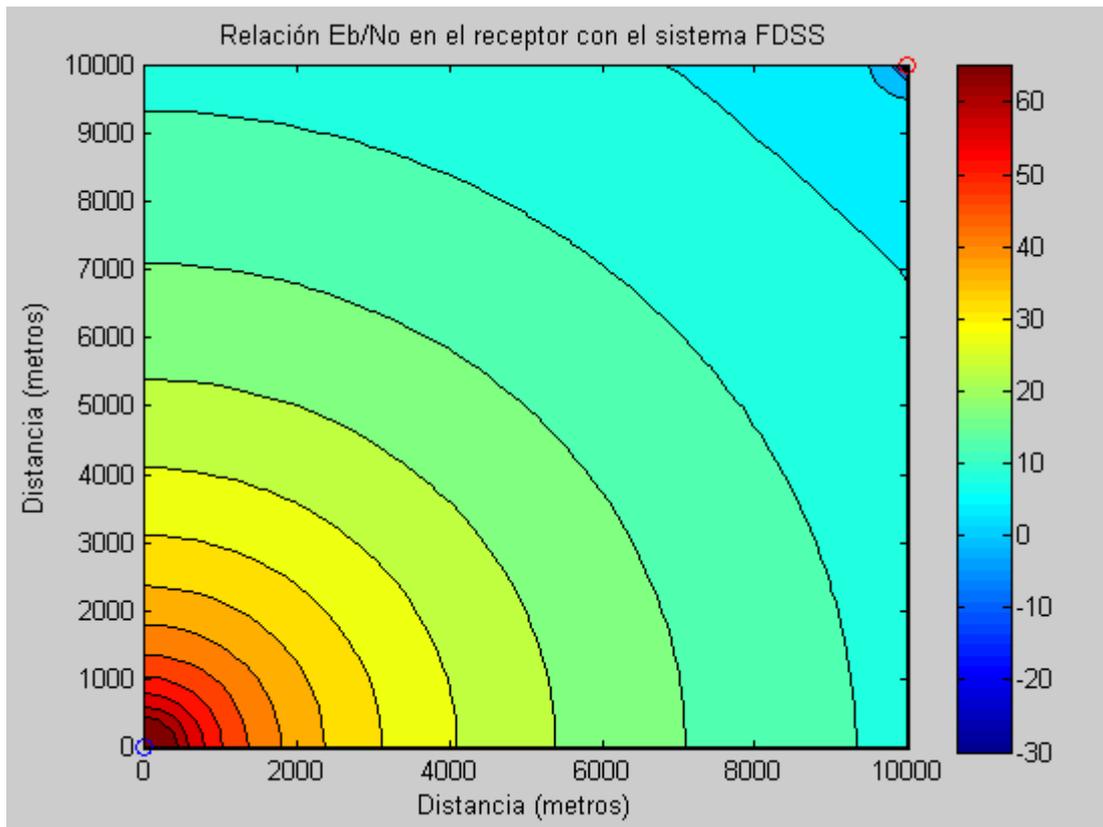
**Tabla 4.3:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	70.00	51.66	39.62	32.57	27.57	23.69	20.52	17.83	15.51	13.46	11.63
1000	51.66	45.64	37.67	31.65	27.03	23.34	20.27	17.64	15.36	13.34	11.53
2000	39.62	37.67	33.59	29.36	25.61	22.37	19.57	17.11	14.94	12.99	11.24
3000	32.57	31.65	29.36	26.53	23.66	20.97	18.52	16.31	14.30	12.48	10.82
4000	27.57	27.03	25.61	23.66	21.49	19.32	17.25	15.30	13.49	11.80	10.25
5000	23.69	23.34	22.37	20.97	19.32	17.59	15.84	14.14	12.51	10.98	9.54
6000	20.52	20.27	19.57	18.52	17.25	15.84	14.37	12.89	11.45	10.06	8.74
7000	17.83	17.64	17.11	16.31	15.30	14.14	12.89	11.61	10.30	9.01	7.79
8000	15.51	15.36	14.94	14.30	13.49	12.51	11.45	10.30	9.06	7.77	6.58
9000	13.46	13.34	12.99	12.48	11.80	10.98	10.06	9.01	7.77	6.17	4.38
10000	11.63	11.53	11.24	10.82	10.25	9.54	8.74	7.79	6.58	4.38	-30.00

En la Figura 4.4 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) en el receptor para las diferentes posiciones del mismo en el plano de trabajo con el empleo del sistema FDSS empleando una señal de entrada triangular.

Con el empleo de esta entrada del sistema se mejoran los resultados obtenidos con la señal rectangular y cosenoidal. En este caso el Jammer impide las comunicaciones a distancias inferiores a los 1560 metros. Sin embargo, puede llegar a ser efectivo a distancias de hasta 2.1 Km en función de la distancia entre transmisor y receptor. De esta manera se reduce considerablemente la amenaza del Jammer al tener que encontrarse mucho más próximo para que el ataque resulte efectivo.

A partir de las Tablas 4.3 y 4.4 se observa la mejora en la calidad de la señal recibida con el empleo de la señal triangular respecto a la cosenoidal, y como esta mejora es mayor cuando el receptor se encuentra próximo al Jammer



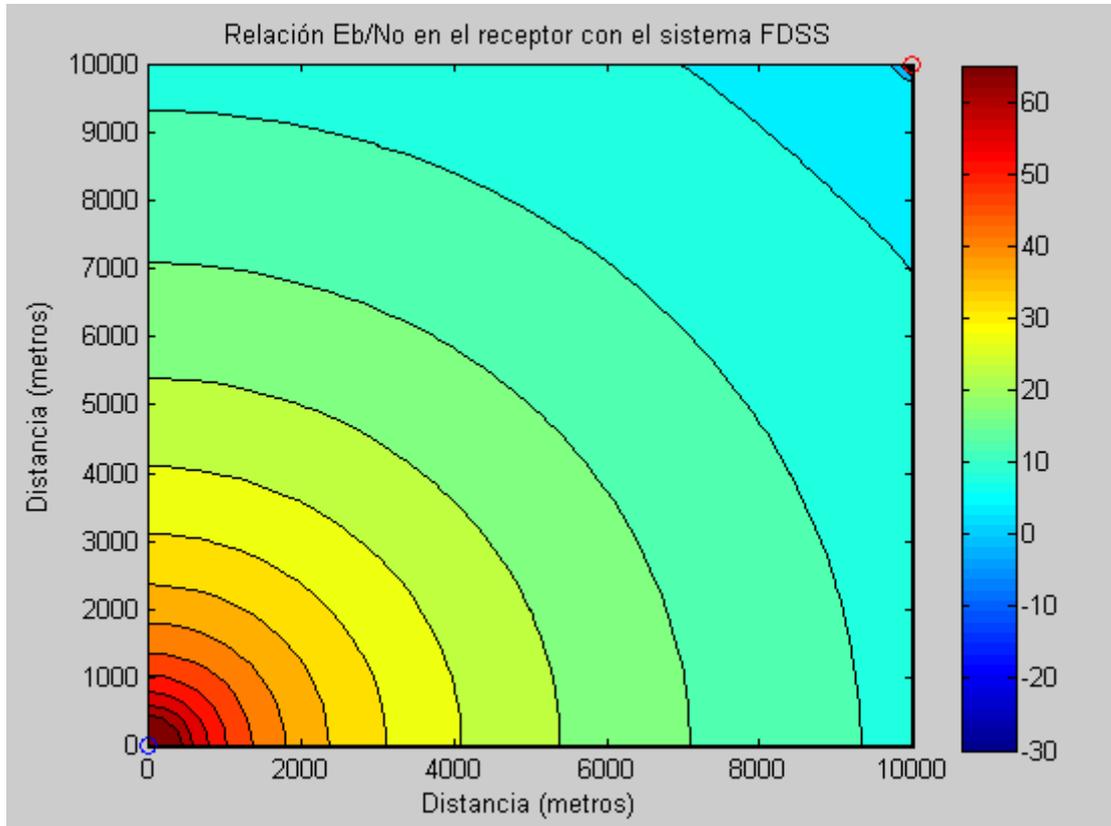
**Figura 4.4:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.4:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	70.00	51.66	39.62	32.57	27.57	23.69	20.52	17.84	15.52	13.47	11.64
1000	51.66	45.64	37.68	31.65	27.04	23.34	20.27	17.65	15.37	13.35	11.53
2000	39.62	37.68	33.59	29.37	25.62	22.38	19.58	17.12	14.95	13.00	11.25
3000	32.57	31.65	29.37	26.53	23.67	20.98	18.53	16.32	14.32	12.50	10.84
4000	27.57	27.04	25.62	23.67	21.50	19.33	17.27	15.32	13.51	11.84	10.28
5000	23.69	23.34	22.38	20.98	19.33	17.61	15.87	14.18	12.57	11.04	9.60
6000	20.52	20.27	19.58	18.53	17.27	15.87	14.42	12.95	11.50	10.13	8.82
7000	17.84	17.65	17.12	16.32	15.32	14.18	12.95	11.67	10.41	9.15	7.95
8000	15.52	15.37	14.95	14.32	13.51	12.57	11.50	10.41	9.23	8.03	6.89
9000	13.47	13.35	13.00	12.50	11.84	11.04	10.13	9.15	8.03	6.72	5.33
10000	11.64	11.53	11.25	10.84	10.28	9.60	8.82	7.95	6.89	5.33	-30.00

En la Figura 4.5 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) en el receptor para la transmisión de señales de voz con el empleo del sistema FDSS con el empleo de una señal de entrada Gaussiana.

Con el empleo de esta señal de entrada se obtienen los mejores resultados al resultar efectivo el Jammer a distancias inferiores a los 1415 metros. Sin embargo, en función de la distancia entre transmisor y receptor el Jammer puede atacar con éxito las comunicaciones enemigas a distancias de hasta 2 Km.



**Figura 4.5:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

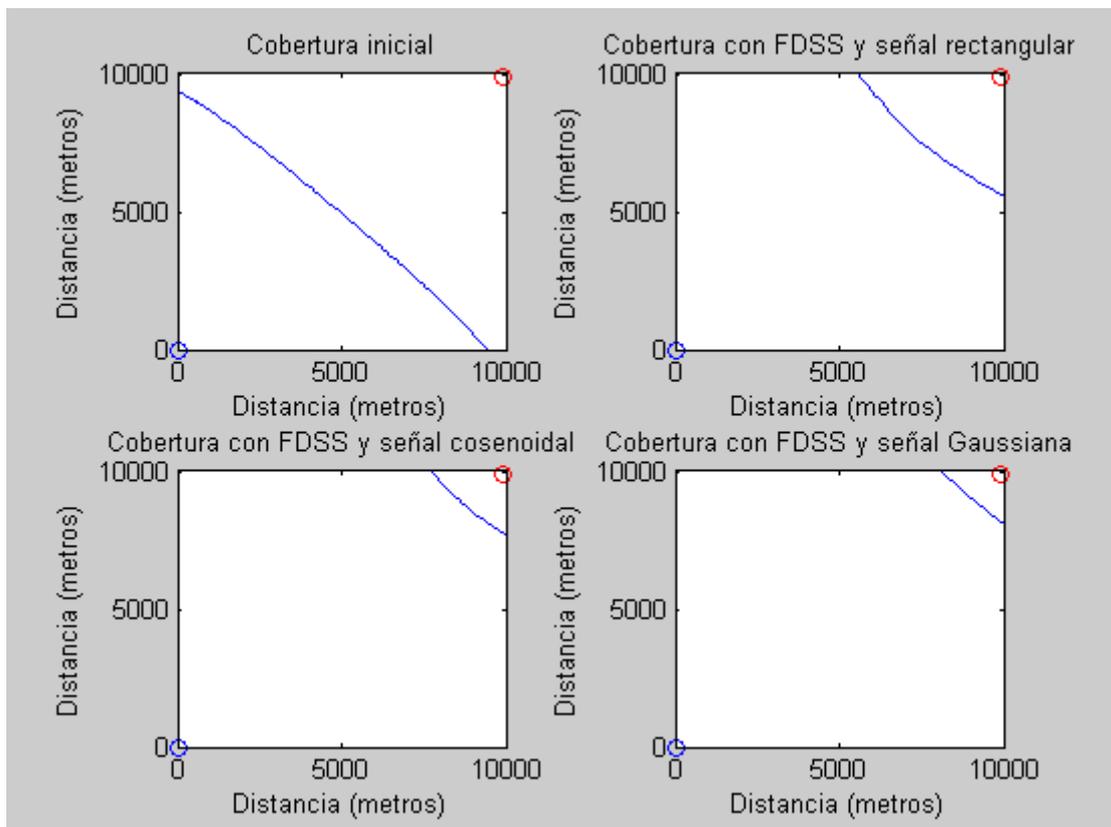
**Tabla 4.5:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	70.00	51.66	39.62	32.57	27.57	23.69	20.52	17.83	15.51	13.46	11.63
1000	51.66	45.64	37.67	31.65	27.03	23.34	20.27	17.64	15.36	13.34	11.53
2000	39.62	37.67	33.59	29.36	25.61	22.37	19.57	17.11	14.95	13.01	11.26
3000	32.57	31.65	29.36	26.53	23.66	20.97	18.53	16.33	14.33	12.51	10.85
4000	27.57	27.03	25.61	23.66	21.50	19.34	17.28	15.34	13.53	11.86	10.30
5000	23.69	23.34	22.37	20.97	19.34	17.62	15.89	14.21	12.60	11.08	9.64
6000	20.52	20.27	19.57	18.53	17.28	15.89	14.44	12.99	11.57	10.20	8.89
7000	17.83	17.64	17.11	16.33	15.34	14.21	12.99	11.74	10.47	9.23	8.04
8000	15.51	15.36	14.95	14.33	13.53	12.60	11.57	10.47	9.35	8.21	7.09
9000	13.46	13.34	13.01	12.51	11.86	11.08	10.20	9.23	8.21	7.07	5.90
10000	11.63	11.53	11.26	10.85	10.30	9.64	8.89	8.04	7.09	5.90	-30.00

En la Figura 4.6 se muestra la cobertura del enlace en función de la posición del receptor tanto inicialmente como con el sistema FDSS y algunas de las señales de entrada empleadas.

Podemos apreciar la diferencia existente entre emplear el sistema WCDMA y el sistema FDSS. Esto se aprecia mejor en la Tabla 4.6 donde se muestra la zona del plano bajo estudio afectada por el Jammer. El plano bajo estudio presenta un área de 100 Km<sup>2</sup>, existiendo cobertura inicialmente en una región de 47.94 Km<sup>2</sup>. Con el empleo del sistema FDSS se mejora notablemente la cobertura del enlace deseado. Así mismo, es determinante la señal de entrada empleada, al variar considerablemente el área de cobertura. Mientras que con una entrada rectangular existe cobertura en una región de 88.27 Km<sup>2</sup>, con una entrada Gaussiana existe cobertura en 97.88 Km<sup>2</sup> como se observa a partir de la Tabla 4.6.

A partir de los resultados se observa la reducción en el impacto del Jammer en las comunicaciones con el empleo del sistema FDSS al tener que situarse a distancia menores al receptor y la importancia en la elección de la señal de entrada.



**Figura 4.6:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del receptor

**Tabla 4.6:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del receptor.

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	47.94
FDSS	Rectangular	88.27
	Cosenoidal	96.73
	Triangular	97.46
	Gaussiana	97.88

#### 4.2.2 Cobertura en función de la posición del transmisor

En un segundo escenario, hemos fijado la posición del transmisor de Jammer así como del receptor y hemos variado la posición del transmisor a lo largo del plano. El objetivo, al igual que en el caso anterior, es establecer un estudio de cobertura en el enlace entre transmisor y receptor y ver las mejoras que ofrece el empleo del sistema FDSS en el mismo.

Las posiciones empleadas para el transmisor de Jammer y el receptor se muestran a continuación:

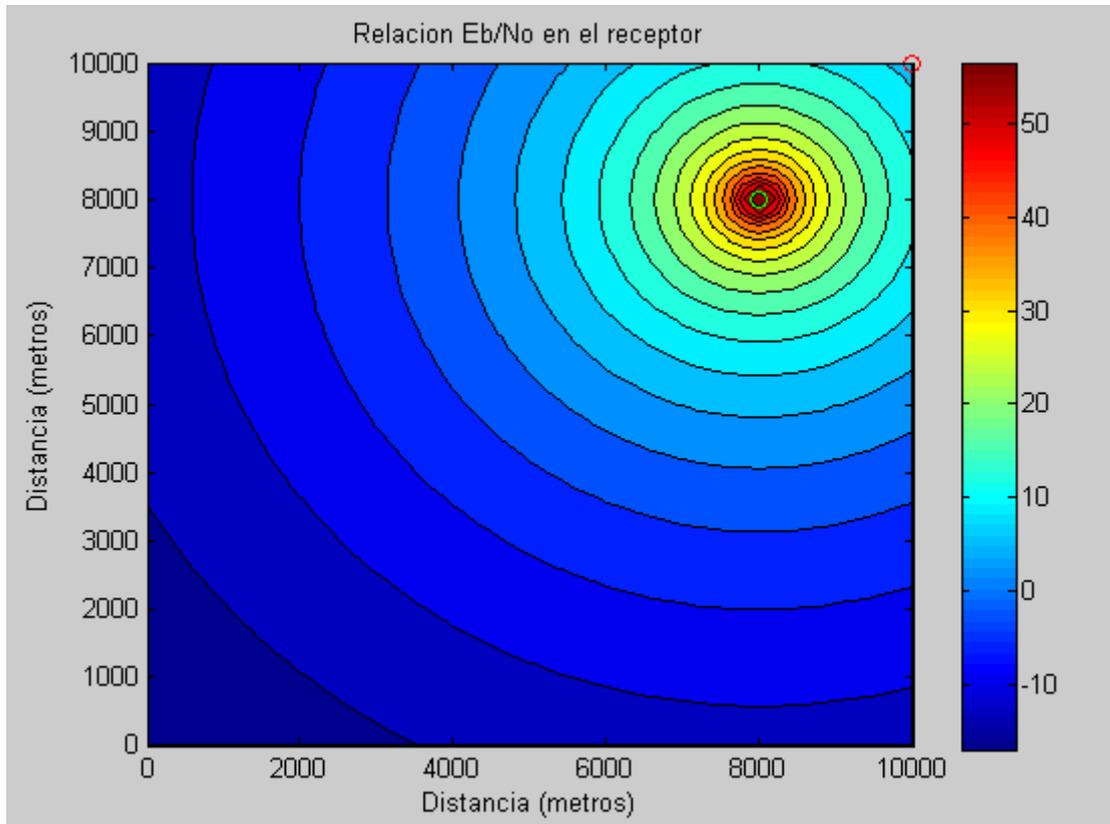
- Receptor:  $(x_1, y_1) = (8000, 8000)$  m.
- Transmisor interferente:  $(x_2, y_2) = (10000, 10000)$  m.

Mantenemos los valores de potencia empleados en el escenario para ambos tipos de transmisores, así como las ganancias de las antenas y las alturas de las mismas. El modelo de transmisión empleado para caracterizar el enlace sigue siendo el modelo de las dos pendientes. Así mismo, consideramos posible establecer una comunicación entre transmisor y receptor cuando  $E_b/N_o \geq 7\text{dB}$ .

En la Figura 4.7 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor para la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor a lo largo del plano de trabajo.

A partir de los resultados obtenidos se observa que inicialmente únicamente se cumplen los criterios de calidad en la recepción de la señal cuando el transmisor se encuentra a distancias menores de 2850 metros del receptor, que se encuentra situado en  $(8000, 8000)$  m. En este caso, el transmisor interferente se encuentra a casi 3 Km del

receptor y es capaz de interrumpir las comunicaciones cuando la distancia entre transmisor y receptor es menor a los 2.83 Km. Es destacable que estas son las prestaciones proporcionadas por el sistema WCDMA.



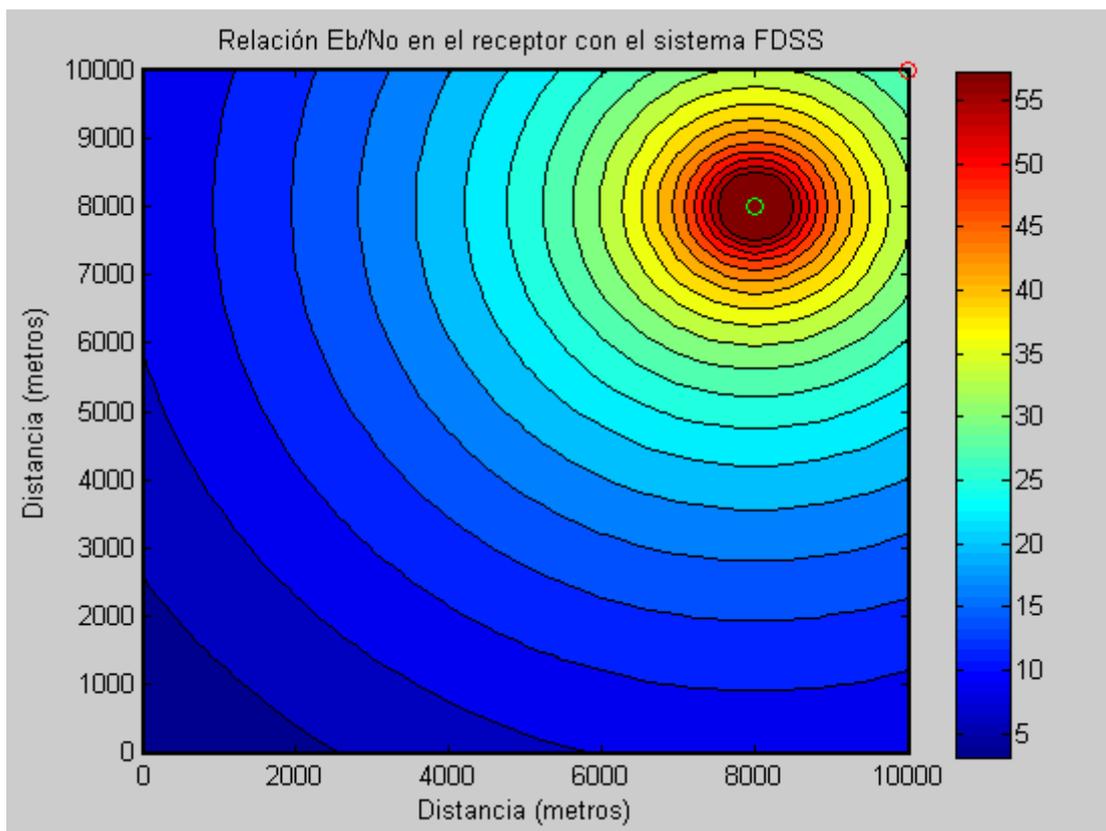
**Figura 4.7:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor

**Tabla 4.7:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-17.00	-15.92	-14.85	-13.84	-12.92	-12.12	-11.50	-11.11	-10.98	-11.11	-11.50
1000	-15.92	-14.68	-13.44	-12.24	-11.11	-10.12	-9.34	-8.83	-8.66	-8.83	-9.34
2000	-14.85	-13.44	-12.00	-10.56	-9.17	-7.92	-6.90	-6.22	-5.98	-6.22	-6.90
3000	-13.84	-12.24	-10.56	-8.83	-7.11	-5.48	-4.10	-3.15	-2.81	-3.15	-4.10
4000	-12.92	-11.11	-9.17	-7.11	-4.96	-2.81	-0.87	0.54	1.06	0.54	-0.87
5000	-12.12	-10.12	-7.92	-5.48	-2.81	0.04	2.87	5.15	6.06	5.15	2.87
6000	-11.50	-9.34	-6.90	-4.10	-0.87	2.87	7.08	11.17	13.10	11.17	7.08
7000	-11.11	-8.83	-6.22	-3.15	0.54	5.15	11.17	19.13	25.15	19.13	11.17
8000	-10.98	-8.66	-5.98	-2.81	1.06	6.06	13.10	25.15	60.00	25.15	13.10
9000	-11.11	-8.83	-6.22	-3.15	0.54	5.15	11.17	19.13	25.15	19.13	11.17
10000	-11.50	-9.34	-6.90	-4.10	-0.87	2.87	7.08	11.17	13.10	11.17	7.08

En la Figura 4.8 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor para las distintas posiciones del transmisor en el plano estudiado con el empleo del sistema FDSS cuando la señal de entrada es la rectangular.

Al introducir el sistema FDSS, con las ventajas que proporciona la selectividad en frecuencia, las prestaciones mejoran mucho. En este caso el transmisor puede estar situado a distancias de hasta 9 Km del receptor, pudiendo recibir esta la señal con el mínimo de calidad necesario pese al ataque del Jammer, que se encuentra mucho más próximo a su posición. Mientras que inicialmente el transmisor debía encontrarse a distancias inferiores a la distancia entre Jammer y receptor para que existiese cobertura en el enlace deseado, con el empleo del sistema FDSS es posible la transmisión de información del transmisor al receptor cuando la distancia entre estos es muy superior a la distancia a la que se encuentra el Jammer del receptor. De esta manera, se reduce notablemente el impacto del Jammer en las comunicaciones.



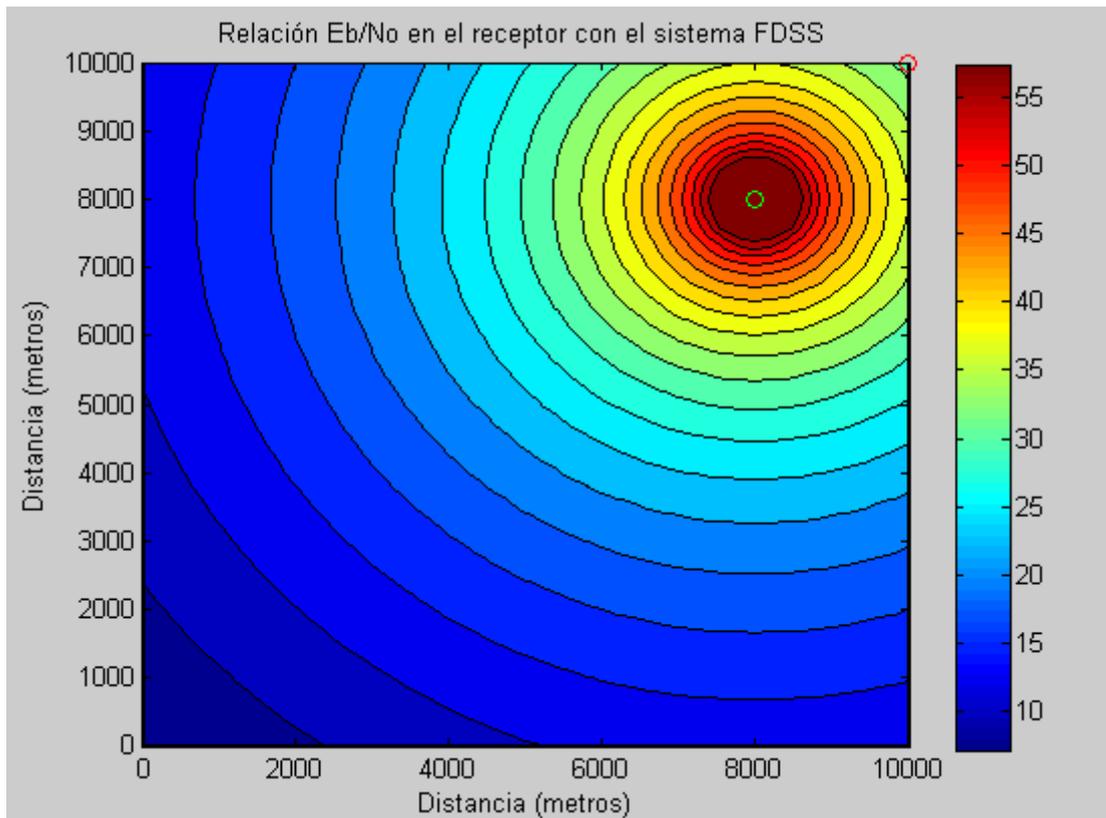
**Figura 4.8:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.8:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

<b>Distancia (m)</b>	<b>0</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>7000</b>	<b>8000</b>	<b>9000</b>	<b>10000</b>
<b>0</b>	3.13	4.21	5.27	6.29	7.21	8.01	8.62	9.02	9.15	9.02	8.62
<b>1000</b>	4.21	5.45	6.69	7.89	9.02	10.01	10.79	11.30	11.47	11.30	10.79
<b>2000</b>	5.27	6.69	8.13	9.57	10.95	12.21	13.23	13.91	14.15	13.91	13.23
<b>3000</b>	6.29	7.89	9.57	11.30	13.02	14.65	16.03	16.98	17.32	16.98	16.03
<b>4000</b>	7.21	9.02	10.95	13.02	15.17	17.32	19.25	20.67	21.19	20.67	19.25
<b>5000</b>	8.01	10.01	12.21	14.65	17.32	20.17	23.00	25.27	26.19	25.27	23.00
<b>6000</b>	8.62	10.79	13.23	16.03	19.25	23.00	27.21	31.30	33.23	31.30	27.21
<b>7000</b>	9.02	11.30	13.91	16.98	20.67	25.27	31.30	39.25	45.27	39.25	31.30
<b>8000</b>	9.15	11.47	14.15	17.32	21.19	26.19	33.23	45.27	60.00	45.27	33.23
<b>9000</b>	9.02	11.30	13.91	16.98	20.67	25.27	31.30	39.25	45.27	39.25	31.30
<b>10000</b>	8.62	10.79	13.23	16.03	19.25	23.00	27.21	31.30	33.23	31.30	27.21

En la Figura 4.9 se muestra la cobertura del enlace entre transmisor y receptor a partir de la relación  $E_b/N_o$  en el receptor con el empleo del sistema FDSS cuando la señal de entrada es la cosenoidal para la transmisión de voz.

Con el empleo de la señal cosenoidal como entrada del sistema el radio de cobertura alrededor del receptor que permite la comunicación conforme a la calidad exigida es superior a los 11.3 Km, que es la máxima distancia a la que puede encontrarse el transmisor del receptor en el plano estudiado, es por ello por lo que existe cobertura en todo el plano independientemente de la posición del transmisor en el mismo. El empleo de esta señal de entrada supone una importante mejora al permitir las comunicaciones entre transmisor y receptor desde distancias mayores a las obtenidas con el empleo de una entrada rectangular.



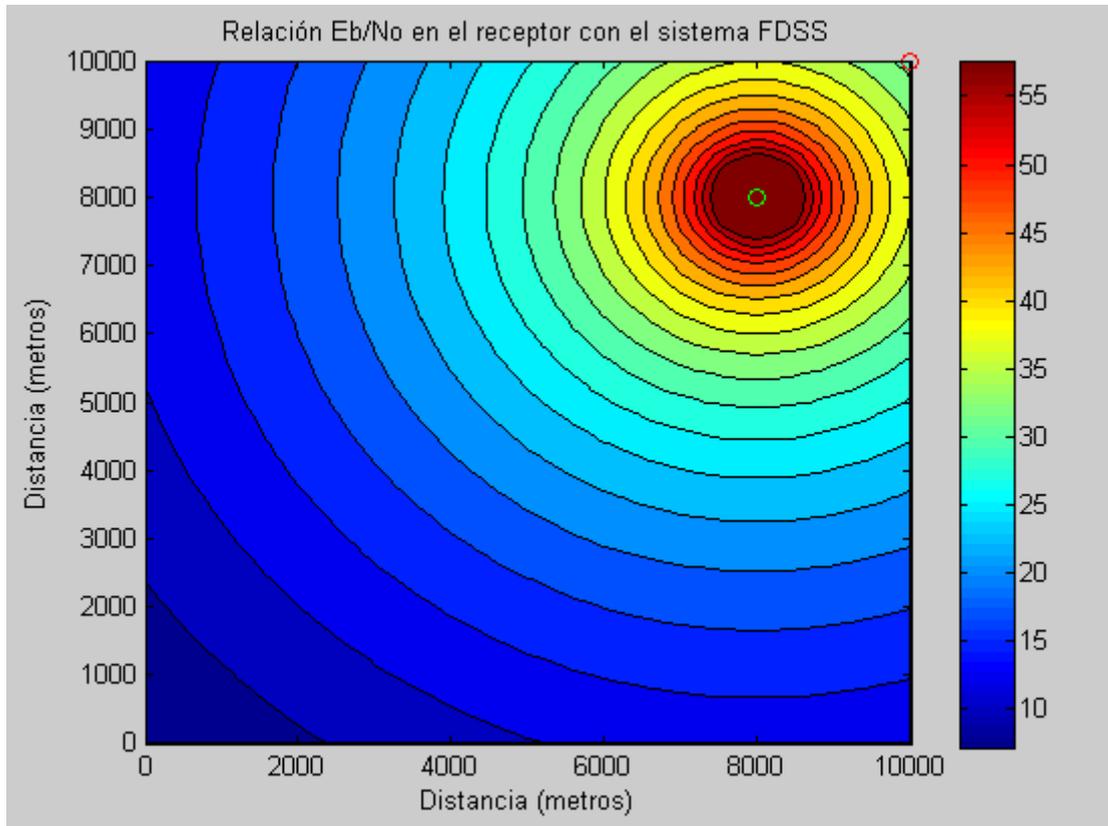
**Figura 4.9:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.9:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	7.08	8.16	9.22	10.23	11.16	11.95	12.57	12.96	13.10	12.96	12.57
1000	8.16	9.40	10.63	11.84	12.96	13.95	14.73	15.24	15.42	15.24	14.73
2000	9.22	10.63	12.07	13.51	14.90	16.16	17.18	17.86	18.09	17.86	17.18
3000	10.23	11.84	13.51	15.24	16.96	18.59	19.97	20.92	21.26	20.92	19.97
4000	11.16	12.96	14.90	16.96	19.12	21.26	23.20	24.61	25.14	24.61	23.20
5000	11.95	13.95	16.16	18.59	21.26	24.11	26.94	29.22	30.14	29.22	26.94
6000	12.57	14.73	17.18	19.97	23.20	26.94	31.16	35.24	37.18	35.24	31.16
7000	12.96	15.24	17.86	20.92	24.61	29.22	35.24	43.20	49.22	43.20	35.24
8000	13.10	15.42	18.09	21.26	25.14	30.14	37.18	49.22	60.00	49.22	37.18
9000	12.96	15.24	17.86	20.92	24.61	29.22	35.24	43.20	49.22	43.20	35.24
10000	12.57	14.73	17.18	19.97	23.20	26.94	31.16	35.24	37.18	35.24	31.16

En la Figura 4.10 se muestra la relación  $E_b/N_o$  obtenida en el receptor con el empleo de la señal triangular como entrada del sistema FDSS para la transmisión de señales de voz.

A partir de la Tabla 4.10 observamos que existe cobertura en toda la región bajo estudio independientemente de la posición del transmisor. Se mejoran las prestaciones respecto a la señal cosenoidal al recibirse la señal con mayor calidad, sin embargo, al ser finita la región estudiada, se obtienen los mismos resultados en cuanto a la cobertura del enlace deseado en dicha región.



**Figura 4.10:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

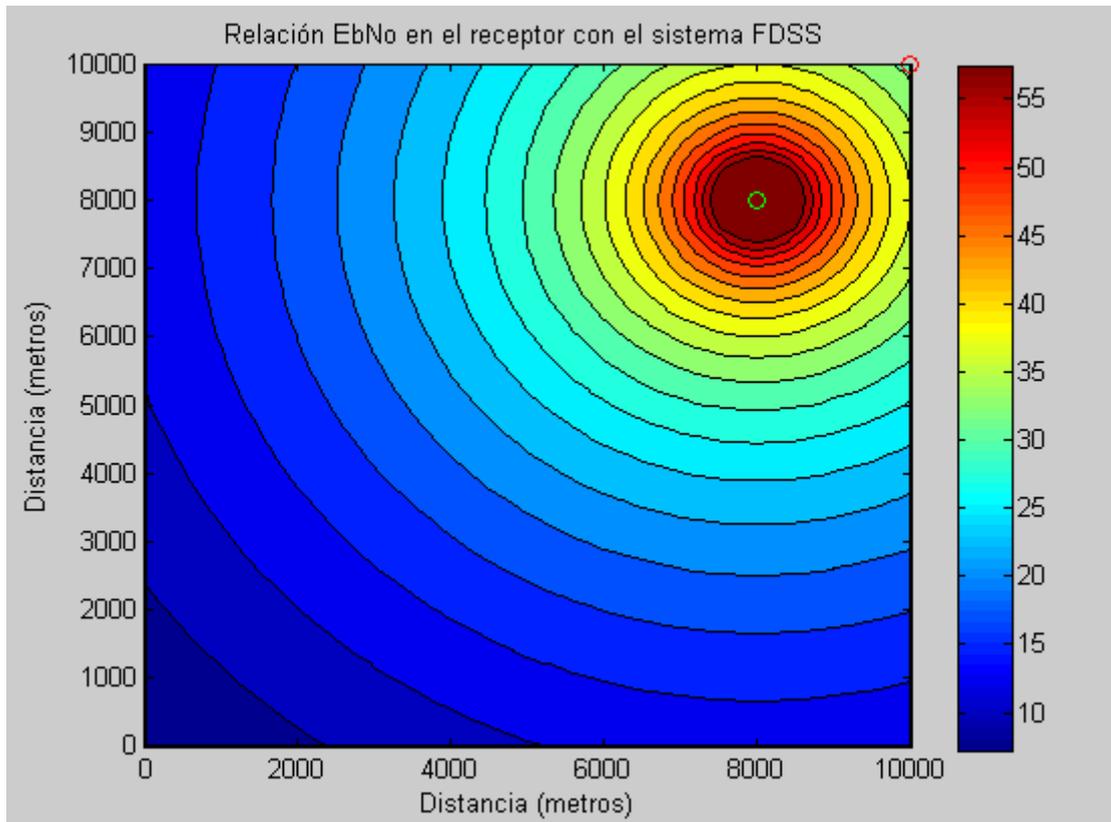
**Tabla 4.10:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	7.17	8.25	9.31	10.32	11.25	12.04	12.66	13.05	13.19	13.05	12.66
1000	8.25	9.49	10.72	11.92	13.05	14.04	14.82	15.33	15.51	15.33	14.82
2000	9.31	10.72	12.16	13.60	14.99	16.25	17.27	17.95	18.18	17.95	17.27
3000	10.32	11.92	13.60	15.33	17.05	18.68	20.06	21.01	21.35	21.01	20.06
4000	11.25	13.05	14.99	17.05	19.21	21.35	23.29	24.70	25.23	24.70	23.29
5000	12.04	14.04	16.25	18.68	21.35	24.20	27.03	29.31	30.22	29.31	27.03
6000	12.66	14.82	17.27	20.06	23.29	27.03	31.25	35.33	37.27	35.33	31.25
7000	13.05	15.33	17.95	21.01	24.70	29.31	35.33	43.29	49.31	43.29	35.33
8000	13.19	15.51	18.18	21.35	25.23	30.22	37.27	49.31	60.00	49.31	37.27
9000	13.05	15.33	17.95	21.01	24.70	29.31	35.33	43.29	49.31	43.29	35.33
10000	12.66	14.82	17.27	20.06	23.29	27.03	31.25	35.33	37.27	35.33	31.25

En la Figura 4.11 se muestra la relación  $E_b/N_o$  obtenida en el receptor con el empleo de la señal Gaussiana como entrada del sistema FDSS.

Pese a que el filtrado que realiza el sistema con esta señal de entrada es más eficiente que el realizado para los otros tipos de señales de entrada no se producen mejoras importantes en la calidad de la señal recibida. Al igual que ocurría cuando la entrada del sistema FDSS era una señal cosenoidal o triangular, existe cobertura en toda la región estudiada independientemente de la posición del transmisor en el plano de trabajo.

Es destacable que pese a que apenas haya cambios en la región de cobertura en función de la señal de empleada, la banda eliminada por el sistema es muy diferente. A menor potencia en los lóbulos secundarios de la señal de entrada empleada, la banda eliminada se aproxima más a la anchura de banda que presenta la señal interferente.



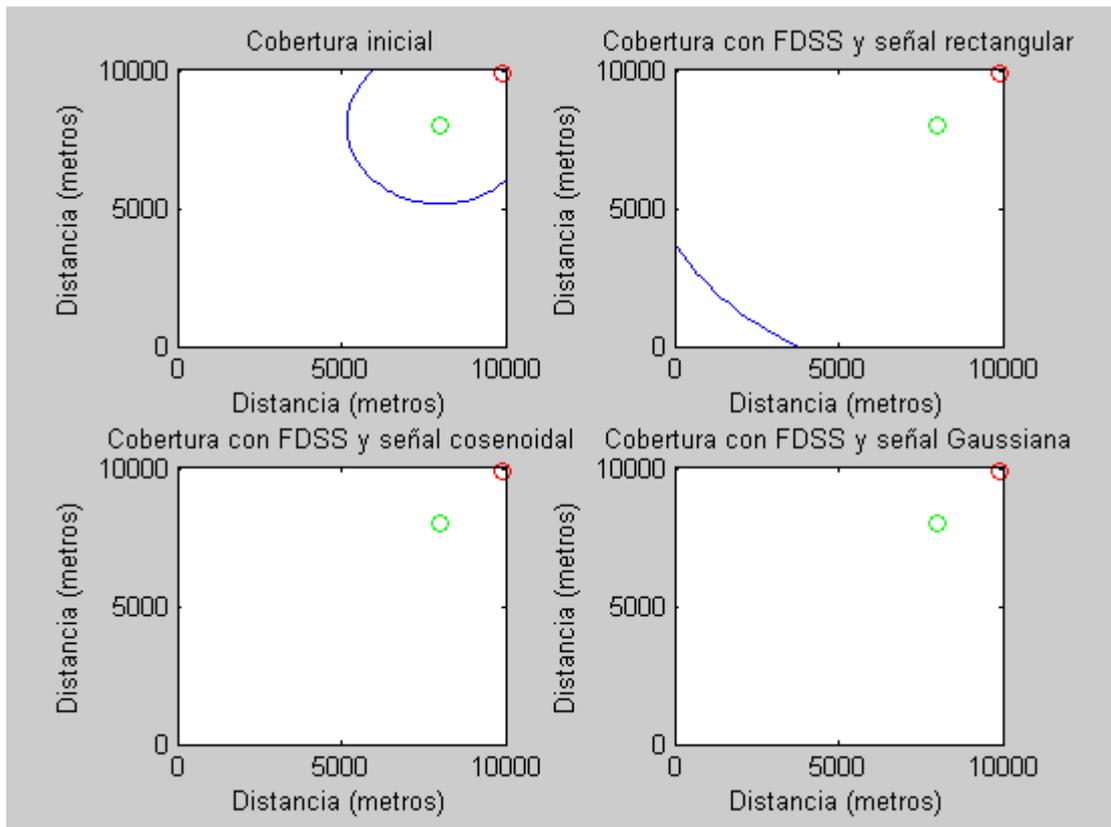
**Figura 4.11:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.11:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	7.23	8.31	9.37	10.38	11.31	12.10	12.72	13.11	13.25	13.11	12.72
1000	8.31	9.55	10.78	11.99	13.11	14.10	14.88	15.39	15.57	15.39	14.88
2000	9.37	10.78	12.22	13.66	15.05	16.31	17.33	18.01	18.24	18.01	17.33
3000	10.38	11.99	13.66	15.39	17.11	18.74	20.12	21.07	21.41	21.07	20.12
4000	11.31	13.11	15.05	17.11	19.27	21.41	23.35	24.76	25.29	24.76	23.35
5000	12.10	14.10	16.31	18.74	21.41	24.26	27.09	29.37	30.28	29.37	27.09
6000	12.72	14.88	17.33	20.12	23.35	27.09	31.31	35.39	37.33	35.39	31.31
7000	13.11	15.39	18.01	21.07	24.76	29.37	35.39	43.35	49.37	43.35	35.39
8000	13.25	15.57	18.24	21.41	25.29	30.28	37.33	49.37	60.00	49.37	37.33
9000	13.11	15.39	18.01	21.07	24.76	29.37	35.39	43.35	49.37	43.35	35.39
10000	12.72	14.88	17.33	20.12	23.35	27.09	31.31	35.39	37.33	35.39	31.31

En la Figura 4.12 se muestra la región de cobertura inicial así como con el empleo del sistema FDSS para alguna de las señales de entrada empleadas.

A partir de dicha Figura se observa que la cobertura inicial, que es la misma a la proporcionada por el sistema WCDMA presenta un área de  $19.76 \text{ Km}^2$  según se observa a partir de la Tabla 4.12. El empleo del sistema FDSS resulta de gran importancia para contrarrestar la amenaza del Jammer. Con el empleo de una entrada rectangular a dicho sistema la zona de cobertura aumenta hasta los  $93.77 \text{ Km}^2$  permitiendo la cobertura entre receptor y transmisor desde distancias mucho mayores pese a la proximidad a la que se encuentra el Jammer del receptor. Con la señal cosenoidal, triangular y Gaussiana existe cobertura en todo el plano estudiado, permitiendo la comunicación entre transmisor y receptor a distancias superiores a los 11 Km. Si bien existen diferencias en las prestaciones obtenidas entre estas señales de entrada, estas son mucho menores que las existentes cuando la entrada es la rectangular. Estas diferencias no se aprecian en la cobertura del enlace deseado debido a que la región estudiada es de únicamente  $100 \text{ Km}^2$  pero si se aprecian a partir de la calidad con que se recibe la señal del transmisor en el receptor. A partir de la Figura 4.12 se observan las diferentes prestaciones en las distintas situaciones analizadas.



**Figura 4.12:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor

**Tabla 4.12:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor.

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	19.76
FDSS	Rectangular	93.77
	Cosenoidal	100
	Triangular	100
	Gaussiana	100

### 4.2.3 Cobertura en función de la posición del Jammer

En el último escenario hemos fijado la posición de transmisor y receptor y hemos variado la posición del transmisor de Jammer a lo largo del plano de estudio.

Queremos ver la cobertura que presenta el enlace deseado en función de la variación de la posición del Jammer y la mejora producida en la misma por el empleo del sistema FDSS.

Al igual que en los otros dos escenarios utilizamos las 4 señales de entrada para ver su efecto en los resultados.

Las posiciones empleadas para el transmisor y el receptor se muestran a continuación:

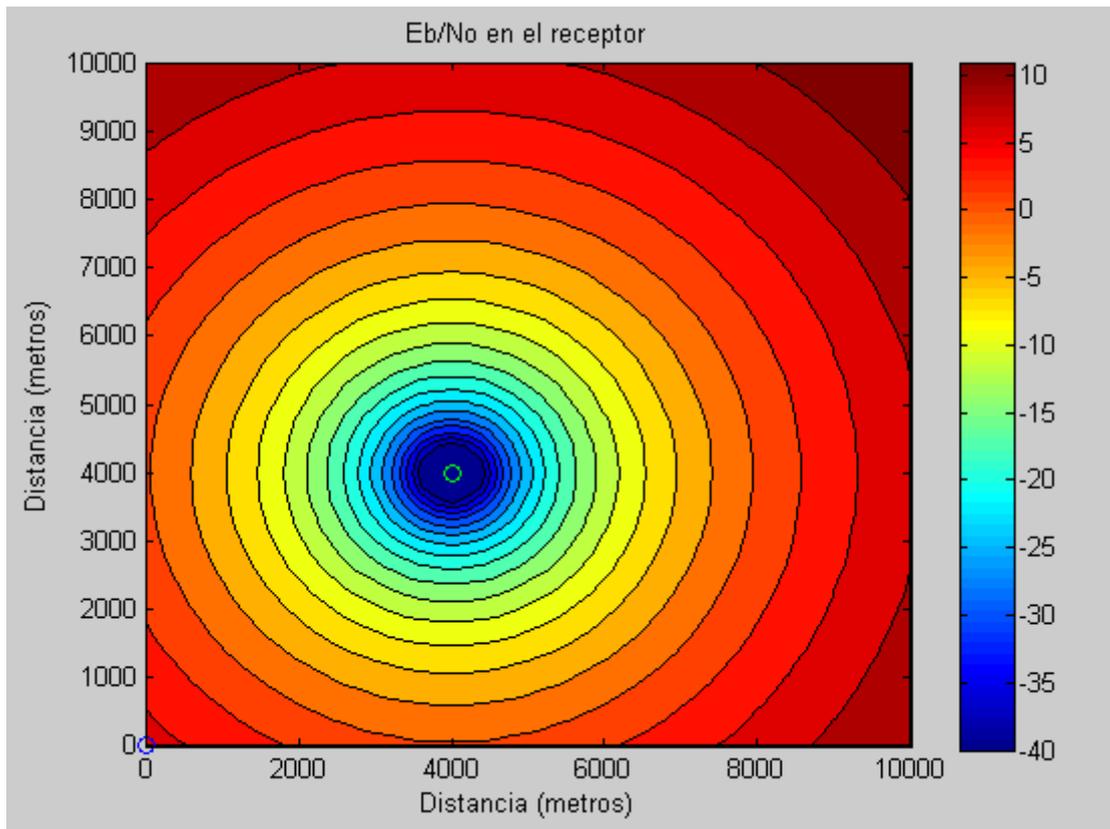
- Transmisor:  $(x_1, x_2) = (0, 0)$  m.
- Receptor:  $(x_1, x_2) = (4000, 4000)$  m.

En la Figura 4.13 se muestran los resultados obtenidos inicialmente en el receptor en función de la posición del Jammer en el plano, para la transmisión de señales de voz.

A partir de los resultados obtenidos se observa que el Jammer interrumpe las comunicaciones entre transmisor y receptor cuando se encuentra a distancias inferiores a los 5.66 Km del receptor, al impedir que este reciba la señal de información con la calidad necesaria. Por tanto, la región de cobertura del enlace entre transmisor y receptor es muy reducida. Es de destacar que los resultados obtenidos sin el empleo del sistema FDSS son los mismos que se obtienen con el sistema WCDMA al presentar ambos sistemas la misma ganancia de proceso.

Al igual que ocurría en el escenario anterior, se observa que si la distancia entre Jammer y receptor es inferior a la distancia entre transmisor y receptor el ataque a las comunicaciones resulta efectivo. El impacto del Jammer en las comunicaciones es muy importante con el empleo del sistema WCDMA.

Es destacable que, pese a que movemos el Jammer a lo largo de todas las posiciones del plano, algunas de ellas representan situaciones muy improbables en una zona de guerra, ya que si el Jammer se encontrara en la trayectoria del transmisor y receptor, esto implicaría que o bien este último se encuentra en territorio enemigo o es el Jammer el que está en las líneas enemigas. A pesar de que esto constituya un hecho muy improbable se estudia para ver el efecto del sistema FDSS.



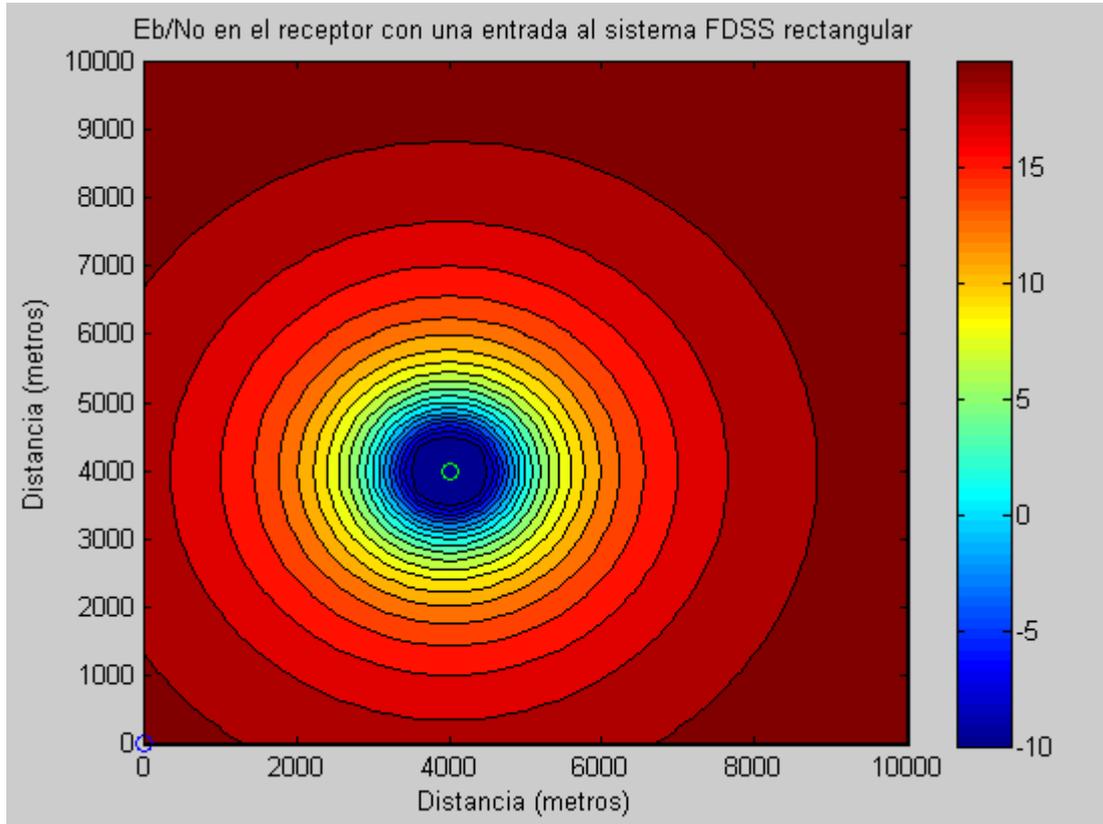
**Figura 4.13:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer

**Tabla 4.13:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	6.96	4.86	2.96	1.56	1.04	1.56	2.96	4.86	6.96	9.02	10.96
1000	4.86	2.05	-0.75	-3.02	-3.94	-3.02	-0.75	2.05	4.86	7.47	9.79
2000	2.96	-0.75	-4.96	-9.03	-10.97	-9.03	-4.96	-0.75	2.96	6.13	8.82
3000	1.56	-3.02	-9.03	-16.99	-23.01	-16.99	-9.03	-3.02	1.56	5.20	8.17
4000	1.04	-3.94	-10.97	-23.01	-40.00	-23.01	-10.97	-3.94	1.04	4.86	7.94
5000	1.56	-3.02	-9.03	-16.99	-23.01	-16.99	-9.03	-3.02	1.56	5.20	8.17
6000	2.96	-0.75	-4.96	-9.03	-10.97	-9.03	-4.96	-0.75	2.96	6.13	8.82
7000	4.86	2.05	-0.75	-3.02	-3.94	-3.02	-0.75	2.05	4.86	7.47	9.79
8000	6.96	4.86	2.96	1.56	1.04	1.56	2.96	4.86	6.96	9.02	10.96
9000	9.02	7.47	6.13	5.20	4.86	5.20	6.13	7.47	9.02	10.64	12.22
10000	10.96	9.79	8.82	8.17	7.94	8.17	8.82	9.79	10.96	12.22	13.49

En la Figura 4.14 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) obtenida en el receptor en función de la posición del Jammer. Se emplea la señal rectangular como entrada del sistema FDSS.

A partir de la Tabla 4.14 se observa que se reduce de manera importante el radio de acción del Jammer. Al hacer uso del sistema FDSS con una entrada rectangular, únicamente si el Jammer se encuentra a una distancia inferior a los 1400 metros del receptor el ataque a las comunicaciones resulta efectivo. Se mejora ampliamente la región de cobertura con el empleo de este sistema limitando la acción del Jammer.



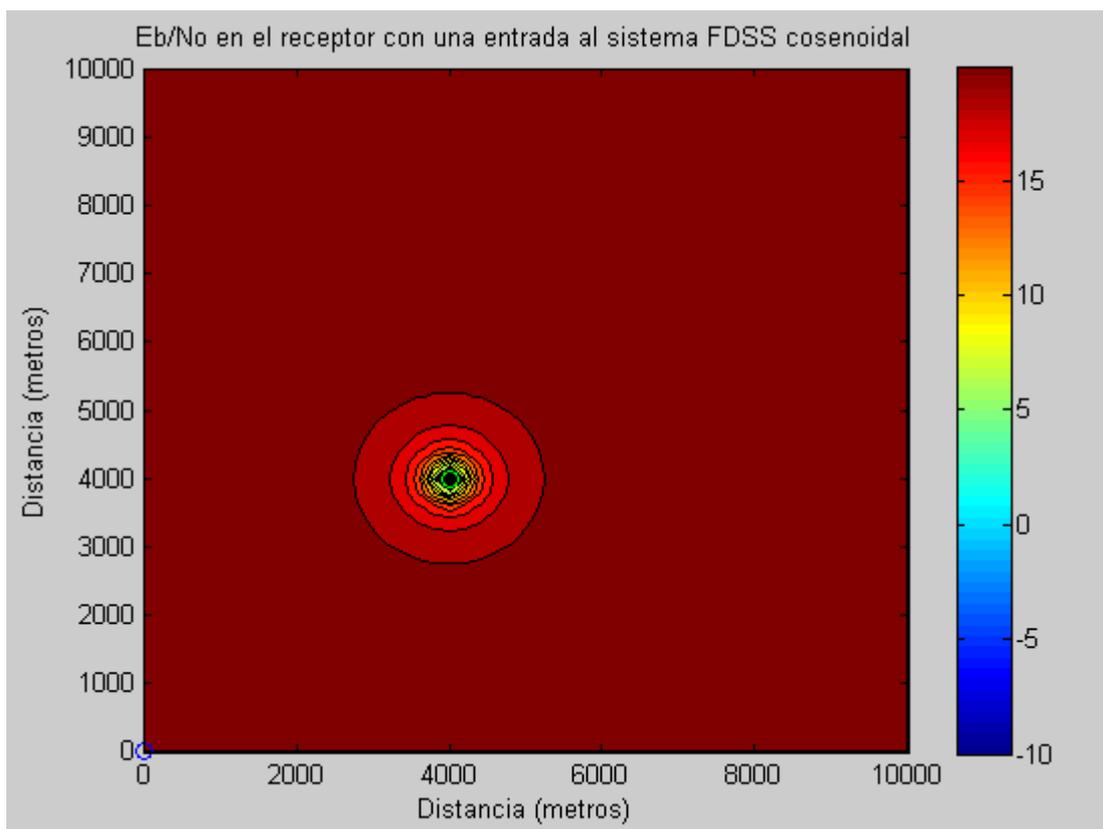
**Figura 4.14:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.14:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	20.20	19.76	19.27	18.86	18.69	18.86	19.27	19.76	20.20	20.55	20.81
1000	19.76	19.01	18.05	17.10	16.67	17.10	18.05	19.01	19.76	20.29	20.66
2000	19.27	18.05	16.16	13.73	12.38	13.73	16.16	18.05	19.27	20.03	20.52
3000	18.86	17.10	13.73	7.47	1.86	7.47	13.73	17.10	18.86	19.84	20.41
4000	18.69	16.67	12.38	1.86	-10.00	1.86	12.38	16.67	18.69	19.76	20.37
5000	18.86	17.10	13.73	7.47	1.86	7.47	13.73	17.10	18.86	19.84	20.41
6000	19.27	18.05	16.16	13.73	12.38	13.73	16.16	18.05	19.27	20.03	20.52
7000	19.76	19.01	18.05	17.10	16.67	17.10	18.05	19.01	19.76	20.29	20.66
8000	20.20	19.76	19.27	18.86	18.69	18.86	19.27	19.76	20.20	20.55	20.81
9000	20.55	20.29	20.03	19.84	19.76	19.84	20.03	20.29	20.55	20.77	20.96
10000	20.81	20.66	20.52	20.41	20.37	20.41	20.52	20.66	20.81	20.96	21.08

La Figura 4.15 representa la relación  $E_b/N_o$  (dB) en el receptor con el empleo del sistema FDSS cuando la entrada es una señal cosenoidal.

A partir de las Tabla 4.15 se observan las grandes prestaciones que proporciona el sistema FDSS con el empleo de esta señal de entrada. La selectividad en frecuencia que proporciona el sistema FDSS conjuntamente con el filtrado obtenido con la señal cosenoidal permite una importante reducción en el impacto del Jammer. Pese a que con el empleo del sistema FDSS y una entrada rectangular se reduce de manera importante la amenaza del Jammer al tener que estar más próximo al receptor, la acción de los Jammers sigue resultando peligrosa. Sin embargo, como consecuencia del mejor filtrado con la señal cosenoidal el Jammer debe encontrarse a menos de 250 metros del receptor para resultar efectivo. Dada la distancia entre posiciones enemigas en una zona de guerra, resulta muy improbable que se produzca al poder resultar fácilmente abatido. Por tanto, se ha pasado de una situación inicial muy peligrosa a una donde el Jammer no supone una amenaza para las comunicaciones debido al empleo del sistema FDSS.



**Figura 4.15:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.15:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz.

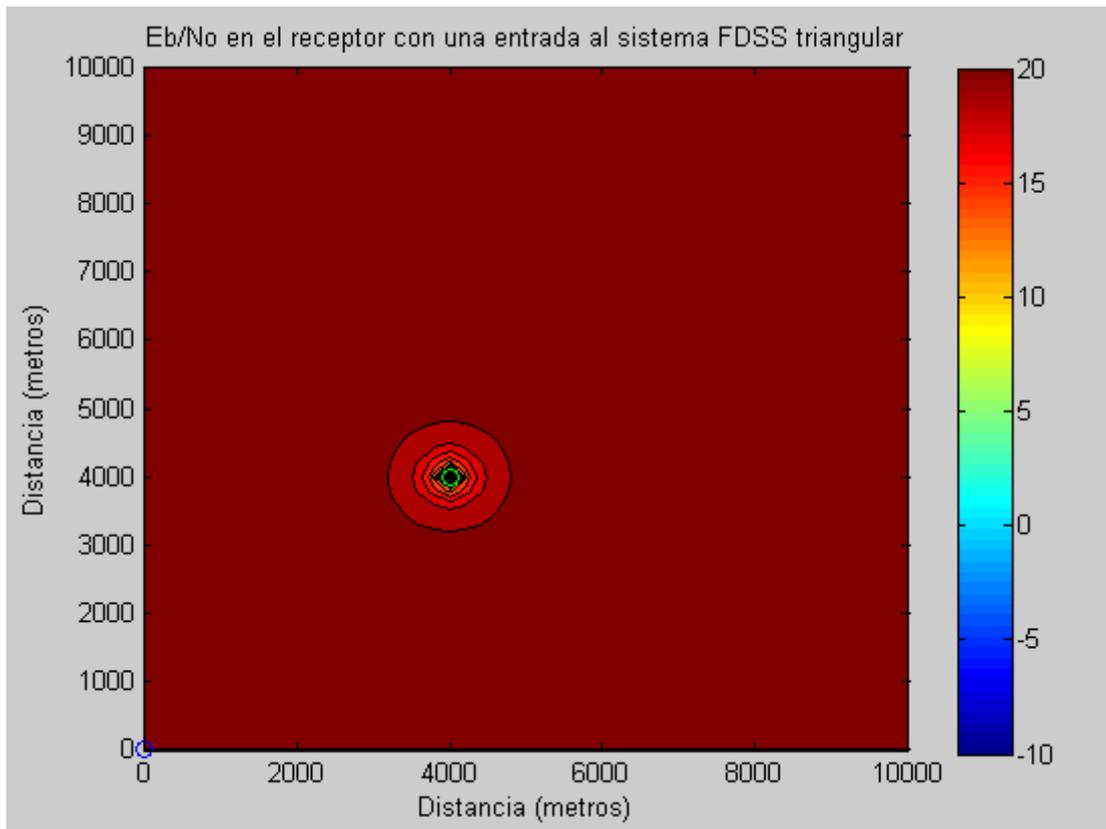
Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	21.41	21.38	21.35	21.32	21.31	21.32	21.35	21.38	21.41	21.45	21.47
1000	21.38	21.33	21.25	21.19	21.15	21.19	21.25	21.33	21.38	21.42	21.46
2000	21.35	21.25	21.10	20.90	20.78	20.90	21.10	21.25	21.35	21.40	21.44
3000	21.32	21.19	20.90	20.25	19.43	20.25	20.90	21.19	21.32	21.38	21.43
4000	21.31	21.15	20.78	19.43	-10.00	19.43	20.78	21.15	21.31	21.38	21.43
5000	21.32	21.19	20.90	20.25	19.43	20.25	20.90	21.19	21.32	21.38	21.43
6000	21.35	21.25	21.10	20.90	20.78	20.90	21.10	21.25	21.35	21.40	21.44
7000	21.38	21.33	21.25	21.19	21.15	21.19	21.25	21.33	21.38	21.42	21.46
8000	21.41	21.38	21.35	21.32	21.31	21.32	21.35	21.38	21.41	21.45	21.47
9000	21.45	21.42	21.40	21.38	21.38	21.38	21.40	21.42	21.45	21.46	21.47
10000	21.47	21.46	21.44	21.43	21.43	21.43	21.44	21.46	21.47	21.47	21.49

En la Figura 4.16 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor en función de la posición del Jammer con el empleo de una señal triangular como entrada del sistema FDSS.

Debido al mejor filtrado realizado por el sistema FDSS sobre la banda de frecuencias atacada con el empleo de esta señal de entrada, la amenaza del Jammer se reduce aún más, interrumpiendo las comunicaciones entre transmisor y receptor únicamente cuando se encuentra a distancias inferiores a 120 metros de este último. Esta amenaza es muy improbable dado que el transmisor de Jammer es traslado en jeep y que se encuentre situado a menos de 120 metros de soldados enemigos no es una situación real.

En la Figura 4.17 se muestran los resultados obtenidos con el empleo de la señal Gaussiana como entrada del sistema FDSS.

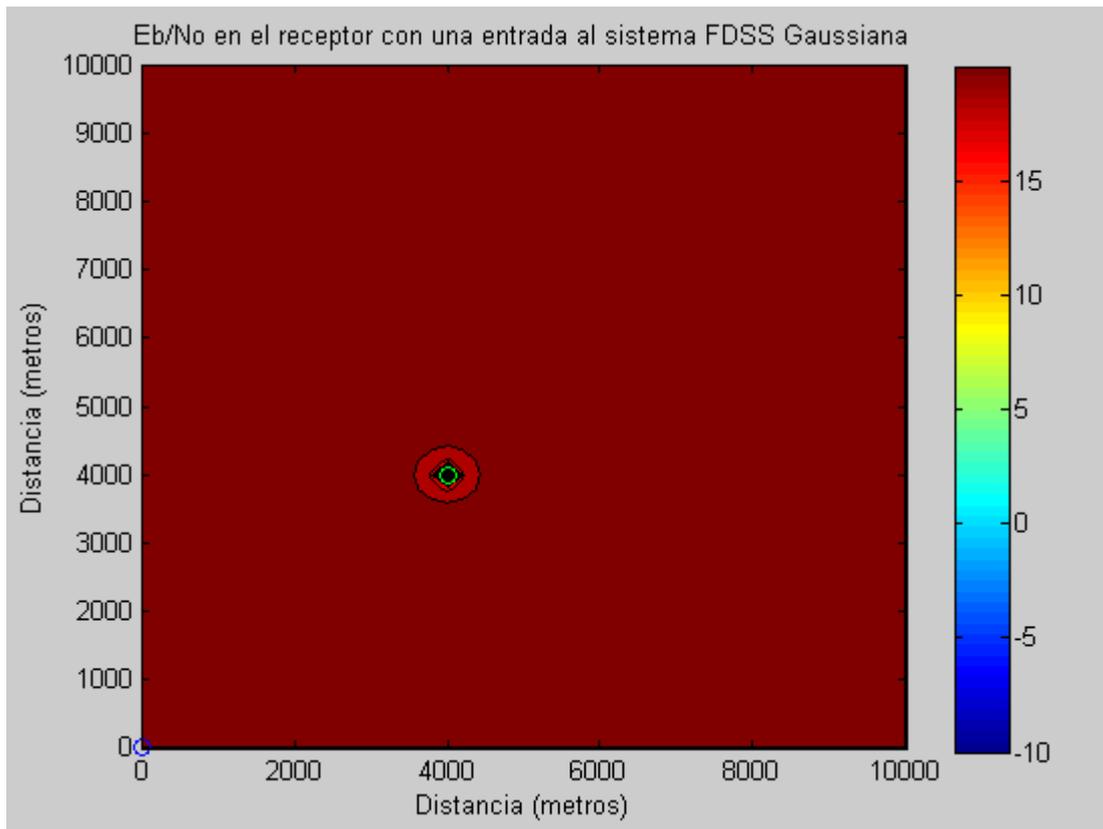
A partir de la Tabla 4.17 se observa que en todas las posiciones del Jammer en el plano se obtiene la calidad necesaria en el receptor. La región de cobertura es la totalidad del plano salvo una pequeña región circular con un radio de 45 metros alrededor de la posición del receptor desde la cual el Jammer es capaz de atacar las comunicaciones de forma efectiva. Al igual que ocurría con el empleo de la señal cosenoidal y triangular, la proximidad a la que debe encontrarse el Jammer del receptor hace que la amenaza del Jammer sea prácticamente nula por no ser una posibilidad real que soldados enemigos se encuentren tan próximos en una zona de guerra.



**Figura 4.16:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.16:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	21.46	21.44	21.40	21.39	21.39	21.39	21.40	21.44	21.46	21.47	21.48
1000	21.44	21.39	21.37	21.33	21.31	21.33	21.37	21.39	21.44	21.46	21.48
2000	21.40	21.37	21.28	21.15	21.08	21.15	21.28	21.37	21.40	21.45	21.47
3000	21.39	21.33	21.15	20.80	20.38	20.80	21.15	21.33	21.39	21.44	21.47
4000	21.39	21.31	21.08	20.38	-10.00	20.38	21.08	21.31	21.39	21.44	21.47
5000	21.39	21.33	21.15	20.80	20.38	20.80	21.15	21.33	21.39	21.44	21.47
6000	21.40	21.37	21.28	21.15	21.08	21.15	21.28	21.37	21.40	21.45	21.47
7000	21.44	21.39	21.37	21.33	21.31	21.33	21.37	21.39	21.44	21.46	21.48
8000	21.46	21.44	21.40	21.39	21.39	21.39	21.40	21.44	21.46	21.47	21.48
9000	21.47	21.46	21.45	21.44	21.44	21.44	21.45	21.46	21.47	21.48	21.49
10000	21.48	21.48	21.47	21.47	21.47	21.47	21.47	21.48	21.48	21.49	21.50



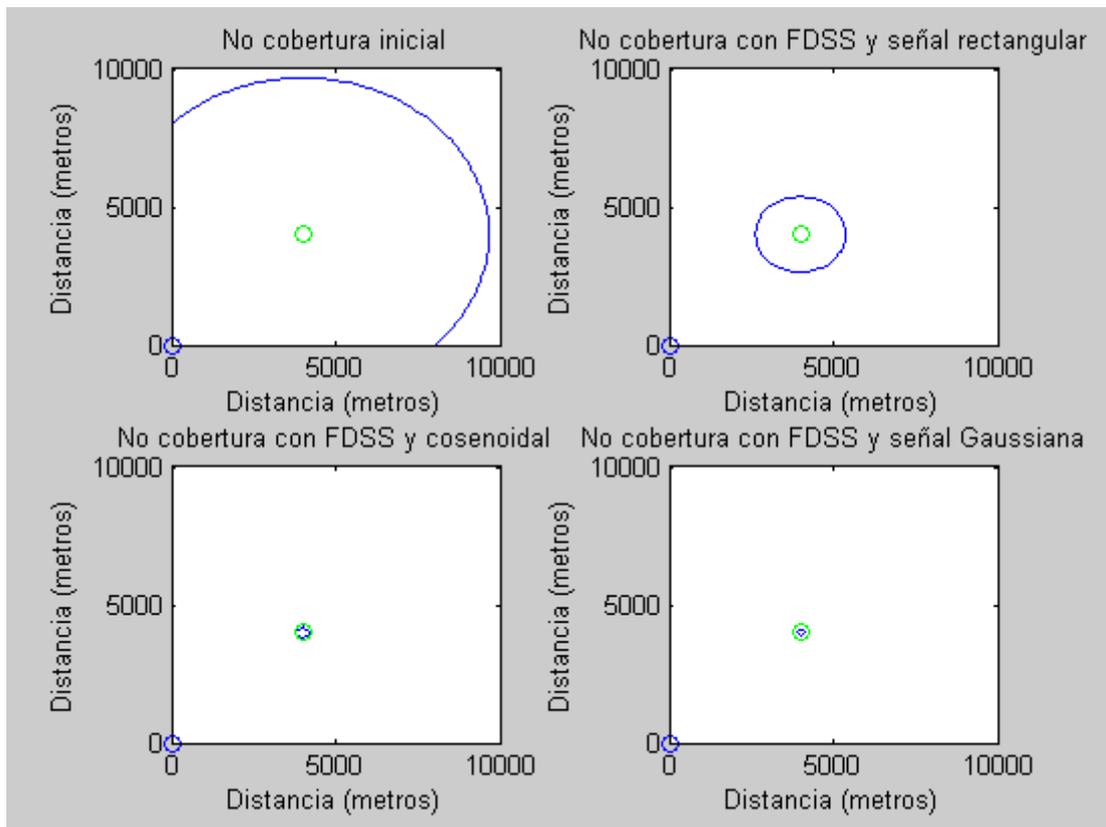
**Figura 4.17:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

**Tabla 4.17:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de voz.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	21.49	21.48	21.47	21.46	21.45	21.46	21.47	21.48	21.49	21.49	21.49
1000	21.48	21.46	21.43	21.40	21.40	21.40	21.43	21.46	21.48	21.49	21.49
2000	21.47	21.43	21.39	21.33	21.28	21.33	21.39	21.43	21.47	21.48	21.49
3000	21.46	21.40	21.33	21.16	20.95	21.16	21.33	21.40	21.46	21.48	21.49
4000	21.45	21.40	21.28	20.95	-10.00	20.95	21.28	21.40	21.45	21.48	21.49
5000	21.46	21.40	21.33	21.16	20.95	21.16	21.33	21.40	21.46	21.48	21.49
6000	21.47	21.43	21.39	21.33	21.28	21.33	21.39	21.43	21.47	21.48	21.49
7000	21.48	21.46	21.43	21.40	21.40	21.40	21.43	21.46	21.48	21.49	21.49
8000	21.49	21.48	21.47	21.46	21.45	21.46	21.47	21.48	21.49	21.49	21.49
9000	21.49	21.49	21.48	21.48	21.48	21.48	21.48	21.49	21.49	21.49	21.49
10000	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.49	21.50

En la Figura 4.18 se muestra la región afectada por el Jammer inicialmente, y en la cual por tanto es imposible la cobertura, y esa misma región con el empleo del sistema FDSS para algunas de las señales de entrada empleadas. A partir de dicha Figura se observa como partiendo de una situación inicial donde el Jammer impide la

comunicación entre transmisor y receptor en una amplia región del plano bajo estudio, al aplicar el sistema FDSS la cobertura aumenta de forma notable. A partir de la Tabla 4.18 se observa que inicialmente la región de cobertura es de únicamente 18.92 Km<sup>2</sup> mientras que con el empleo del sistema FDSS se obtiene cobertura en casi 94 Km<sup>2</sup> en el caso menos favorable, esto es, cuando la entrada es la señal rectangular. Si la entrada es cosenoidal, triangular o Gaussiana existe cobertura en más de 99 Km<sup>2</sup> de la región estudiada resultando altamente improbable sufrir un ataque de los Jammer que impida las comunicaciones entre transmisor y receptor.



**Figura 4.18:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz en función de la posición del transmisor de Jammer

**Tabla 4.18:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de voz en función de la posición del Jammer.

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	18.92
FDSS	Rectangular	93.84
	Cosenoidal	99.80
	Triangular	99.95
	Gaussiana	99.99

### 4.3. Transmisión de señales de datos

Este mismo estudio lo hemos realizado para la transmisión de señales de datos. El sistema FDSS para la transmisión de una señal de datos, presenta las siguientes características:

- $T_b = \frac{1}{120 \cdot 10^3}$  (s)
- $G_p = 32$

Al igual que en la transmisión de voz, se emplea el modelo de las dos pendientes para caracterizar los dos enlaces existentes. La frecuencia a la que se realiza la transmisión, la potencia de señal y la potencia de la señal interferente así como las ganancias de las antenas son las mismas que hemos empleado para la transmisión de voz.

#### 4.3.1 Cobertura en función de la posición del receptor

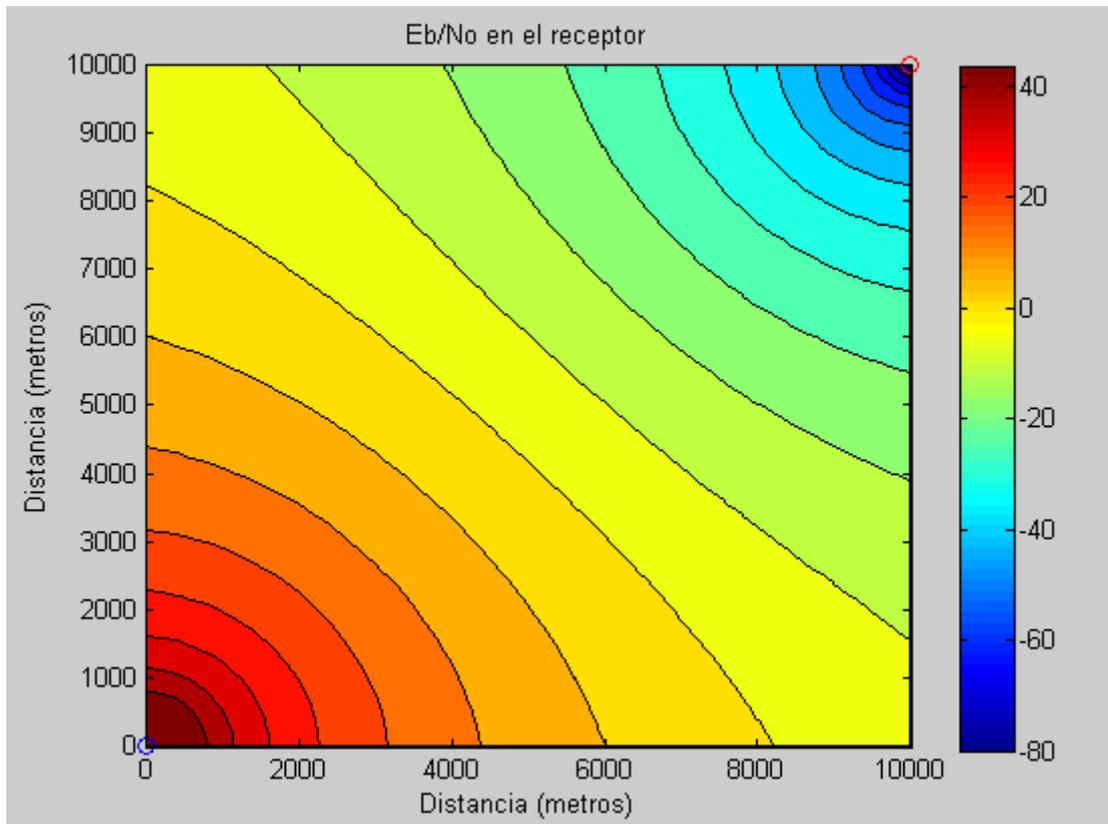
En el primer escenario, tanto el transmisor como el Jammer están fijos, variando la posición del receptor a lo largo de la región estudiada. Las coordenadas del transmisor y Jammer son las siguientes:

- Transmisor:  $(x_1, y_1) = (0, 0)$  m.
- Jammer:  $(x_2, y_2) = (10000, 10000)$  m.

En la Figura 4.19 se muestra la relación  $E_b/N_o$  (dB) en el receptor obtenida inicialmente.

El impacto del Jammer en las comunicaciones es muy elevado al impedir la recepción de la señal con la calidad necesaria en una amplia región del plano. En función de la distancia del receptor al transmisor y de la distancia del receptor al Jammer varía el radio de acción del Jammer, oscilando entre los 9.2 Km y los 10.8 Km. En cualquier caso, el Jammer es capaz de interrumpir las comunicaciones entre transmisor y receptor desde distancias muy alejadas cuando transmisor y receptor se encuentran más próximos. En la transmisión de señales de datos se obtienen peores prestaciones que las obtenidas para la transmisión de voz debido a la menor ganancia de

proceso del sistema como consecuencia del menor número de portadoras que presenta, que en este caso es únicamente 32.



**Figura 4.19:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de su posición

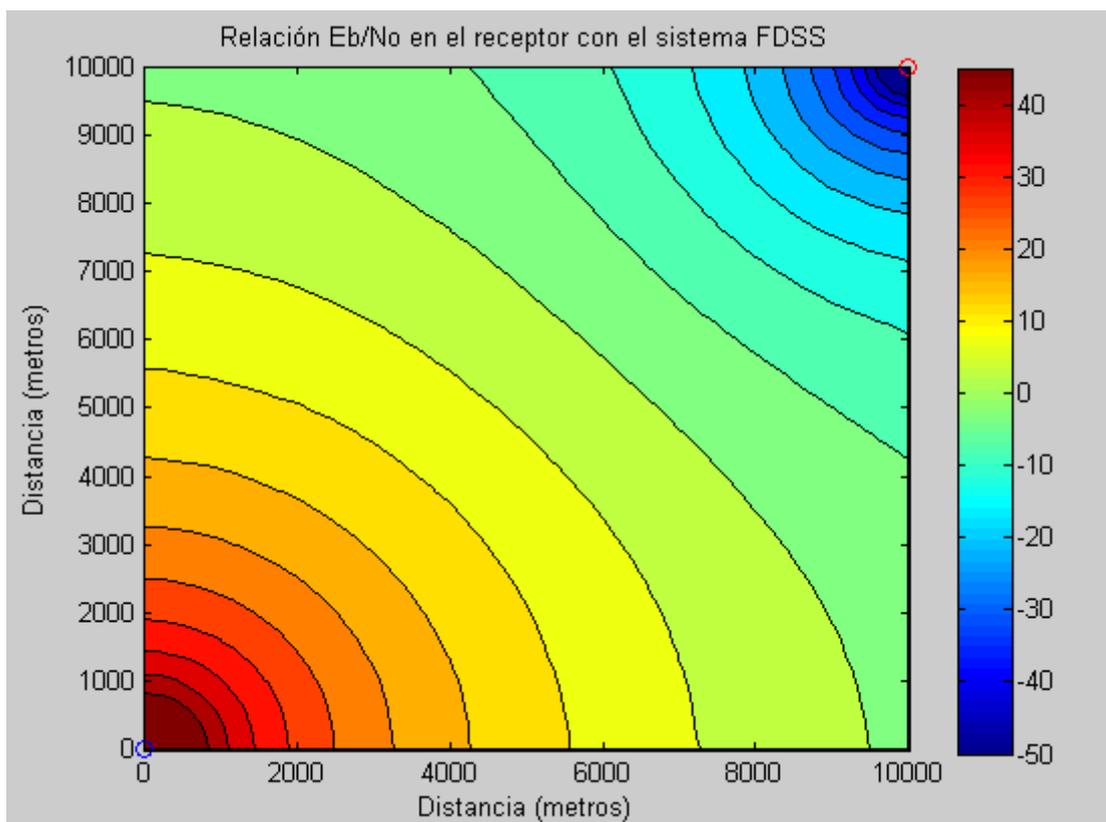
**Tabla 4.19:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de su posición

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	50.00	40.16	27.68	20.16	14.67	10.32	6.71	3.64	1.02	-1.22	-3.12
1000	40.16	33.64	25.12	18.50	13.27	8.97	5.32	2.19	-0.49	-2.76	-4.66
2000	27.68	25.12	20.35	15.39	10.86	6.84	3.29	0.18	-2.52	-4.81	-6.68
3000	20.16	18.50	15.39	11.64	7.81	4.13	0.72	-2.37	-5.08	-7.37	-9.20
4000	14.67	13.27	10.86	7.81	4.46	1.04	-2.29	-5.40	-8.17	-10.49	-12.27
5000	10.32	8.97	6.84	4.13	1.04	-2.26	-5.61	-8.85	-11.79	-14.24	-16.00
6000	6.71	5.32	3.29	0.72	-2.29	-5.61	-9.12	-12.65	-15.97	-18.73	-20.56
7000	3.64	2.19	0.18	-2.37	-5.40	-8.85	-12.65	-16.70	-20.74	-24.23	-26.33
8000	1.02	-0.49	-2.52	-5.08	-8.17	-11.79	-15.97	-20.74	-26.03	-31.19	-34.20
9000	-1.22	-2.76	-4.81	-7.37	-10.49	-14.24	-18.73	-24.23	-31.19	-40.11	-47.09
10000	-3.12	-4.66	-6.68	-9.20	-12.27	-16.00	-20.56	-26.33	-34.20	-47.09	-80.00

En la Figura 4.20 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor cuando este hace uso del sistema FDSS para minimizar el impacto del Jammer en la transmisión de señales de datos. La entrada del sistema es una señal rectangular.

Con el empleo del sistema FDSS aumenta la zona de cobertura. En este caso el Jammer es capaz de interrumpir las comunicaciones entre transmisor y receptor desde distancias de hasta 10.35 Km, si bien es posible que a distancias menores, en función de la distancia entre transmisor y receptor su efecto no sea decisivo en las comunicaciones. En cualquier caso, a distancias inferiores a los 7.22 Km del receptor impide que este reciba la señal con la calidad deseada. Se observa por tanto una reducción importante del impacto del Jammer respecto a la situación inicial.

Nuevamente se observa las peores prestaciones obtenidas en la transmisión de señales de datos frente a la transmisión de voz. A diferencia de la situación inicial, donde el único factor determinante era la distinta ganancia de proceso, en este caso también afecta el filtrado a realizar sobre la banda atacada por el Jammer debido al menor número de portadoras del sistema que resulta en un filtrado menos fino. Mientras que para la transmisión de voz el Jammer resulta efectivo a distancias de hasta 4.4 Km para la transmisión de datos el impacto del Jammer es de hasta 10.35 Km.



**Figura 4.20:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.20:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	50.00	42.20	30.08	22.95	17.85	13.87	10.59	7.81	5.41	3.31	1.46
1000	42.20	36.09	28.02	21.88	17.12	13.27	10.06	7.37	5.02	2.96	1.13
2000	30.08	28.02	23.79	19.40	15.44	12.09	9.16	6.57	4.29	2.26	0.48
3000	22.95	21.88	19.40	16.33	13.32	10.45	7.79	5.34	3.12	1.14	-0.58
4000	17.85	17.12	15.44	13.32	10.93	8.47	6.01	3.69	1.58	-0.32	-1.96
5000	13.87	13.27	12.09	10.45	8.47	6.24	4.01	1.76	-0.44	-2.36	-3.94
6000	10.59	10.06	9.16	7.79	6.01	4.01	1.78	-0.59	-2.99	-5.14	-6.76
7000	7.81	7.37	6.57	5.34	3.69	1.76	-0.59	-3.33	-6.31	-9.13	-11.01
8000	5.41	5.02	4.29	3.12	1.58	-0.44	-2.99	-6.31	-10.50	-15.05	-17.90
9000	3.31	2.96	2.26	1.14	-0.32	-2.36	-5.14	-9.13	-15.05	-23.55	-30.45
10000	1.46	1.13	0.48	-0.58	-1.96	-3.94	-6.76	-11.01	-17.90	-30.45	-50.00

En la Figura 4.21 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor para las diferentes posiciones de este en el plano de trabajo cuando se emplea una señal cosenoidal como entrada del sistema FDSS para la transmisión de señales de datos.

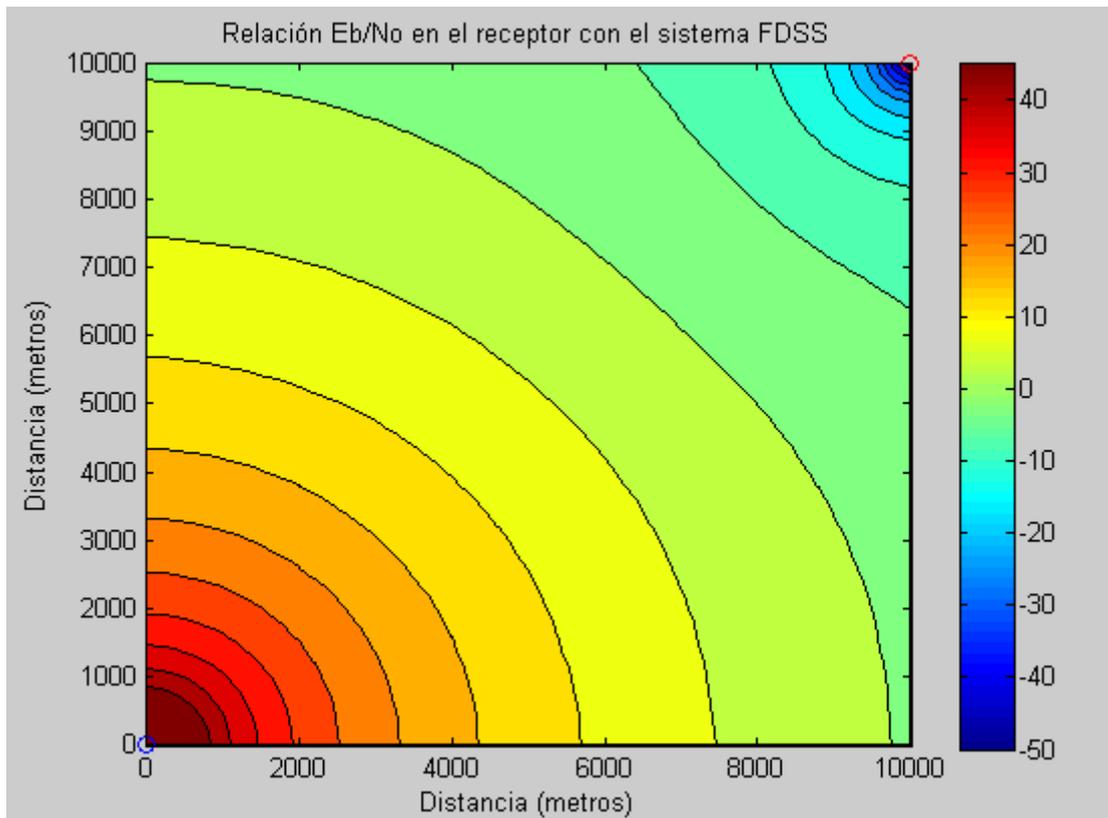
Con el empleo de esta señal de entrada se obtiene una zona de cobertura más extensa, mejorando ampliamente las prestaciones obtenidas con una entrada rectangular. En este caso el Jammer impide una correcta recepción de la señal cuando la distancia a la que se encuentra del receptor es inferior a los 6.78 Km. Sin embargo, su efecto puede resultar decisivo a distancias de hasta 10.3 Km del receptor en función de la distancia entre éste y el transmisor. El impacto del Jammer sigue resultando muy importante en las comunicaciones dado el elevado radio de acción que presenta.

Al igual que ocurría para la entrada rectangular se obtienen peores prestaciones desde el punto de vista de la cobertura en la transmisión de señales de datos que los obtenidos para la transmisión de voz. Mientras que para la transmisión de voz el sistema FDSS presentaba cobertura siempre que la distancia entre Jammer y receptor fuera superior a 2.3 Km, en este caso a 6.78 Km el Jammer impide la cobertura en el enlace deseado.

En la Figura 4.22 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor con el empleo de una señal triangular como entrada del sistema FDSS para la transmisión de datos.

Con esta señal de entrada apenas varía la zona de cobertura respecto a la obtenida con la señal de entrada cosenoidal. La máxima distancia a la que cual resulta efectivo el ataque mediante Jammers es de 6.7 Km, si bien en función de la distancia entre transmisor y receptor puede llegar a ser de hasta 10.3 Km. Dada la similitud de

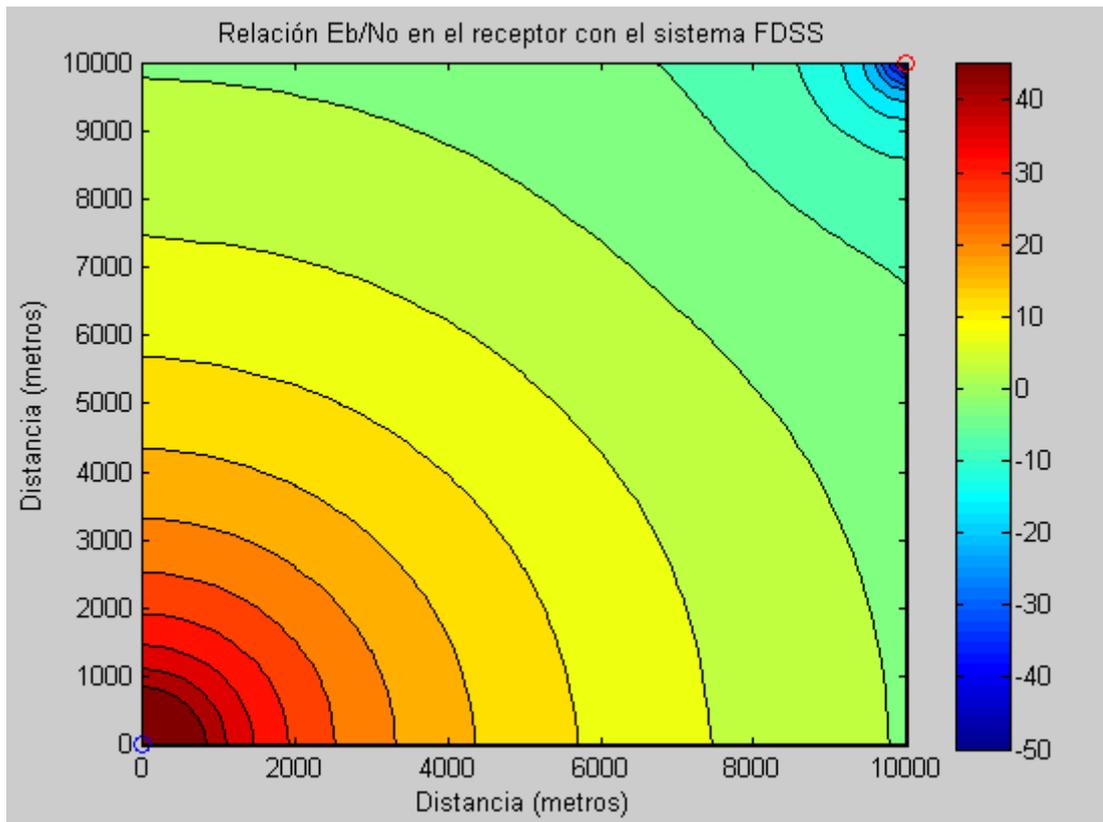
estos resultados con los obtenidos con la señal cosenoidal se observa que la elección de la señal de entrada no supone un factor decisivo en las prestaciones en cuanto a la cobertura en el enlace deseado. El Jammer sigue afectando de manera muy importante a las comunicaciones en tanto que es capaz de interrumpirlas desde distancias muy alejadas a la posición del receptor.



**Figura 4.21:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.21:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	50.00	42.37	30.29	23.20	18.15	14.21	10.98	8.25	5.88	3.80	1.96
1000	42.37	36.31	28.29	22.20	17.51	13.72	10.56	7.92	5.63	3.61	1.79
2000	30.29	28.29	24.12	19.81	15.94	12.65	9.84	7.37	5.19	3.24	1.49
3000	23.20	22.20	19.81	16.83	13.93	11.23	8.77	6.53	4.50	2.66	0.99
4000	18.15	17.51	15.94	13.93	11.75	9.56	7.44	5.43	3.56	1.83	0.26
5000	14.21	13.72	12.65	11.23	9.56	7.76	5.93	4.11	2.35	0.69	-0.80
6000	10.98	10.56	9.84	8.77	7.44	5.93	4.29	2.55	0.99	-0.50	-1.86
7000	8.25	7.92	7.37	6.53	5.43	4.11	2.55	1.09	-0.49	-2.15	-3.58
8000	5.88	5.63	5.19	4.50	3.56	2.35	0.99	-0.49	-2.49	-4.75	-6.57
9000	3.80	3.61	3.24	2.66	1.83	0.69	-0.50	-2.15	-4.75	-8.75	-13.45
10000	1.96	1.79	1.49	0.99	0.26	-0.80	-1.86	-3.58	-6.57	-13.45	-50.00



**Figura 4.22:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.22:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

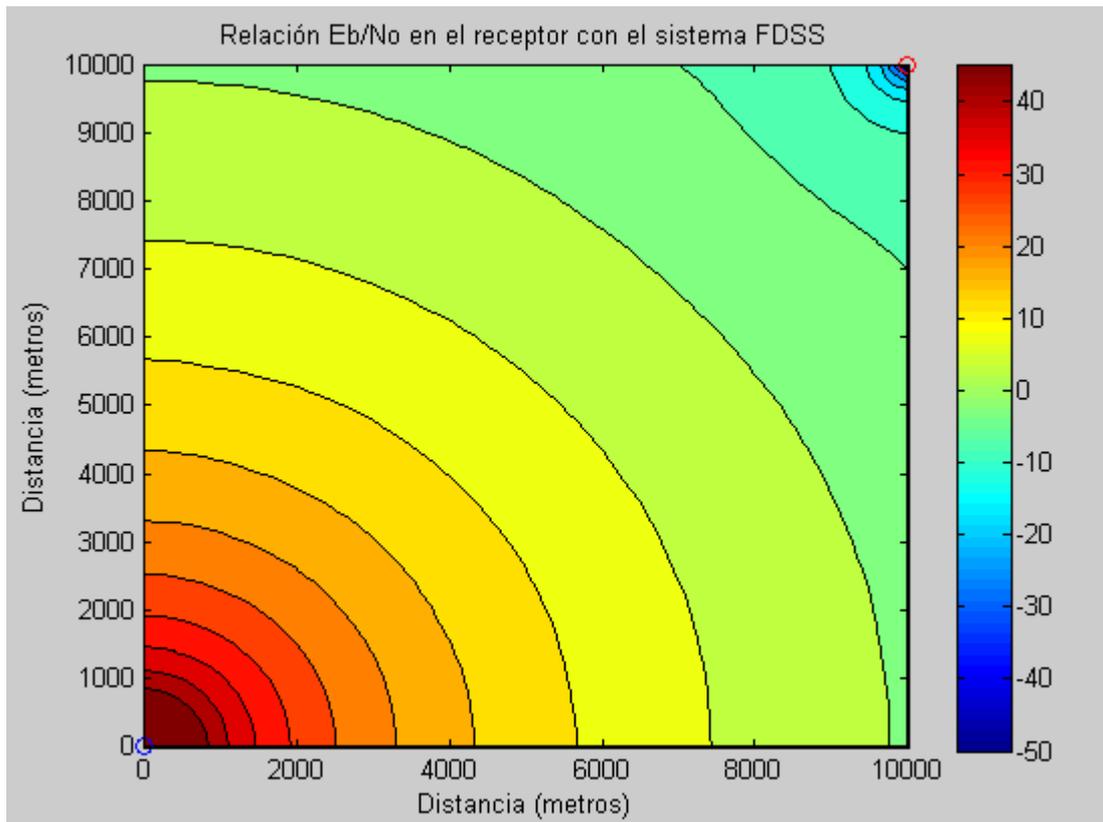
Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	50.00	42.38	30.30	23.21	18.16	14.22	11.00	8.26	5.90	3.82	1.98
1000	42.38	36.31	28.30	22.21	17.52	13.74	10.58	7.95	5.67	3.65	1.84
2000	30.30	28.30	24.14	19.82	15.96	12.68	9.88	7.43	5.26	3.32	1.56
3000	23.21	22.21	19.82	16.85	13.97	11.29	8.84	6.62	4.61	2.78	1.11
4000	18.16	17.52	15.96	13.97	11.81	9.64	7.55	5.58	3.74	2.04	0.48
5000	14.22	13.74	12.68	11.29	9.64	7.88	6.11	4.36	2.68	1.09	-0.37
6000	11.00	10.58	9.88	8.84	7.55	6.11	4.57	2.98	1.36	-0.22	-1.56
7000	8.26	7.95	7.43	6.62	5.58	4.36	2.98	1.40	-0.05	-1.47	-2.76
8000	5.90	5.67	5.26	4.61	3.74	2.68	1.36	-0.05	-1.59	-3.60	-5.15
9000	3.82	3.65	3.32	2.78	2.04	1.09	-0.22	-1.47	-3.60	-6.60	-10.11
10000	1.98	1.84	1.56	1.11	0.48	-0.37	-1.56	-2.76	-5.15	-10.11	-50.00

En la Figura 4.23 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la calidad con la que se recibe la señal en el receptor a partir de la relación  $E_b/N_o$  en el mismo cuando la entrada del sistema FDSS es una señal Gaussiana.

Nuevamente, desde el punto de vista de la cobertura en el enlace deseado, no se producen grandes variaciones respecto a los resultados obtenidos con las señales de

entrada cosenoidal y triangular. El Jammer impide las comunicaciones siempre que el receptor se encuentre a distancias inferiores a los 6.64 Km de éste. Resulta, por tanto, muy efectivo el ataque a las comunicaciones mediante Jammers en este escenario dada su gran efectividad desde distancias muy elevadas.

A partir de los resultados de las Figuras 4.5 y 4.23 se observa que el impacto del Jammer es mucho más importante para la transmisión de señales de datos que para la transmisión de voz como consecuencia de las diferencias que presenta el sistema FDSS en función del tipo de información que se vaya a transmitir. El filtrado realizado en el receptor con el fin de maximizar la calidad de la señal enviada por el transmisor es más burdo consecuencia del menor número de portadoras del sistema. Así mismo, la menor ganancia de proceso afecta de una forma importante en la cobertura del enlace deseado. Mientras que para la transmisión de voz se limitaba enormemente el ataque a las comunicaciones mediante Jammers, en la transmisión de datos la reducción del impacto del Jammer no es tan importante.



**Figura 4.23:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

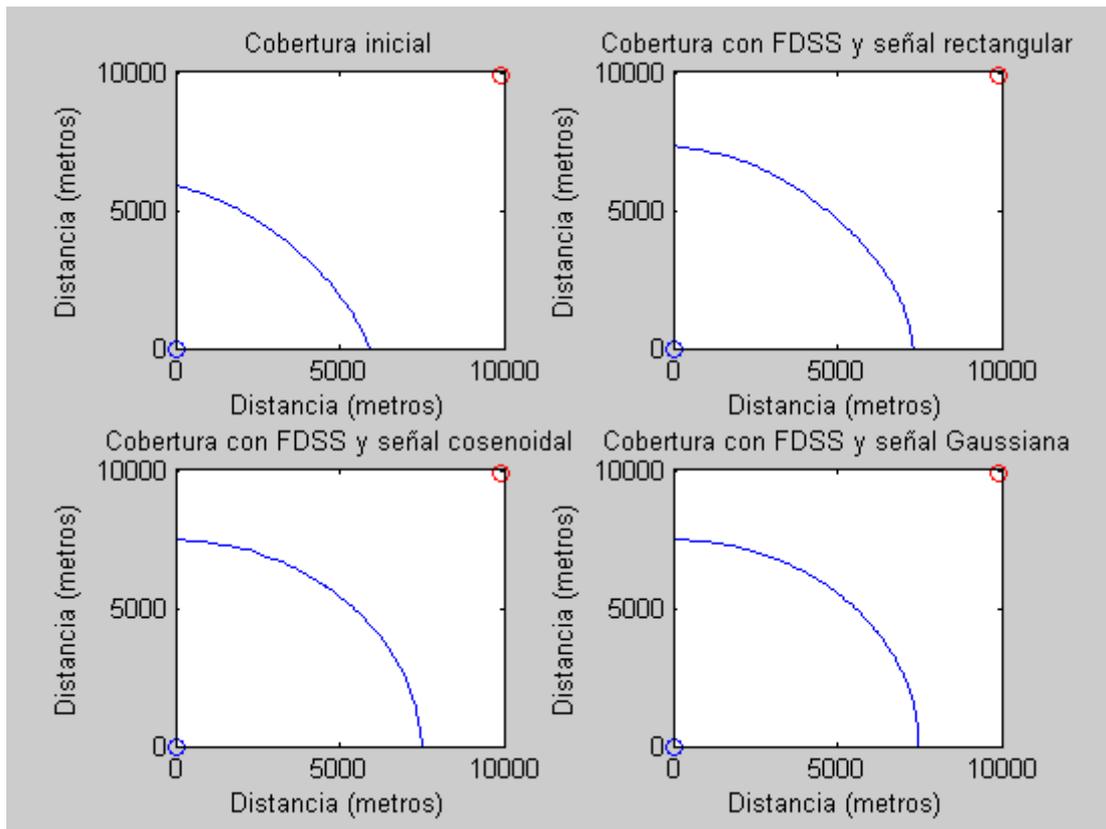
**Tabla 4.23:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de su posición con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	50.00	42.35	30.26	23.16	18.11	14.16	10.93	8.19	5.83	3.79	1.96
1000	42.35	36.28	28.25	22.15	17.45	13.66	10.59	7.98	5.70	3.68	1.87
2000	30.26	28.25	24.08	19.75	15.94	12.71	9.91	7.46	5.30	3.36	1.60
3000	23.16	22.15	19.75	16.85	14.00	11.32	8.88	6.67	4.67	2.85	1.18
4000	18.11	17.45	15.94	14.00	11.85	9.69	7.61	5.67	3.85	2.17	0.61
5000	14.16	13.66	12.71	11.32	9.69	7.95	6.21	4.51	2.88	1.34	-0.10
6000	10.93	10.59	9.91	8.88	7.61	6.21	4.74	3.25	1.76	0.33	-1.02
7000	8.19	7.98	7.46	6.67	5.67	4.51	3.25	1.89	0.44	-1.07	-2.37
8000	5.83	5.70	5.30	4.67	3.85	2.88	1.76	0.44	-1.10	-2.59	-4.00
9000	3.79	3.68	3.36	2.85	2.17	1.34	0.33	-1.07	-2.59	-4.91	-7.25
10000	1.96	1.87	1.60	1.18	0.61	-0.10	-1.02	-2.37	-4.00	-7.25	-50.00

En la Figura 4.24 se muestra la curva que delimita la zona de cobertura inicialmente y con el empleo del sistema FDSS con algunas de las señales de entrada utilizadas.

A partir de la Tabla 4.24 se observa como la cobertura proporcionada con el sistema WCDMA es de únicamente 23.34 Km<sup>2</sup>. Al hacer uso del sistema FDSS se aumenta considerablemente la zona de cobertura si bien el impacto del Jammer sigue siendo muy importante. Con el empleo de una entrada rectangular la cobertura en el enlace aumenta hasta los 38.87 Km<sup>2</sup>, lo que supone un aumento en la zona de cobertura superior al 66 % respecto a la situación inicial. Con el empleo de la señal cosenoidal, triangular y Gaussiana se mejora ligeramente la región de cobertura respecto a la rectangular, existiendo cobertura en todos los casos en una región superior a los 43 Km<sup>2</sup>.

A partir de las Tablas 4.6 y 4.24 se observa cómo afecta el tipo de información transmitida en la cobertura del enlace, obteniéndose prestaciones muy superiores para la transmisión de señales voz.



**Figura 4.24:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del receptor

**Tabla 4.24:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del receptor.

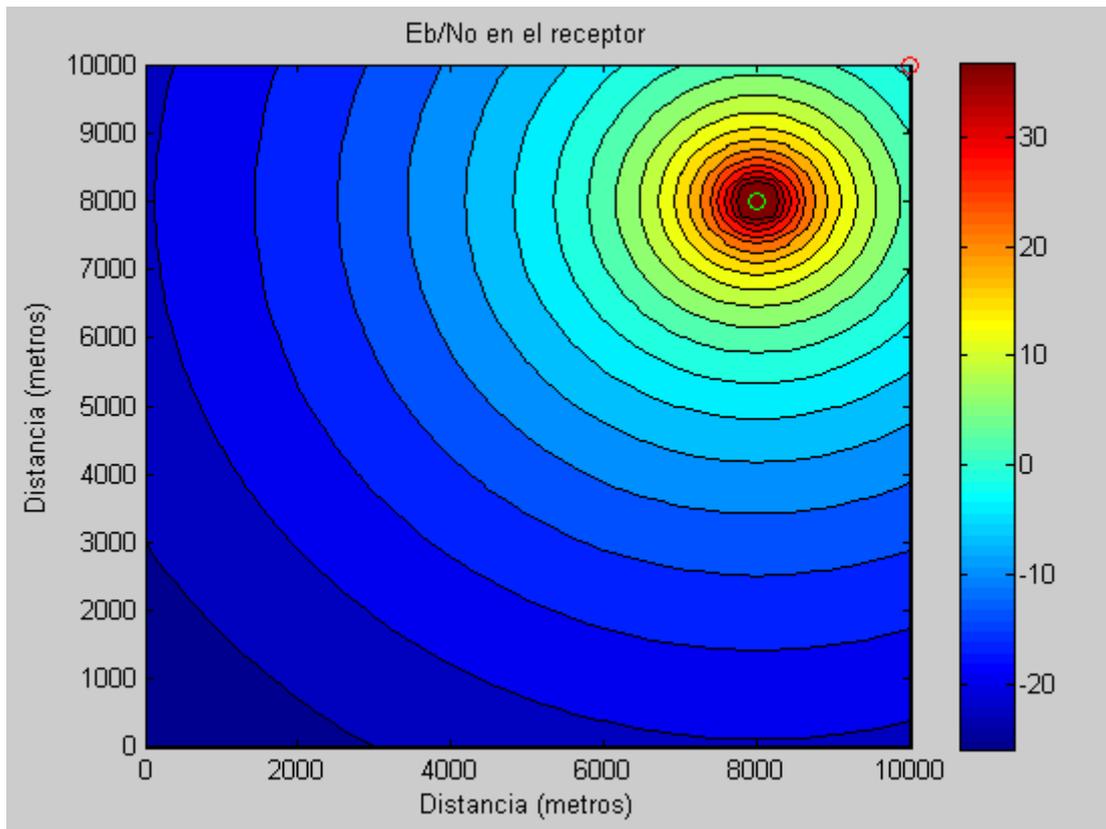
Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	23.34
FDSS	Rectangular	38.87
	Cosenoidal	43.02
	Triangular	43.41
	Gaussiana	43.71

### 4.3.2 Cobertura en función de la posición del transmisor

Se muestran ahora los resultados obtenidos para el segundo escenario, en el que tanto transmisor interferente como receptor se encuentran fijos mientras que la posición del transmisor varía a lo largo del plano bajo estudio. Sus coordenadas son:

- Receptor:  $(x_1, y_1) = (8000, 8000)$  m.
- Transmisor interferente:  $(x_2, y_2) = (10000, 10000)$  m.

En la Figura 4.25 se muestra la relación  $E_b/N_o$  obtenida inicialmente en el receptor para la transmisión de señales de datos. Debido a la reducción en la ganancia de proceso,  $G_p$ , respecto a la transmisión de voz, se obtiene cobertura en una región menos extensa que la obtenida para la transmisión de señales de voz. Únicamente si el transmisor se encuentra a distancias inferiores a 1.7 Km es posible la recepción de la señal con la calidad necesaria.



**Figura 4.25:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor

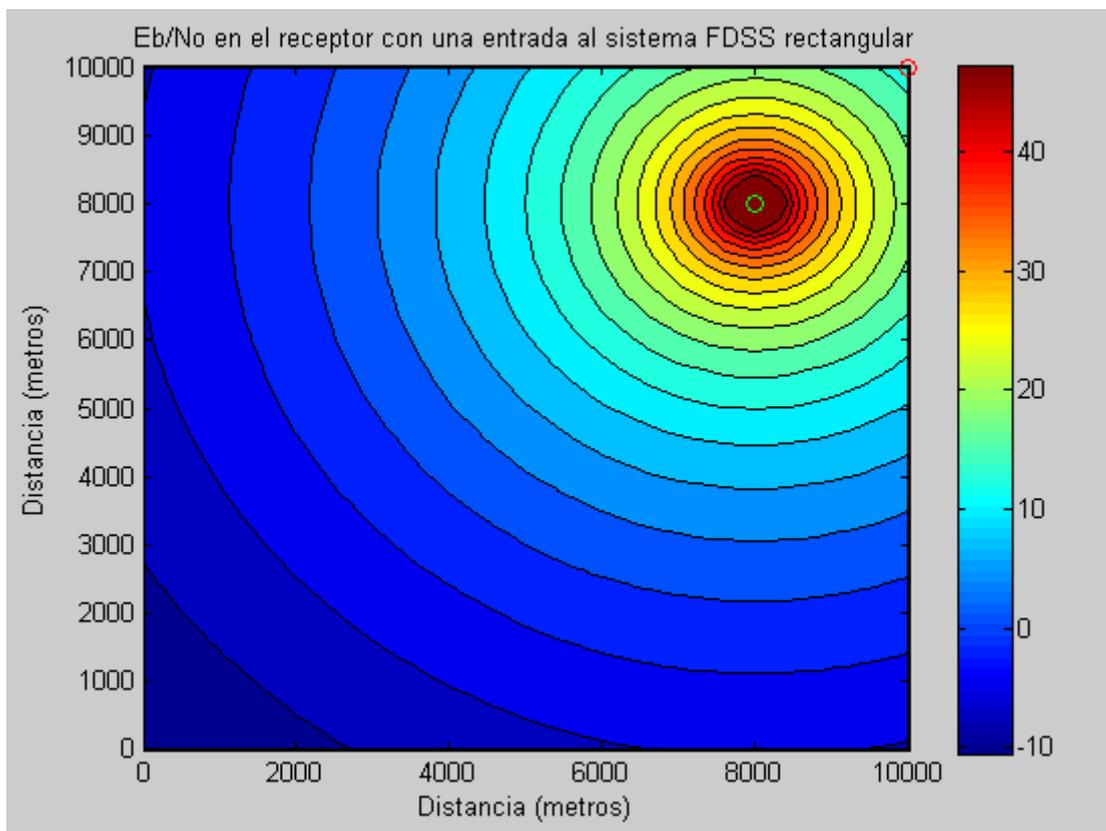
**Tabla 4.25:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-26.03	-24.95	-23.89	-22.87	-21.95	-21.15	-20.54	-20.14	-20.01	-20.14	-20.54
1000	-24.95	-23.71	-22.47	-21.27	-20.14	-19.15	-18.37	-17.86	-17.69	-17.86	-18.37
2000	-23.89	-22.47	-21.03	-19.59	-18.21	-16.95	-15.93	-15.25	-15.01	-15.25	-15.93
3000	-22.87	-21.27	-19.59	-17.86	-16.14	-14.51	-13.13	-12.18	-11.84	-12.18	-13.13
4000	-21.95	-20.14	-18.21	-16.14	-13.99	-11.84	-9.91	-8.49	-7.97	-8.49	-9.91
5000	-21.15	-19.15	-16.95	-14.51	-11.84	-8.99	-6.16	-3.89	-2.97	-3.89	-6.16
6000	-20.54	-18.37	-15.93	-13.13	-9.91	-6.16	-1.95	2.14	4.07	2.14	-1.95
7000	-20.14	-17.86	-15.25	-12.18	-8.49	-3.89	2.14	10.09	16.11	10.09	2.14
8000	-20.01	-17.69	-15.01	-11.84	-7.97	-2.97	4.07	16.11	40.00	16.11	4.07
9000	-20.14	-17.86	-15.25	-12.18	-8.49	-3.89	2.14	10.09	16.11	10.09	2.14
10000	-20.54	-18.37	-15.93	-13.13	-9.91	-6.16	-1.95	2.14	4.07	2.14	-1.95

En la Figura 4.26 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor al hacer uso del sistema FDSS para reducir el impacto del Jammer cuando la entrada del sistema es una señal rectangular.

A partir de los resultados mostrados tanto en la Figura como en la Tabla 4.26 observamos el aumento en la calidad de la señal recibida al hacer uso del sistema FDSS. Como consecuencia del empleo de este sistema, podemos reducir la potencia interferente eliminando los canales que presenten una mayor interferencia provocada por el Jammer. De esta forma aumenta la cobertura en el enlace estudiado reduciéndose notablemente el impacto del Jammer. El transmisor puede encontrarse a distancias de hasta 4125 metros del receptor pudiendo éste recibir la señal con la calidad necesaria.

Se observan las peores prestaciones que se obtienen con el sistema FDSS en la transmisión de señales de datos a partir de los resultados obtenidos en las Tablas 4.8 y 4.26. En la transmisión de señales de voz el sistema FDSS era capaz de permitir la cobertura cuando el transmisor se encontraba a distancias de hasta 9.05 Km gracias al mejor filtrado realizado sobre la banda de frecuencias atacada por el Jammer y la mayor ganancia de proceso.



**Figura 4.26:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.26:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

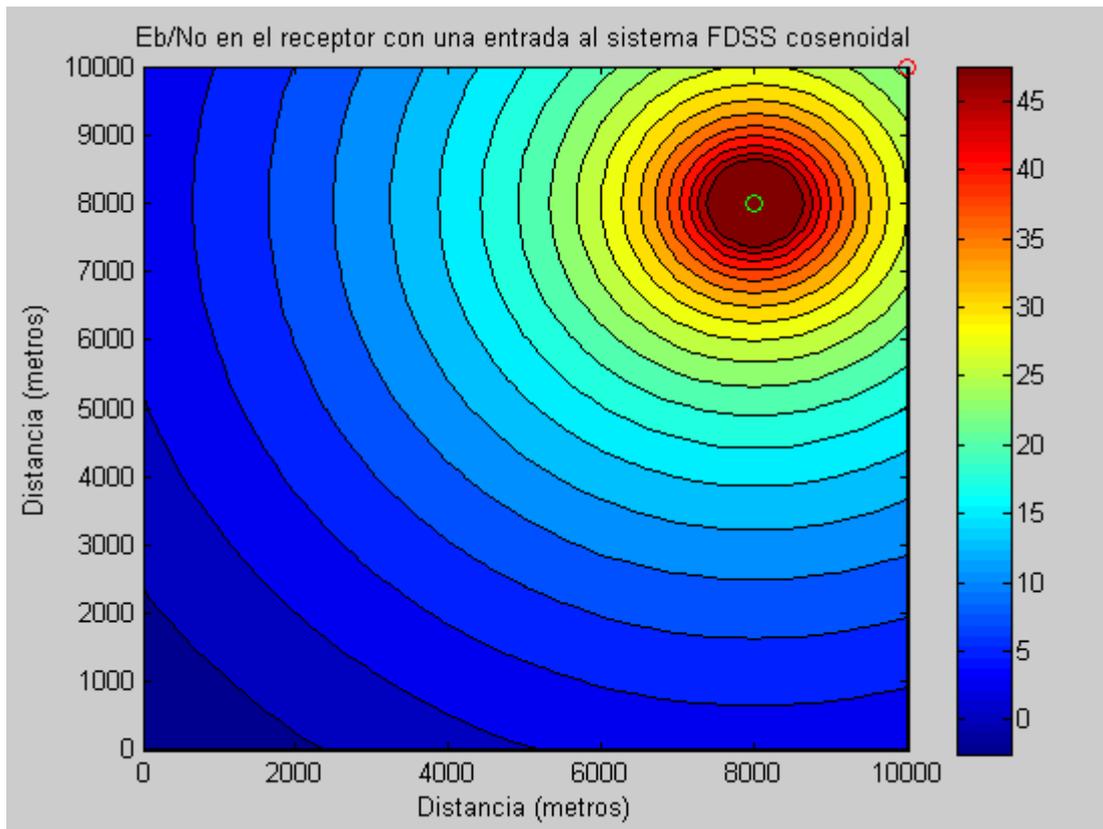
<b>Distancia (m)</b>	<b>0</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>7000</b>	<b>8000</b>	<b>9000</b>	<b>10000</b>
<b>0</b>	-10.50	-9.42	-8.36	-7.35	-6.42	-5.63	-5.01	-4.62	-4.48	-4.62	-5.01
<b>1000</b>	-9.42	-8.18	-6.95	-5.74	-4.62	-3.63	-2.84	-2.34	-2.16	-2.34	-2.84
<b>2000</b>	-8.36	-6.95	-5.51	-4.07	-2.68	-1.42	-0.40	0.28	0.52	0.28	-0.40
<b>3000</b>	-7.35	-5.74	-4.07	-2.34	-0.61	1.01	2.39	3.34	3.68	3.34	2.39
<b>4000</b>	-6.42	-4.62	-2.68	-0.61	1.54	3.68	5.62	7.03	7.56	7.03	5.62
<b>5000</b>	-5.63	-3.63	-1.42	1.01	3.68	6.54	9.36	11.64	12.56	11.64	9.36
<b>6000</b>	-5.01	-2.84	-0.40	2.39	5.62	9.36	13.58	17.66	19.60	17.66	13.58
<b>7000</b>	-4.62	-2.34	0.28	3.34	7.03	11.64	17.66	25.62	31.64	25.62	17.66
<b>8000</b>	-4.48	-2.16	0.52	3.68	7.56	12.56	19.60	31.64	50.00	31.64	19.60
<b>9000</b>	-4.62	-2.34	0.28	3.34	7.03	11.64	17.66	25.62	31.64	25.62	17.66
<b>10000</b>	-5.01	-2.84	-0.40	2.39	5.62	9.36	13.58	17.66	19.60	17.66	13.58

Los resultados obtenidos en la relación  $E_b/N_o$  en el receptor cuando la entrada del sistema FDSS es una señal cosenoidal para la transmisión de datos se observan en la Figura 4.27.

El empleo de esta señal de entrada mejora los resultados obtenidos respecto a la entrada rectangular. En este caso el transmisor puede estar situado en un entorno no superior a los 6.55 Km respecto de la posición del receptor para que éste pueda recibir la señal con la calidad necesaria.

Es destacable la reducción del impacto del Jammer. Bien es cierto que se encuentra a una distancia de 2.83 Km del receptor, pero transmisor y receptor deben encontrarse mucho más alejados para que el ataque a las comunicaciones resulte efectivo.

También es importante citar la diferencia en las prestaciones del sistema FDSS en función del tipo de información transmitida. Mientras que para la voz la distancia máxima entre transmisor y receptor para que exista cobertura en el enlace deseado es superior a los 11.3 Km, lo que supone la existencia de cobertura en toda la región estudiada, para la transmisión de datos la distancia máxima entre transmisor y receptor es de únicamente 6.55 Km.



**Figura 4.27:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

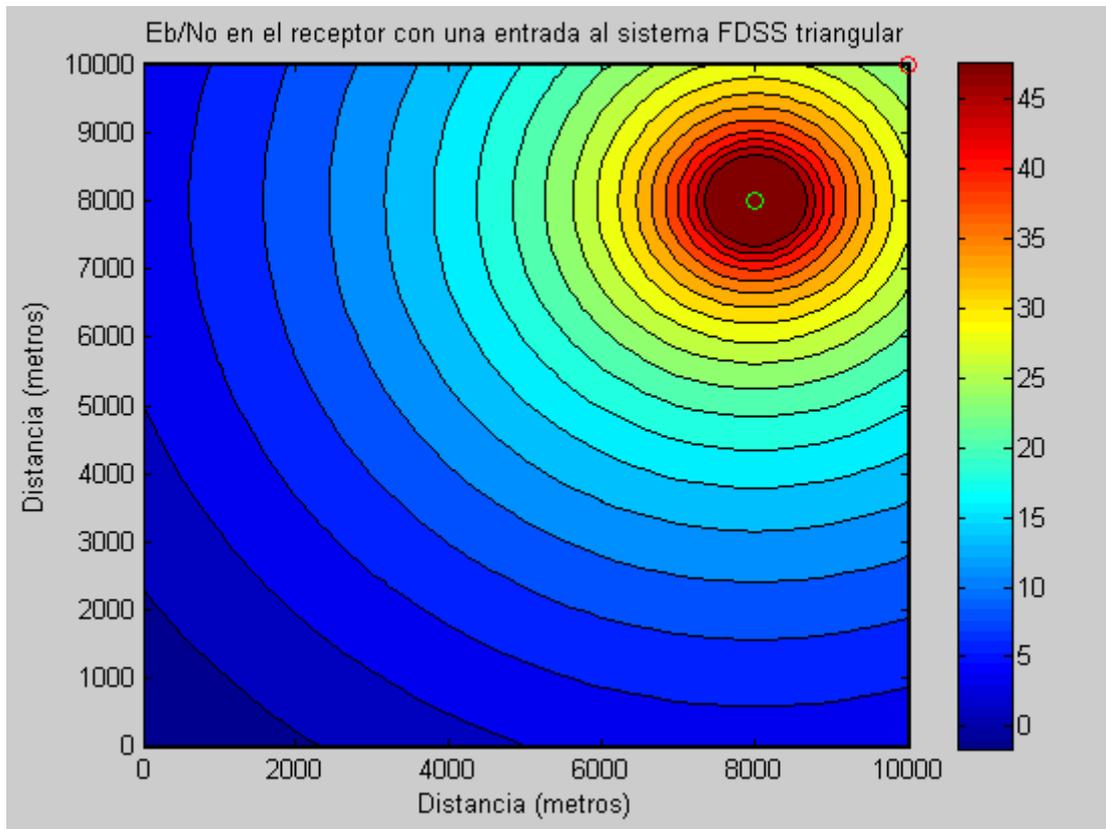
**Tabla 4.27:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-2.49	-1.41	-0.34	0.67	1.59	2.39	3.01	3.40	3.53	3.40	3.01
1000	-1.41	-0.17	1.07	2.27	3.40	4.39	5.17	5.68	5.85	5.68	5.17
2000	-0.34	1.07	2.51	3.95	5.34	6.59	7.62	8.29	8.53	8.29	7.62
3000	0.67	2.27	3.95	5.68	7.40	9.03	10.41	11.36	11.70	11.36	10.41
4000	1.59	3.40	5.34	7.40	9.55	11.70	13.64	15.05	15.57	15.05	13.64
5000	2.39	4.39	6.59	9.03	11.70	14.55	17.38	19.66	20.57	19.66	17.38
6000	3.01	5.17	7.62	10.41	13.64	17.38	21.59	25.68	27.62	25.68	21.59
7000	3.40	5.68	8.29	11.36	15.05	19.66	25.68	33.64	39.66	33.64	25.68
8000	3.53	5.85	8.53	11.70	15.57	20.57	27.62	39.66	50.00	39.66	27.62
9000	3.40	5.68	8.29	11.36	15.05	19.66	25.68	33.64	39.66	33.64	25.68
10000	3.01	5.17	7.62	10.41	13.64	17.38	21.59	25.68	27.62	25.68	21.59

Se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor cuando la entrada del sistema FDSS es una señal triangular en la Figura 4.28.

Con el empleo de esta señal de entrada se produce un ligero aumento en la zona de cobertura del enlace deseado. La distancia máxima a la que puede encontrarse el

transmisor del receptor para que el Jammer no interrumpa las comunicaciones son 6.9 Km, es decir, 350 metros más que lo obtenido con una entrada cosenoidal.



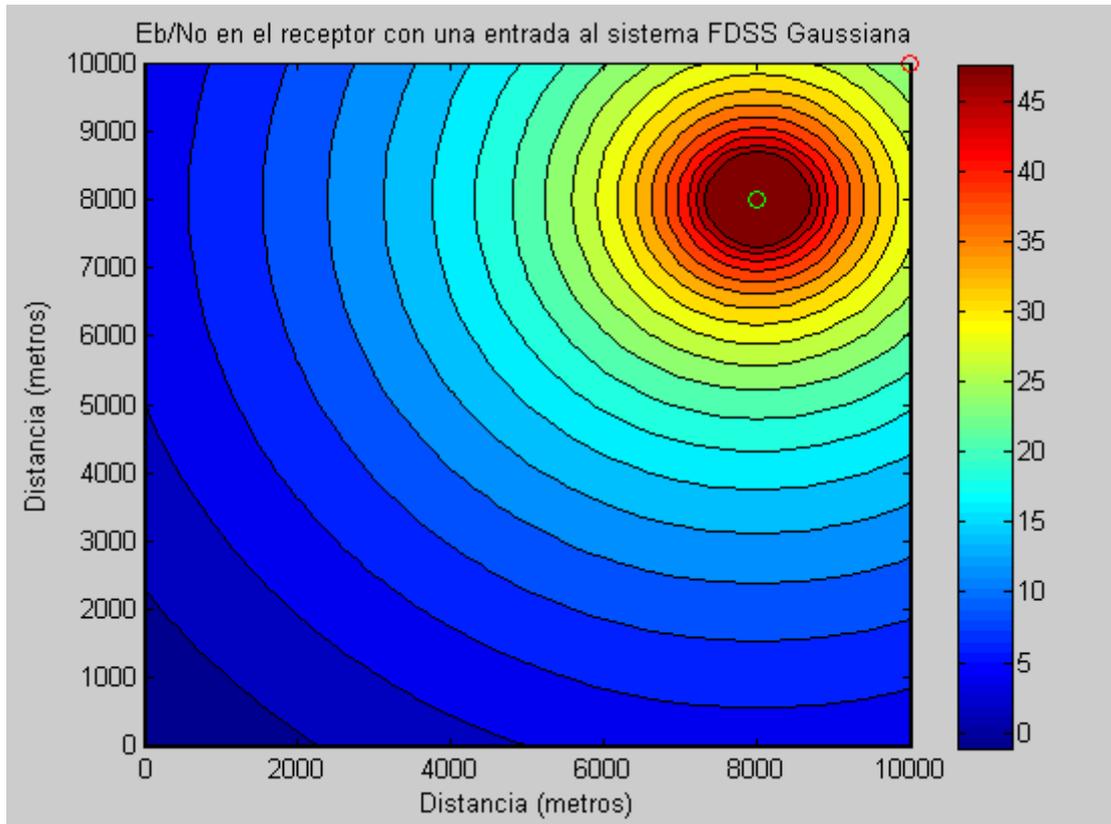
**Figura 4.28:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.28:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-1.59	-0.51	0.55	1.57	2.49	3.29	3.90	4.29	4.43	4.29	3.90
1000	-0.51	0.73	1.96	3.17	4.29	5.28	6.07	6.57	6.75	6.57	6.07
2000	0.55	1.96	3.41	4.85	6.23	7.49	8.51	9.19	9.43	9.19	8.51
3000	1.57	3.17	4.85	6.57	8.30	9.92	11.30	12.25	12.59	12.25	11.30
4000	2.49	4.29	6.23	8.30	10.45	12.59	14.53	15.94	16.47	15.94	14.53
5000	3.29	5.28	7.49	9.92	12.59	15.45	18.27	20.55	21.47	20.55	18.27
6000	3.90	6.07	8.51	11.30	14.53	18.27	22.49	26.57	28.51	26.57	22.49
7000	4.29	6.57	9.19	12.25	15.94	20.55	26.57	34.53	40.55	34.53	26.57
8000	4.43	6.75	9.43	12.59	16.47	21.47	28.51	40.55	50.00	40.55	28.51
9000	4.29	6.57	9.19	12.25	15.94	20.55	26.57	34.53	40.55	34.53	26.57
10000	3.90	6.07	8.51	11.30	14.53	18.27	22.49	26.57	28.51	26.57	22.49

En la Figura 4.29 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor para la transmisión de señales de datos con una entrada Gaussiana del sistema FDSS.

Con el empleo de una entrada Gaussiana se obtienen los mejores resultados en la calidad de la señal recibida debido a que es la que presenta mejores prestaciones. En este caso, la máxima distancia a la que puede encontrarse el transmisor del receptor para que este reciba la señal con la calidad necesaria es de 7.07 Km, lo que supone un aumento en la región de cobertura.



**Figura 4.29:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

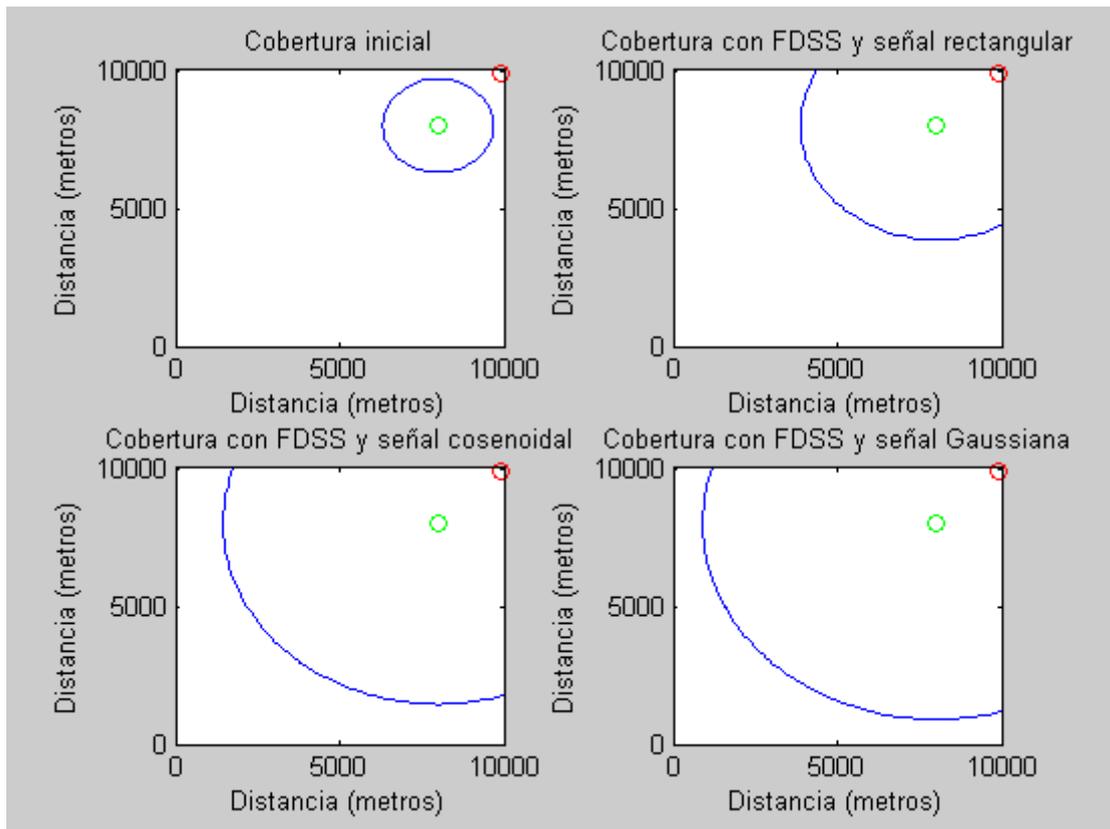
**Tabla 4.29:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del transmisor con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-1.10	-0.02	1.04	2.05	2.98	3.78	4.39	4.78	4.92	4.78	4.39
1000	-0.02	1.22	2.45	3.66	4.78	5.77	6.56	7.06	7.24	7.06	6.56
2000	1.04	2.45	3.89	5.33	6.72	7.98	9.00	9.68	9.92	9.68	9.00
3000	2.05	3.66	5.33	7.06	8.79	10.41	11.79	12.74	13.08	12.74	11.79
4000	2.98	4.78	6.72	8.79	10.94	13.08	15.02	16.43	16.96	16.43	15.02
5000	3.78	5.77	7.98	10.41	13.08	15.94	18.76	21.04	21.96	21.04	18.76
6000	4.39	6.56	9.00	11.79	15.02	18.76	22.98	27.06	29.00	27.06	22.98
7000	4.78	7.06	9.68	12.74	16.43	21.04	27.06	35.02	41.04	35.02	27.06
8000	4.92	7.24	9.92	13.08	16.96	21.96	29.00	41.04	50.00	41.04	29.00
9000	4.78	7.06	9.68	12.74	16.43	21.04	27.06	35.02	41.04	35.02	27.06
10000	4.39	6.56	9.00	11.79	15.02	18.76	22.98	27.06	29.00	27.06	22.98

En la Figura 4.30 se muestra de manera gráfica la zona de cobertura inicial así como la existente con el sistema FDSS para las señales rectangular, cosenoidal y Gaussiana.

A partir de la misma se observa que la región de cobertura aumenta de manera notable al hacer uso de las ventajas del sistema FDSS. En la Tabla 4.30 se muestra el área de dicha zona en  $\text{Km}^2$ . Se observa cómo se pasa de una situación inicial donde el área de cobertura es de  $8.49 \text{ Km}^2$  a situaciones donde existe cobertura en más de  $70 \text{ Km}^2$ . De los resultados también se observa la importancia de la señal de entrada del sistema FDSS debido a las grandes variaciones en la cobertura del sistema en función de la señal empleada. Podemos observar como con el empleo de la señal Gaussiana se obtiene cobertura en una región de  $70.66 \text{ Km}^2$  mientras que con una entrada rectangular únicamente en una área de  $33.26 \text{ Km}^2$ . Esto supone un incremento en la zona de cobertura de más del 120 % respecto a la región de cobertura obtenida con la señal rectangular.

Así mismo es destacable el impacto que tiene el tipo de información transmitida en la cobertura del enlace. Se obtiene una mayor cobertura cuando se transmiten señales de voz que cuando se transmiten señales de datos. Dado que el número de portadoras del sistema FDSS para la transmisión de señales de datos es únicamente 32, resulta más complicado alcanzar el ancho de banda óptimo a eliminar que maximice la  $E_b/N_o$  y por tanto la calidad en las comunicaciones. El espectro del sistema FDSS para la transmisión de voz, cuando suprimimos las 14 portadoras centrales, que son las que están afectadas directamente por el Jammer, resulta en una banda eliminada de 210 KHz. Si necesitáramos eliminar más portadoras para aumentar la relación  $E_b/N_o$  en el receptor, lo haríamos con un paso de 30 KHz ya que eliminamos las portadoras de dos en dos cuando el Jammer se encuentra centrado en la banda de paso del sistema como en esta situación. Sin embargo, el espectro del sistema FDSS para la transmisión de señales de datos, presenta una portadora cada 120 KHz, por lo que únicamente dos de ellas se encuentran sobre la banda afectada por el Jammer. Esto constituye una banda eliminada de 240 KHz. Si necesitáramos un mejor filtrado para reducir más la potencia interferente tendríamos que seguir eliminando portadoras de dos en dos eliminando cada vez 240 KHz más. Es debido a la menor resolución que presenta el sistema FDSS así como a la menor ganancia de proceso que se obtienen resultados peores.



**Figura 4.30:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor

**Tabla 4.30:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor.

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	8.49
FDSS	Rectangular	33.26
	Cosenoidal	62.74
	Triangular	67.71
	Gaussiana	70.66

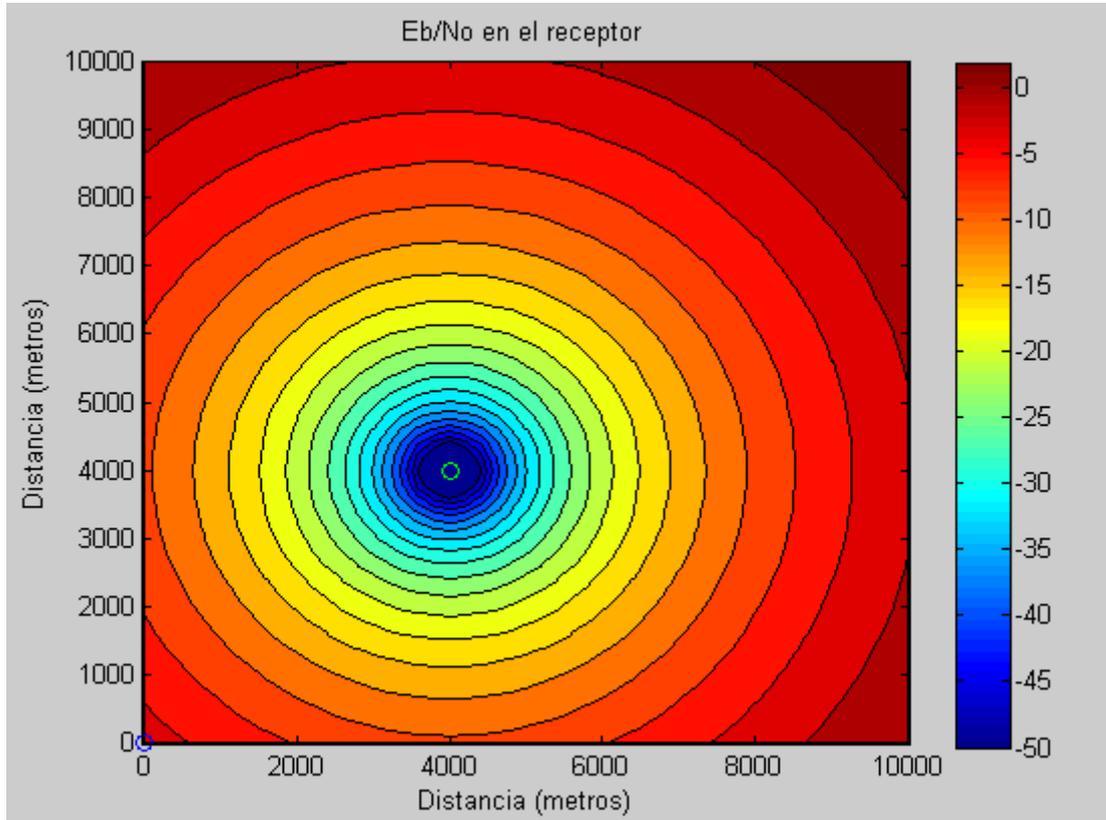
### 4.3.3 Cobertura en función de la posición del Jammer

En este escenario, tanto transmisor como receptor se encuentran fijos variando la posición del Jammer a lo largo del plano de trabajo. Receptor y transmisor presentan las siguientes coordenadas:

- Transmisor:  $(x_1, y_1) = (0,0)$  m.
- Receptor:  $(x_2, y_2) = (4000,4000)$  m.

En la Figura 4.31 se muestra la relación  $E_b/N_o$  inicial obtenida en el receptor en función de la posición del Jammer.

A partir de la Tabla 4.31 se observa como independientemente de la posición del Jammer en la región estudiada la recepción de la señal no se hace cumpliendo los criterios de calidad impuestos, por lo que no existe cobertura inicial.



**Figura 4.31:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer

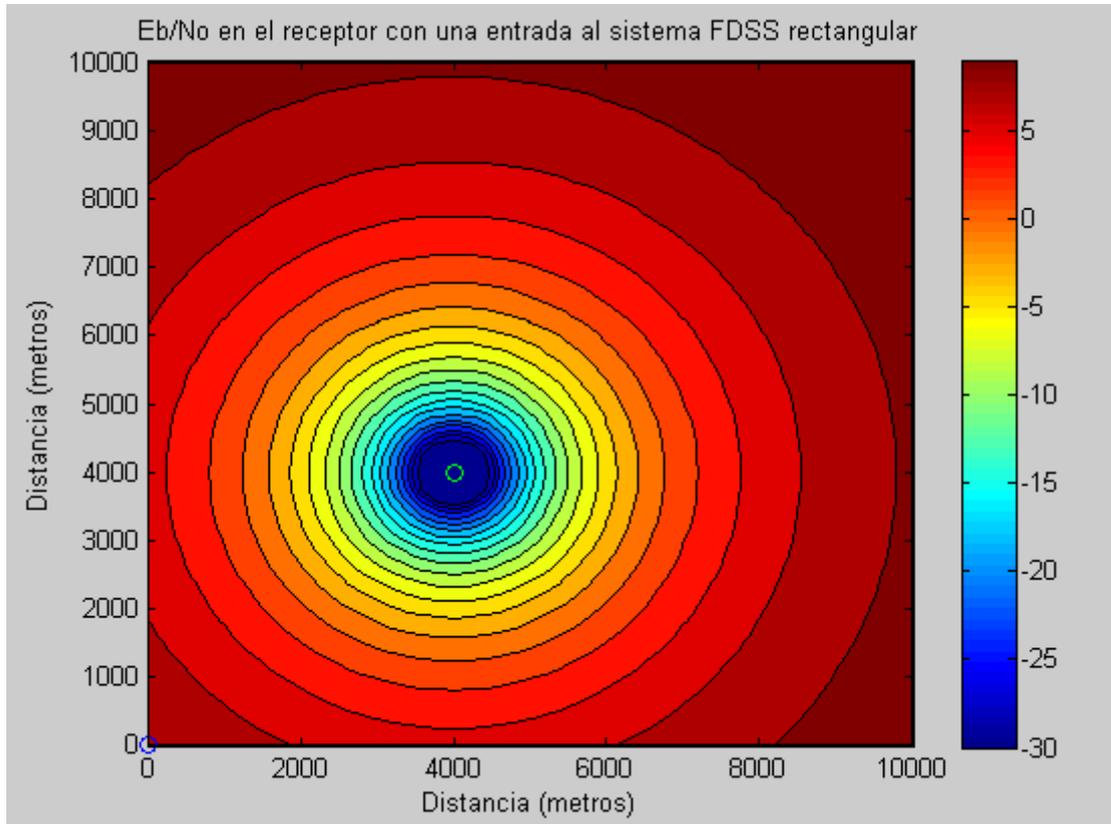
**Tabla 4.31:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor en función de la posición del transmisor de Jammer

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	-2.07	-4.17	-6.07	-7.47	-7.99	-7.47	-6.07	-4.17	-2.07	-0.01	1.93
1000	-4.17	-6.98	-9.79	-12.05	-12.97	-12.05	-9.79	-6.98	-4.17	-1.57	0.76
2000	-6.07	-9.79	-13.99	-18.07	-20.00	-18.07	-13.99	-9.79	-6.07	-2.91	-0.21
3000	-7.47	-12.05	-18.07	-26.02	-32.04	-26.02	-18.07	-12.05	-7.47	-3.83	-0.86
4000	-7.99	-12.97	-20.00	-32.04	-50.00	-32.04	-20.00	-12.97	-7.99	-4.17	-1.09
5000	-7.47	-12.05	-18.07	-26.02	-32.04	-26.02	-18.07	-12.05	-7.47	-3.83	-0.86
6000	-6.07	-9.79	-13.99	-18.07	-20.00	-18.07	-13.99	-9.79	-6.07	-2.91	-0.21
7000	-4.17	-6.98	-9.79	-12.05	-12.97	-12.05	-9.79	-6.98	-4.17	-1.57	0.76
8000	-2.07	-4.17	-6.07	-7.47	-7.99	-7.47	-6.07	-4.17	-2.07	-0.01	1.93
9000	-0.01	-1.57	-2.91	-3.83	-4.17	-3.83	-2.91	-1.57	-0.01	1.61	3.19
10000	1.93	0.76	-0.21	-0.86	-1.09	-0.86	-0.21	0.76	1.93	3.19	4.46

En la Figura 4.32 se muestran los resultados obtenidos con el empleo del sistema FDSS con una entrada rectangular en la transmisión de señales de datos.

Mientras que inicialmente el Jammer era capaz de impedir las comunicaciones desde distancias superiores a los 8.49 Km del receptor, con el empleo del sistema FDSS el impacto del Jammer se reduce sensiblemente. Con una entrada rectangular del sistema FDSS, es posible la recepción de la señal del transmisor con la calidad necesaria cuando el Jammer se encuentra a distancias superiores a los 4.53 Km. De esta manera se reduce el radio de acción del Jammer a casi la mitad, proporcionando cobertura en una mayor región del plano como se observa a partir de los valores de la  $E_b/N_o$  que se muestran en la Tabla 4.44. Sin embargo, pese a la reducción de la amenaza en las comunicaciones por parte del Jammer, este sigue resultando muy nocivo, ya que un radio de acción de más de 4.5 Km permite un ataque desde posiciones muy alejadas al receptor.

Resulta de especial importancia el tipo de información transmitida dado el impacto que tiene este hecho en la cobertura. Mientras que para la transmisión de voz el Jammer solo resultaba efectivo cuando se encontraba a distancias inferiores a los 1.4 Km, en la transmisión de datos el radio de acción es de 4.53 Km.



**Figura 4.32:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

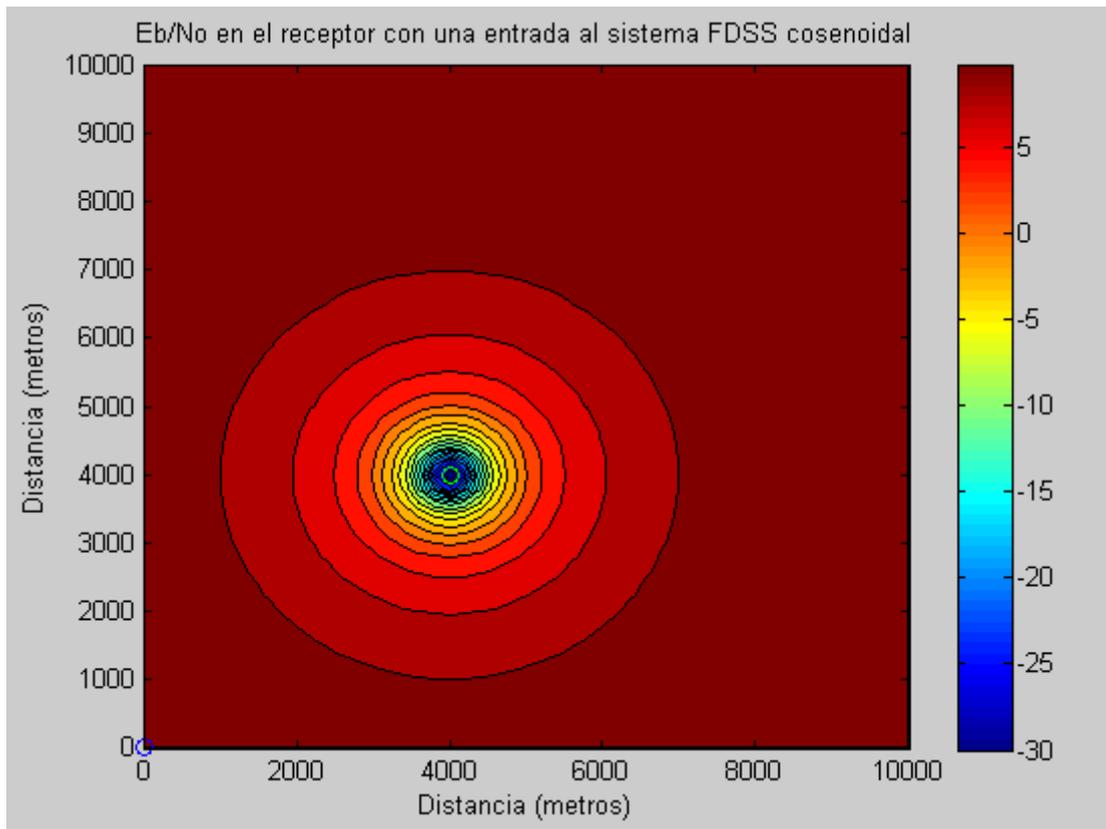
**Tabla 4.32:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos.

<b>Distancia (m)</b>	<b>0</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>7000</b>	<b>8000</b>	<b>9000</b>	<b>10000</b>
<b>0</b>	8.82	7.89	6.90	6.11	5.80	6.11	6.90	7.89	8.82	9.60	10.23
<b>1000</b>	7.89	6.38	4.64	3.04	2.34	3.04	4.64	6.38	7.89	9.03	9.84
<b>2000</b>	6.90	4.64	1.53	-1.94	-3.72	-1.94	1.53	4.64	6.90	8.44	9.54
<b>3000</b>	6.11	3.04	-1.94	-9.47	-15.42	-9.47	-1.94	3.04	6.11	8.04	9.31
<b>4000</b>	5.80	2.34	-3.72	-15.42	-30.00	-15.42	-3.72	2.34	5.80	7.89	9.22
<b>5000</b>	6.11	3.04	-1.94	-9.47	-15.42	-9.47	-1.94	3.04	6.11	8.04	9.31
<b>6000</b>	6.90	4.64	1.53	-1.94	-3.72	-1.94	1.53	4.64	6.90	8.44	9.54
<b>7000</b>	7.89	6.38	4.64	3.04	2.34	3.04	4.64	6.38	7.89	9.03	9.84
<b>8000</b>	8.82	7.89	6.90	6.11	5.80	6.11	6.90	7.89	8.82	9.60	10.23
<b>9000</b>	9.60	9.03	8.44	8.04	7.89	8.04	8.44	9.03	9.60	10.12	10.61
<b>10000</b>	10.23	9.84	9.54	9.31	9.22	9.31	9.54	9.84	10.23	10.61	10.93

Al utilizar una señal cosenoidal como entrada del sistema se mejoran las prestaciones enormemente como se aprecia a partir de la Figura 4.33. En este caso el ataque del Jammer resulta efectivo únicamente cuando se encuentra a distancias inferiores a los 1.8 Km del receptor. Pasamos, por tanto, de una situación inicial donde el ataque a las comunicaciones podía realizarse desde distancias muy elevadas a una situación donde, si bien las comunicaciones pueden sufrir ataques efectivos, estos son menos probables dada la menor distancia a la que debe encontrarse el Jammer. Dado que con el empleo de la señal rectangular el Jammer presentaba un radio de acción superior a los 4.5 Km pese al empleo del sistema FDSS, resulta de especial importancia la señal utilizada como entrada del sistema para disminuir la vulnerabilidad de las comunicaciones al ataque de los Jammers.

Comparando los resultados de las Tablas 4.15 y 4.33 observamos el impacto que tiene la ganancia de proceso así como el filtrado menos selectivo de la señal de Jammer. Es por estos motivos por los que se obtienen prestaciones muy superiores para la transmisión de señales de voz. Esto afecta a la cobertura del enlace estudiado. Mientras que en la transmisión de voz el Jammer tenía que encontrarse en un entorno inferior a los 250 metros del receptor, lo cual eliminaba la amenaza de sufrir un ataque mediante Jammers, con la transmisión de señales de datos el radio de acción del Jammer es muy superior existiendo una amenaza real en las comunicaciones.

Nuevamente es destacable el hecho de que algunas posiciones del Jammer representan situaciones irreales, dado que el hecho de que el Jammer se encuentre entre transmisor y receptor implicaría que el jeep que transporta el equipo interferente se encontrara en territorio enemigo.



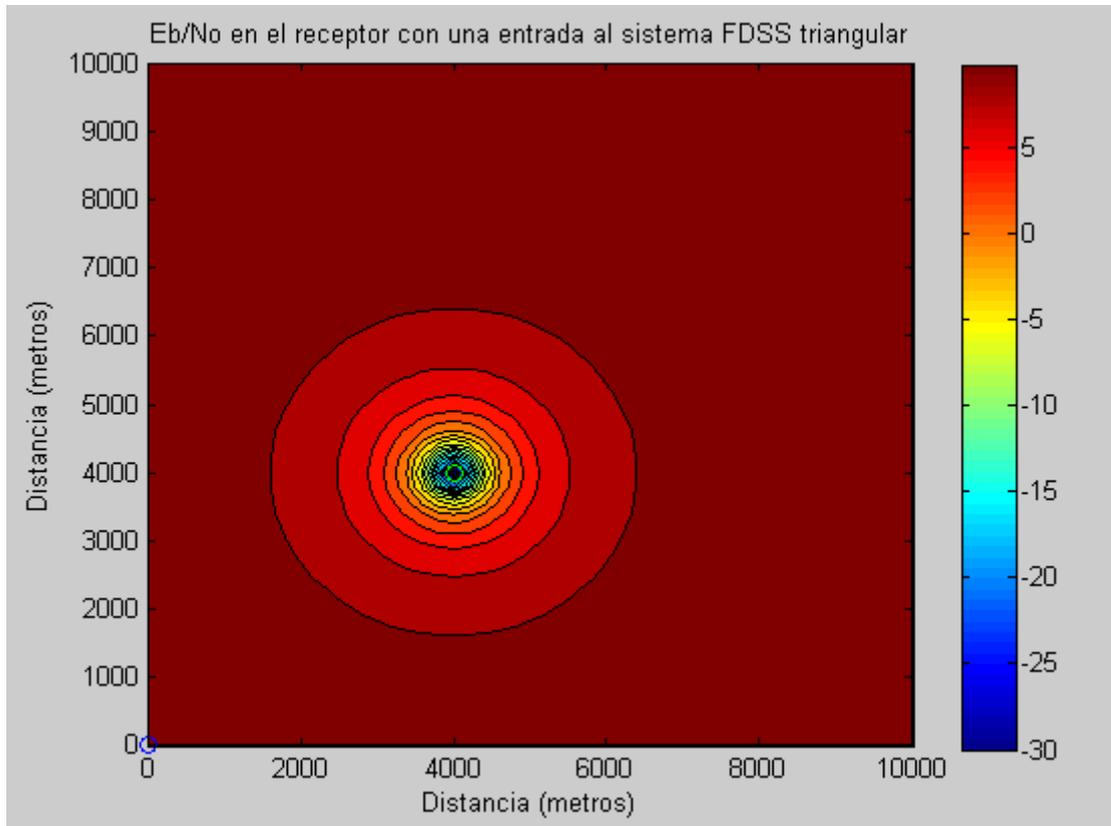
**Figura 4.33:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.33:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	11.34	11.03	10.89	10.77	10.71	10.77	10.89	11.03	11.34	11.54	11.66
1000	11.03	10.81	10.47	10.02	9.79	10.02	10.47	10.81	11.03	11.40	11.59
2000	10.89	10.47	9.55	8.37	7.63	8.37	9.55	10.47	10.89	11.23	11.52
3000	10.77	10.02	8.37	5.33	1.60	5.33	8.37	10.02	10.77	11.09	11.47
4000	10.71	9.79	7.63	1.60	-30.00	1.60	7.63	9.79	10.71	11.03	11.44
5000	10.77	10.02	8.37	5.33	1.60	5.33	8.37	10.02	10.77	11.09	11.47
6000	10.89	10.47	9.55	8.37	7.63	8.37	9.55	10.47	10.89	11.23	11.52
7000	11.03	10.81	10.47	10.02	9.79	10.02	10.47	10.81	11.03	11.40	11.59
8000	11.34	11.03	10.89	10.77	10.71	10.77	10.89	11.03	11.34	11.54	11.66
9000	11.54	11.40	11.23	11.09	11.03	11.09	11.23	11.40	11.54	11.64	11.71
10000	11.66	11.59	11.52	11.47	11.44	11.47	11.52	11.59	11.66	11.71	11.76

Si utilizamos una señal triangular como entrada del sistema FDSS aumenta la relación  $E_b/N_o$  en el receptor según se observa a partir de la Figura 4.34. Podemos ver que se alcanza la calidad necesaria en la señal recibida salvo que el Jammer se encuentre en un entorno muy próximo al receptor. La distancia máxima a la que puede encontrarse para que el ataque a las comunicaciones enemigas resulte efectivo es de 1.3

Km. Pese a la reducción del impacto del Jammer, esta distancia no elimina la amenaza de éste, como si ocurría en la transmisión de señales de voz, donde el Jammer debía estar mucho más próximo al receptor para cumplir su objetivo.

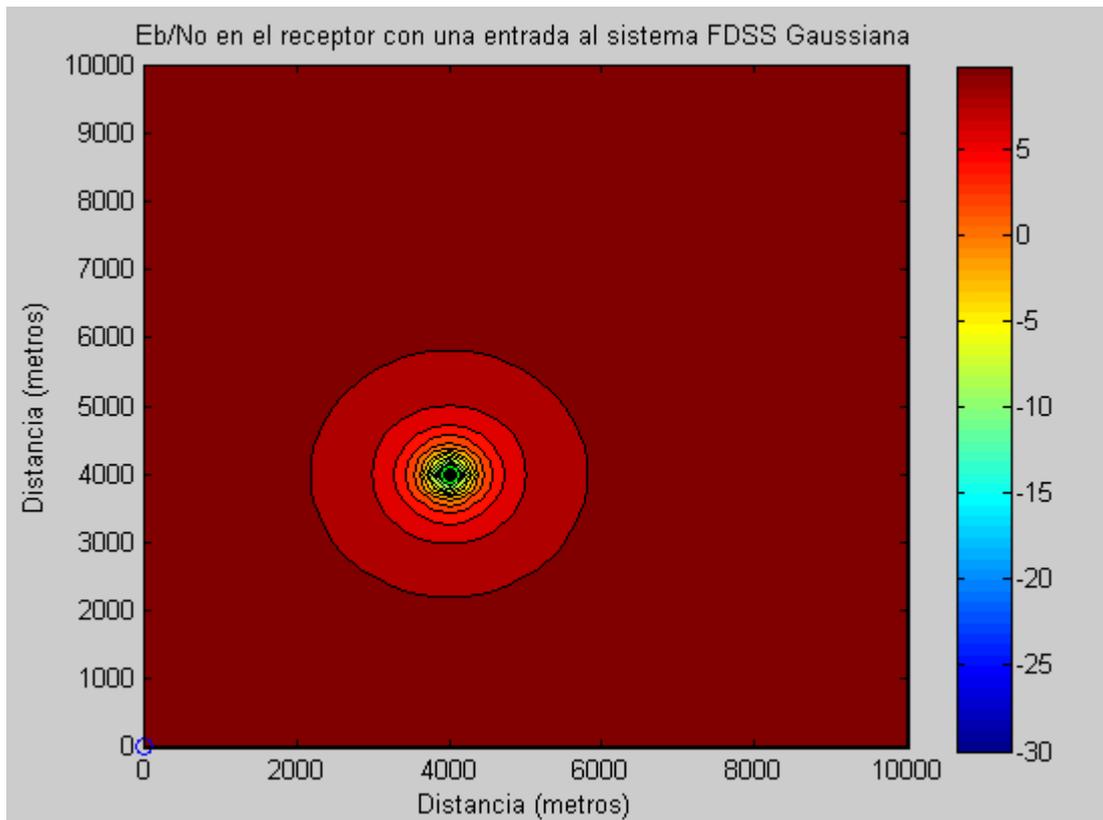


**Figura 4.34:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.34:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada triangular para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	11.62	11.47	11.26	11.04	11.01	11.04	11.26	11.47	11.62	11.71	11.77
1000	11.47	11.12	10.91	10.71	10.60	10.71	10.91	11.12	11.47	11.64	11.74
2000	11.26	10.91	10.45	9.52	9.04	9.52	10.45	10.91	11.26	11.56	11.70
3000	11.04	10.71	9.52	7.49	4.94	7.49	9.52	10.71	11.04	11.49	11.68
4000	11.01	10.60	9.04	4.94	-30.00	4.94	9.04	10.60	11.01	11.47	11.67
5000	11.04	10.71	9.52	7.49	4.94	7.49	9.52	10.71	11.04	11.49	11.68
6000	11.26	10.91	10.45	9.52	9.04	9.52	10.45	10.91	11.26	11.56	11.70
7000	11.47	11.12	10.91	10.71	10.60	10.71	10.91	11.12	11.47	11.64	11.74
8000	11.62	11.47	11.26	11.04	11.01	11.04	11.26	11.47	11.62	11.71	11.77
9000	11.71	11.64	11.56	11.49	11.47	11.49	11.56	11.64	11.71	11.76	11.80
10000	11.77	11.74	11.70	11.68	11.67	11.68	11.70	11.74	11.77	11.80	11.81

Utilizando una entrada Gaussiana se obtienen los mejores resultados en la  $E_b/N_o$  en el receptor. En este caso el Jammer únicamente resulta efectivo si se encuentra a distancias inferiores a los 895 metros del receptor según se aprecia en la Figura 4.35. Pese a que es muy improbable que el Jammer pueda estar tan próximo como para que el ataque interrumpa las comunicaciones, se obtienen prestaciones muy inferiores respecto a la transmisión de voz.

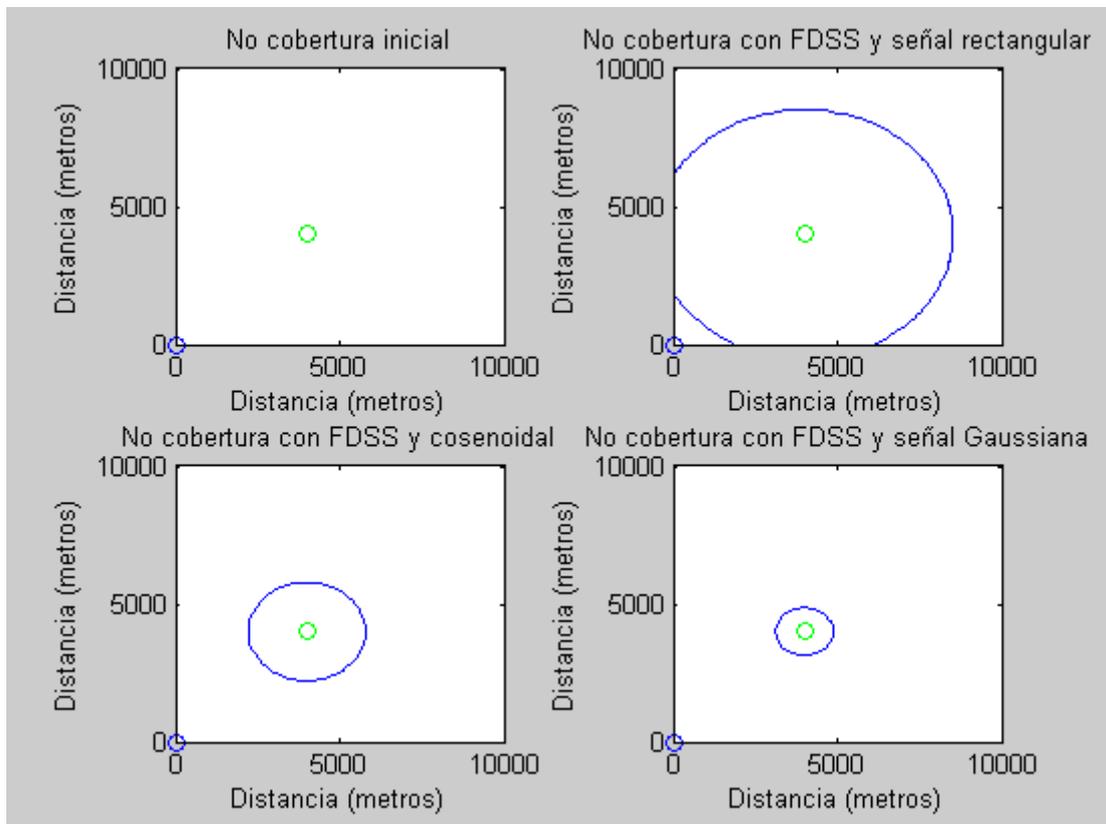


**Figura 4.35:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

**Tabla 4.35:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor en función de la posición del Jammer con la señal de entrada Gaussiana para la transmisión de señales de datos.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	11.78	11.73	11.66	11.59	11.55	11.59	11.66	11.73	11.78	11.82	11.83
1000	11.73	11.62	11.40	11.11	11.00	11.11	11.40	11.62	11.73	11.79	11.82
2000	11.66	11.40	10.94	10.54	10.20	10.54	10.94	11.40	11.66	11.77	11.81
3000	11.59	11.11	10.54	9.18	7.80	9.18	10.54	11.11	11.59	11.74	11.80
4000	11.55	11.00	10.20	7.80	-30.00	7.80	10.20	11.00	11.55	11.73	11.80
5000	11.59	11.11	10.54	9.18	7.80	9.18	10.54	11.11	11.59	11.74	11.80
6000	11.66	11.40	10.94	10.54	10.20	10.54	10.94	11.40	11.66	11.77	11.81
7000	11.73	11.62	11.40	11.11	11.00	11.11	11.40	11.62	11.73	11.79	11.82
8000	11.78	11.73	11.66	11.59	11.55	11.59	11.66	11.73	11.78	11.82	11.83
9000	11.82	11.79	11.77	11.74	11.73	11.74	11.77	11.79	11.82	11.83	11.84
10000	11.83	11.82	11.81	11.80	11.80	11.80	11.81	11.82	11.83	11.84	11.85

En la Figura 4.36 se muestra la región en la que es imposible la cobertura en las diferentes situaciones analizadas. Podemos observar que no existe una región de cobertura inicial, ya que el Jammer es capaz de interrumpir las comunicaciones desde elevadas distancias. Con el empleo del sistema FDSS se reduce el impacto del Jammer siendo de especial importancia la entrada empleada para mejorar las prestaciones. A partir de la Tabla 4.36 podemos ver la importante variación en la región de cobertura en función de la entrada del sistema FDSS. Mientras que con una entrada rectangular se obtiene cobertura en  $40.45 \text{ Km}^2$ , con la señal Gaussiana la región de cobertura aumenta hasta los  $97.65 \text{ Km}^2$ , siendo muy reducida la amenaza del Jammer a las comunicaciones.



**Figura 4.36:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos en función de la posición del transmisor de Jammer

**Tabla 4.36:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas en la transmisión de señales de datos en función de la posición del Jammer.

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	0
FDSS	Rectangular	40.45
	Cosenoidal	90.73
	Triangular	94.73
	Gaussiana	97.65

## 5. FDSS en aplicaciones militares Aire-Tierra

### 5.1. Introducción

Además de las comunicaciones militares entre un transmisor y un receptor terrestre hemos probado la eficacia del sistema FDSS para comunicaciones entre un transmisor aéreo, en este caso un transmisor a bordo de un caza, y un receptor situado en tierra. Al igual que en el caso anterior las comunicaciones son atacadas por el enemigo que transmite una señal de Jammer desde sus posiciones con el fin de imposibilitar las comunicaciones.

Al igual que para el modelo Tierra-Tierra utilizamos un plano de trabajo de  $(10 \times 10)$  Km<sup>2</sup>. Sin embargo, en este caso, únicamente el receptor y el transmisor de Jammer se encuentran en esa zona, estando el transmisor más alejado.

Suponemos que nos encontramos en una zona de guerra. El receptor constituye la estación base más próxima al frente que tenemos. Los aviones que vuelan sobre territorio enemigo se comunican con dicha estación base. El enemigo detecta nuestras transmisiones y ataca nuestra comunicación mandando una señal de Jammer a la misma frecuencia.

El enlace entre el transmisor de Jammer y el receptor lo modelamos mediante el modelo de las dos pendientes. Para el enlace entre el transmisor y el receptor utilizamos el modelo de propagación del espacio libre.

El modelo de las dos pendientes se define de la siguiente manera:

$$L_b (dB) = \begin{cases} L_{ref} + 10n_1 \log_{10} \left( \frac{d}{d_{ref}} \right) & d \leq R_b \\ L_{R_b} + 10n_2 \log_{10} \left( \frac{d}{R_b} \right) & d > R_b \end{cases} \quad (5.1)$$

Donde:

- $n_1 = 2,00$
- $n_2 = 4,00$
- $R_b = \frac{4 h_t h_r}{\lambda}$
- $L_{ref} (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4 \pi d_{ref}}{\lambda} \right)$
- $d_{ref} = 1\text{m}$

Mientras que las pérdidas básicas las caracterizamos de la siguiente manera para el modelo del espacio libre:

- $L_b (dB) = 32,45 + 20 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} d_{km}$  (5.2)

Hacemos un estudio de cobertura a lo largo del plano de trabajo. En este caso, para todos los escenarios simulados, el transmisor interferente se encuentra en una posición fija y vamos variando la posición del receptor a lo largo del plano de trabajo. El caza se encuentra internado en territorio enemigo. En cada uno de los escenarios simulados variamos la distancia del caza al receptor y al Jammer.

Al igual que en el modelo anterior, el Jammer es traslado en un jeep. La antena empleada es una whip tactical antena que radia de manera omnidireccional.

El receptor es una estación terrestre mientras que el transmisor está ubicado en el caza. En los diferentes escenarios simulados, utilizamos los siguientes valores:

- $f_1 = 300MHz$ . La frecuencia de transmisión utilizada para la comunicación entre el caza y la estación receptora es de 300 MHz, propia de los sistemas militares entre un transmisor aéreo y un receptor terrestre. Esta es la frecuencia en la que se recibe el ataque por medio de la señal de Jammer.
- $P_{tx} = 10W$
- $P_{txjammer} = 500W$

Al igual que en el caso anterior suponemos una anchura de banda instantánea de la señal de Jammer de 200 KHz.

Las ganancias de las antenas empleadas serán 2 dB para la antena receptora y el Jammer, mientras que la antena transmisora tendrá una ganancia de 0 dB.

Para las alturas hemos supuesto 2 metros tanto para receptor como para el transmisor de Jammer mientras que la altura de la antena transmisora está a 10 Km que es la altura a la que suponemos vuela el caza.

Nuevamente distinguimos entre la transmisión de señales de voz y señales de datos. Para la transmisión de señales de voz, el sistema FDSS presenta las siguientes características:

- $T_b = \frac{1}{15 \cdot 10^3}$  (s)
- $G_p = 256$

Mientras que para la transmisión de datos las características del sistema FDSS son:

- $T_b = \frac{1}{120 \cdot 10^3}$  (s)
- $G_p = 32$

Se han simulado 3 escenarios distintos para las señales de entrada rectangular y cosenoidal.

En cada uno de ellos tanto el transmisor interferente como el transmisor están en posiciones fijas mientras que la posición del receptor varía a lo largo del área de trabajo. Los 3 escenarios difieren en la posición del transmisor respecto de transmisor de Jammer y receptor.

A lo largo de los escenarios suponemos que la recepción es posible cuando la relación  $E_b/N_o$  es superior a 8 dB. Se exige 1 dB más que en las comunicaciones Tierra-Tierra para compensar el efecto Doppler generado por el movimiento del caza.

## 5.2. Transmisión de señales de voz

En este primer escenario la posición del transmisor y del transmisor de Jammer son las siguientes:

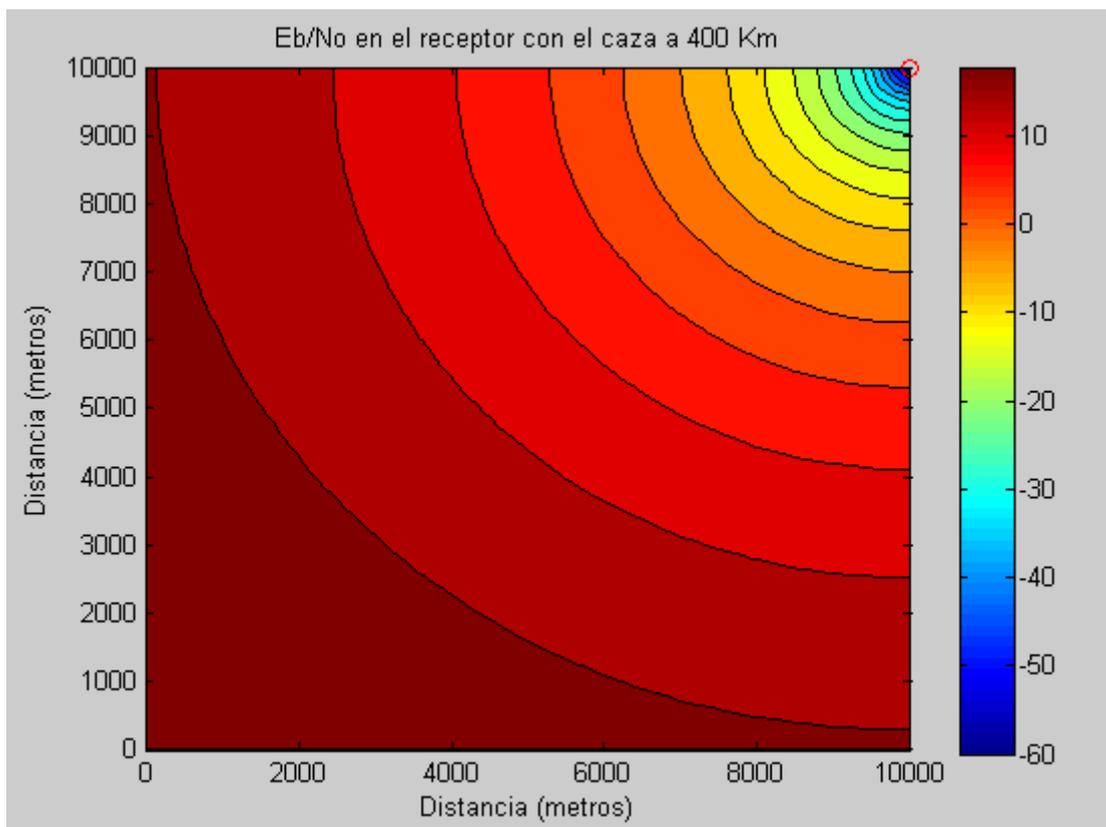
- Transmisor:  $x_1=400$  Km,  $y_1=0$  Km,  $z_1=10$  Km
- Transmisor de Jammer:  $x_2=10$  Km,  $y_2=10$  Km,  $z_2=2$ m.

A una distancia de 400 Km, no existe visión directa entre el caza y el receptor según se aprecia a partir de la ecuación:

$$LOS(Km) = 3.8 * \sqrt{h_t(m)}$$

Dado que el caza vuela a una altura de 10Km, se producen pérdidas por difracción en el enlace entre el caza y la estación receptora. Estimamos estas pérdidas en una reducción de potencia de 10 dB en el enlace entre el caza y la estación receptora.

En la Figura 5.1 se muestra la relación de la  $E_b/N_o$  obtenida en el receptor antes de hacer uso del sistema FDSS cuando el caza se encuentra a 400 Km del origen del plano bajo estudio. Esta es una situación análoga al empleo del sistema WCDMA dado que ambos sistemas presentan la misma ganancia de proceso, que para la transmisión de señales de voz es de 256. A partir de la Tabla 5.1 se observa que si el receptor se encuentra a distancias inferiores a 5.35 Km del Jammer no se alcanza el límite de 8 dB que habíamos establecido para considerar que la recepción de la señal alcanza el mínimo de calidad necesario. Comprobamos por tanto la efectividad de atacar las comunicaciones mediante Jammers, pues a distancias de hasta 5.35 Km entre Jammer y receptor resulta imposible que éste reciba con la calidad necesaria la señal enviada por el caza. El radio de acción del Jammer es, por tanto, muy elevado.



**Figura 5.1:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 400 Km de distancia

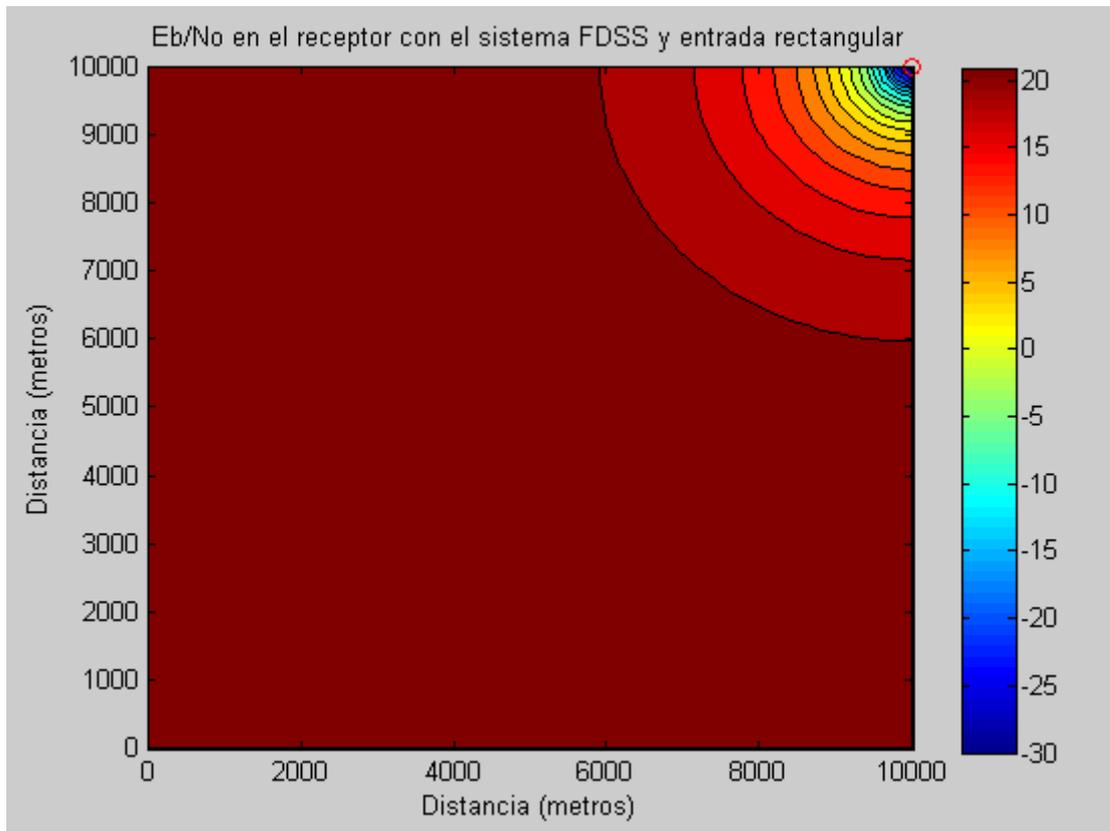
**Tabla 5.1:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 400 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	21.47	21.08	20.66	20.21	19.74	19.28	18.86	18.49	18.21	18.04	18.00
1000	21.06	20.58	20.04	19.47	18.87	18.27	17.71	17.22	16.84	16.61	16.54
2000	20.61	20.02	19.36	18.63	17.87	17.10	16.36	15.71	15.20	14.88	14.78
3000	20.14	19.42	18.61	17.71	16.75	15.77	14.81	13.95	13.25	12.81	12.67
4000	19.65	18.80	17.82	16.73	15.54	14.30	13.06	11.91	10.96	10.34	10.13
5000	19.17	18.18	17.03	15.72	14.28	12.72	11.12	9.59	8.27	7.36	7.05
6000	18.73	17.60	16.27	14.74	13.01	11.10	9.06	6.99	5.10	3.72	3.22
7000	18.34	17.09	15.60	13.86	11.84	9.54	6.96	4.17	1.39	-0.86	-1.75
8000	18.04	16.69	15.07	13.14	10.87	8.20	5.05	1.37	-2.82	-6.87	-8.78
9000	17.84	16.43	14.72	12.68	10.23	7.27	3.66	-0.90	-6.89	-14.83	-20.82
10000	17.78	16.34	14.60	12.51	10.00	6.94	3.13	-1.82	-8.83	-20.85	-60.00

Al emplear el sistema FDSS con la señal de entrada rectangular la zona de impacto del Jammer disminuye sensiblemente. En la Figura 5.2 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor en función de su posición en el plano bajo estudio. A partir de los valores mostrados en la Tabla 5.2 se observa la mejora en las prestaciones con el empleo del sistema FDSS. En esta situación únicamente se interrumpen las comunicaciones cuando el receptor se encuentra a distancias menores a 1.28 Km respecto al Jammer. A partir de los resultados comprobamos la eficacia del sistema FDSS gracias al filtrado sobre el ancho de banda afectado por el Jammer. Pese a la mejora en la cobertura del enlace deseado, la distancia de 1.28 Km de acción del Jammer, aunque dificulta el ataque por parte de estos, no elimina la posibilidad de que las comunicaciones sean atacadas con éxito por el enemigo.

El sistema FDSS mejora sus prestaciones al utilizar como entrada la señal cosenoidal. Dado que la gran ventaja del sistema es la capacidad de suprimir una parte de la banda de frecuencias del sistema la elección en la señal de entrada resulta decisiva. A partir de la Figura 5.3 y de la Tabla 5.3 observamos el aumento en la relación  $E_b/N_o$  respecto a los resultados obtenidos con la señal de entrada rectangular. En este caso el Jammer únicamente impedirá que la señal del caza se reciba con la calidad deseada si la distancia entre éste y el receptor es menor a los 190 metros. Dado que el Jammer es trasladado en un jeep debido a su peso, es una situación altamente improbable que se encuentre a distancias tan reducidas del receptor, que puede ser un soldado o una estación terrestre. Por lo tanto, el empleo del sistema FDSS empleando como entrada del sistema una señal cosenoidal elimina casi totalmente la amenaza provocada por el Jammer en el enlace estudiado. Por tanto, es recomendable el empleo de esta señal de

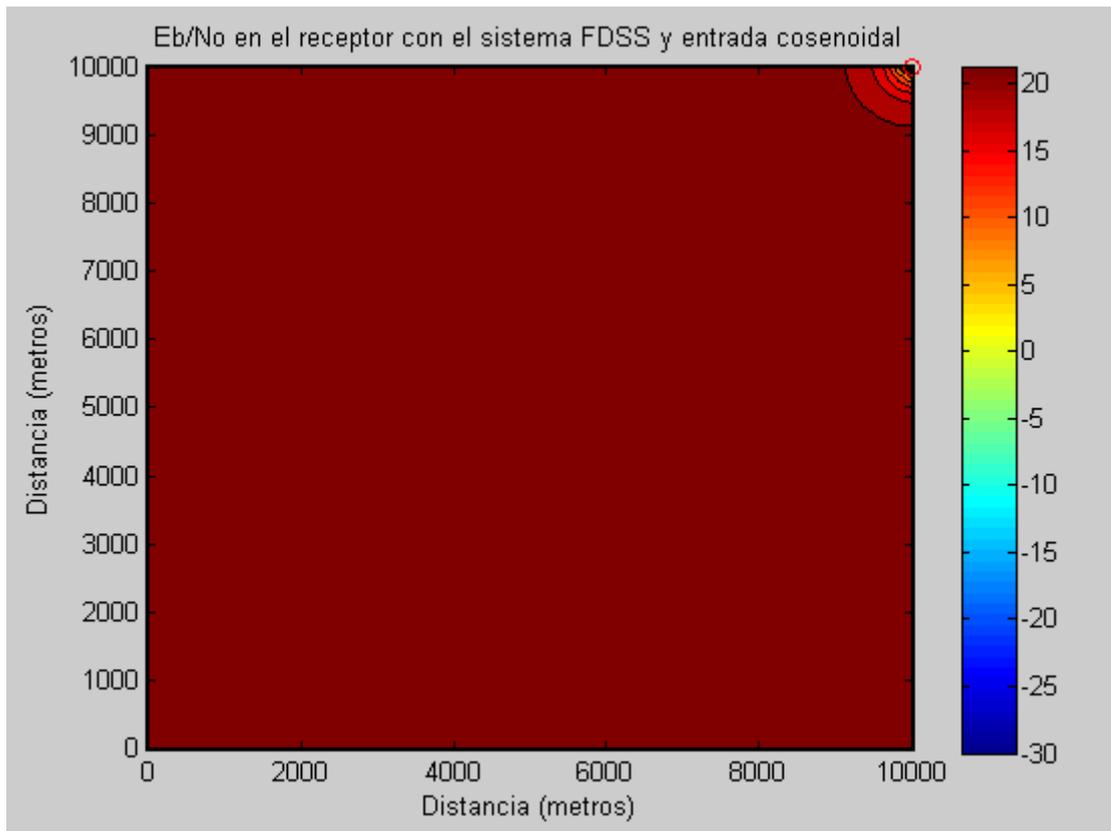
entrada debido a las altas prestaciones y la simpleza del filtrado a realizar sobre la señal rectangular para obtener una señal de este tipo.



**Figura 5.2:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia.

**Tabla 5.2:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	23.46	23.46	23.46	23.46	23.45	23.44	23.43	23.43	23.43	23.44	23.46
1000	23.44	23.43	23.43	23.41	23.39	23.37	23.36	23.34	23.33	23.33	23.35
2000	23.42	23.40	23.38	23.35	23.33	23.29	23.25	23.21	23.19	23.17	23.18
3000	23.39	23.37	23.33	23.30	23.24	23.18	23.11	23.03	22.98	22.94	22.94
4000	23.36	23.32	23.28	23.22	23.14	23.03	22.91	22.78	22.66	22.58	22.56
5000	23.33	23.29	23.23	23.13	23.01	22.85	22.65	22.41	22.18	22.00	21.95
6000	23.30	23.25	23.16	23.04	22.87	22.62	22.30	21.88	21.42	21.03	20.88
7000	23.27	23.21	23.10	22.95	22.71	22.37	21.86	21.13	20.20	19.27	18.86
8000	23.26	23.18	23.05	22.86	22.57	22.11	21.37	20.17	18.30	15.89	14.56
9000	23.24	23.15	23.02	22.80	22.46	21.91	20.96	19.22	15.87	9.63	4.05
10000	23.24	23.15	23.01	22.78	22.43	21.83	20.79	18.79	14.52	4.02	-30.00



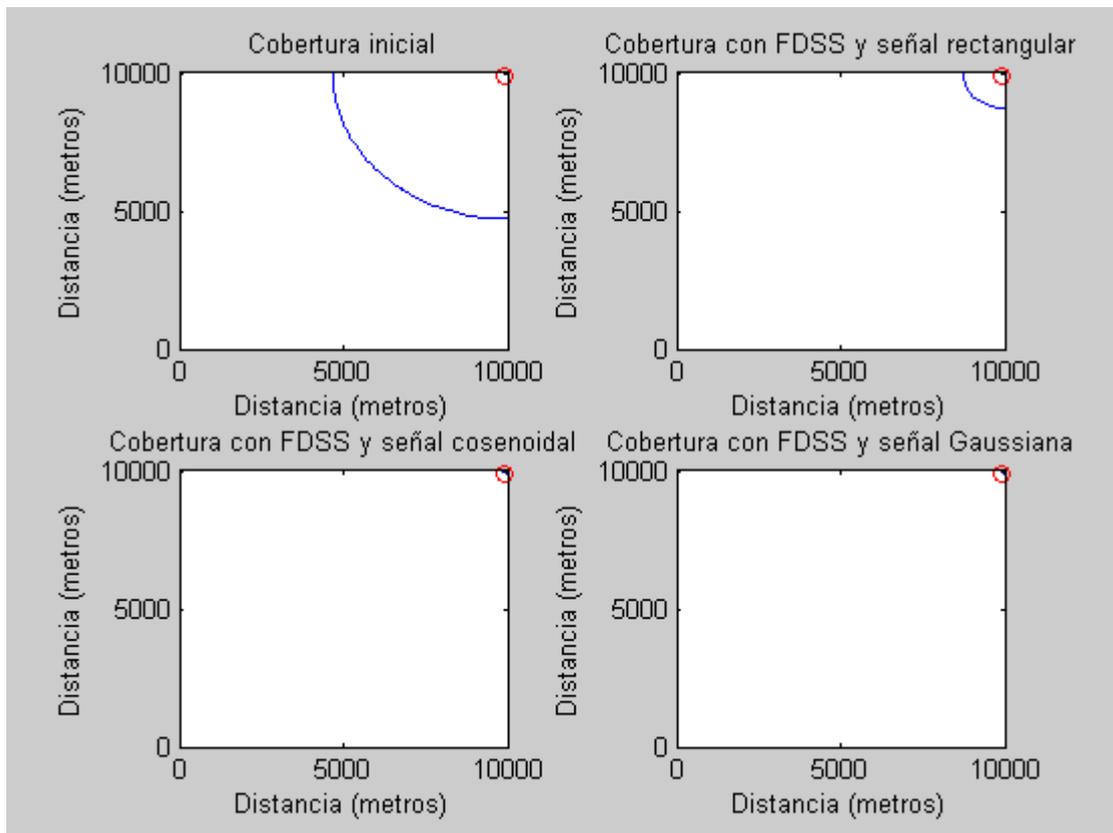
**Figura 5.3:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia.

**Tabla 5.3:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	23.53	23.55	23.57	23.59	23.60	23.62	23.64	23.66	23.68	23.70	23.72
1000	23.53	23.54	23.56	23.58	23.60	23.61	23.63	23.64	23.66	23.68	23.70
2000	23.52	23.54	23.56	23.57	23.59	23.60	23.61	23.62	23.63	23.64	23.66
3000	23.52	23.54	23.55	23.56	23.57	23.57	23.58	23.59	23.61	23.63	23.65
4000	23.52	23.53	23.54	23.55	23.55	23.55	23.56	23.58	23.59	23.60	23.62
5000	23.51	23.52	23.53	23.53	23.53	23.54	23.55	23.54	23.54	23.55	23.56
6000	23.51	23.52	23.52	23.51	23.52	23.52	23.51	23.50	23.49	23.49	23.50
7000	23.50	23.51	23.51	23.50	23.51	23.50	23.48	23.45	23.40	23.35	23.34
8000	23.50	23.50	23.49	23.50	23.50	23.47	23.45	23.37	23.24	23.06	22.96
9000	23.50	23.50	23.49	23.49	23.49	23.46	23.42	23.31	23.04	22.42	21.62
10000	23.50	23.50	23.49	23.49	23.48	23.45	23.41	23.27	22.92	21.60	-30.00

En la Figura 5.4 mostramos la zona de cobertura obtenida en los distintos escenarios estudiados. La región de cobertura es la exterior al entorno casi circular con centro en el Jammer. Se observa que inicialmente el Jammer impide la recepción de la señal con la calidad necesaria en una región de  $22.5 \text{ Km}^2$  de extensión. Al emplear el sistema FDSS con la señal de entrada rectangular el impacto del Jammer se reduce

mucho existiendo cobertura en  $98.71 \text{ Km}^2$  de los  $100 \text{ Km}^2$  estudiados como observamos a partir de la Tabla 5.4. Solamente en un entorno de radio 1.28 Km alrededor del Jammer resulta imposible la cobertura. Con la señal de entrada cosenoidal existe cobertura en el enlace estudiado en  $99.97 \text{ Km}^2$ , es decir, casi la totalidad del plano estudiado. Se muestran también los resultados obtenidos con la señal de entrada Gaussiana, en este caso, únicamente si la distancia entre Jammer y receptor es menor que 40 metros resulta efectivo el ataque a las comunicaciones. Esto supone que el área de cobertura con esta señal de entrada es de  $99.9987 \text{ Km}^2$ .



**Figura 5.4:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km

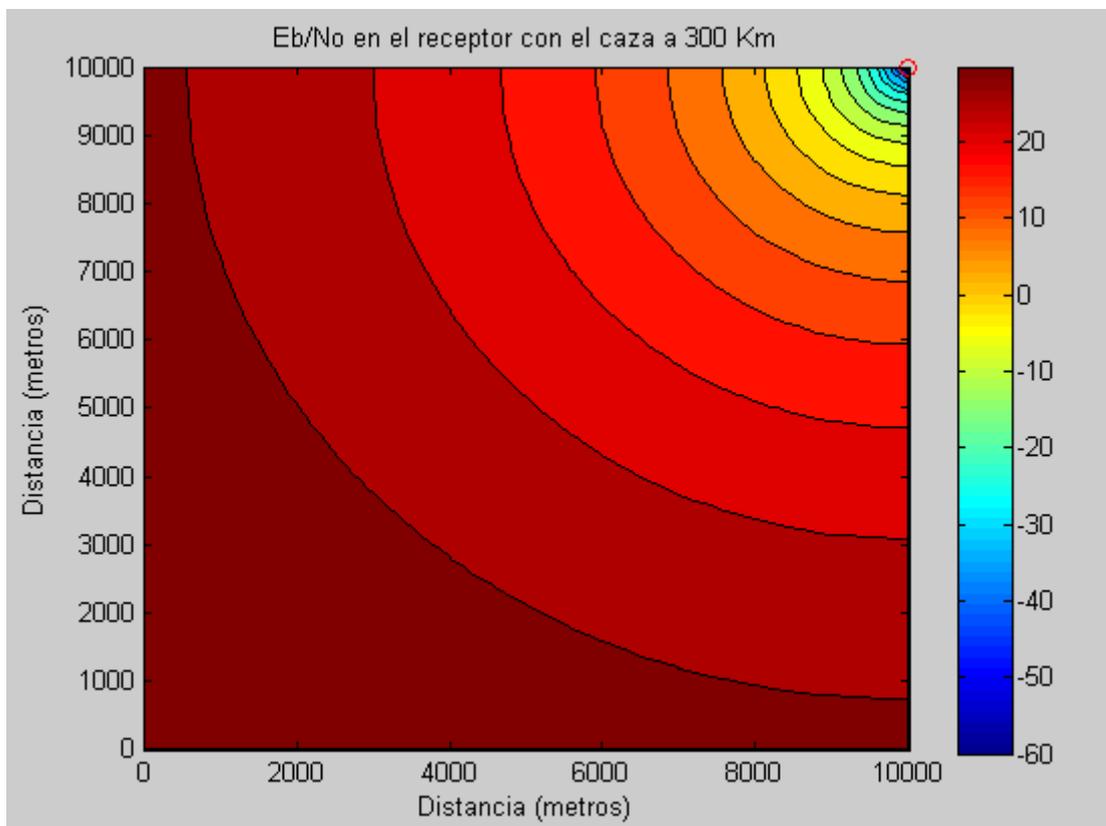
**Tabla 5.4:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 400 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura( $\text{Km}^2$ )
WCDMA	-----	77.5199
FDSS	Rectangular	98.7132
	Cosenoidal	99.9716
	Gaussiana	99.9987

En el segundo escenario las posiciones del transmisor y el Jammer son las siguientes:

- Transmisor:  $x_1=300$  Km,  $y_1=0$  Km,  $z_1=10$  Km
- Transmisor de Jammer:  $x_2=10$  Km,  $y_2=10$  Km,  $z_2=2$ m.

En la Figura 5.5 se muestra la relación SJNR en el receptor cuando el caza se encuentra a 300 Km del origen del plano bajo estudio. A diferencia del primer escenario, existe visión directa entre el caza y el receptor, por lo que no existen pérdidas debidas a la difracción. Comprobamos a partir de los valores de la Tabla 5.5 el aumento en la relación  $E_b/N_o$  como consecuencia de la disminución de las pérdidas básicas por la menor distancia entre el caza y el receptor. En este caso el radio de acción del Jammer es de 2.55 Km. Pese a la reducción del radio del mismo, el impacto del Jammer en las comunicaciones sigue siendo de gran importancia, ya que el Jammer es capaz de interrumpir las comunicaciones desde distancias elevadas, por lo que resulta muy efectivo el empleo de los mismos para atacar las comunicaciones enemigas.



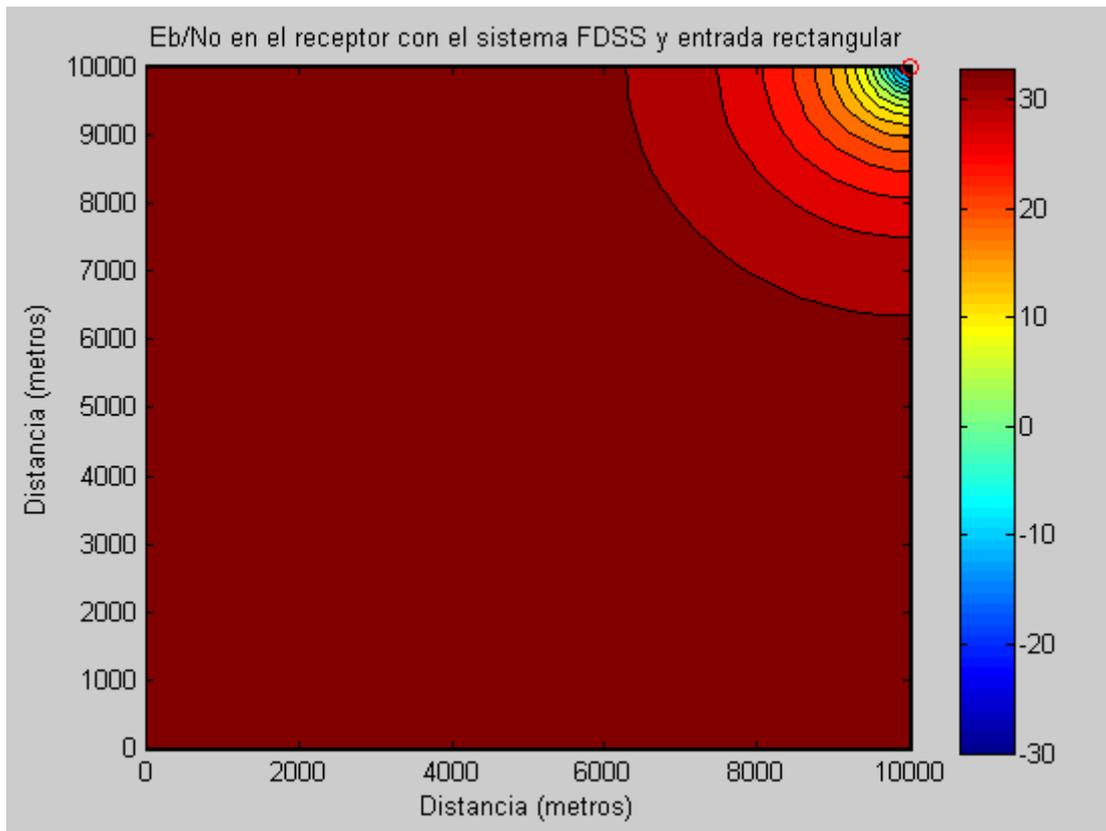
**Figura 5.5:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 300 Km de distancia

**Tabla 5.5:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 300 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	33.96	33.58	33.17	32.72	32.27	31.82	31.40	31.04	30.77	30.61	30.57
1000	33.55	33.08	32.55	31.98	31.39	30.80	30.25	29.77	29.40	29.17	29.11
2000	33.11	32.52	31.87	31.15	30.39	29.63	28.90	28.26	27.76	27.44	27.35
3000	32.64	31.93	31.12	30.23	29.28	28.30	27.35	26.50	25.81	25.37	25.24
4000	32.15	31.30	30.33	29.25	28.07	26.83	25.60	24.46	23.52	22.90	22.70
5000	31.67	30.69	29.54	28.24	26.80	25.25	23.66	22.13	20.82	19.93	19.62
6000	31.22	30.10	28.78	27.26	25.54	23.63	21.59	19.53	17.65	16.29	15.80
7000	30.83	29.59	28.11	26.38	24.37	22.07	19.50	16.72	13.94	11.70	10.82
8000	30.53	29.19	27.58	25.66	23.40	20.73	17.59	13.91	9.74	5.69	3.78
9000	30.34	28.93	27.23	25.19	22.75	19.81	16.20	11.64	5.66	-2.27	-8.26
10000	30.27	28.84	27.11	25.03	22.52	19.47	15.67	10.73	3.72	-8.29	-60.00

El empleo del sistema FDSS minimiza en gran medida la eficacia del Jammer. A partir de la Figura 5.6 se observa el aumento en la relación  $E_b/N_o$  y por tanto la mejora en la calidad de la señal recibida con el empleo del sistema FDSS con una entrada rectangular. En este caso la zona de impacto del Jammer consiste en un entorno de 600 metros respecto a su posición. Esta distancia es bastante reducida y no es probable que el jeep que transporte el Jammer se encuentre tan próximo a la estación terrestre donde se recibe la señal del caza. Por tanto se reduce mucho la amenaza de sufrir un ataque a las comunicaciones al emplear dicho sistema frente a la situación inicial, en la que interrumpir las comunicaciones resultaba mucho más sencillo.

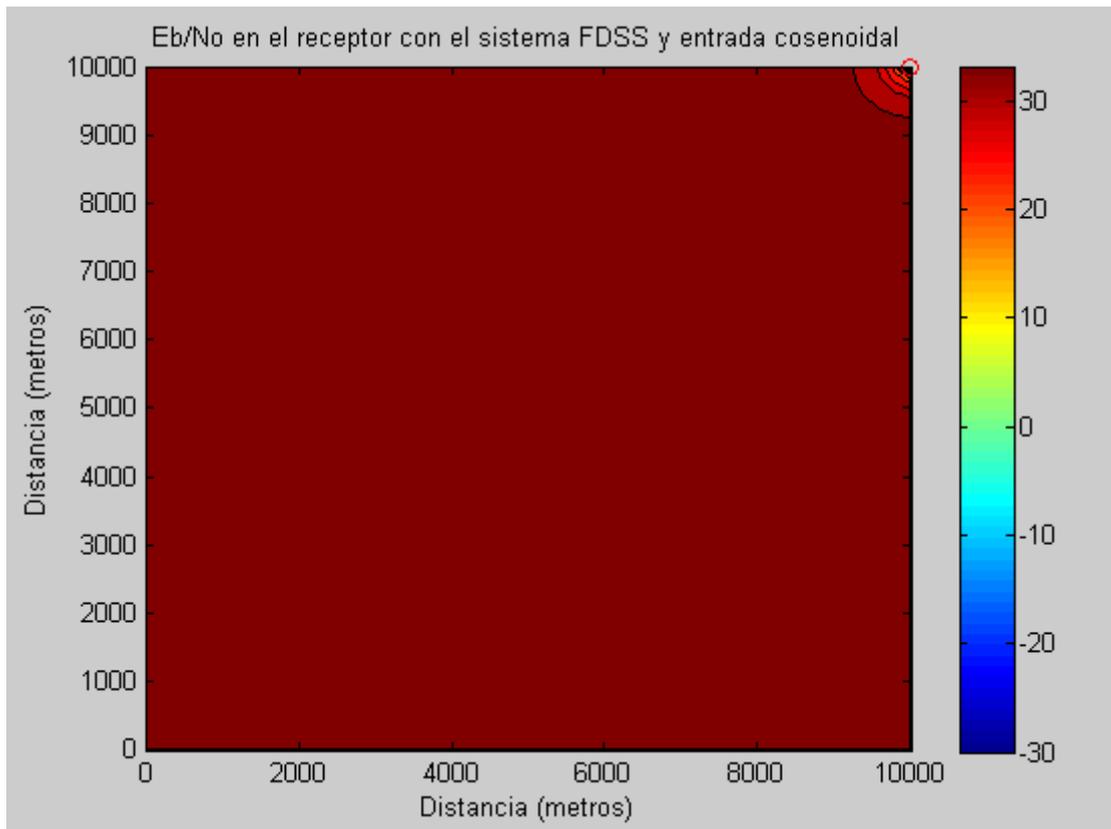
En la Figura 5.7 mostramos los resultados obtenidos con el sistema FDSS cuando se utiliza una señal cosenoidal como entrada del sistema. Dadas las mejores prestaciones que tiene esta señal de entrada permite un mejor filtrado de la banda de frecuencias atacada por el Jammer. Podemos apreciar a partir de la Tabla 5.7 que únicamente situando el receptor en la posición del Jammer este impide la recepción con la calidad necesaria de la señal transmitida por el caza. Dado que el paso empleado es menor que el que se muestra en la Tabla 5.7, el Jammer únicamente resulta efectivo cuando se encuentra a distancias menores a los 90 metros del receptor. En una situación de guerra es altamente improbable que soldados enemigos se encuentren tan próximos por lo que la amenaza del ataque a las comunicaciones mediante Jammers es muy baja. El Jammer debería radiar una potencia mucho mayor a los 500W o atacar una banda de frecuencias superior a los 200 KHz para que el ataque resultara más efectivo.



**Figura 5.6:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia.

**Tabla 5.6:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	35.95	35.96	35.97	35.97	35.97	35.97	35.97	35.98	35.99	36.01	36.03
1000	35.93	35.94	35.94	35.93	35.91	35.91	35.90	35.89	35.89	35.90	35.92
2000	35.91	35.91	35.89	35.87	35.85	35.83	35.79	35.76	35.74	35.74	35.76
3000	35.89	35.87	35.84	35.81	35.77	35.71	35.65	35.58	35.53	35.50	35.51
4000	35.86	35.83	35.79	35.74	35.66	35.57	35.45	35.33	35.22	35.14	35.13
5000	35.83	35.79	35.74	35.65	35.54	35.38	35.19	34.96	34.73	34.56	34.52
6000	35.79	35.75	35.67	35.56	35.39	35.16	34.84	34.43	33.97	33.59	33.45
7000	35.77	35.71	35.61	35.46	35.24	34.90	34.40	33.68	32.75	31.83	31.43
8000	35.75	35.68	35.56	35.38	35.10	34.64	33.91	32.72	30.85	28.46	27.13
9000	35.74	35.66	35.53	35.32	34.99	34.44	33.50	31.77	28.42	22.19	16.62
10000	35.73	35.65	35.51	35.30	34.95	34.37	33.33	31.34	27.07	16.58	-30.00



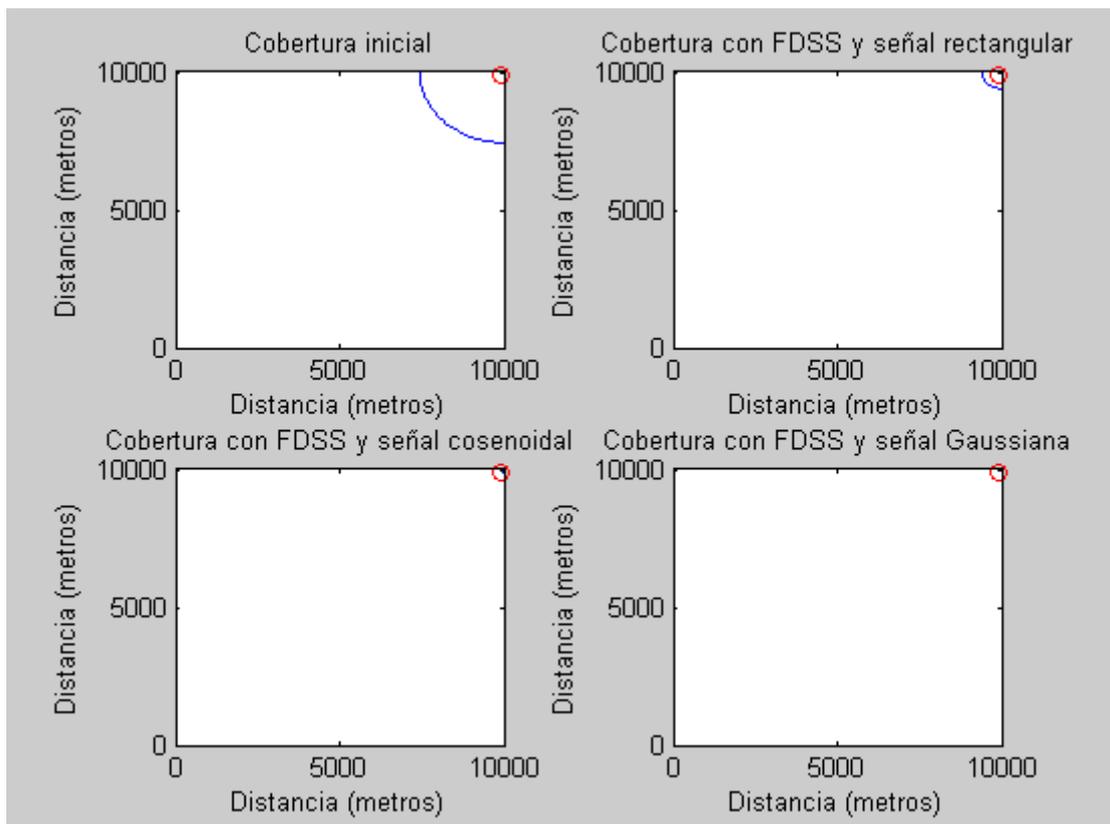
**Figura 5.7:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia.

**Tabla 5.7:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{final}}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	36.02	36.05	36.08	36.10	36.13	36.15	36.18	36.21	36.23	36.26	36.29
1000	36.02	36.05	36.07	36.10	36.12	36.14	36.17	36.19	36.21	36.24	36.27
2000	36.02	36.04	36.07	36.09	36.11	36.13	36.15	36.16	36.18	36.21	36.24
3000	36.02	36.04	36.06	36.08	36.10	36.11	36.12	36.14	36.17	36.19	36.22
4000	36.01	36.03	36.05	36.07	36.07	36.08	36.11	36.12	36.14	36.16	36.19
5000	36.01	36.03	36.04	36.05	36.05	36.07	36.09	36.09	36.09	36.11	36.13
6000	36.00	36.02	36.03	36.03	36.05	36.06	36.05	36.04	36.05	36.05	36.07
7000	36.00	36.01	36.02	36.02	36.03	36.03	36.01	36.00	35.95	35.92	35.91
8000	35.99	36.01	36.00	36.02	36.02	36.00	35.99	35.92	35.80	35.62	35.53
9000	35.99	36.00	36.00	36.01	36.01	35.99	35.96	35.85	35.59	34.98	34.19
10000	35.99	36.00	35.99	36.01	36.01	35.98	35.94	35.82	35.47	34.16	-30.00

En la Figura 5.8 se muestra el área de cobertura para los diferentes sistemas estudiados. Observamos que inicialmente la región afectada por el Jammer presenta un área de  $5.11 \text{ Km}^2$ . Es destacable la reducción de dicha región como consecuencia de la mayor proximidad entre caza y receptor. Con el empleo del sistema FDSS utilizando una entrada rectangular la zona de cobertura aumenta de forma notable, siendo posible

la comunicación de acuerdo a la calidad establecida en  $99.71 \text{ Km}^2$ . Únicamente si el receptor se encuentra a distancias inferiores a los 600 metros del Jammer es imposible la recepción de la señal con la calidad necesaria. Si se emplea dicho sistema con la señal de entrada cosenoidal la región afectada por el Jammer se reduce aún más siendo la zona de cobertura de  $99.9936 \text{ Km}^2$  mientras que con la señal Gaussiana el Jammer impide las comunicaciones en un entorno de 20 metros respecto a su posición, lo que constituye una zona de cobertura de  $99.9997 \text{ Km}^2$  sobre los  $100 \text{ Km}^2$  estudiados.



**Figura 5.8:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km

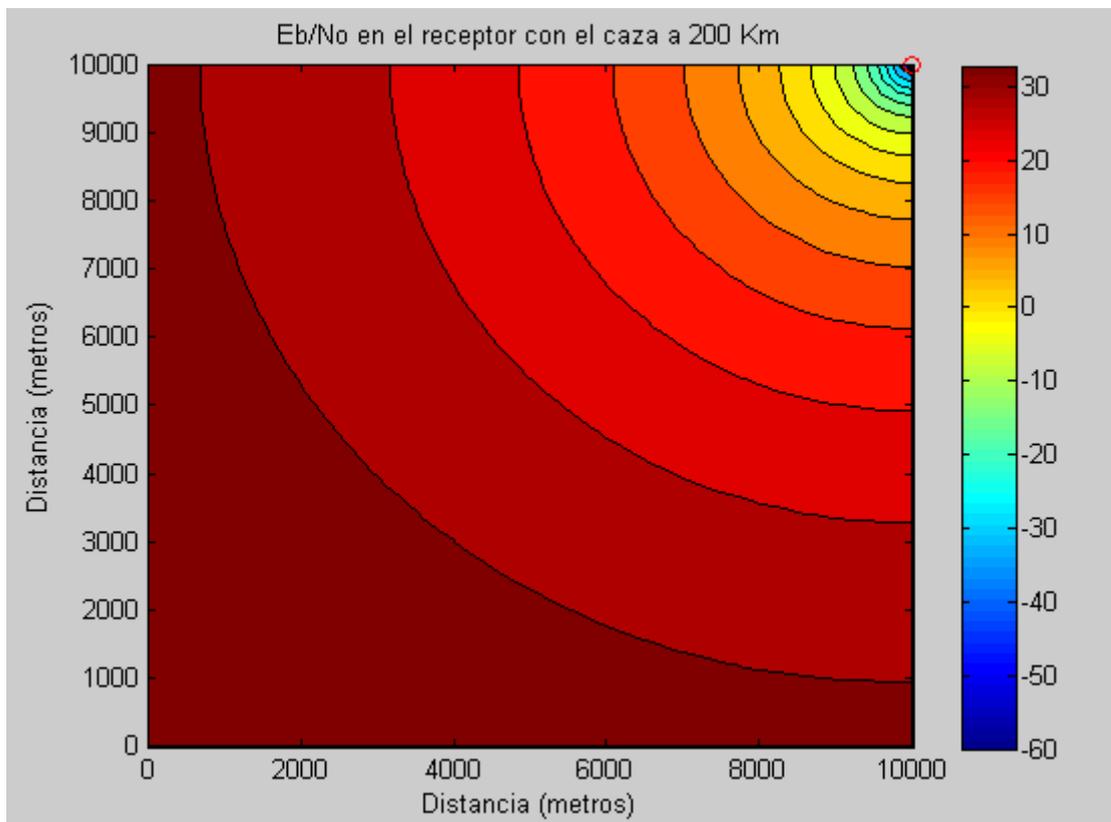
**Tabla 5.8:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 300 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura( $\text{Km}^2$ )
WCDMA	-----	94.8929
FDSS	Rectangular	99.7173
	Cosenoidal	99.9936
	Gaussiana	99.9997

En el tercer escenario las posiciones del transmisor y el Jammer son las siguientes:

- Transmisor:  $x_1=200$  Km,  $y_1=0$  Km,  $z_1=10$  Km
- Transmisor de Jammer:  $x_2=10$  Km,  $y_2=10$  Km,  $z_2=2$ m.

En la Figura 5.9 se muestran los resultados obtenidos inicialmente con el caza situado a 200 Km del origen del plano bajo estudio. Al igual que en el caso anterior, existe visión directa entre caza y transmisor, por lo que no existen pérdidas adicionales por este motivo. Así mismo, con la reducción de la distancia entre el caza y el receptor el impacto del Jammer es menor. En este caso, únicamente si el Jammer se encuentra a una distancia inferior a 2.09 Km del receptor el ataque a las comunicaciones resulta efectivo. Sin embargo, esta distancia sigue siendo muy elevada ya que permite atacar las comunicaciones enemigas desde las propias líneas. Es por tanto destacable que el ataque a las comunicaciones es posible desde grandes distancias aún cuando el caza y el receptor se encuentren muy próximos con el empleo del sistema WCDMA.



**Figura 5.9:** Relación  $(E_b/N_o)_{\text{inicial}}$  en el receptor con el caza a 200 Km de distancia

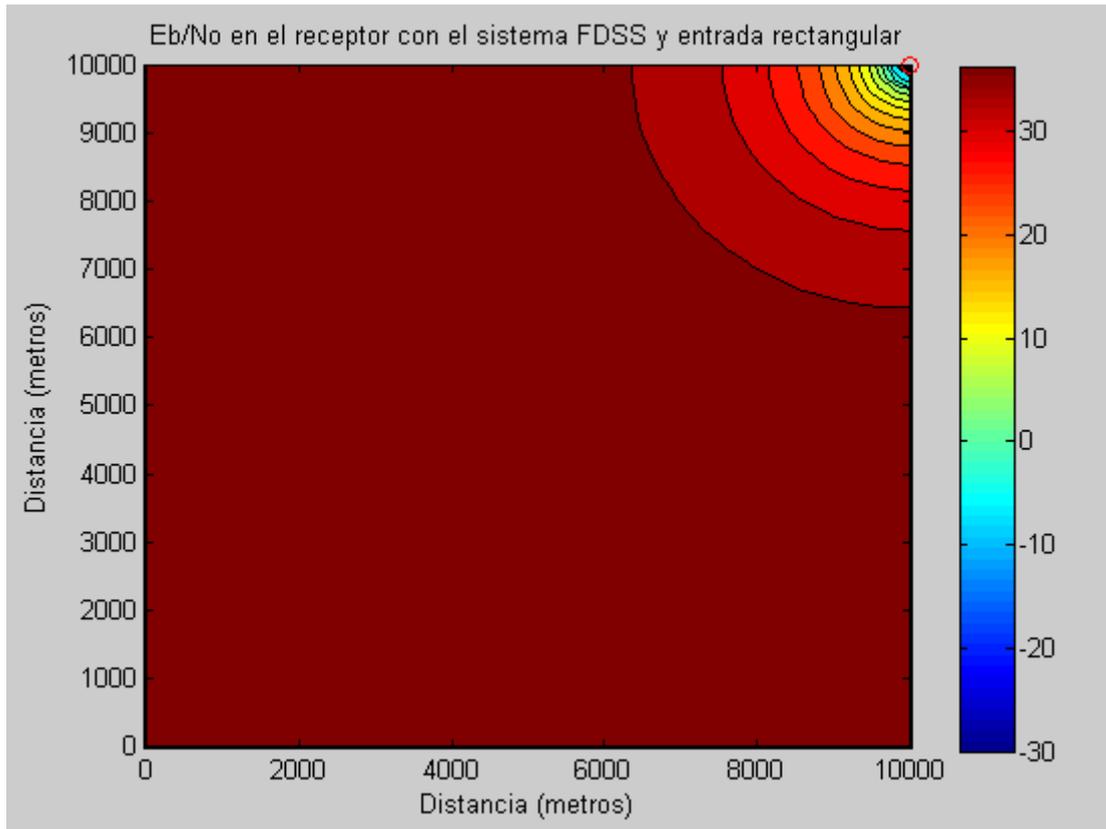
**Tabla 5.9:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 200 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	37.48	37.11	36.71	36.28	35.84	35.41	35.00	34.66	34.40	34.26	34.24
1000	37.07	36.61	36.10	35.54	34.97	34.39	33.85	33.39	33.03	32.82	32.78
2000	36.62	36.05	35.41	34.71	33.97	33.22	32.51	31.88	31.39	31.09	31.02
3000	36.15	35.46	34.66	33.79	32.85	31.89	30.96	30.11	29.44	29.02	28.90
4000	35.66	34.83	33.88	32.81	31.64	30.42	29.20	28.08	27.15	26.55	26.37
5000	35.18	34.21	33.09	31.80	30.37	28.84	27.27	25.75	24.46	23.58	23.29
6000	34.74	33.63	32.33	30.82	29.11	27.22	25.20	23.15	21.29	19.94	19.46
7000	34.35	33.12	31.65	29.93	27.94	25.66	23.10	20.34	17.57	15.35	14.48
8000	34.04	32.71	31.12	29.22	26.97	24.32	21.19	17.53	13.37	9.34	7.45
9000	33.85	32.46	30.77	28.75	26.32	23.39	19.80	15.26	9.29	1.38	-4.59
10000	33.78	32.37	30.65	28.58	26.09	23.05	19.27	14.34	7.35	-4.64	-60.00

La Figura 5.10 representa la calidad en la recepción de la señal con el empleo del sistema FDSS cuando se utiliza como entrada del sistema la señal rectangular. Nuevamente comprobamos la eficacia del sistema a partir de los resultados obtenidos. Como consecuencia de la selectividad en frecuencia del sistema FDSS el impacto del Jammer se reduce notablemente, resultando efectivo solo cuando el receptor se encuentra a distancias menores a los 500 metros de éste. Pasamos por tanto de una situación inicial en que la comunicación entre el caza y el receptor son muy vulnerables al ataque del Jammer a una situación donde es necesario que el Jammer se encuentre muy próximo al receptor para resultar efectivo, algo altamente improbable en una zona de guerra.

Al emplear una señal de entrada cosenoidal se obtienen mejores resultados. A partir de la Figura 5.11 se observa el aumento en la relación  $E_b/N_o$  respecto a la obtenida con la señal de entrada rectangular. Se puede observar como ésta presenta valores muy por encima de los necesarios en la práctica totalidad de la región estudiada. Así mismo la zona donde el impacto del Jammer resulta decisivo en las comunicaciones es aquella en la que el receptor se encuentra a distancias inferiores a los 70 metros. Al trasladarse los equipos interferentes en jeeps conducidos por soldados y poder ser otro soldado el que transporte el equipo receptor resulta prácticamente imposible realizar un ataque a las comunicaciones desde distancias tan próximas.

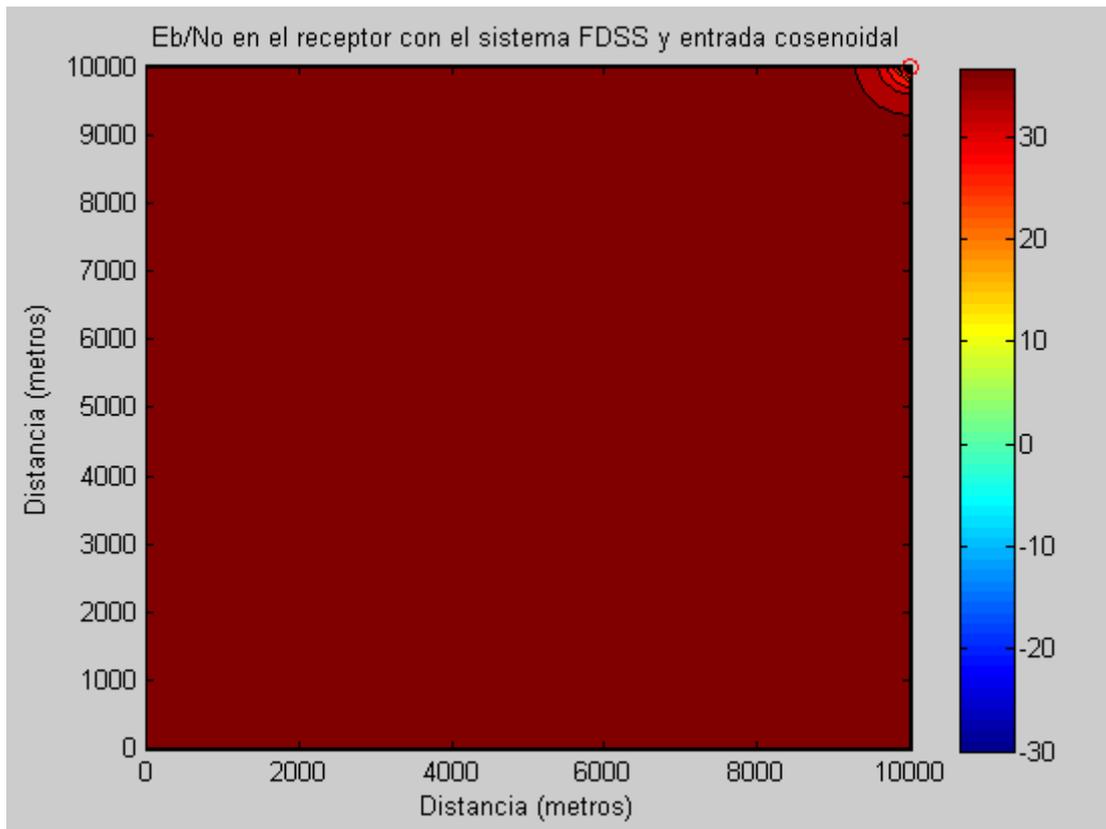
Comprobamos nuevamente la efectividad del sistema FDSS tanto para una entrada rectangular como para una cosenoidal. Si bien con esta última se obtienen mejores resultados la amenaza supone una probabilidad remota en ambos casos.



**Figura 5.10:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia.

**Tabla 5.10:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	39.47	39.49	39.52	39.53	39.55	39.56	39.57	39.60	39.62	39.66	39.70
1000	39.45	39.47	39.48	39.49	39.49	39.50	39.50	39.51	39.52	39.55	39.58
2000	39.43	39.44	39.44	39.43	39.43	39.41	39.39	39.38	39.38	39.39	39.42
3000	39.40	39.40	39.39	39.37	39.34	39.30	39.25	39.20	39.17	39.15	39.17
4000	39.37	39.36	39.34	39.30	39.24	39.15	39.06	38.95	38.85	38.79	38.80
5000	39.34	39.32	39.28	39.21	39.11	38.97	38.79	38.58	38.37	38.21	38.18
6000	39.31	39.28	39.21	39.12	38.96	38.74	38.44	38.04	37.60	37.24	37.11
7000	39.28	39.24	39.15	39.02	38.81	38.49	38.00	37.30	36.38	35.48	35.09
8000	39.26	39.21	39.10	38.94	38.67	38.23	37.51	36.34	34.48	32.10	30.79
9000	39.25	39.18	39.07	38.87	38.56	38.03	37.10	35.38	32.05	25.84	20.28
10000	39.24	39.17	39.05	38.85	38.52	37.95	36.93	34.95	30.70	20.23	-30.00



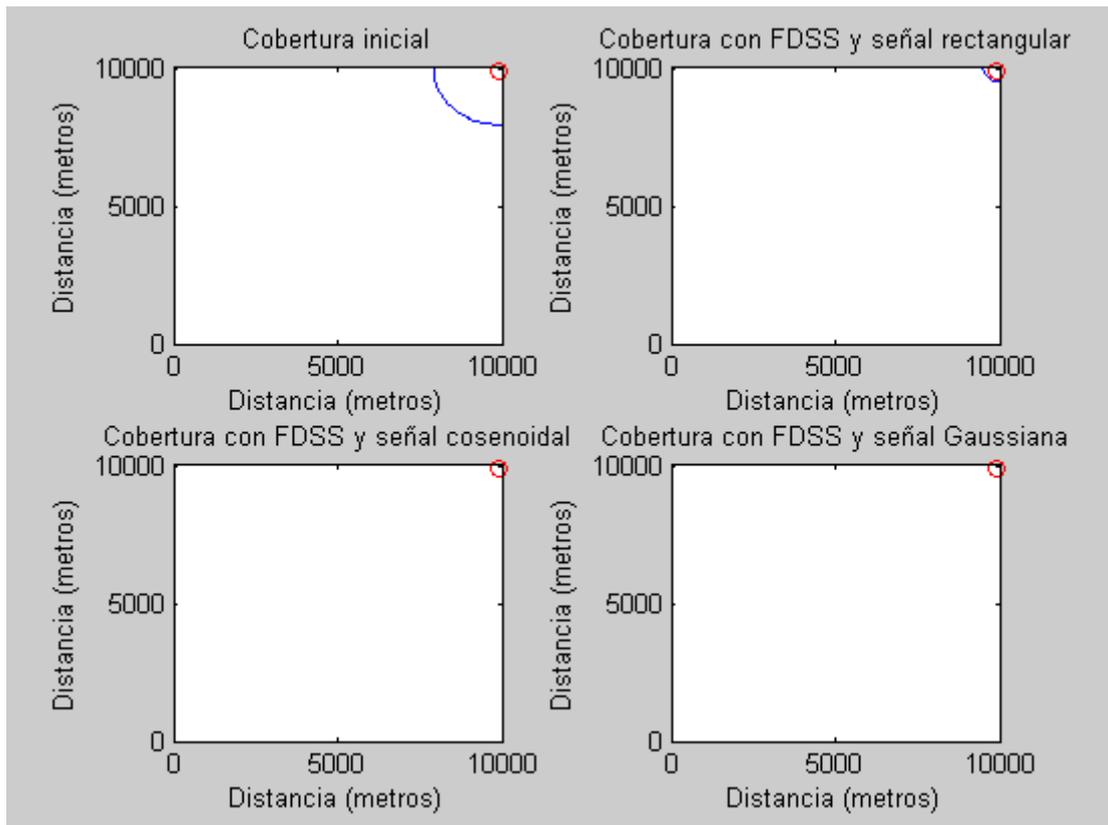
**Figura 5.11:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia.

**Tabla 5.11:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	39.54	39.58	39.62	39.66	39.70	39.74	39.78	39.83	39.87	39.91	39.95
1000	39.54	39.58	39.62	39.66	39.70	39.73	39.77	39.81	39.85	39.89	39.93
2000	39.54	39.57	39.61	39.65	39.68	39.72	39.75	39.78	39.82	39.86	39.90
3000	39.53	39.57	39.61	39.64	39.67	39.70	39.72	39.76	39.80	39.84	39.89
4000	39.53	39.56	39.60	39.62	39.65	39.67	39.71	39.74	39.78	39.81	39.85
5000	39.52	39.56	39.58	39.61	39.63	39.66	39.69	39.71	39.73	39.76	39.80
6000	39.52	39.55	39.57	39.58	39.62	39.64	39.65	39.66	39.68	39.70	39.73
7000	39.51	39.54	39.56	39.58	39.61	39.62	39.62	39.62	39.58	39.56	39.57
8000	39.51	39.53	39.54	39.57	39.59	39.59	39.59	39.54	39.43	39.27	39.19
9000	39.50	39.53	39.54	39.57	39.58	39.57	39.56	39.47	39.22	38.62	37.85
10000	39.50	39.52	39.53	39.56	39.58	39.57	39.54	39.43	39.10	37.80	-30.00

En la Figura 5.12 se muestra la zona de cobertura inicial así como la obtenida con el empleo del sistema FDSS con el empleo de las señales rectangular, cosenoidal y Gaussiana. Se comprueba que el impacto del Jammer es notable inicialmente, existiendo cobertura únicamente en 96.56 Km<sup>2</sup> del plano estudiado. Sin embargo se observa como con el empleo del sistema FDSS la amenaza del Jammer es prácticamente nula. Pese a

que el impacto del Jammer es muy reducido independientemente de la señal de entrada utilizada con el sistema FDSS, dado que requiere que el Jammer se encuentre a distancias muy próximas del receptor, algo que no sucede en una zona de guerra, es destacable la diferencia en las prestaciones obtenidas en función de la señal de entrada empleada. A pesar de que el área afectada es reducida, el radio de acción del Jammer pasa de 500 metros con una entrada rectangular a únicamente 15 metros con el empleo de la señal Gaussiana como entrada del sistema.



**Figura 5.12:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km

**Tabla 5.12:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de voz con el caza a 200 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	96.5693
FDSS	Rectangular	99.8037
	Cosenoidal	99.9960
	Gaussiana	99.9999

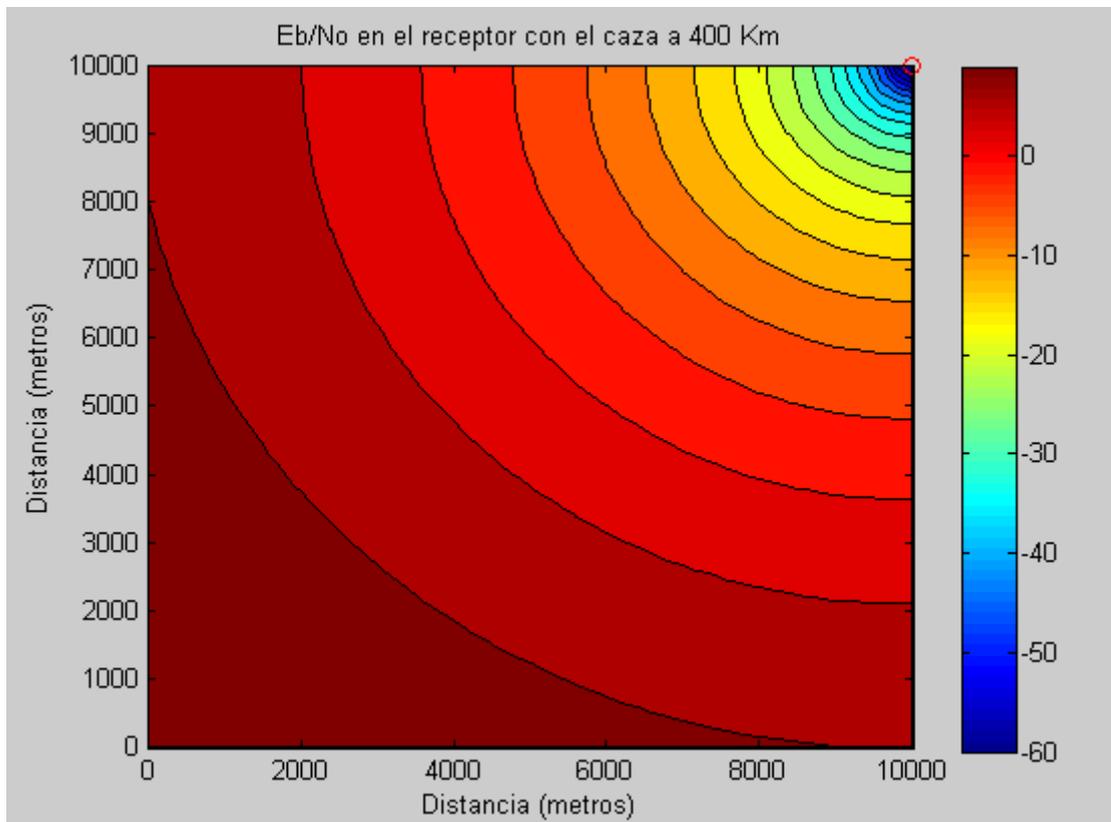
### 5.3. Transmisión de señales de datos

Se muestran ahora los resultados de los diferentes escenarios para la transmisión de señales de datos.

En este primer escenario se varía la posición del receptor estando fijos transmisor y Jammer. Se encuentran en las siguientes posiciones:

- Transmisor:  $x_1=400$  Km,  $y_1=0$  Km,  $z_1=10$  Km
- Transmisor de Jammer:  $x_1=10$  Km,  $y_1=10$  Km,  $z_1=2$ m.

En la Figura 5.13 se muestra la relación  $E_b/N_o$  obtenida inicialmente con el caza a 400 Km de distancia. Al igual que ocurría en la transmisión de voz cuando la comunicación se producía a esta distancia, existen unas pérdidas adicionales como consecuencia de la no existencia de visión directa entre caza y receptor. Las estimamos en 10 dB. A partir de la Figura 5.25 podemos observar que el radio de acción del Jammer es de 9.4 Km, por lo que la amenaza de sufrir un ataque a las comunicaciones es muy elevado por la gran autonomía que presenta el Jammer.



**Figura 5.13:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 400 Km de distancia

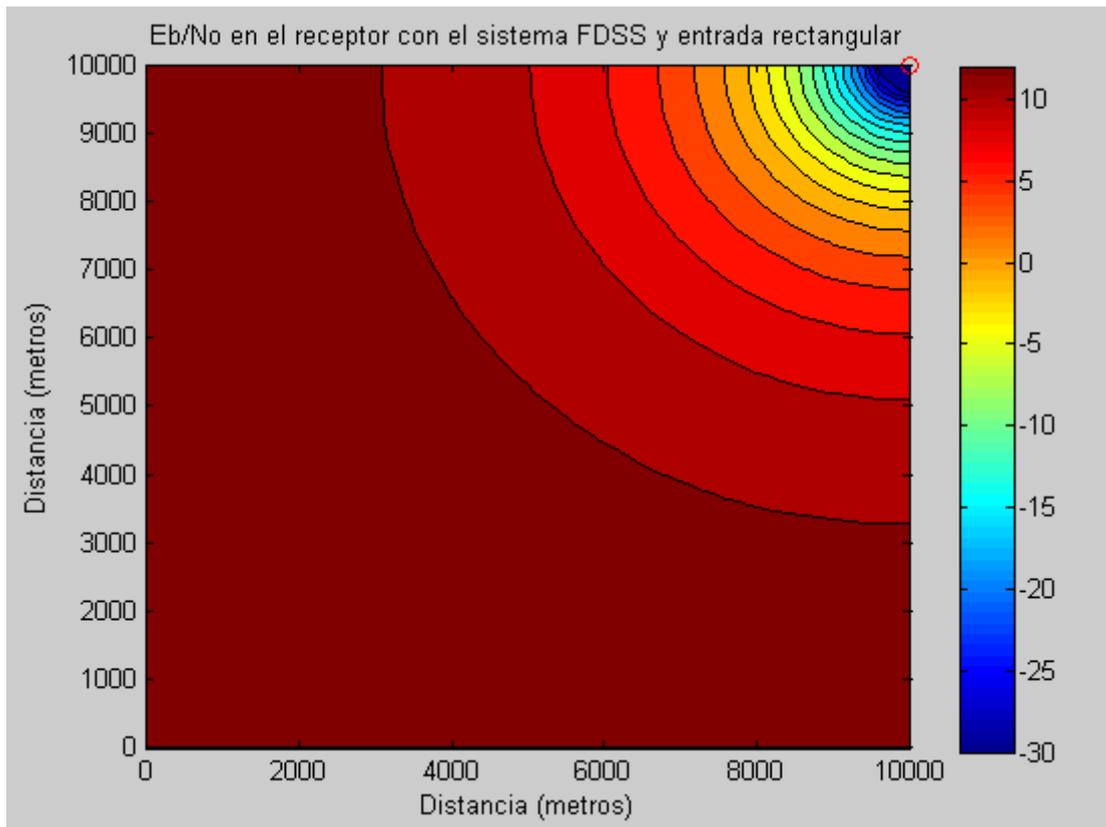
**Tabla 5.13:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 400 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	12.43	12.05	11.63	11.17	10.71	10.25	9.83	9.46	9.18	9.01	8.97
1000	12.03	11.55	11.01	10.44	9.84	9.24	8.68	8.19	7.81	7.58	7.51
2000	11.58	10.99	10.32	9.60	8.84	8.07	7.33	6.68	6.17	5.85	5.75
3000	11.11	10.39	9.58	8.68	7.72	6.74	5.78	4.92	4.22	3.78	3.64
4000	10.62	9.77	8.79	7.70	6.51	5.27	4.03	2.88	1.93	1.31	1.10
5000	10.14	9.15	8.00	6.69	5.24	3.69	2.09	0.56	-0.76	-1.67	-1.98
6000	9.70	8.57	7.24	5.71	3.98	2.07	0.02	-2.05	-3.93	-5.31	-5.81
7000	9.31	8.06	6.57	4.83	2.81	0.51	-2.07	-4.86	-7.64	-9.89	-10.78
8000	9.01	7.65	6.04	4.11	1.84	-0.83	-3.98	-7.67	-11.85	-15.90	-17.82
9000	8.81	7.40	5.69	3.64	1.20	-1.76	-5.37	-9.94	-15.92	-23.86	-29.86
10000	8.75	7.31	5.57	3.48	0.97	-2.09	-5.90	-10.85	-17.86	-29.88	-60.00

Con el empleo del sistema FDSS se limita considerablemente la acción del Jammer. A partir de la Figura 5.14 se observa el aumento obtenido en la  $E_b/N_o$  en el receptor debido al empleo de dicho sistema. En este caso la señal utilizada como entrada es la rectangular.

En esta situación el radio de acción del Jammer es de 4.4 Km. Se pasa por tanto de una situación inicial, donde el Jammer puede interrumpir las comunicaciones desde distancias superiores a 9.4 Km a una situación donde el ataque del Jammer es menos decisivo. Sin embargo, pese a la importante reducción en el área de acción del Jammer, la amenaza de sufrir un ataque a las comunicaciones es muy posible, aunque se dificulta en gran medida al exigir una menor distancia del Jammer al receptor para impedir que este reciba la señal del caza con la calidad necesaria.

Es destacable el mayor impacto del Jammer en la transmisión de este tipo de señales. Mientras que el radio de acción del Jammer era de 1.28 Km para las señales de voz en este caso el radio de acción es superior a los 4 Km. Esto se debe a dos factores. Por un lado la menor ganancia de proceso del sistema en la transmisión de este tipo de información, y por otro las diferencias en el filtrado realizado. Mientras que el ancho de banda asociado a cada portadora era de 15 KHz con las señales de voz en este caso es de 120 KHz por lo que el filtrado es menos fino al tener menos resolución el sistema lo que implica peores prestaciones. Se aprecia la importancia de la ganancia de proceso en las situaciones iniciales, donde al no hacer uso de la selectividad en frecuencia del sistema FDSS es el único factor a tener en cuenta. Mientras que el radio de acción del Jammer era de 5.35 Km para la transmisión de voz, el Jammer presenta una autonomía de 9.4 Km si se transmiten señales de datos.



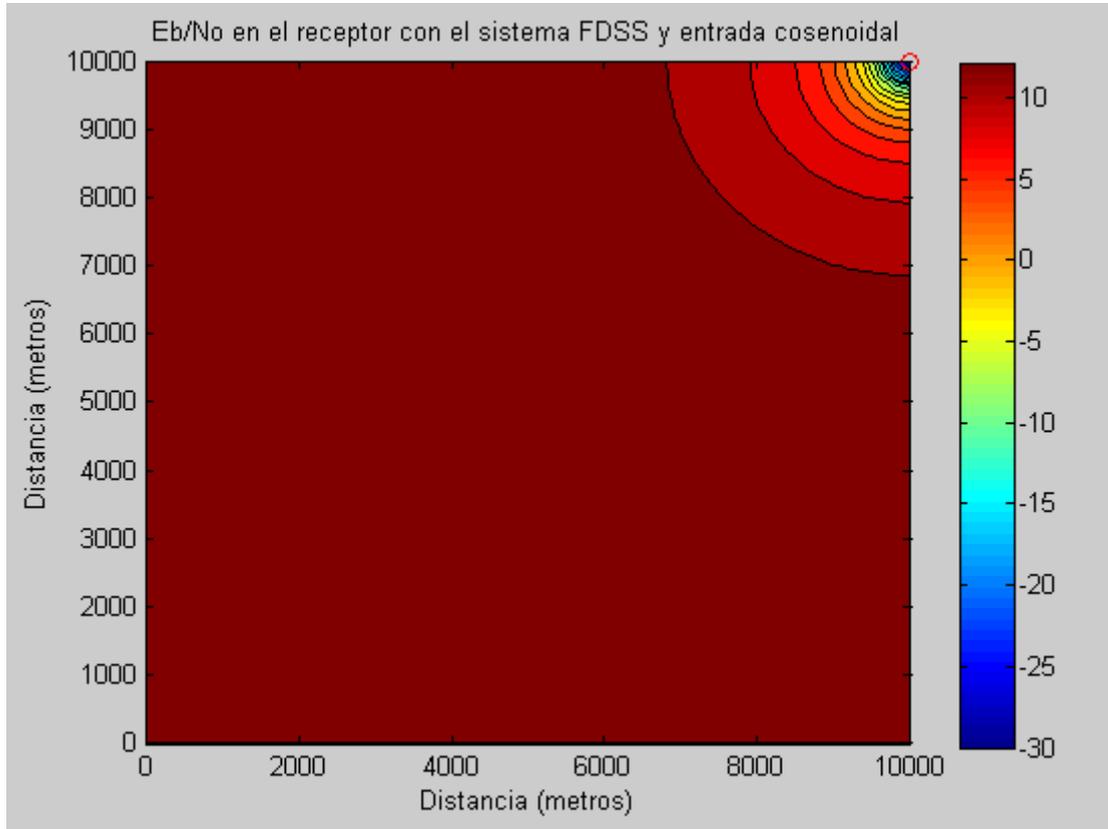
**Figura 5.14:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.

**Tabla 5.14:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	14.13	14.08	14.03	13.96	13.88	13.80	13.71	13.63	13.57	13.53	13.54
1000	14.06	14.00	13.91	13.80	13.68	13.54	13.42	13.37	13.32	13.29	13.30
2000	13.98	13.89	13.76	13.60	13.41	13.31	13.19	13.08	12.98	12.91	12.90
3000	13.89	13.76	13.58	13.37	13.23	13.05	12.85	12.62	12.42	12.28	12.24
4000	13.79	13.61	13.37	13.21	12.99	12.69	12.32	11.96	11.68	11.47	11.41
5000	13.69	13.45	13.24	13.01	12.67	12.19	11.70	11.15	10.58	10.21	10.08
6000	13.58	13.31	13.10	12.78	12.28	11.68	10.92	10.01	9.04	8.28	7.99
7000	13.47	13.23	12.97	12.53	11.89	11.11	9.99	8.51	6.78	5.20	4.53
8000	13.39	13.16	12.84	12.31	11.59	10.51	9.00	6.76	3.67	0.22	-1.53
9000	13.33	13.12	12.76	12.15	11.36	10.12	8.21	5.16	0.20	-7.31	-13.23
10000	13.32	13.10	12.72	12.09	11.28	9.96	7.90	4.46	-1.58	-13.26	-30.00

En la Figura 5.15 se muestra la relación  $E_b/N_o$  en el receptor con el empleo de la señal cosenoidal como entrada del sistema FDSS. En este caso, únicamente si el receptor se encuentra a una distancia del Jammer inferior a los 1525 metros resulta imposible la obtención de la señal enviada por el caza con la calidad necesaria. De esta manera la amenaza del Jammer se reduce considerablemente por la proximidad al receptor necesaria. Nuevamente observamos la diferencia en las prestaciones en función

del tipo de información transmitida por el caza. Mientras que en la transmisión de señales de voz el radio de acción del Jammer era de 190 metros, en este caso dicho radio es ocho veces superior.



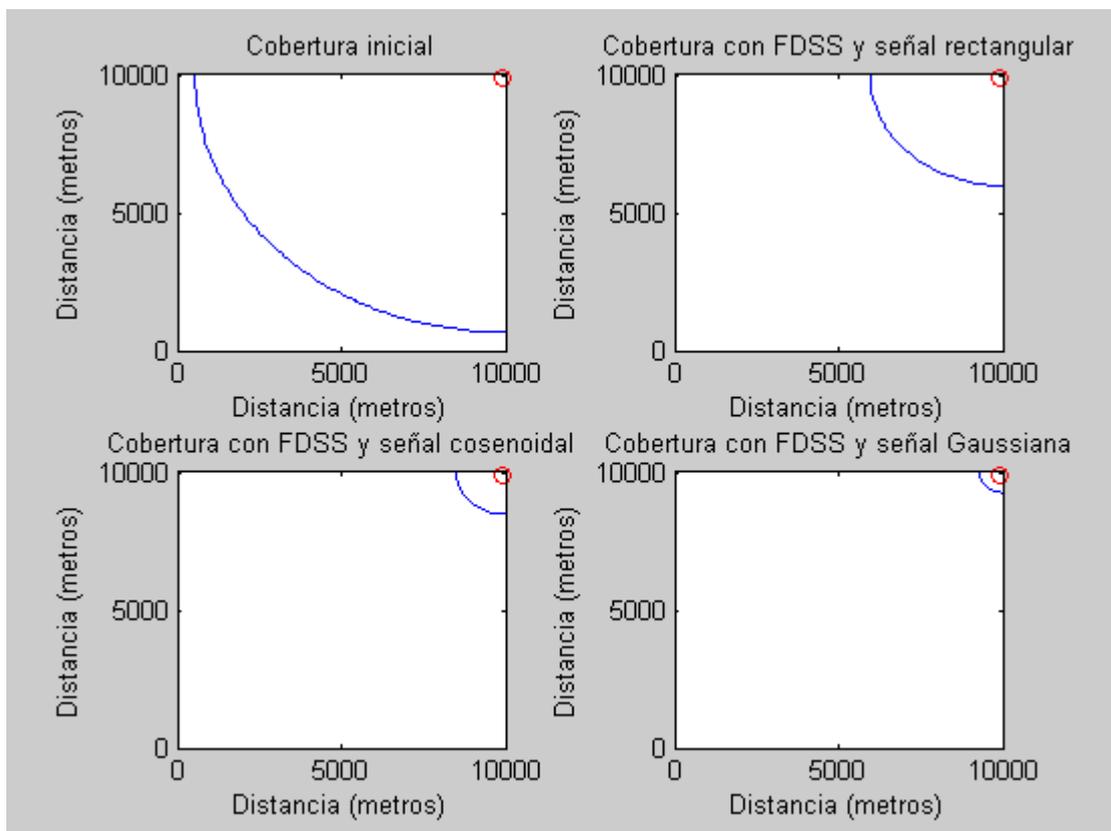
**Figura 5.15:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.

**Tabla 5.15:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	14.27	14.26	14.24	14.21	14.18	14.14	14.10	14.07	14.04	14.03	14.04
1000	14.24	14.21	14.18	14.13	14.07	13.99	13.92	13.92	13.93	13.95	13.97
2000	14.20	14.15	14.09	14.01	13.91	13.87	13.88	13.88	13.89	13.90	13.92
3000	14.15	14.08	13.99	13.86	13.84	13.84	13.83	13.82	13.81	13.81	13.82
4000	14.09	14.00	13.86	13.82	13.81	13.79	13.76	13.71	13.66	13.63	13.63
5000	14.03	13.91	13.80	13.79	13.77	13.72	13.64	13.52	13.38	13.26	13.22
6000	13.97	13.81	13.79	13.76	13.71	13.61	13.44	13.16	13.03	12.93	12.90
7000	13.91	13.78	13.77	13.73	13.65	13.47	13.13	12.93	12.62	12.19	11.97
8000	13.86	13.77	13.75	13.70	13.58	13.31	12.99	12.59	11.69	10.54	9.81
9000	13.83	13.77	13.74	13.67	13.52	13.17	12.86	12.14	10.52	7.50	3.78
10000	13.82	13.77	13.74	13.66	13.50	13.11	12.81	11.90	9.77	3.76	-30.00

En la Figura 5.16 se representa la zona de cobertura en los diferentes escenarios estudiados cuando el caza está a 400 Km de distancia. Inicialmente existe una región de

casi 70 Km<sup>2</sup> en la resulta imposible la comunicación. Sin embargo con el empleo del sistema FDSS el impacto del Jammer se reduce drásticamente. Cuando empleamos una entrada rectangular la región de cobertura es de 87.46 Km<sup>2</sup> como se observa a partir de la Tabla 5.16. Con la señal de entrada cosenoidal la región de cobertura aumenta hasta los 98.17 Km<sup>2</sup> de los 100 Km<sup>2</sup> que presenta el plano estudiado mientras que con la señal Gaussiana es de 99.59 Km<sup>2</sup>. Se observa como el empleo del sistema FDSS permite reducir mucho la amenaza del Jammer resultando de especial importancia la elección de la señal de entrada del sistema.

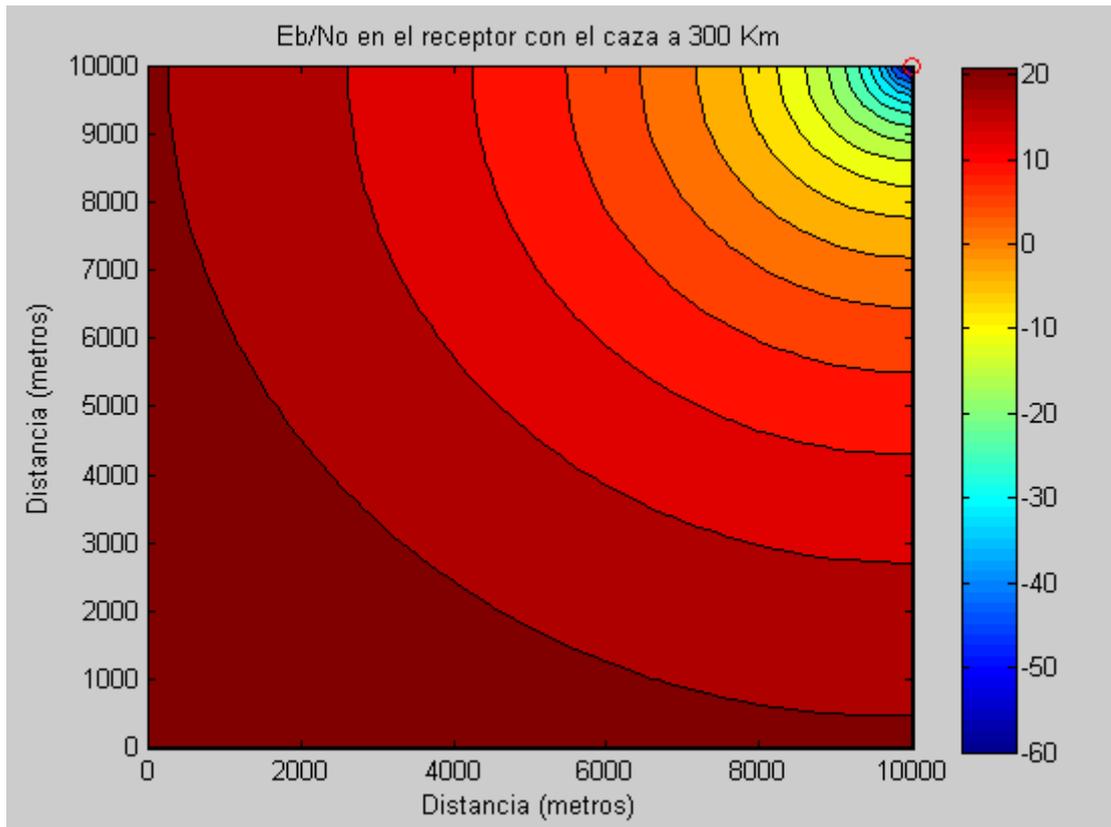


**Figura 5.16:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km

**Tabla 5.16:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 400 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	30.6022
FDSS	Rectangular	87.4636
	Cosenoidal	98.1735
	Gaussiana	99.5928

En la Figura 5.17 mostramos la relación  $E_b/N_o$  inicial en el receptor con el caza situado a 300 Km de distancia del origen de la región estudiada. Debido a la mayor proximidad del caza respecto al escenario anterior y a la existencia de visión directa entre caza y receptor aumenta la cobertura inicial reduciéndose por tanto, el impacto del Jammer. Este presenta un radio de acción de 4.35 Km, que sigue suponiendo una distancia elevada. Las comunicaciones podrían ser atacadas con el empleo de Jammers desde distancias muy alejadas haciendo imposible la comunicación con los aviones.

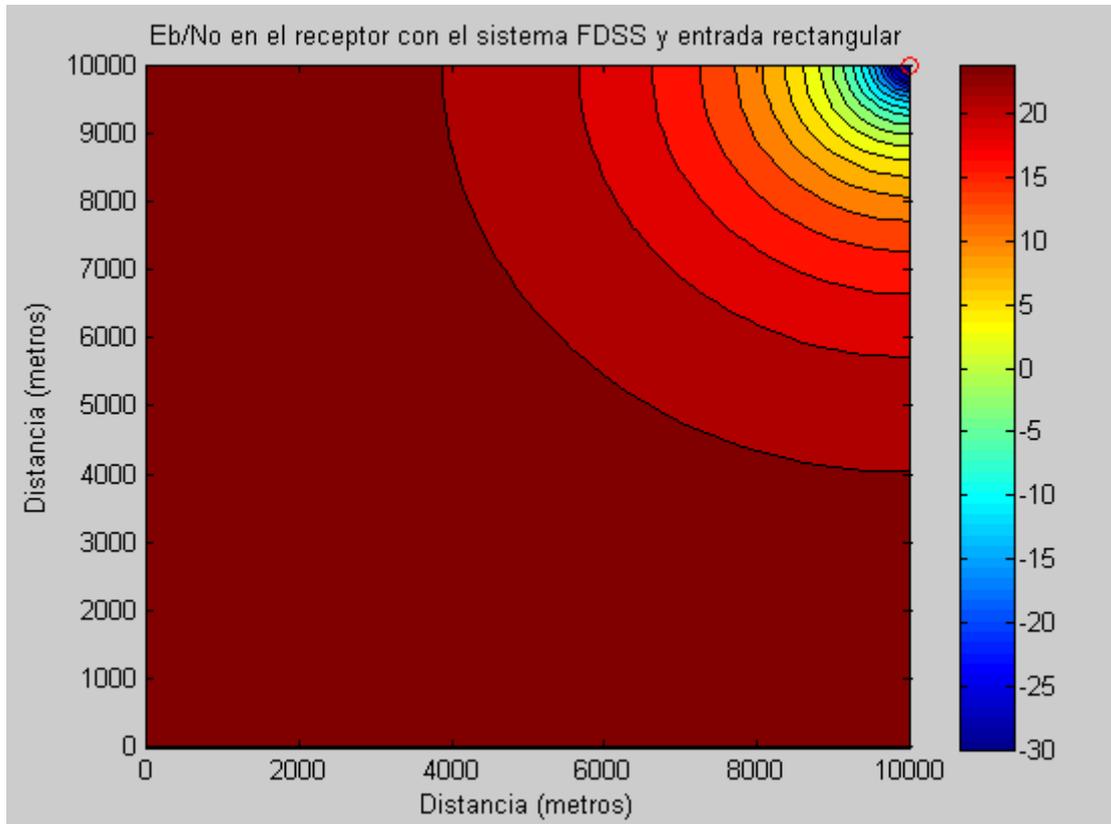


**Figura 5.17:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 300 Km de distancia

**Tabla 5.17:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 300 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	24.93	24.55	24.14	23.69	23.24	22.79	22.37	22.01	21.74	21.58	21.54
1000	24.52	24.05	23.52	22.95	22.36	21.77	21.22	20.74	20.37	20.14	20.08
2000	24.08	23.49	22.84	22.12	21.36	20.60	19.87	19.23	18.72	18.41	18.32
3000	23.61	22.90	22.09	21.20	20.25	19.27	18.32	17.46	16.78	16.34	16.21
4000	23.12	22.27	21.30	20.22	19.04	17.80	16.57	15.43	14.49	13.87	13.67
5000	22.64	21.65	20.51	19.21	17.77	16.22	14.63	13.10	11.79	10.90	10.59
6000	22.19	21.07	19.75	18.23	16.51	14.60	12.56	10.50	8.62	7.26	6.76
7000	21.80	20.56	19.08	17.34	15.34	13.04	10.47	7.69	4.91	2.67	1.79
8000	21.50	20.16	18.54	16.63	14.37	11.70	8.56	4.88	0.71	-3.34	-5.25
9000	21.31	19.90	18.20	16.16	13.72	10.77	7.17	2.61	-3.37	-11.30	-17.29
10000	21.24	19.81	18.08	16.00	13.49	10.44	6.64	1.70	-5.31	-17.32	-60.00

Al emplear el sistema FDSS con una señal de entrada rectangular la amenaza del Jammer disminuye como se observa en la Figura 5.18. En este caso el radio de acción del Jammer es de 1.65 Km. Si bien constituye una distancia importante y es una amenaza para nuestras comunicaciones, se dificulta en gran medida dicho ataque debido a la menor distancia a la que debe encontrarse el enemigo.



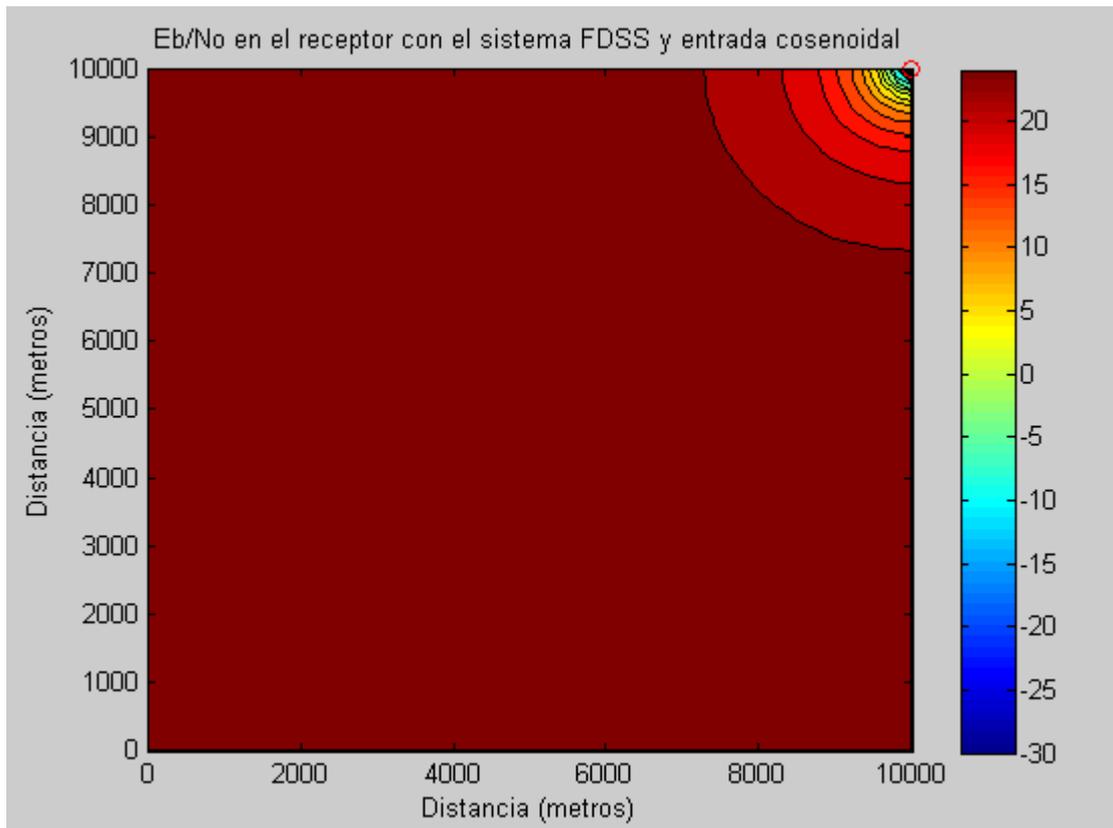
**Figura 5.18:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.

**Tabla 5.18:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	26.62	26.59	26.54	26.48	26.41	26.33	26.25	26.18	26.12	26.10	26.11
1000	26.56	26.50	26.42	26.32	26.20	26.07	25.97	25.91	25.87	25.86	25.87
2000	26.48	26.39	26.27	26.12	25.94	25.84	25.73	25.62	25.53	25.48	25.47
3000	26.39	26.26	26.09	25.89	25.76	25.59	25.39	25.17	24.98	24.84	24.82
4000	26.29	26.12	25.88	25.73	25.51	25.23	24.87	24.51	24.24	24.04	23.98
5000	26.18	25.95	25.75	25.53	25.20	24.73	24.24	23.70	23.13	22.77	22.65
6000	26.07	25.82	25.62	25.30	24.81	24.21	23.46	22.56	21.60	20.84	20.56
7000	25.97	25.74	25.48	25.05	24.42	23.64	22.53	21.05	19.34	17.77	17.10
8000	25.89	25.67	25.35	24.83	24.12	23.04	21.54	19.31	16.22	12.79	11.04
9000	25.83	25.62	25.27	24.66	23.89	22.65	20.75	17.71	12.76	5.25	-0.66
10000	25.82	25.60	25.23	24.60	23.80	22.49	20.44	17.01	10.98	-0.69	-30.00

En la Figura 5.19 mostramos los resultados obtenidos cuando la entrada del sistema FDSS es la señal cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km del origen del plano estudiado.

Dado que la señal cosenoidal presenta una menor potencia en sus lóbulos secundarios que la rectangular, obtenemos mejores resultados como consecuencia del mejor filtrado sobre la banda de frecuencias atacada. En este caso es necesario que el Jammer se encuentre a una distancia inferior a los 560 metros para que no se alcance la calidad necesaria en la recepción de la señal deseada. Aunque existe una región donde el Jammer podría atacar nuestras comunicaciones de manera efectiva, es una posibilidad remota que soldados de distintos bandos se encuentren a distancias tan próximas en una zona de guerra. Nuevamente es destacable el peor comportamiento del sistema en la transmisión de este tipo de señales respecto a la transmisión de voz. Para la transmisión de señales de voz el radio de acción del Jammer era de únicamente 90 metros mientras que para la transmisión de datos el impacto del Jammer es mucho mayor.



**Figura 5.19:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.

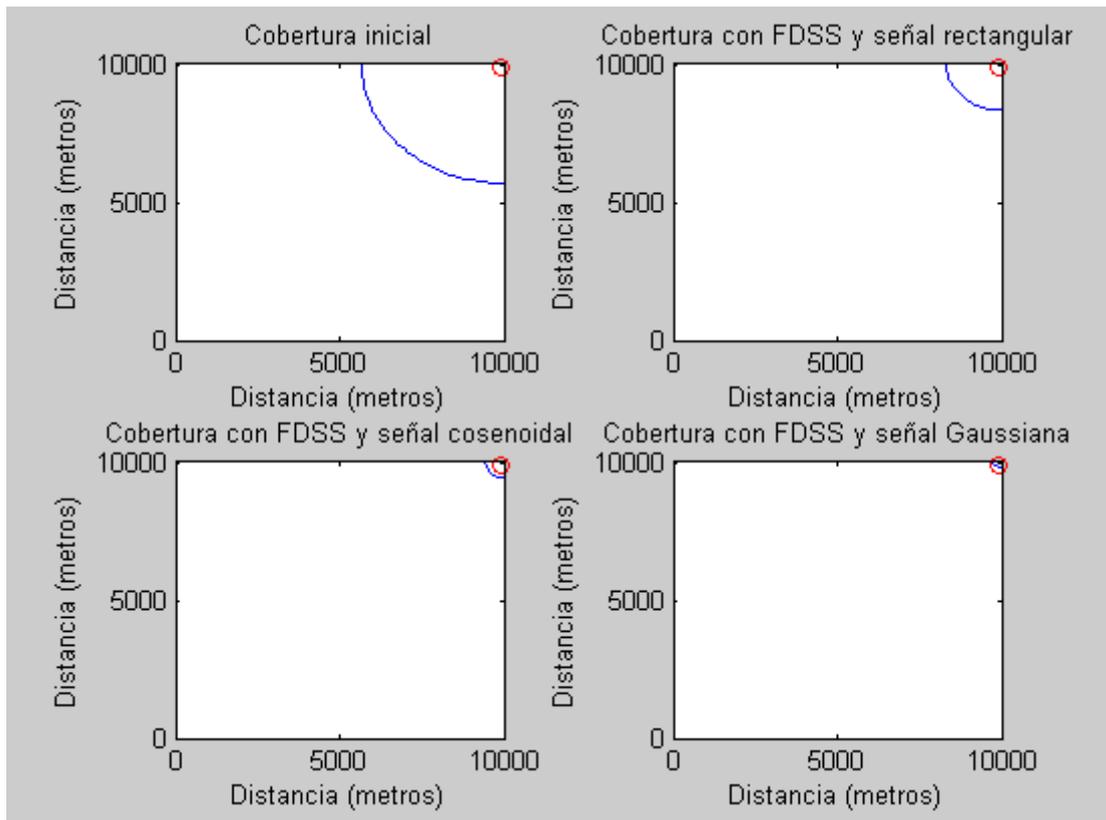
**Tabla 5.19:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	26.77	26.76	26.75	26.73	26.71	26.67	26.64	26.61	26.60	26.59	26.61
1000	26.73	26.72	26.69	26.65	26.59	26.53	26.46	26.46	26.49	26.51	26.54
2000	26.69	26.66	26.60	26.53	26.43	26.40	26.42	26.43	26.44	26.46	26.49
3000	26.64	26.59	26.50	26.38	26.37	26.37	26.37	26.37	26.37	26.37	26.39
4000	26.59	26.50	26.38	26.34	26.34	26.32	26.30	26.26	26.22	26.19	26.20
5000	26.53	26.41	26.32	26.31	26.29	26.25	26.18	26.07	25.93	25.82	25.79
6000	26.47	26.31	26.30	26.28	26.24	26.15	25.98	25.70	25.59	25.49	25.47
7000	26.41	26.29	26.28	26.25	26.17	26.00	25.67	25.48	25.17	24.75	24.54
8000	26.36	26.28	26.26	26.22	26.10	25.84	25.53	25.14	24.25	23.10	22.38
9000	26.33	26.27	26.25	26.19	26.04	25.70	25.40	24.69	23.07	20.06	16.35
10000	26.31	26.27	26.25	26.18	26.02	25.64	25.35	24.45	22.32	16.32	-30.00

Finalmente, en la Figura 5.20 mostramos la región de cobertura inicial, así como aquella obtenida con el empleo del sistema FDSS cuando este utiliza como entrada la señal rectangular, cosenoidal y Gaussiana.

Se observa a partir de la Tabla 5.20 como inicialmente solo existe cobertura en una región de  $85.13 \text{ Km}^2$ , que es la zona en la que el ataque del Jammer no impide la recepción de la señal con la calidad necesaria. El Jammer, por tanto, resulta determinante dada la gran autonomía que presenta al poder atacar las comunicaciones con éxito desde distancias de hasta 4.35 Km. Esta sería la cobertura obtenida con el empleo del sistema WCDMA. Al introducir el sistema FDSS, el impacto del Jammer disminuye notablemente. Podemos observar a partir de la Tabla 5.20 el aumento en la zona de cobertura con el empleo de dicho sistema. Utilizando una señal de entrada rectangular la región de cobertura es de  $97.86 \text{ Km}^2$ , ya que el Jammer solo resulta efectivo a distancias inferiores a 1.65 Km del receptor. Con la cosenoidal mejoran las prestaciones obteniendo cobertura en un área de  $99.75 \text{ Km}^2$  al ser el radio de acción del Jammer de únicamente 560 metros. Con la señal Gaussiana el impacto del Jammer es aun más reducido afectando únicamente a una región inferior a  $0.05 \text{ Km}^2$ .

Podemos comprobar a partir de los resultados que el empleo del sistema FDSS resulta decisivo para reducir el impacto del Jammer siendo un factor determinante la señal de entrada empleada en la reducción de dicho impacto.

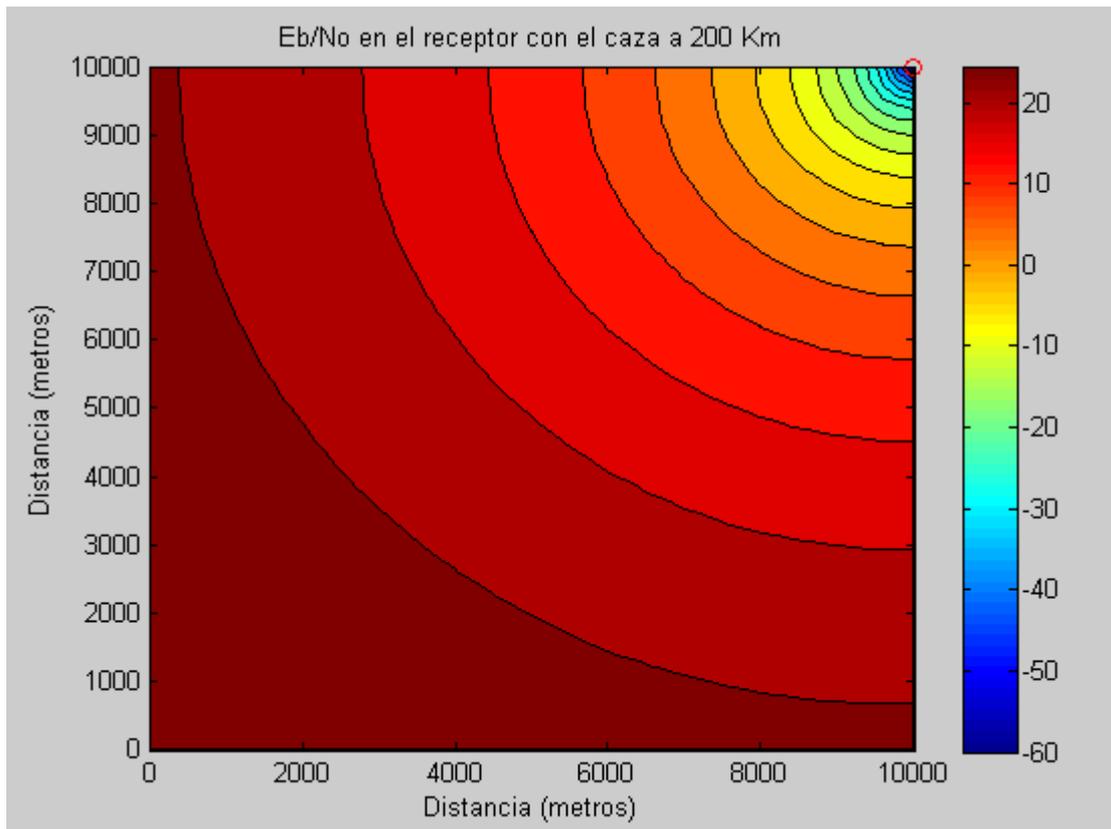


**Figura 5.20:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km

**Tabla 5.20:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 300 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	85.1383
FDSS	Rectangular	97.8618
	Cosenoidal	99.7537
	Gaussiana	99.9566

En la Figura 5.21 se muestra la relación  $E_b/N_o$  obtenida inicialmente en el receptor cuando el Jammer se encuentra a 200 Km del origen del plano bajo estudio. Debido a la mayor proximidad entre el caza y el receptor la región de cobertura inicial es mayor. En este caso la zona de impacto del Jammer consiste en un entorno de 3.5 Km respecto a su posición. La reducción en la zona de impacto del Jammer siempre disminuye la amenaza de que nuestras comunicaciones sean atacadas, sin embargo, esta distancia continúa siendo muy elevada y es factible que la acción del enemigo impida la recepción de la señal del caza con la calidad necesaria.



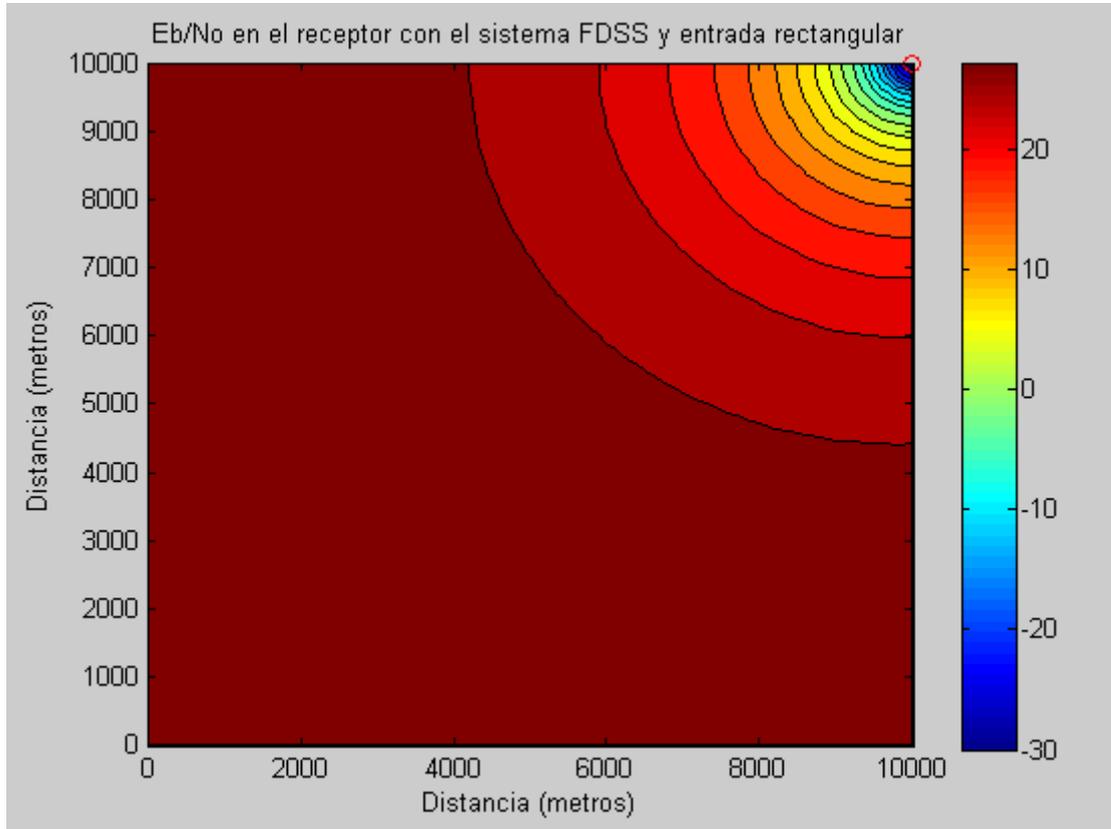
**Figura 5.21:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 200 Km de distancia

**Tabla 5.21:** Relación  $(E_b/N_o)_{inicial}$  en el receptor con el caza a 200 Km de distancia

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	28.45	28.08	27.68	27.25	26.81	26.38	25.97	25.63	25.37	25.23	25.21
1000	28.04	27.58	27.07	26.51	25.94	25.36	24.82	24.36	24.00	23.79	23.75
2000	27.59	27.02	26.38	25.68	24.94	24.19	23.48	22.85	22.36	22.06	21.99
3000	27.12	26.42	25.63	24.76	23.82	22.86	21.92	21.08	20.41	19.99	19.87
4000	26.63	25.80	24.85	23.78	22.61	21.39	20.17	19.05	18.12	17.52	17.34
5000	26.15	25.18	24.05	22.77	21.34	19.81	18.23	16.72	15.43	14.54	14.26
6000	25.71	24.60	23.30	21.79	20.08	18.19	16.17	14.12	12.26	10.90	10.43
7000	25.32	24.09	22.62	20.90	18.91	16.63	14.07	11.30	8.54	6.32	5.45
8000	25.01	23.68	22.09	20.18	17.94	15.29	12.16	8.50	4.34	0.31	-1.58
9000	24.82	23.43	21.74	19.72	17.29	14.36	10.76	6.23	0.26	-7.65	-13.63
10000	24.75	23.33	21.62	19.55	17.06	14.02	10.24	5.31	-1.68	-13.67	-60.00

Con el empleo del sistema FDSS disminuye la región de impacto del Jammer y con ella la amenaza de ver atacadas nuestras comunicaciones con éxito. Se muestra la relación  $E_b/N_o$  en la Figura 5.22 con el empleo de una señal de entrada rectangular. Observamos a partir de la misma y de los valores de la Tabla 5.22 el aumento en la calidad de la señal recibida respecto a la situación inicial. De esta forma se reduce el radio de acción del Jammer es de 1.34 Km. Así mismo se observa nuevamente el mayor

impacto del Jammer en la transmisión de señales de datos como consecuencia del menor número de portadoras que presenta el sistema FDSS que resulta en un filtrado más burdo y en una menor ganancia de proceso.

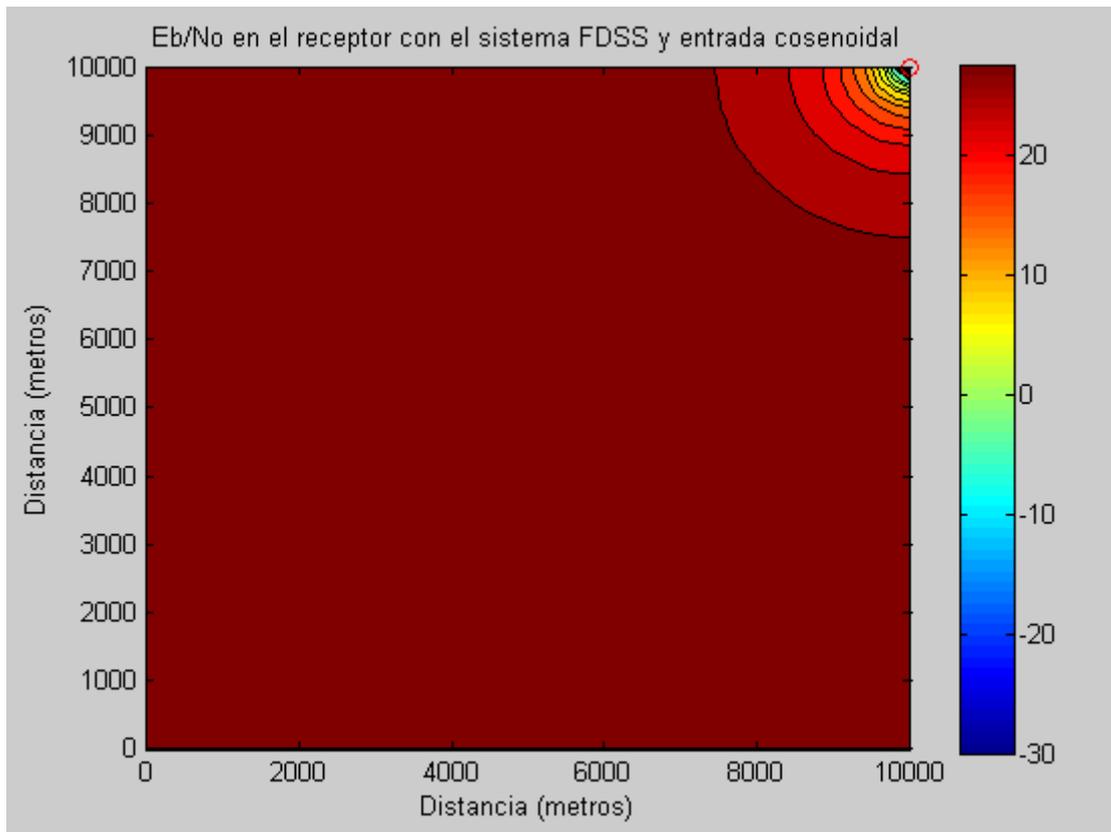


**Figura 5.22:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.

**Tabla 5.22:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada rectangular para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	30.14	30.12	30.08	30.04	29.98	29.92	29.85	29.80	29.76	29.75	29.78
1000	30.07	30.03	29.97	29.88	29.78	29.66	29.57	29.53	29.51	29.51	29.54
2000	30.00	29.92	29.82	29.68	29.51	29.43	29.34	29.24	29.17	29.13	29.14
3000	29.91	29.79	29.63	29.45	29.33	29.18	28.99	28.79	28.61	28.49	28.48
4000	29.81	29.65	29.42	29.29	29.09	28.81	28.47	28.13	27.87	27.69	27.65
5000	29.70	29.48	29.30	29.09	28.77	28.31	27.85	27.32	26.77	26.42	26.31
6000	29.59	29.35	29.16	28.85	28.38	27.80	27.06	26.17	25.23	24.49	24.22
7000	29.48	29.26	29.02	28.61	27.99	27.23	26.13	24.67	22.97	21.41	20.76
8000	29.40	29.19	28.89	28.38	27.69	26.63	25.14	22.92	19.85	16.43	14.70
9000	29.34	29.14	28.81	28.22	27.46	26.23	24.35	21.32	16.38	8.90	3.00
10000	29.32	29.12	28.77	28.16	27.37	26.08	24.04	20.62	14.61	2.95	-30.00

En la Figura 5.23 mostramos los resultados obtenidos con el empleo de una señal cosenoidal como entrada del sistema FDSS. Se observa la reducción del impacto del Jammer debido a las mejores prestaciones de esta señal. En este caso el radio de acción del Jammer es de 440 metros, con lo que se elimina casi totalmente la amenaza del Jammer al no ser una situación nada probable que se encuentre tan próximo un jeep enemigo.

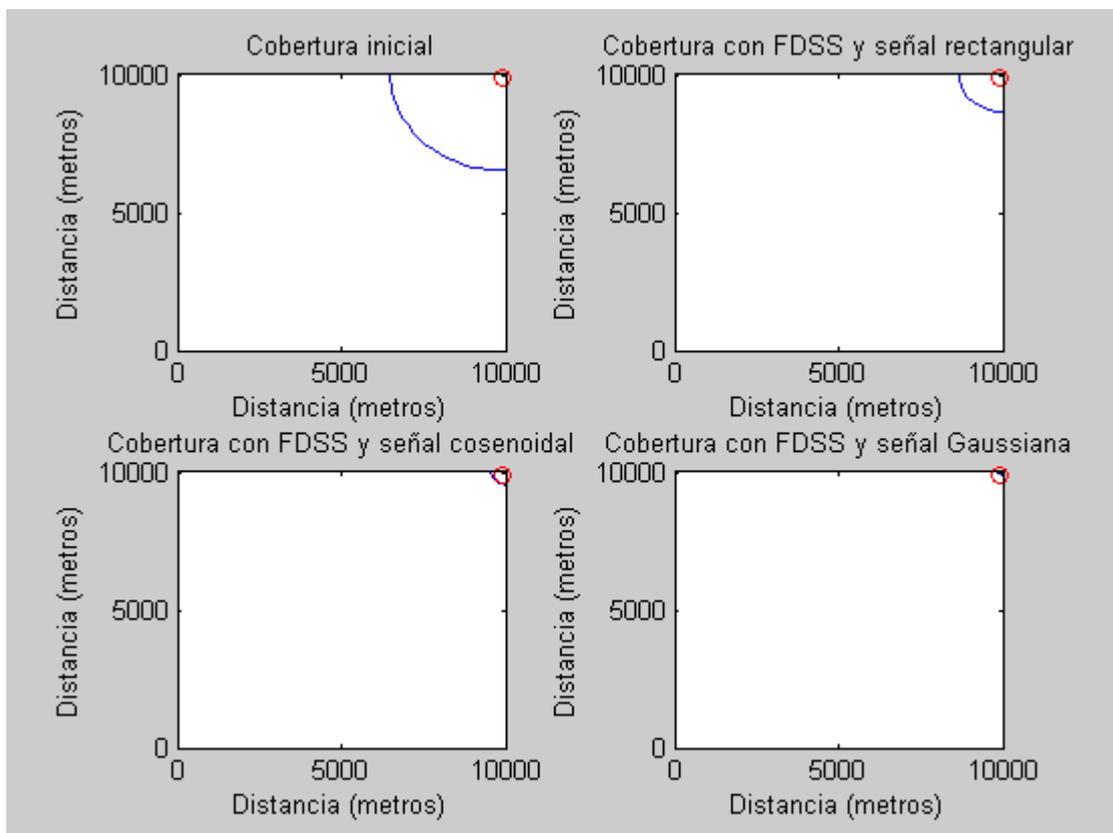


**Figura 5.23:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.

**Tabla 5.23:** Relación  $(E_b/N_o)_{final}$  en el receptor con la señal de entrada cosenoidal para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km de distancia.

Distancia (m)	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
0	30.29	30.29	30.30	30.29	30.28	30.26	30.25	30.23	30.23	30.24	30.28
1000	30.25	30.25	30.23	30.20	30.17	30.12	30.06	30.08	30.12	30.16	30.20
2000	30.21	30.19	30.15	30.09	30.01	29.99	30.02	30.05	30.08	30.11	30.15
3000	30.16	30.12	30.05	29.94	29.94	29.96	29.98	29.99	30.00	30.02	30.06
4000	30.10	30.03	29.92	29.90	29.91	29.91	29.90	29.88	29.85	29.84	29.87
5000	30.04	29.94	29.86	29.87	29.87	29.84	29.78	29.68	29.56	29.47	29.46
6000	29.98	29.84	29.84	29.84	29.81	29.73	29.58	29.32	29.22	29.14	29.13
7000	29.92	29.81	29.82	29.80	29.74	29.59	29.27	29.10	28.80	28.40	28.20
8000	29.87	29.80	29.80	29.77	29.67	29.43	29.13	28.75	27.88	26.75	26.05
9000	29.84	29.80	29.79	29.74	29.61	29.28	29.00	28.30	26.70	23.70	20.01
10000	29.82	29.79	29.78	29.73	29.59	29.22	28.95	28.06	25.95	19.97	-30.00

En la Figura 5.24 mostramos la región de cobertura con el caza situado a 200 Km de distancia. Observamos a partir de la misma que el Jammer impide las comunicaciones en una región importante del plano estudiado sin el empleo del sistema FDSS. En este caso la región en la que es posible la cobertura es de 90.37 Km<sup>2</sup> según se observa en la Tabla 5.24. El efecto del Jammer en las comunicaciones disminuye de forma notable al hacer uso del sistema FDSS. Con el empleo de una entrada rectangular se consigue cobertura en 98.58 Km<sup>2</sup>, mientras que con otras señales de entrada que ofrecen mejores prestaciones los resultados mejoran. En el caso de la señal cosenoidal existe cobertura en 99.84 Km<sup>2</sup> del plano mientras que con la señal Gaussiana la región de cobertura es de 99.97 Km<sup>2</sup>.



**Figura 5.24:** Zona de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km

**Tabla 5.24:** Área de cobertura para las diferentes señales de entrada empleadas para la transmisión de señales de datos con el caza a 200 Km

Sistema empleado	Señal de entrada	Área de cobertura(Km <sup>2</sup> )
WCDMA	-----	90.3789
FDSS	Rectangular	98.5897
	Cosenoidal	99.8479
	Gaussiana	99.9731

A partir de los resultados de los diferentes escenarios podemos decir que el sistema FDSS resulta muy ventajoso para las comunicaciones Aire-Tierra ya que aumenta considerablemente la posibilidad de comunicación entre el caza y el receptor cuando nuestras comunicaciones son atacadas con señales interferentes. Cuando el caza se encuentra internado en territorio enemigo, el empleo de un Jammer resulta muy eficaz con los sistemas empleados actualmente en aplicaciones militares ya que interrumpe las comunicaciones desde distancias muy elevadas. Sin embargo, el empleo del sistema FDSS minimiza enormemente la influencia del Jammer, que para resultar eficaz debería transmitir una potencia enorme.

Es también destacable la elección de la señal de entrada. Aunque las mejoras introducidas por el sistema tanto para una señal de entrada rectangular como para una señal de entrada cosenoidal son muy elevadas, existen grandes diferencias en los resultados en función de cuál de ellas hemos empleado. Mientras que el empleo de la señal rectangular con el sistema FDSS permite reducir mucho el área de impacto del Jammer sobre la comunicación deseada existe siempre la posibilidad de interrumpir las comunicaciones por medio del Jammer, especialmente cuando el caza se encuentra a grandes distancias del receptor. Sin embargo, con el empleo de una señal de entrada cosenoidal esa posibilidad resulta mucho más remota por la mayor proximidad a la que debe encontrarse el caza para resultar efectivo.

También se aprecia cómo afecta la constitución del sistema FDSS en la región de cobertura del sistema. Se obtienen mejores resultados en la cobertura del enlace estudiado para la transmisión de señales de voz debido a la mayor ganancia de proceso por el mayor número de portadoras que presenta el sistema FDSS y que permite, así mismo, un mejor filtrado de la banda de frecuencias afectada por la interferencia.



## 6. Conclusiones

A partir del trabajo realizado podemos destacar el hecho de que el sistema FDSS resulta muy eficiente tanto para aplicaciones militares como para el sistema celular en comparación con el sistema WCDMA en presencia de señales interferentes cuya anchura de banda no afecte a la totalidad de la banda de paso del sistema FDSS.

Respecto a las aplicaciones celulares, es destacable el hecho de que el sistema WCDMA únicamente es capaz de resistir interferencias cuya relación  $\frac{J}{S} \leq 18dB$  mientras que el sistema FDSS es capaz de resistir señales de Jammer de una potencia mucho mayor en función de la señal de entrada empleada en el sistema. Para aquellas que hemos empleado nosotros, la capacidad resulta nula en señales de voz a los siguientes valores:

- Rectangular: 40.8 dB
- Cosenoidal: 72.95 dB
- Triangular: 83.2 dB
- Gaussiana: 98.5 dB

Para el caso de la transmisión de datos en un sistema celular, el sistema WCDMA resiste únicamente señales interferentes que cumplan la relación  $\frac{J}{S} \leq 12dB$ . Por el contrario, el sistema FDSS, como consecuencia de sus características, presenta una resistencia al Jammer mucho más elevada. En función de la señal de entrada empleada para una señal de 200 KHz de ancho de banda centrada sobre la frecuencia central del sistema FDSS se obtiene lo siguiente:

- Rectangular: 26.2 dB
- Cosenoidal: 44 dB
- Triangular: 49.8 dB
- Gaussiana: 57.8 dB

Vemos por tanto la importante ventaja que presenta este sistema en cuanto a la alta resistencia al Jammer frente al sistema WCDMA.

Dado que las redes móviles están reguladas por el estado, está prohibida la transmisión en la banda de frecuencias que estas emplean. Sin embargo, es posible que sean atacadas por un transmisor interferente reduciendo o anulando la capacidad de una estación base en función de la potencia de señal interferente que se reciba en la misma. En el caso de que este transmisor esté en una posición fija, es fácil localizarlo a partir de la triangulación y anular la amenaza en un intervalo muy corto de tiempo. Sin embargo, si este transmisor se encuentra en movimiento, su localización es muy complicada pudiendo suponer una amenaza por un periodo prolongado de tiempo.

En el caso de las comunicaciones militares, el efecto del sistema FDSS es mucho más importante. Dado que en situaciones de guerra no existe regulación acerca de la transmisión de señales y sus frecuencias correspondientes se da el marco adecuado para el empleo de señales de Jammer. Interrumpir las comunicaciones del enemigo de esta forma se ha venido utilizando desde hace más de un centenar de años en las distintas guerras acontecidas. Actualmente se emplea WCDMA en la tecnología militar. Hemos visto que la resistencia a las interferencias de este sistema no es muy elevada, por lo que resulta beneficioso el empleo de Jammers para atacar las comunicaciones enemigas. El sistema FDSS, gracias a la capacidad de eliminar portadoras para reducir la potencia interferente permite minimizar en gran medida este efecto. En los distintos escenarios del modelo Aire-Tierra mostrados, observamos el enorme impacto producido por el empleo del sistema FDSS. El empleo de este sistema inutiliza casi totalmente el efecto del Jammer, no resultando efectivo el empleo del mismo en las condiciones propuestas. La alternativa sería transmitir señales interferentes cuya potencia sea mucho mayor que la empleada en estas simulaciones pero esto no resulta efectivo dada la gran potencia necesaria. Sin embargo, la forma más efectiva de reducir la eficiencia del sistema FDSS es atacarlo con Jammers que presenten una anchura de banda mayor o igual que la anchura de banda del sistema FDSS.

## Referencias

- [1] José María Hernando Rábanos (2003): Transmisión por radio. (Editorial Centro Estudios Ramón Areces)
- [2] Bazil Taha Ahmed, Miguel Calvo Ramón: “On the Narrow-Band Jammer Mitigation Using Intelligent FDSS System” 2007 European Conference on Wireless Technologies, Munich, Germany, 8-10 October 2007
- [3] Shinsuke Hara y Ramjee Prasad (1997): “Overview of MultiCarrier CDMA”.
- [4] A Baseband Pulse Shaping Filter For Gaussian Minimum Shift Keying (1998), N. Krishnapura, S. Pavan, C. Mathiazhagan, B. Ramamurth
- [5] Vicente Burillo, Leandro de Haro, José María Hernando y Fundación Airtel Vodafone (2002): Sistemas de Comunicaciones Móviles de Tercera Generación IMT-2000 (UMTS).



## **Glosario de acrónimos**

BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
FDSS	Frequency Division Spread Spectrum
GSM	Global System for Mobile communications
ICI	Inter Carrier Interference
IFDSS	Intelligent Frequency Division Spread Spectrum
JSR	Jammer to Signal Ratio
LOS	Line of Sight
MC-DS-CDMA	Multi Carrier Direct Sequence Code Division Multiple Access
SJNR	Signal to Jammer and Noise Ratio
SNR	Signal Noise Ratio
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wide Code Division Multiple Access



# Anexos

## A. Programación en Matlab

### A.1. Capacidad del sistema celular con el sistema FDSS para la transmisión de señales de voz con interferencia centrada sobre la frecuencia central del sistema y señal de entrada rectangular

```
clc
clear all
close all

%Defino el tipo de señal de entrada
FACTOR_AMP=1;
FACTOR_ANC=1;
%Duración del pulso
Tb=1/(15*10^3);
w=-100000*2*pi:500:5000000*2*pi;

%Genero la señal rectangular en banda base

xw=10*log10(((sin(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)
.^FACTOR_AMP);
plot(w/(2*pi),xw)
axis([-100000 100000 -50 5])
title('Espectro de la señal en banda base')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')
figure
xwtotal=0;

w=0:500:5000000*2*pi;
posicion_portadoras=zeros(1,256);
Gp=256;

%Genero el sistema FDSS para la transmisión de señales de voz
for t=1:Gp
    constante(t)=2*pi*(587.5+15*(t-1))*10^3;
    xwaux(t,:)=10*log10(((sin((w-constante(t)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./
((w-constante(t)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2).^FACTOR_AMP);
    xwaux(t,:)=10.^(xwaux(t,:)/10);
    pot(t)=sum(xwaux(t,:));
    [valor,posicion]=max(xwaux(t,:));
    posicion_portadoras(t)=posicion;
    xwtotal=xwtotal+xwaux(t,:);
end

plot(w/(2*pi),10*log10(xwtotal))
axis([0 5000000 -40 5])
title('Espectro del sistema de transmision FDSS')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')
```

```

%Calculo la ICI media sobre cada portadora
ICI=zeros(1,Gp);

for i=1:Gp
    for j=1:Gp
        if j~=i
            indice=posicion_portadoras(i);
            ICI(i,j)=xwaux(j,indice);
        else
            ICI(i,j)=0;
        end
    end
    end
    ICIb(i)=sum(ICI(i,:));
end

ICI_total=sum(ICIb)/Gp;
S=sum(xwttotal);

%Capacidad del sistema sin señal interferente

Gp=256;    %Número de portadoras para transmisión de datos
EbNo=4;    %Relación Eb/No en unidades naturales
F=0.66;    %Factor de interferencia entre células
alfa=0.5;  %Factor de actividad
Gs=2.5;    %Ganancia por sectorización
Wsn=0;     %Porcentaje de banda eliminada
Jres=0;    %Potencia residual de jammer

N=(S*Gp*((1-Wsn)^2 -Jres*(EbNo) -ICI_total*S*(EbNo)) / (S*alfa*
(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
cap_sin_interferencia=N;

%Introduzco la señal de Jammer y defino el ancho de banda donde se
%encuentra

S=sum(xwttotal); %Sumo todos los valores para calcular la potencia
num_portadoras=Gp;
Capacidad=[zeros(1,num_portadoras/2); zeros(1,num_portadoras/2);
zeros(1,num_portadoras/2);zeros(1,num_portadoras/2);
zeros(1,num_portadoras/2)];

%Genero Jammers de distinto ancho de banda sobre distintas bandas de
%frecuencia del sistema FDSS y calculo el optimo de capacidad del
%sistema en cada situación para las distintas potencias del Jammer

for k=1:5 %Varío el ancho de banda del Jammer sobre el sistema FDSS
    Wsistema=5.0;
    fmin=[2.4 2.3 2.2 2.1 2.0];
    fmax=[2.6 2.7 2.8 2.9 3.0];
    limiteinferior=round(fmin*length(w)/5.0);
    limitesuperior=round(fmax*length(w)/5.0);
    cte=[10^0.5 10 10^1.5 100 10^2.5 10^3 10^3.5 10^4 10^4.5 10^5];
    salto=5;
    for j=1:length(cte) %Varío la potencia de J respecto a S
        Gp=256;
        EbNo=4;
        F=0.66;
    end
end

```

```

alfa=0.5;
Gs=2.5;
Wsn=0;
xwtotalbis=xwtotal;
S=sum(xwtotalbis);
Wjammer=Wsistema/(fmax(k)-fmin(k));
J=cte(j)*S;
%Cálculo de la capacidad del sistema sin eliminar potencia
%interferente
N=(S*Gp*((1-Wsn))^2-J*(EbNo)-ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-
Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
senal_jammer=10*log10(xwtotal(limiteinferior+1:limitesuperior
))+10*log10(cte(j))+10*log10(Wjammer);
senal_jammer=10.^(senal_jammer/10);
%Proceso de eliminación de portadoras para optimizar la
%capacidad del sistema FDSS
for i=1:Gp/2
    frecuencia1= 2*pi*(587.5+15*((Gp/2)-i))*10^3;
    frecuencia2= 2*pi*(587.5+15*(i+Gp/2-1))*10^3;
    xwaux1=10*log10((((sin((w-frecuencia1).* FACTOR_ANC.*
(Tb/2))./(w-frecuencia1).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux2=10*log10((((sin((w-frecuencia2).* FACTOR_ANC.*
(Tb/2))./(w-frecuencia2).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux1=10.^(xwaux1/10);
    xwaux2=10.^(xwaux2/10);
    xwtotalbis=xwtotalbis-(xwaux1+xwaux2);
    S=sum(xwtotalbis);

    media(i)=sum(xwtotalbis(limiteinferior(k):limitesuperior(k)
))/(limitesuperior(k)-limiteinferior(k)+1);
    Jres(i)=media(i)*J;
    Wsn=(i/128);
    %Calculo de la capacidad al ir eliminando la potencia
    %interferente
    Capacidad(j,i)=(S*Gp*((1-Wsn))^2-Jres(i)*(EbNo)-
ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
    if (i==1 && Capacidad(j,i)<N)
        portadoras_eliminadas(k,j)=(i-1)*2;
        banda_eliminada(k,j)=(portadoras_eliminadas(k,j)/Gp);
        break;
    end
    %Ya he alcanzado el máximo
    if (i>1 && Capacidad(j,i-1)>Capacidad(j,i) )
        portadoras_eliminadas(k,j)=(i-1)*2;
        banda_eliminada(k,j)=(portadoras_eliminadas(k,j)/Gp);
        break;
    end
end
end
% El primer valor es N es la capacidad del sistema sin
eliminar ninguna portadora
Capacidad_total=[N Capacidad(j,:)];
maximo(j)=max(Capacidad_total);
end
maximo_total(k,:)= [cap_sin_interferencia maximo]
end

```

```

%Represento la capacidad del sistema para las diferentes anchuras de
%banda del Jammer

t=0:salto:50;
figure
plot(t, maximo_total)
axis([0 50 0 220])
title('Capacidad del sistema FDSS con señal de entrada cuadrada')
xlabel('Potencia Jammer / Potencia señal (dB)')
ylabel('Capacidad del sistema (en n° de usuarios)')
legend('Bw=0.2MHz', 'Bw=0.4MHz', 'Bw=0.6MHz', 'Bw=0.8MHz', 'Bw=1.0MHz' )

```

## A.2 Capacidad del sistema celular con el sistema FDSS para la transmisión de señales de datos con interferencia no centrada sobre la frecuencia central del sistema y señal de entrada cosenoidal

```

clc
clear all
close all

%El factor de amplitud y ensanchamiento definen la señal de entrada
FACTOR_AMP=23.2/13.2;
FACTOR_ANC=50.6/68.8;
%Duración del pulso
Tb=1/(120*10^3);
w=-500000*2*pi: 500: 5000000*2*pi;

%Genero la señal en banda base
xw=10*log10(((sin(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)
.^ FACTOR_AMP);
plot(w/(2*pi),xw)
axis([-500000 500000 -50 5])
title('Espectro de la señal cosenoidal en banda base')
xlabel('Frecuencia(Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')
figure
xwtotal=0;

w=0:500:5000000*2*pi;

posicion_portadoras=zeros(1,32);
Gp=32;

%Genero el sistema FDSS
for t=1:Gp
    constante(t)=2*pi*(640+120*(t-1))*10^3;
    xwaux(t,:)=10*log10((((sin((w-constante(t)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(
((w-constante(t)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux(t,:)=10.^(xwaux(t,:)/10);
    pot(t)=sum(xwaux(t,:));
    [valor,posicion]=max(xwaux(t,:));
    posicion_portadoras(t)=posicion;
    xwtotal=xwtotal+xwaux(t,:);
end

```

```

plot(w/(2*pi),10*log10(xwttotal))
axis([0 5000000 -40 5])
title('Espectro del sistema de transmision FDSS')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')

%Calculo la ICI media sobre cada portadora
ICI=zeros(1,Gp);

for i=1:Gp
    for j=1:Gp
        if j~=i
            indice=posicion_portadoras(i);
            ICI(i,j)=xwaux(j,indice);
        else
            ICI(i,j)=0;
        end
    end
    end
    ICIb(i)=sum(ICI(i,:));
end

ICI_total=sum(ICIb)/Gp;

%Capacidad del sistema sin señal interferente

Gp=32; %Número de portadoras para transmisión de datos
EbNo=2; %Relación Eb/No en unidades naturales
F=0.66; %Factor de interferencia entre células
alfa=1; %Factor de utilización
Gs=2.5; %Ganancia por sectorización
Wsn=0; %Porcentaje de banda eliminada
Jres=0; %Potencia residual de jammer
S=sum(xwttotal);

N=(S*Gp*((1-Wsn))^2-Jres*(EbNo)-ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-
Wsn)*(1+F) *(EbNo)/Gs);
cap_sin_interferencia=N;

%Introduzco la señal de Jammer y defino el ancho de banda donde se
%encuentra

num_portadoras=Gp;
fmin=[0.0 0.4 1.6 2.0 2.4 2.8 3.2 4.4 4.8];
fmax=[0.2 0.6 1.8 2.2 2.6 3.0 3.4 4.6 5.0];

for k=1:length(fmin) %Vario la posición del jammer sobre el sistema
FDSS
    Capacidad=[zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);
zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp);zeros(1,Gp)
]];
    Wsistema=5.0;
    limiteinferior(k)=round(fmin(k)*length(w)/Wsistema);
    limitesuperior(k)=round(fmax(k)*length(w)/Wsistema);
    cte=[10^0.5 10 10^1.5 100 10^2.5 1000 10^3.5 10^4 10^4.5 10^5
10^5.5 10^6 10^6.5 10^7 10^7.5 10^8 10^8.5 10^9 10^9.5 10^10];
    salto=5;
    for j=1:length(cte) %Vario la potencia de J respecto a S
        contador=0;

```

```

Gp=32;
EbNo=2;
F=0.66;
alfa=1;
Gs=2.5;
Wsn=0;
xwtotalbis=xwtotal;
S=sum(xwtotalbis);
Wjammer=Wsistema/(fmax(k)-fmin(k));
J=cte(j)*S;
%Calculo de la capacidad del sistema sin eliminar la potencia
%interferente
if fmin(k)*10^6<constante(1)/(2*pi) ||
fmax(k)*10^6>constante(Gp)/(2*pi)

    valor_inicial=sum(xwtotal(limiteinferior(k)+1:limitesuperio
r(k)))/(limitesuperior(k)-limiteinferior(k));
    Jres=J*valor_inicial;
    N=(S*Gp*((1-Wsn)^2-Jres*(EbNo)-ICI_total*S*(EbNo)))/
(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
else
    N=(S*Gp*((1-Wsn)^2-J*(EbNo)-ICI_total*S*(EbNo)))/
(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
end
%Proceso de eliminación de las portadoras para optimizar la
%capacidad del sistema FDSS
for i=1:Gp
    %Búsqueda de las portadoras centrales afectadas por el
Jammer
    if i==1
        frec_central(k)=(fmin(k)+fmax(k))/2;
        for m=1:Gp
            dist_frecuencia(m)=abs(constante(m)-
2*pi*frec_central(k)*10^6);
            if dist_frecuencia(m)/(2*pi)<=60*10^3
                frecuencial(i)=constante(m)-2*pi*120*10^3*(i-
1);
                if m < Gp && m > 1
                    dist_frecuencia(m+1)=abs(constante(m+1)-
2*pi*frec_central(k)*10^6);
                    if dist_frecuencia(m+1)<dist_frecuencia(m-
1)
                        frecuencia2(i)= constante(m)+
2*pi*120*10^3*i;
                        break;
                    else
                        aux=frecuencial(i);
                        frecuencial(i)= constante(m)-
2*pi*120*10^3*i;
                        frecuencia2(i)=aux;
                        break;
                    end
                elseif m==1
                    frecuencia2(i)= constante(m)+
2*pi*120*10^3*i;
                    break;
                elseif m==Gp
                    aux=frecuencial(i);
                    frecuencial(i)= constante(m)-
2*pi*120*10^3*i;
                    frecuencia2(i)=aux;

```

```

        break;
    end
end
end
%La señal interferente está a frecuencias inferiores a
%la portadora de menor frecuencia del sistema FDSS
if m==Gp && dist_frecuencia(m)/(2*pi) > 60*10^3
    if dist_frecuencia(1)< dist_frecuencia(Gp)
        frecuencial(i)= constante(1);
        frecuencia2(i)= constante(1)+ 2*pi*120*10^3*i;
    end
end
%La señal interferente está a frecuencias superiores a
%la portadora de mayor frecuencia del sistema FDSS
if m==Gp && dist_frecuencia(m)/(2*pi) > 60*10^3
    if dist_frecuencia(1)> dist_frecuencia(Gp)
        frecuencial(i)= constante(Gp)-
2*pi*120*10^3*i;
        frecuencia2(i)= constante(Gp);
    end
end
end
if i~=1
    frecuencial(i)= frecuencial(i-1)- 2*pi*120*10^3;
    frecuencia2(i)= frecuencia2(i-1)+ 2*pi*120*10^3;
end
%Proceso de eliminación de las portadoras
if frecuencial(i)/(2*pi)<constante(1)/(2*pi)
    contador=contador+1;
    xwaux2=10*log10((((sin((w-
frecuencia2(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w-
frecuencia2(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux2=10.^(xwaux2/10);
    xwtotalbis=xwtotalbis-xwaux2;
    S=sum(xwtotalbis);
    media(i)=sum(xwtotalbis(limiteinferior(k)+1:limitesupe
rior(k)))/(limitesuperior(k)-limiteinferior(k)+1);
    Jres(i)=media(i)*J;
    Wsn=(i-contador)/(Gp/2) +contador/Gp;
    Capacidad(j,i)=(S*Gp*((1-Wsn))^2-Jres(i)*(EbNo)-
ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
    if (i>1 && Capacidad(j,i-1)>Capacidad(j,i) )
        break;
    end
elseif frecuencia2(i)/(2*pi)>constante(Gp)/(2*pi)
    contador=contador+1;
    xwaux1=10*log10((((sin((w-
frecuencia1(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w-
frecuencia1(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux1=10.^(xwaux1/10);
    xwtotalbis=xwtotalbis-xwaux1;
    S=sum(xwtotalbis);
    media(i)=sum(xwtotalbis(limiteinferior(k)+1:limitesupe
rior(k)))/(limitesuperior(k)-limiteinferior(k)+1);
    Jres(i)=media(i)*J;
    Wsn=(i-contador)/(Gp/2) +contador/Gp;
    Capacidad(j,i)=(S*Gp*((1-Wsn))^2-Jres(i)*(EbNo)-
ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
    if (i>1 && Capacidad(j,i-1)>Capacidad(j,i) )
        break;
    end
end
end

```

```

elseif frecuencia1(i)/(2*pi)>=constante(1)/(2*pi) &&
frecuencia2(i)/(2*pi) <= constante(Gp)/(2*pi)
    xwaux1=10*log10(((sin((w-
frecuencia1(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w-
frecuencia1(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux2=10*log10(((sin((w-
frecuencia2(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w-
frecuencia2(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux1=10.^(xwaux1/10);
    xwaux2=10.^(xwaux2/10);
    xwtotalbis=xwtotalbis-(xwaux1+xwaux2);
    S=sum(xwtotalbis);
    %A lo largo del ancho de banda de la señal
    %interferente calculo el valor medio
    media(i)=sum(xwtotalbis(limiteinferior(k)+1:limitesupe
rior(k)))/(limitesuperior(k)-limiteinferior(k)+1);
    Jres(i)=media(i)*J;
    Wsn=(i-contador)/(Gp/2) +contador/Gp;
    Capacidad(j,i)=(S*Gp*((1-Wsn)^2-Jres(i))*(EbNo)-
ICI_total*S*(EbNo))/(S*alfa*(1-Wsn)*(1+F)*(EbNo)/Gs);
    if (i>1 && Capacidad(j,i-1)>Capacidad(j,i) )
        break;
    end
else
    break;
end
end
end
Capacidad_total=[N Capacidad(j,:)];
maximo(j)=max(Capacidad_total);
end
%Obtengo la capacidad del sistema para cada posición del Jammer y
%sus diferentes potencias
maximo_total(k,:)=[cap_sin_interferencia maximo]
end

```

```

%Represento la Capacidad del sistema
t=0:salto:100;
figure
plot(t, maximo_total)
axis([0 70 0 25])
title('Capacidad del sistema FDSS con señal de entrada cosenoidal')
xlabel('Potencia Jammer / Potencia señal (dB)')
ylabel('Capacidad del sistema (en n° de usuarios)')
legend('0-0.2 MHz', '0.4-0.6 MHz', '1.6-1.8 MHz', '2.0-2.2 MHz', '2.4-
2.6 MHz', '2.8-3.0 MHz', '3.2-3.4 MHz', '4.4-4.6 MHz', '4.8-5.0 MHz')

```

### A.3. Cálculo de la cobertura del enlace entre un transmisor y un receptor terrestre cuando las comunicaciones son atacadas por un Jammer con el empleo del sistema FDSS

```

clc
clear all
close all

```

```

%En las comunicaciones militares entre transmisor y receptor terrestre
%se emplea la banda de frecuencias de 30 a 88 MHz. Utilizamos 50 MHz

```

```

f1=50*10^6;
c=3*10^8;
lambda=c/f1;

Ptx=10; %Trasmite 10W de potencia de señal
Pti=500; %La potencia interferente transmitida son 500W

%Ganancia de las antenas
Gt=2;
Gtj=2;
Gr=2;

%Altura de los transmisores
hr=2;
ht=2;
htj=2;

%Fijo la posición del transmisor y receptor. El Jammer se mueve por el
%plano de trabajo.
posxtx=0;
posytx=0;
posxrec=4000;
posyrec=4000;

%Defino un área de 10*10Km sobre la que calculo la cobertura del
%enlace. Calculo la distancia del transmisor al receptor y del jammer
%con el receptor

d1=0:200:10000;
d2=0:200:10000;

%Distancia entre transmisor y receptor
distancia=sqrt((posxrec-posxtx)^2+(posyrec-posytx)^2);

%Distancia entre Jammer y receptor
for i=1:length(d1)
    for j=1:length(d2)
        if d1(i)==posyrec && d2(j)==posxrec
            distanciajammer((i-1)*length(d1)+j)=0;
        else
            distanciajammer((i-1)*length(d1)+j)=sqrt((d1(i)-
posyrec)^2+ (d2(j)-posxrec)^2);
        end
    end
end

%Introduzco el ruido
Nrec=6;
N=-114+10*log10(4)+Nrec;
n=10^(N/10);

%Calculo las perdidas básicas. Empleo el modelo del espacio libre para
%ambos enlaces
n1=2;
n2=4;
Rb=(4*ht*hr)/lambda;
Rbj=(4*htj*hr)/lambda;
dref=1;
Lref=20*log10((4*pi*dref)/lambda);
Lrb=Lref+10*n1*log10(Rb/dref);

```

```

if distancia<=Rb
    Lb=Lref+10*n1*log10(distancia/dref);
else
    Lb=Lrb+10*n2*log10(distancia/Rb);
end

for i=1:length(distanciajammer)
    if distanciajammer(i)==0
        Lbj(i)=0;
    elseif distanciajammer(i)<=Rbj
        Lbj(i)=Lref+10*n1*log10(distanciajammer(i)/dref);
    else
        Lbj(i)=Lrb+10*n2*log10(distanciajammer(i)/Rb);
    end
end

%Calculo la relación EbNo inicial en el receptor
Gp=32;
for i=1:length(distanciajammer)
    S(i)=10*log10(Ptx*1000)+Gt-Lb+Gr;
    s(i)=10^(S(i)/10);
    J(i)=10*log10(Pti*1000)+Gtj-Lbj(i)+Gr;
    jam(i)=10^(J(i)/10);
    SJR(i)=10*log10(s(i)/jam(i));
    sjnr(i)=(s(i)/(jam(i)+n));
    SJNR(i)=10*log10(sjnr(i));
    EbNo(i)=10*log10(Gp)+SJNR(i);
end

for i=1:length(d1)
    for j=1:length(d2)
        EbNoinicial(i,j)=EbNo((i-1)*length(d2)+j);
    end
end

for j=1:length(d1)
    for k=1:length(d2)
        EbNoinicial(j,k)=EbNo((j-1)*length(d2)+k);
        if EbNoinicial(j,k)>40
            EbNoinicial(j,k)=40;
        elseif EbNoinicial(j,k)<=-50
            EbNoinicial(j,k)=-50;
        end
    end
end

%Represento la relación EbNo inicial en el receptor
figure
[a,b]=contourf(d2,d1,EbNoinicial,20)
colorbar
title('Relación EbNo en el receptor')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Distancia (metros)')
x1=0;
x2=0;
x3=4000;
x4=4000;
hold on
plot(x1,x2,'bo')
hold on
plot(x3,x4,'go')
figure

```

```

%Introduzco el sistema FDSS

%Defino la señal de entrada empleada
FACTOR_AMP=2;
FACTOR_ANC=50.6/73.4;
%Defino la duración del pulso
Tb=1/(120*10^3);
w=-500000*2*pi:10000:5000000*2*pi;

%Represento la señal en banda base
xw=10*log10(((sin(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)
.^FACTOR_AMP);
plot(w/(2*pi),xw)
axis([-500000 500000 -50 5])
title('Espectro de la señal en banda base')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')
figure
xwtotal=0;

w=0:10000:5000000*2*pi;

Gp=32;

%Genero y represento el sistema FDSS
for i=1:Gp
    constante(i)=2*pi*(640+120*(i-1))*10^3;
    xwaux=10*log10((((sin((w-constante(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./
((w-constante(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux=10.^(xwaux/10);
    xwtotal=xwtotal+xwaux;
end

plot(w/(2*pi),10*log10(xwtotal))
axis([0 5000000 -40 5])
title('Espectro del sistema de transmisión FDSS')
xlabel('Frecuencia (MHz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')

%Introduzco la señal de jammer en el receptor a partir de la relación
%EbNo obtenida inicialmente en el receptor. Defino la anchura de banda
%del jammer en 0.2 MHz entre 2.4 y 2.6 MHz.

paso=10000;
anchura_sistema=2*pi*5*10^6;
anchura_sistema_puntos=3840*10^3*2*pi/paso;
anchura_banda=2*10^5*2*pi;
anchura_banda_puntos=anchura_banda/(paso);
puntos=round(anchura_banda/paso);

wjam=2400000*2*pi:10000:2600000*2*pi;

limite=(length(w)-puntos)/2;
limiteinferior=round(limite);
limitesuperior=round(limite+puntos);

SJRbis=zeros(length(distancia),Gp/2,length(Ptx));

```

```

SJNRbis=zeros(length(distancia),Gp/2,length(Ptx));

potenciasenal=zeros(length(distancia),Gp/2,length(Ptx));
potenciajammer=zeros(length(distancia),Gp/2,length(Ptx));

%Valores de frecuencia mínima y máxima donde se encuentran la señal y
%el jammer

limiteinferiorsenal=floor((640-60)*10^3*2*pi/paso)+1;
limitesuperiorsenal=floor((640*10^3*2*pi+(Gp-
1)*2*pi*120*10^3+60*10^3*2*pi)/paso)+1;
limiteinferiorjammer=wjam(1)/(paso)+1;
limitesuperiorjammer=wjam(end)/(paso)+1;

%Proceso de eliminación de portadoras en el receptor para maximizar la
%relacion EbNo en el receptor en función de su posición
for j=1:length(distanciajammer)
    xwtotalbis=xwtotal;
    densidadpotjammer(j)=10^(J(j)/10)/anchura_banda_puntos;
    densidadpotsenal(j)=10^(S(j)/10)/anchura_sistema_puntos;
    i=1;
    mediasenal=sum(xwtotalbis(limiteinferiorsenal:limitesuperiorsenal)
)/(limitesuperiorsenal-limiteinferiorsenal+1);
    media=sum(xwtotalbis(limiteinferiorjammer:limitesuperiorjammer))/
(limitesuperiorjammer-limiteinferiorjammer+1);
    potenciasenal(j,i)=densidadpotsenal(j)*sum
(xwtotalbis(limiteinferiorsenal:limitesuperiorsenal))/mediasenal;
    potenciajammer(j,i)=densidadpotjammer(j)*sum(xwtotalbis
(limiteinferiorjammer:limitesuperiorjammer))/media;
    SJRbis(j,i)=10*log10(potenciasenal(j,i)/potenciajammer(j,i));
    SJNRbis(j,i)=10*log10(potenciasenal(j,i)/(potenciajammer(j,i)+n));
    EbNobis(j,i)=10*log10(Gp)+SJNRbis(j,i);
    %Para cada posición del Jammer maximizo la EbNo
    for i=1:Gp/2-1
        frecuencia1= 2*pi*(640+120*((Gp/2)-i))*10^3;
        frecuencia2= 2*pi*(640+120*(i+Gp/2-1))*10^3;
        xwaux1=10*log10((((sin((w-frecuencia1).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./
((w-frecuencia1).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
        xwaux2=10*log10((((sin((w-frecuencia2).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./
((w-frecuencia2).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
        xwaux1=10.^(xwaux1/10);
        xwaux2=10.^(xwaux2/10);
        xwtotalbis=xwtotalbis-(xwaux1+xwaux2);
        potenciasenal(j,i+1)=densidadpotsenal(j)*sum(xwtotalbis(limitei
nferiorsenal:limitesuperiorsenal))/mediasenal;
        potenciajammer(j,i+1)=densidadpotjammer(j)*sum(xwtotalbis(limit
einferiorjammer:limitesuperiorjammer))/media;
        SJRbis(j,i+1)=10*log10(potenciasenal(j,i+1)/potenciajammer(j,i+
1))
        SJNRbis(j,i+1)=10*log10(potenciasenal(j,i+1)/
(potenciajammer(j,i+1)+n));
        EbNobis(j,i+1)=10*log10(Gp-2*i)+SJNRbis(j,i+1);
    end
end

dimension1=length(EbNobis(:,1)); %Distancias
dimension2=length(EbNobis(1,:)); %Portadoras

```

```

for j=1:dimension1
    for k=1:dimension2
        if k==1
            EbNofinal(j)=EbNobis(j,k);
        elseif EbNobis(j,k)>EbNofinal(j)
            EbNofinal(j)=EbNobis(j,k);
        end
    end
end

for j=1:length(d1)
    for k=1:length(d2)
        EbNodef(j,k)=EbNofinal((j-1)*length(d2)+k);
        if EbNodef(j,k)>40
            EbNodef(j,k)=40;
        elseif EbNodef(j,k)<-30
            EbNodef(j,k)=-30;
        end
    end
end

%Represento la relación EbNo final en el receptor para las diferentes
%posiciones del Jammer

figure
[a,b]=contourf(d2,d1,EbNodef,20);
colorbar
title('Relación EbNo en el receptor al aplicar FDSS con una entrada
triangular')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Distancia (metros)')
hold on
plot(x1,x2,'bo')
hold on
plot(x3,x4,'go')

```

#### A.4. Cálculo de la cobertura del enlace entre un transmisor y un receptor terrestre cuando las comunicaciones son atacadas por un Jammer con el empleo del sistema FDSS

```

clc
clear all
close all

%Las comunicaciones militares entre un transmisor aéreo y receptor
%están reguladas. Se emplea la banda de frecuencias de 225 a 400 MHz.
%Empleamos la frecuencia f1=300 MHz.

f1=300*10^6;
c=3*10^8;
lambda=c/f1;

Ptx=10; %Trasmiso 10W de potencia de señal
Pti=500; %Trasmiso 500W de potencia de Jammer

```

```

%Ganancia de las antenas
Gt=0;
Gtj=2;
Gr=2;

%Altura de los transmisores
hr=2;
htj=2;

%Fijo la posición del transmisor y del transmisor de Jammer. Varío la
%posición del receptor a lo largo del área bajo estudio

posxjammer=10000;
posyjammer=10000;
poszjammer=2;
posxtx=300000;
posytx=0;
posztx=10000;
poszrec=2;

%Defino un área de 10*10Km sobre la que calculo la cobertura del
%enlace. Calculo la distancia del transmisor al receptor en todos los
%puntos del plano por los que muevo el receptor

d1=0:200:10000;
d2=0:200:10000;

%Calculo la distancia entre transmisor y receptor
for i=1:length(d1)
    for j=1:length(d2)
        distancia((i-1)*length(d2)+j)=sqrt((d1(i)-posytx)^2+(d2(j)-
posxtx)^2+(poszrec-posztx)^2);
    end
end

%Calculo la distancia del transmisor de jammer al receptor
for i=1:length(d1)
    for j=1:length(d2)
        if d1(i)==posyjammer && d2(j)==posxjammer &&
poszrec==poszjammer
            distanciajammer((i-1)*length(d1)+j)=0;
        else
            distanciajammer((i-1)*length(d2)+j)=sqrt((d1(i)-
posxjammer)^2 +(d2(j)-posyjammer)^2+(poszrec-poszjammer)^2);
        end
    end
end

%Calculo las perdidas básicas. Empleo el modelo del espacio libre para
%el enlace entre transmisor y receptor y el modelo de las 2 pendientes
%para el enlace entre transmisor interferente y receptor
for i=1:length(distancia)
    if distancia(i)==0
        Lb(i)=0;
    else
        Lb(i)=32.45+20*log10(f1/10^6)+20*log10(distancia(i)/1000);
    end
end

```

```

n1=2;
n2=4;
Rbj=(4*htj*hr)/lambda;
dref=1;
Lref=20*log10((4*pi*dref)/lambda);
Lrb=Lref+10*n1*log10(Rbj/dref);
for i=1:length(distanciajammer)
    if distanciajammer(i)<=Rbj
        Lbj(i)=Lref+10*n1*log10(distanciajammer(i)/dref);
    else
        Lbj(i)=Lrb+10*n2*log10(distanciajammer(i)/Rbj);
    end
end

%Introduzco el ruido
Nrec=6;
N=-114+10*log10(4)+Nrec;
n=10^(N/10);

Gp=256;
%Calculo la relación EbNo para las diferentes posiciones del receptor
for i=1:length(distanciajammer)
    S(i)=10*log10(Ptx*1000)+Gt-Lb(i)+Gr;
    s(i)=10^(S(i)/10);
    J(i)=10*log10(Pti*1000)+Gtj-Lbj(i)+Gr;
    jam(i)=10^(J(i)/10);
    SJR(i)=10*log10(s(i)/jam(i));
    sjnr(i)=(s(i)/(jam(i)+n));
    SJNR(i)=10*log10(sjnr(i));
    EbNo(i)=10*log10(Gp)+SJNR(i);
end

for i=1:length(d1)
    for j=1:length(d2)
        EbNoInicial(i,j)= EbNo((i-1)*length(d2)+j);
    end
end
for j=1:length(d1)
    for k=1:length(d2)
        EbNoInicial(j,k)= EbNo((j-1)*length(d2)+k);
        if EbNoInicial(j,k)>40
            EbNoInicial(j,k)=40;
        elseif EbNoInicial(j,k)<-60
            EbNoInicial(j,k)=-60;
        end
    end
end

%Represento la relación EbNo inicial en el receptor

figure
[a,b]=contourf(d2,d1, EbNoInicial,20)
colorbar
title('Relación EbNo en el receptor')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Distancia (metros)')
x1=10000;
x2=10000;
hold on
plot(x1,x2,'ro')
figure

```

```

%Introduzco el sistema FDSS

%Defino la señal de entrada empleada
FACTOR_AMP=1;
FACTOR_ANC=1;

%Defino la duración del pulso
Tb=1/(15*10^3);
w=-100000*2*pi:500:5000000*2*pi;

%Genero y represento la señal en banda base
xw=10*log10(((sin(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w.*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)
.^FACTOR_AMP);
plot(w/(2*pi),xw)
axis([-100000 100000 -50 5])
title('Espectro de la señal en banda base')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')
figure
xwtotal=0;

w=0:2*pi*1000:5000000*2*pi;
Gp=256;

%Genero y represento el sistema FDSS
for i=1:Gp
    constante(i)=2*pi*(587.5+15*(i-1))*10^3;
    xwaux=10*log10(((sin((w-constante(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(w-
constante(i)).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
    xwaux=10.^(xwaux/10);
    xwtotal=xwtotal+xwaux;
end

plot(w/(2*pi),10*log10(xwtotal))
axis([0 5000000 -40 5])
title('Espectro del sistema de transmisión FDSS')
xlabel('Frecuencia (MHz)')
ylabel('Potencia normalizada (dB)')

%Introduzco la señal de jammer en el receptor a partir de la relación
%EbNo obtenida inicialmente. Defino la anchura de banda del jammer en
%.2MHz entre 2.4 y 2.6 MHz.

paso=2*pi*1000;
anchura_sistema=2*pi*5*10^6;
anchura_sistemaKHz=3840;
anchura_banda=2*10^5*2*pi;
anchura_bandaKHz=anchura_banda/(2*pi*1000);
puntos=round(anchura_banda/paso);

wjam=2400000*2*pi:1000*2*pi:2600000*2*pi;

limite=(length(w)-puntos)/2;
limiteinferior=round(limite);
limitesuperior=round(limite+puntos);

```

```

SJRbis=zeros(length(distancia),Gp/2);
SJNRbis=zeros(length(distancia),Gp/2);

potenciasenal=zeros(length(distancia),Gp/2);
potenciajammer=zeros(length(distancia),Gp/2);

%Valores de frecuencia mínima y máxima donde se encuentran la señal y
%el jammer
limiteinferiorsenal=floor((587.5-7.5)*10^3*2*pi/paso)+1;
limitesuperiorsenal=floor((587.5*10^3*2*pi+255*2*pi*15*10^3+
7.5*10^3*2*pi)/paso)+1;
limiteinferiorjammer=wjam(1)/(2*pi*10^3)+1;
limitesuperiorjammer=wjam(end)/(2*pi*10^3)+1;

%Proceso de eliminación de portadoras para maximizar la relación EbNo
%en el receptor en función de su posición
for j=1:length(distanciajammer)
    contador(j)=0;
    xwtotalbis=xwtotal;
    %Calculo la densidad de potencia de señal y de Jammer inicial en
%el receptor
    densidadpotjammer(j)=10^(J(j)/10)/anchura_bandaKHz;
    densidadpotsenal(j)=10^(S(j)/10)/anchura_sistemaKHz;
    i=1;
    mediasenal=sum(xwtotalbis(limiteinferiorsenal:limitesuperiorsenal)
    )/(limitesuperiorsenal-limiteinferiorsenal+1);
    media=sum(xwtotalbis(limiteinferiorjammer:limitesuperiorjammer))/(
    limitesuperiorjammer-limiteinferiorjammer+1);
    potenciasenal(j,i)=densidadpotsenal(j)*sum(xwtotalbis
    (limiteinferiorsenal:limitesuperiorsenal))/mediasenal;
    potenciajammer(j,i)=densidadpotjammer(j)*sum(xwtotalbis
    (limiteinferiorjammer:limitesuperiorjammer))/media;
    SJRbis(j,i)=10*log10(potenciasenal(j,i)/potenciajammer(j,i));
    SJNRbis(j,i)=10*log10(potenciasenal(j,i)/(potenciajammer(j,i)+n));
    EbNobis(j,i)=10*log10(Gp)+SJNRbis(j,i);
    for i=1:Gp/2-1
        frecuencia1= 2*pi*(587.5+15*((Gp/2)-i))*10^3;
        frecuencia2= 2*pi*(587.5+15*(i+Gp/2-1))*10^3;
        xwaux1=10*log10((((sin((w-frecuencia1).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(
        (w-frecuencia1).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
        xwaux2=10*log10((((sin((w-frecuencia2).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))./(
        (w-frecuencia2).*FACTOR_ANC.*(Tb/2))).^2)).^FACTOR_AMP);
        xwaux1=10.^(xwaux1/10);
        xwaux2=10.^(xwaux2/10);
        xwtotalbis=xwtotalbis-(xwaux1+xwaux2);
        potenciasenal(j,i+1)=densidadpotsenal(j)*sum(xwtotalbis(limitei
        nferiorsenal:limitesuperiorsenal))/mediasenal;
        potenciajammer(j,i+1)=densidadpotjammer(j)*sum(xwtotalbis(limit
        einferiorjammer:limitesuperiorjammer))/media;
        SJRbis(j,i+1)=10*log10(potenciasenal(j,i+1)/potenciajammer(j,i+
        1));
        SJNRbis(j,i+1)=10*log10(potenciasenal(j,i+1)/
        (potenciajammer(j,i+1)+n));
        EbNobis(j,i+1)=10*log10(Gp-2*i)+SJNRbis(j,i+1);
    end
end
end

dimension1=length(EbNobis(:,1)); %Distancias
dimension2=length(EbNobis(1,:)); %Portadoras

```

```

for j=1:dimension1
    for k=1:dimension2
        if k==1
            EbNofinal(j)=EbNobis(j,k);
        elseif EbNobis(j,k)>EbNofinal(j)
            EbNofinal(j)=EbNobis(j,k);
        end
    end
end

for j=1:length(d1)
    for k=1:length(d2)
        EbNodef(j,k)=EbNofinal((j-1)*length(d2)+k);
        if EbNodef(j,k)>40
            EbNodef(j,k)=40;
        elseif EbNodef(j,k)<-30
            EbNodef(j,k)=-30;
        end
    end
end

%Represento la relación EbNo final en el receptor para las diferentes
%posiciones de este
figure
[a,b]=contourf(d2,d1,EbNodef,20);
colorbar
title('Relación EbNo en el receptor al aplicar FDSS')
xlabel('Distancia (metros)')
ylabel('Distancia (metros)')

```

## **BIBLIOGRAFIA**

José María Hernando Rábanos (2004): Comunicaciones Móviles.

Alan V.Oppenheim, Alan S. Willsky, S.Hamid Nawab (1998): Señales y Sistemas.



# **PRESUPUESTO**

## **1) Ejecución Material**

- Compra de ordenador personal (Software incluido) 2.000 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
- Material de oficina 150 €
- Total de ejecución material 2.200 €

## **2) Gastos generales**

- 16 % sobre Ejecución Material 352 €

## **3) Beneficio Industrial**

- 6 % sobre Ejecución Material 132 €

## **4) Honorarios Proyecto**

- 640 horas a 15 € / hora 9600 €

## **5) Material fungible**

- Gastos de impresión 60 €
- Encuadernación 6 €

## **6) Subtotal del presupuesto**

- Subtotal Presupuesto 12.350 €

## **7) I.V.A. aplicable**

- 16% Subtotal Presupuesto 1.976€

## **8) Total presupuesto**

- Total Presupuesto 14.326€

Madrid, Septiembre de 2009

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Miguel García López  
Ingeniero Superior de Telecomunicación



# PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio sobre el sistema FDSS en aplicaciones celulares y sistemas militares. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulara por las siguientes:

## Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe limite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizara con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonara al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedara el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluara su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetaran siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad mas elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partidaalzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al ano de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que este designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se giraran visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que este no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificara al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicaran sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregara a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contara con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuara en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicara su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de este, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinara toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegara en el las responsabilidades que ostente.