

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Máster en Ingeniería de Telecomunicación**

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**COEXISTENCIA ENTRE TDT Y LTE**

**Bárbara Cristina Gil de Santivañes de Benito**

**Tutor: Bazil Taha Ahmed**

**Febrero 2016**







A Alberto



# RESUMEN

La llegada de las tecnologías digitales y de nuevos sistemas de compresión de información ha favorecido, a la hora de transmitir televisión, a disminuir el número de frecuencias necesarias para ello, permitiendo una mejor gestión del espectro radioeléctrico y posibilitando la obtención de un dividendo en forma de nuevas frecuencias disponibles, conocido como Dividendo Digital (DD). Ya que en el momento actual la prestación de servicios de banda ancha móvil es uno de los fines más demandados, el DD se destinó a ello.

Debido a la determinación por parte de Europa de que los nuevos servicios de banda ancha inalámbrica ocuparían la banda de 800 MHz, en España hubo que activar un plan para la liberación del Dividendo Digital que tenía que ser realizado en el plazo establecido, minimizando las molestias a los ciudadanos y reduciendo el impacto en las televisiones. Esto fue necesario pues la banda estaba ocupada por algunos canales de la Televisión Digital Terrestre (TDT).

Tras la reorganización del espectro, la banda de frecuencia más alta destinada a la TDT termina en 790 MHz y la banda de frecuencia más baja de LTE empieza en 791 MHz, existiendo solamente un espacio de 1 MHz sin utilización. Por lo tanto, en este Trabajo de Fin de Máster se propone el estudio de la coexistencia entre estos dos sistemas en la banda de 800 MHz para comprobar si es posible la convivencia entre ambos, así como determinar si la banda de guarda asignada es suficiente o debería ser mayor.

En otras partes del mundo, la red inalámbrica se encuentra asignada en la banda de 700 MHz. Además, algunos países de Europa tienen intenciones de establecer en esta misma los servicios móviles, dando lugar a un segundo Dividendo Digital (DD2) sobre 2017. Por tanto, también se realizará un estudio de la coexistencia entre TDT y LTE en esta banda.

En particular, se simularán y se analizarán dos escenarios. El primero consistirá en el efecto que produce la señal de un transmisor TDT sobre la señal LTE y el segundo, el efecto de la señal de un transmisor LTE que interfiere sobre la señal TDT.

## Palabras clave

Televisión Digital Terrestre (TDT), *Long Term Evolution (LTE)*, Dividendo Digital (DD), coexistencia, banda de guarda, cobertura.





## **ABSTRACT**

The arrival of digital technologies and new systems of data compression has permitted, when transmitting television, to decrease the number of frequencies required for that purpose, allowing a better management of the radio-electric spectrum and obtaining a dividend in a way of new available frequencies, known as Digital Dividend (DD). At present provision of mobile broadband is one of the most popular purposes, therefore the DD was allocated to it.

Due to the order from Europe that the new mobile broadband services need to occupy the 800 MHz band, Spain had to activate a plan to release the Digital Dividend. It needed to be done in a given time, minimizing discomfort of citizens and decreasing the impact on televisions. That was necessary because that band was occupied by some Digital Terrestrial Television channels.

After the relocation of the spectrum, the higher frequency band intended to DTT finishes in 790 MHz and the lowest frequency band to LTE starts in 791 MHz, so it exists only 1 MHz between them without usage. Because of that, this project proposes the study of coexistence between these two systems on this 800 MHz band, to check if it is possible to have it and to determine if the guard band assigned is enough or should be greater.

Elsewhere in the world, the wireless network is assigned in the 700 MHz band. Also, some European countries intend to establish mobile services in that band, creating a second Digital Dividend (DD2) around 2017. That is the reason why it will be analyzed the coexistence between DTT and LTE on this band, too.

In particular, it will be simulated and analyzed two scenarios. The first one will consist on the effect that a signal from a DTT transmitter produces on a LTE signal and the second one, the effect that a signal from a LTE transmitter causes on a DTT signal.

## **Index terms**

Digital Terrestrial Television (DTT), Long Term Evolution (LTE), Digital Dividend (DD), coexistence, guard band, coverage.



## AGRADECIMIENTOS

Tras la decisión tomada de hacer este TFM y, en general, el Máster de Ingeniería de Telecomunicación en la UAM y su finalización, quería agradecer a las personas que han formado parte de él y han hecho que este año y medio haya merecido la pena.

Como en todo momento, desde el inicio de mi tiempo en la universidad, Alberto ha sido la persona más importante y por la cual, con su ayuda, he conseguido todos y cada uno de los retos que me he propuesto, pues no duda en ofrecerse y dar todo para que sea así. Gracias por formar parte de mi vida y espero que siga siendo de esta manera.

A Marta, por ser el mayor apoyo en este trabajo, porque sin ella y sin su ayuda no hubiera sido posible sacarlo adelante. En poco tiempo estarás en este punto del TFG y en unos meses celebraremos tu graduación.

A mi tutor, Bazil, por aguantar todos los fallos, dudas y preguntas que han surgido durante estos meses y por las correspondientes soluciones. Espero que, a partir de ahora, tengas una vida más tranquila y puedas disfrutar de la familia.

A mis amigos, tanto de la universidad como los de toda la vida, por permitirme haberles conocido y hacer que mis días sean más llevaderos. Una mención especial a Nacho y Sergio, pues su compañía y buen humor en el día a día suponen una gran alegría.

Por último, a mis padres y hermanos, por darme todo lo que tienen, por confiar en mí y apoyarme en cada uno de los pasos que decido dar.



# ÍNDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| RESUMEN.....   | III       |
| ABSTRACT .....   | V         |
| AGRADECIMIENTOS.....   | VII       |
| ÍNDICE GENERAL.....  | IX        |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | XI        |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | XV        |
| <b>1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE .....</b>                           | <b>1</b>  |
| 1.1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN .....   | 2         |
| 1.2 ESTADO DEL ARTE.....   | 4         |
| 1.3 ESTRUCTURA .....   | 6         |
| <b>2. SISTEMAS IMPLICADOS: LTE Y TDT .....</b>                           | <b>7</b>  |
| 2.1 SISTEMA LTE .....  | 7         |
| 2.1.1 Evolución de la Tecnología Móvil.....                              | 7         |
| 2.1.2 Técnicas de Acceso Múltiple .....                                  | 10        |
| 2.1.3 Esquemas de Modulación .....                                       | 13        |
| 2.1.4 Codificación de Canal.....   | 16        |
| 2.2 SISTEMA TDT.....   | 20        |
| 2.2.1 Ventajas e Inconvenientes de la Televisión Digital Terrestre ..... | 20        |
| 2.2.2 Estándar DVB-T2 .....  | 21        |
| 2.2.3 Técnica de Modulación COFDM .....                                  | 22        |
| 2.2.4 Codificación de Canal.....   | 23        |
| <b>3. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y TDT .....</b>                             | <b>25</b> |
| 3.1 ESCENARIOS DE TRABAJO ESCOGIDOS.....                                 | 25        |
| 3.2 PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO .....                            | 26        |
| 3.3 MODELO DE PROPAGACIÓN.....   | 27        |
| 3.4 EFECTO DEL <i>LEAKAGE</i> .....                                      | 28        |
| 3.5 RADIO DE COBERTURA.....  | 35        |
| 3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA.....                                     | 37        |
| 3.6.1 Señal LTE con interferencia de señal TDT.....                      | 37        |
| 3.6.2 Señal TDT con interferencia de señal LTE.....                      | 38        |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>   | <b>41</b> |
| 4.1 SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA TDT (800 MHz).....                       | 41        |
| 4.1.1 Efecto del Canal 60 sobre A .....                                  | 42        |
| 4.1.2 Efecto del Canal 60 sobre B .....                                  | 44        |
| 4.1.3 Efecto del Canal 60 sobre C.....                                   | 46        |
| 4.1.4 Efecto del Canal 59 sobre A .....                                  | 47        |
| 4.1.5 Efecto del Canal 59 sobre B .....                                  | 49        |
| 4.1.6 Efecto del Canal 59 sobre C.....                                   | 50        |
| 4.1.7 Efecto del Canal 58 sobre A, B y C .....                           | 52        |
| 4.2 SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA LTE (800MHz) .....                       | 53        |
| 4.2.1 Efecto del Canal A sobre 60 .....                                  | 54        |
| 4.2.2 Efecto del Canal A sobre 59 .....                                  | 56        |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 4.2.3  | <i>Efecto del Canal A sobre 58</i> .....                      | 58        |
| 4.2.4  | <i>Efecto del Canal B sobre 60</i> .....                      | 59        |
| 4.2.5  | <i>Efecto del Canal B sobre 59</i> .....                      | 61        |
| 4.2.6  | <i>Efecto del Canal B sobre 58</i> .....                      | 62        |
| 4.2.7  | <i>Efecto del Canal C sobre 60</i> .....                      | 64        |
| 4.2.8  | <i>Efecto del Canal C sobre 59 y 58</i> .....                 | 65        |
| 4.3  | SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA TDT (700MHz) .....                | 67        |
| 4.3.1  | <i>Efecto del Canal 60 sobre A, B y C</i> .....               | 67        |
| 4.3.2  | <i>Efecto del Canal 59 sobre A, B y C</i> .....               | 69        |
| 4.3.3  | <i>Efecto del Canal 58 sobre A, B y C</i> .....               | 70        |
| 4.4  | SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA LTE (700MHz) .....                | 71        |
| 4.4.1  | <i>Efecto del Canal A, B y C sobre 60 y 59</i> .....          | 72        |
| 4.4.2  | <i>Efecto del Canal A, B y C sobre 58</i> .....               | 73        |
| 4.5  | REDUCCIÓN DEL RADIO DE COBERTURA DE LA ESTACIÓN BASE LTE..... | 75        |
| <b>5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b> .....        |   | <b>77</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                            |   | <b>79</b> |
| <b>GLOSARIO</b> .....                                |   | <b>81</b> |
| <b>ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS</b> ..... |   | <b>85</b> |
| I.1  | ANTENA TDT DE TRANSMISIÓN .....                               | 85        |
| I.2  | ANTENAS LTE DE ESTACIÓN BASE.....                             | 86        |
| <b>ANEXO II. LISTA DE CÓDIGOS</b> .....              |   | <b>89</b> |
| II.1   | SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA SEÑAL TDT .....                   | 89        |
| II.2   | SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA SEÑAL LTE .....                   | 90        |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. EVOLUCIÓN DEL ESPECTRO DE LA BANDA DE TELEVISIÓN (470 MHz-862 MHz) .....               | 1  |
| FIGURA 2. BANDA DE 800 MHz [3].....  | 2  |
| FIGURA 3. BANDA DE 700 MHz [5].....  | 3  |
| FIGURA 4. MAPA DE REGIONES DETERMINADAS POR LA ITU. ....   | 4  |
| FIGURA 5. ESPECTRO POR DEBAJO DE 1 GHz EN LAS DISTINTAS REGIONES DE LA ITU (FUENTE: AEGIS) ..... | 5  |
| FIGURA 6. SISTEMA DE RADIOTELEFONÍA Y SISTEMA CELULAR, RESPECTIVAMENTE.....                      | 8  |
| FIGURA 7. ESTRUCTURA DE FRAME GSM.....   | 9  |
| FIGURA 8. TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE POR CANALIZACIÓN.....                                      | 11 |
| FIGURA 9. DIFERENCIAS ENTRE OFDM Y OFDMA .....   | 12 |
| FIGURA 10. COMPARACIÓN ENTRE TÉCNICAS UTILIZADAS EN DL Y UL DE LTE .....                         | 13 |
| FIGURA 11. CONSTELACIÓN QPSK.....  | 14 |
| FIGURA 12. ERROR VECTOR MAGNITUDE (EVM).....   | 15 |
| FIGURA 13. CONSTELACIÓN 16QAM.....   | 15 |
| FIGURA 14. CONSTELACIÓN 64QAM.....   | 16 |
| FIGURA 15. ESQUEMA DE CÓDIGOS DE CANAL EN SISTEMA LTE.....                                       | 17 |
| FIGURA 16. TURBO ENCODER.....  | 18 |
| FIGURA 17. TURBO DECODER.....  | 18 |
| FIGURA 18. TAILBITING CONVOLUTIONAL ENCODER.....   | 19 |
| FIGURA 19. DIFUSIÓN DE LOS SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN EL MUNDO.....             | 21 |
| FIGURA 20. ECOS PRODUCIDOS POR MÚLTIPLES CAMINOS DE LA SEÑAL EN SU PROPAGACIÓN.....              | 23 |
| FIGURA 21. ESCENARIO 1 -SEÑAL TDT INTERFIRIENDO SOBRE SEÑAL LTE.....                             | 25 |
| FIGURA 22. ESCENARIO 2 -SEÑAL LTE INTERFIRIENDO SOBRE SEÑAL TDT.....                             | 26 |
| FIGURA 23. EXPLICACIÓN VISUAL DEL LEAKAGE.....   | 29 |
| FIGURA 24. MÁSCARA TRANSMISOR TDT (BW = 8 MHz).....  | 29 |
| FIGURA 25. RESPUESTA EN FRECUENCIA RX DEL DUPLEXOR.....  | 30 |
| FIGURA 26. RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO IF DEL RECEPTOR LTE.....                           | 31 |
| FIGURA 27. MÁSCARA DE EMISIÓN DE LTE.....  | 32 |
| FIGURA 28. RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO RF TDT.....  | 33 |
| FIGURA 29. RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO IF TDT.....  | 33 |
| FIGURA 30. MODULACIONES EN LTE.....  | 41 |
| FIGURA 31. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 0 M.....                    | 42 |
| FIGURA 32. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 500 M.....                  | 42 |
| FIGURA 33. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 1 KM.....                   | 42 |
| FIGURA 34. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 2 KM.....                   | 42 |
| FIGURA 35. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 3 KM.....                   | 43 |
| FIGURA 36. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 5 KM.....                   | 43 |
| FIGURA 37. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 7 KM.....                   | 43 |
| FIGURA 38. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 13 KM.....                  | 43 |
| FIGURA 39. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 0 M.....                    | 44 |
| FIGURA 40. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 500 M.....                  | 44 |
| FIGURA 41. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 1 KM.....                   | 45 |
| FIGURA 42. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 1,5 KM.....                 | 45 |
| FIGURA 43. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 2,5 KM.....                 | 45 |
| FIGURA 44. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 3,5 KM.....                 | 45 |
| FIGURA 45. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 0 M.....                    | 46 |
| FIGURA 46. ZONA DE COBERTURA LTE. DISTANCIA ENTRE ESTACIONES BASE DE 500 M.....                  | 46 |







|   |           |
|---|-----------|
| <i>FIGURA 151. ZONA DE COBERTURA TDT EN MACROCELDA LTE. DISTANCIA BS 36 KM.....</i> | <i>74</i> |
| <i>FIGURA 152. ZONA DE COBERTURA TDT EN MACROCELDA LTE. DISTANCIA BS 22 KM.....</i> | <i>74</i> |
| <i>FIGURA 153. ZONA DE COBERTURA LTE PARA UNA PTX DE 40 W.....</i>                  | <i>76</i> |
| <i>FIGURA 154. ZONA DE COBERTURA LTE PARA UNA PTX DE 0,5 W.....</i>                 | <i>76</i> |

# ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1. VALORES DE LOS PARÁMETROS PARA EL ESTUDIO DE LA COEXISTENCIA.....     | 27 |
| TABLA 2. EFECTO DEL DUPLEXOR SOBRE LOS CANALES DE TDT (800 MHz).....           | 30 |
| TABLA 3. EFECTO DEL TRANSMISOR TDT (800 MHz).....                              | 31 |
| TABLA 4. EFECTO DEL FILTRO IF DE LTE (800MHz).....                             | 31 |
| TABLA 5. EFECTO DEL DUPLEXOR SOBRE LOS CANALES DE TDT (700 MHz).....           | 32 |
| TABLA 6. EFECTO DEL TRANSMISOR LTE EN LA BANDA DE 800 MHz.....                 | 34 |
| TABLA 7. EFECTO DEL FILTRO RF TDT EN LA BANDA DE 800 MHz.....                  | 34 |
| TABLA 8. EFECTO DEL FILTRO IF TDT EN LA BANDA DE 800 MHz.....                  | 34 |
| TABLA 9. EFECTO DEL FILTRO RF TDT EN LA BANDA DE 700 MHz.....                  | 34 |
| TABLA 10. VALORES DE SINR PARA EL ESTUDIO.....                                 | 35 |
| TABLA 11. RADIO DE COBERTURA LTE.....  | 36 |
| TABLA 12. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE A.....                  | 42 |
| TABLA 13. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE B.....                  | 44 |
| TABLA 14. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE C.....                  | 46 |
| TABLA 15. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE A.....                  | 47 |
| TABLA 16. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE B.....                  | 49 |
| TABLA 17. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE C.....                  | 50 |
| TABLA 18. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 58 SOBRE A, B Y C.....           | 52 |
| TABLA 19. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL A SOBRE 60.....                  | 54 |
| TABLA 20. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL A SOBRE 59.....                  | 56 |
| TABLA 21. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL A SOBRE 58.....                  | 58 |
| TABLA 22. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL B SOBRE 60.....                  | 59 |
| TABLA 23. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL B SOBRE 59.....                  | 61 |
| TABLA 24. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL B SOBRE 58.....                  | 62 |
| TABLA 25. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL C SOBRE 60.....                  | 64 |
| TABLA 26. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL C SOBRE 59 Y 58.....             | 65 |
| TABLA 27. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE A, B Y C.....           | 67 |
| TABLA 28. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE A, B Y C.....           | 69 |
| TABLA 29. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DEL CANAL 58 SOBRE A, B Y C.....           | 70 |
| TABLA 30. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DE LOS CANALES A, B Y C SOBRE 60 Y 59..... | 72 |
| TABLA 31. PARÁMETROS PARA EL EFECTO DE LOS CANALES A, B Y C SOBRE 58.....      | 73 |







# 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

La llegada de las tecnologías digitales y de nuevos sistemas de compresión de información ha favorecido, a la hora de transmitir televisión, a disminuir el número de frecuencias necesarias para ello. La televisión analógica utilizaba, desde los años 30, bandas de frecuencia de VHF –*Very High Frequency*- desde 47 MHz a 230 MHz y de UHF –*Ultra High Frequency*- desde 470 MHz a 862 MHz. El traslado de ésta a la televisión digital permitió una mejor gestión del espectro radioeléctrico y posibilitó la obtención de un dividendo en forma de nuevas frecuencias disponibles, conocido como Dividendo Digital (DD). Gracias a esta migración, en el espectro que se necesitaba para transmitir un programa de televisión analógica ahora se pueden transmitir seis programas de televisión digital con una calidad similar. Por lo tanto, las frecuencias que han quedado libres pueden aprovecharse y utilizarse para otros fines.

Debido al momento de auge en el que se encuentran las tecnologías móviles en estos tiempos, es la prestación de servicios de banda ancha móvil el principal demandante. En Europa, se decidió que el conjunto de frecuencias que se utilizaría para este motivo en el continente entero, sería la banda de 800 MHz, en concreto desde 790 MHz hasta 862 MHz. Para poder hacer uso del Dividendo Digital como banda ancha es necesario que el conjunto de frecuencias sea contiguo, por lo que en España la liberación del DD dio lugar a un proceso de reordenación de frecuencias para que la banda de 800 MHz estuviera disponible, ya que ésta estaba ocupada por algunos canales de la Televisión Digital Terrestre (TDT) y, además, las frecuencias del DD estaban esparcidas. A finales del primer trimestre del 2015, la banda de 800 MHz quedó libre y se asignó a los operadores de telefonía móvil para que pudieran dar servicio de banda ancha de cuarta generación (4G).

En la Figura 1 se puede ver la evolución del espectro de la banda de televisión [1].

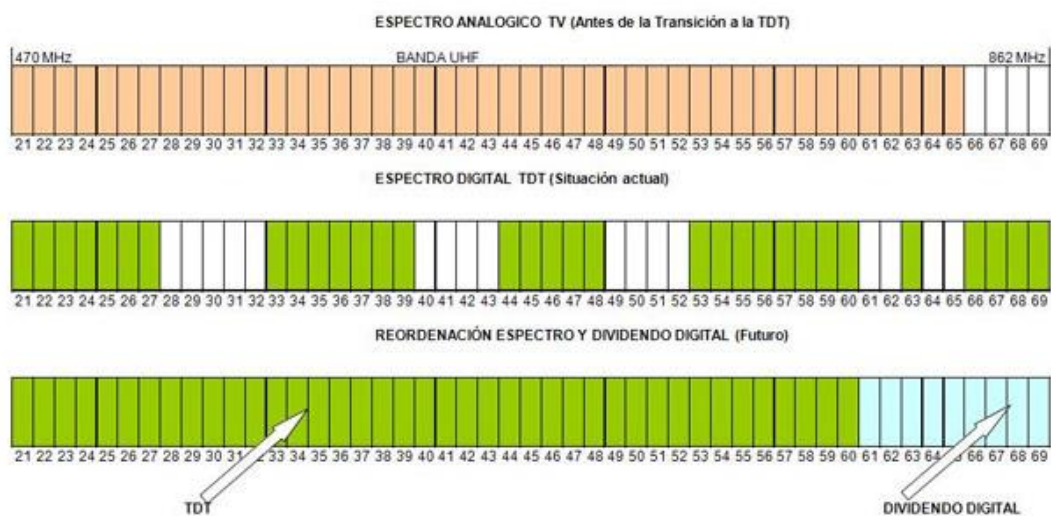


Figura 1. Evolución del espectro de la banda de televisión (470 MHz-862 MHz)

## 1.1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN

Este Trabajo de Fin de Máster (TFM) se basa en el estudio de la coexistencia del sistema *Long Term Evolution* (LTE) con el sistema de Televisión Digital Terrestre (TDT) en las bandas de 700 MHz y 800 MHz.

Debido al Dividendo Digital, al migrar de la televisión analógica a la digital, y a la determinación por parte de Europa de que los nuevos servicios de banda ancha inalámbrica ocuparían la banda de 800 MHz, en España se tuvo que poner en marcha un plan para la liberación del Dividendo Digital que tenía que ser realizado en el plazo establecido, minimizando las molestias a los ciudadanos y reduciendo el impacto en las televisiones.

La disposición de las frecuencias exigida por Europa consistía en *frequency-division duplex* (FDD) de los canales organizados en  $2 \times 30$  MHz, con bloques de ancho de banda de 5 MHz o 10 MHz y un *duplex gap* –rango de frecuencias entre los canales del *uplink* (UL) y *downlink* (DL) que no se utiliza en comunicaciones móviles- de 11 MHz. El FDD DL empezaría en 791 MHz y el UL en 832 MHz.

La radio-interferencia entre tipos diferentes de servicios es controlada, normalmente, por una banda de guarda que se utiliza para separar asignaciones diferentes o asegurar una separación espacial suficiente [2]. Ya que la banda de frecuencia más alta destinada a la TDT termina en 790 MHz y la banda de frecuencia más baja de LTE empieza en 791 MHz, existe solamente un espacio de 1 MHz sin utilización (ver Figura 2), luego es necesario el estudio de la coexistencia entre estos dos sistemas en esta banda de 800 MHz para saber si es posible la convivencia entre ambos, así como determinar si la banda de guarda asignada es suficiente o debería ser mayor. Esto es así porque al estar tan próximos es muy probable que se produzcan interferencias en algunas zonas, siendo más acusadas en los bordes de cobertura.

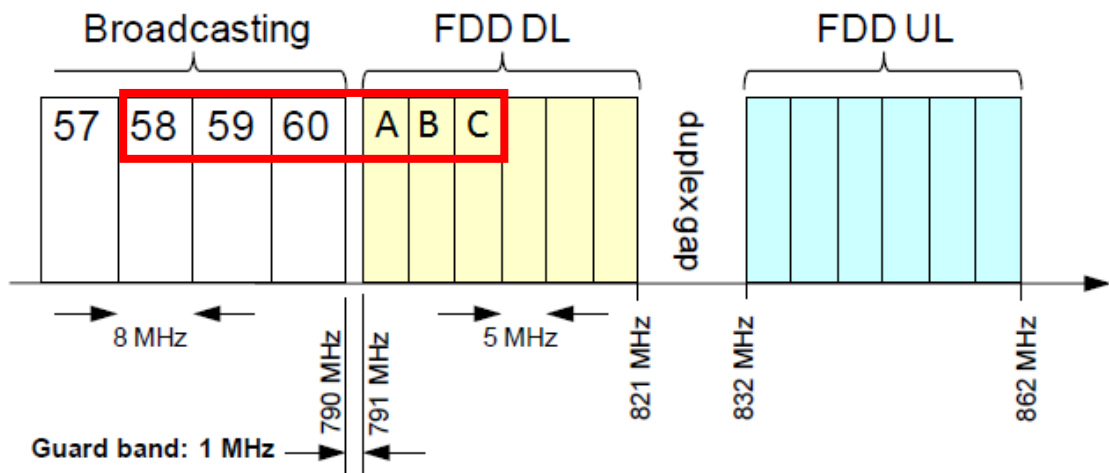


Figura 2. Banda de 800 MHz [3]



En otras partes del mundo, como se comentará en el Estado del Arte, la banda asignada para la red inalámbrica se encuentra en 700 MHz. Además, algunos países de Europa tienen intenciones de establecer en esta banda los servicios móviles, dando lugar a un segundo Dividendo Digital (DD2) sobre 2017 [4]. Por tanto, también se realizará un estudio de la coexistencia entre TDT y LTE en esta banda (ver Figura 3).

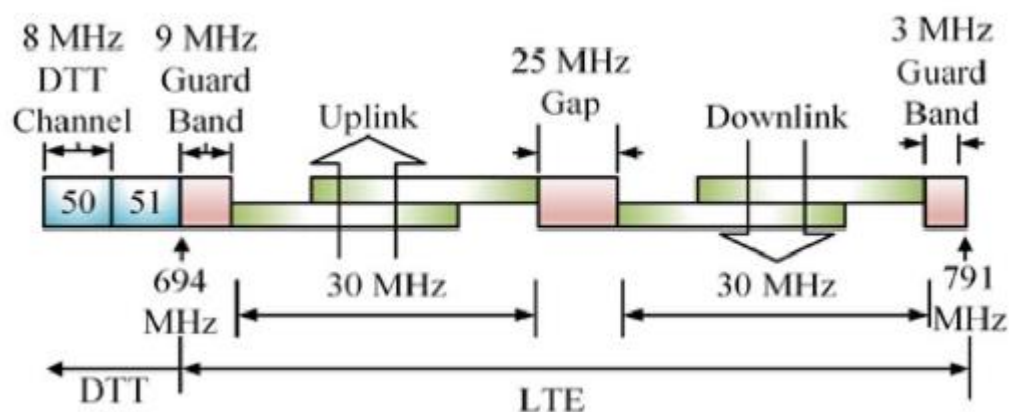


Figura 3. Banda de 700 MHz [5]

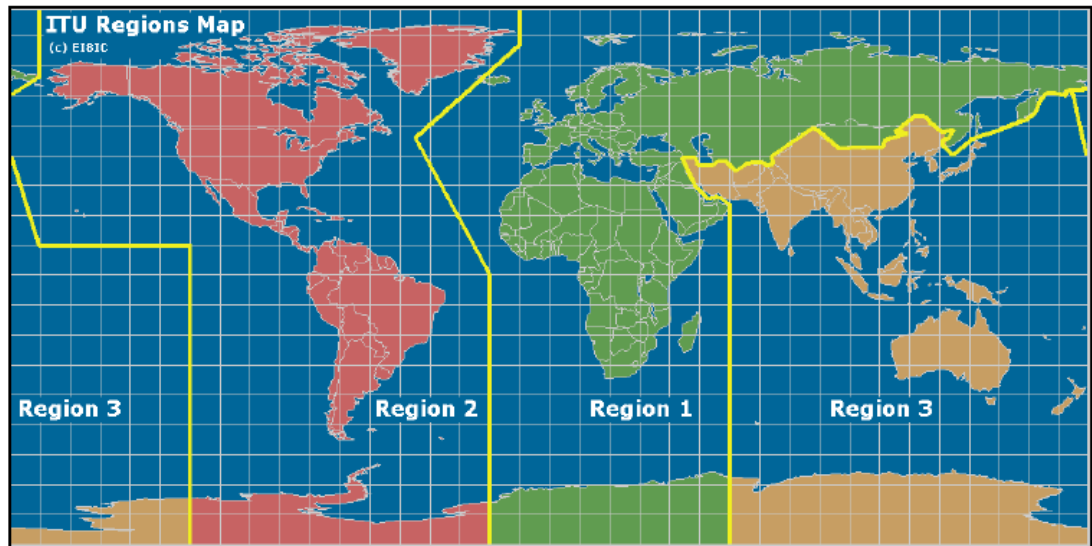
Como puede verse en la Figura 2, en la banda de 800 MHz el LTE *downlink* está ubicado en la parte baja de la banda, mientras que el *uplink* en la parte alta (*reverse duplex*, para reducir algunos efectos de interferencia entre los teléfonos y los servicios *broadcast*). En cambio, en la Figura 3, se ve que en la banda de 700 MHz es el UL el que está en la parte baja de la banda y el DL en la parte alta, como suele ser normalmente. Como los teléfonos móviles suelen estar más cerca de los receptores de TDT que de las estaciones base móviles, las interferencias son mayores, siendo ésta la razón por la que en Europa se ha propuesto dejar una banda de guarda de 9 MHz [4], bastante mayor a la que en España se ha dejado en la banda de 800 MHz.

En este Trabajo de Fin de Máster se tratará como objeto de estudio, para la banda de 800 MHz (ver Figura 2), los tres últimos canales de TDT: Canal 60 (782 MHz - 790 MHz), 59 (774 - 782 MHz) y 58 (766 MHz - 774 MHz), y los tres primeros canales de LTE, que se referirán como Canal A (791 MHz - 796 MHz), B (796 MHz - 801 MHz) y C (801 MHz - 806 MHz). Se realizará una comparativa de los efectos de cada uno de ellos sobre los demás y se analizarán los resultados de cobertura obtenidos.

Por otro lado, para la banda de 700 MHz se considerarán los tres últimos canales de TDT: Canal 51 (686 MHz - 694 MHz), 50 (678 MHz - 686 MHz) y 49 (670 MHz - 678 MHz), y los tres primeros de LTE, que se llamarán, también, Canal A (758 MHz - 763 MHz), B (763 MHz - 768 MHz) y C (768 MHz - 773 MHz).

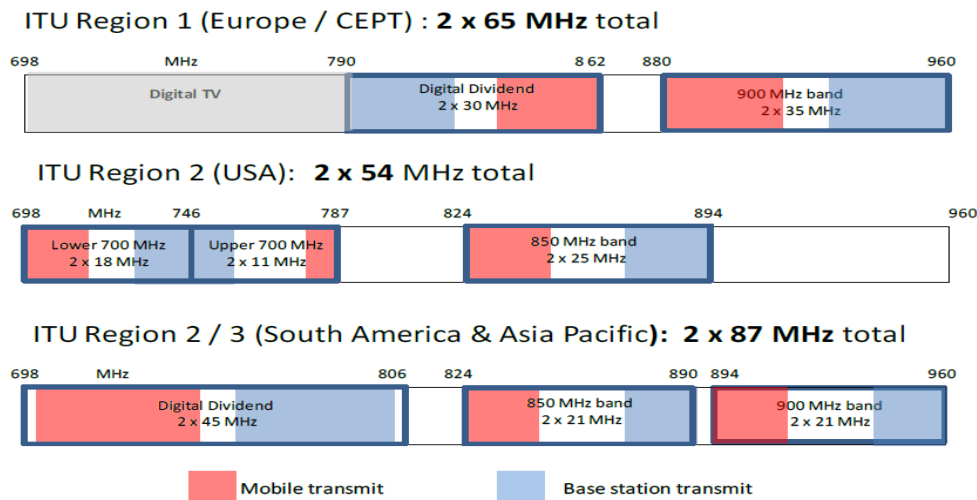
## 1.2 ESTADO DEL ARTE

Existen distintos estudios, en diferentes países (siendo el primero que los realizó Reino Unido), sobre la coexistencia de los sistemas de LTE y TDT en la banda de 800 MHz, la correspondiente al Dividendo Digital. La Conferencia Regional de Radiocomunicaciones (RRC) de la Región 1 (Europa y África) de la ITU (*International Telecommunications Union*) de 2006 acordó utilizar la banda UHF (470 MHz - 862 MHz) para los servicios de radiodifusión, mientras que en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007, la ITU asignó la parte superior de la banda UHF a LTE [6]. Así el espectro queda dividido a lo largo del mundo en tres regiones (ver Figura 4): Región 1 - Europa y África-, Región 2 - América- y Región 3 - Asia y Oceanía-.



*Figura 4. Mapa de regiones determinadas por la ITU.*

En las Regiones 1 y 3 el Dividendo Digital se realizó en la banda 800 MHz, mientras que en la Región 2 fue en la banda de 700 MHz. En la Figura 5, se muestra una comparación de los espectros en cada una de las tres regiones de la ITU por debajo de 1 GHz con el Dividendo Digital.



**Figura 5. Espectro por debajo de 1 GHz en las distintas regiones de la ITU (fuente: Aegis)**

Para la banda de 800 MHz en Europa, se presentan en la referencia [7] requisitos generales sobre la coexistencia entre DVB-T y LTE para diferentes escenarios, tanto en interiores como en exteriores. En [8] se muestra que el rendimiento de la tecnología *broadcast* (DVB-T) puede verse muy afectado por las señales LTE adyacentes si no se dispone de una banda de guarda de ancho suficiente. Además, en [6] se demuestra que en el escenario en el que se encuentra una estación base LTE cerca de un receptor TDT, es necesario contar con un filtro externo entre la antena de televisión y el receptor TDT.

Así mismo, existen estudios sobre este mismo tema realizados por Organismos Internacionales, como el CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*); DIGITALEUROPE en el que se establecen distintos tipos de interferencia y sus soluciones posibles [9]; *Digital Video Broadcasting (DVB)* o el ITU. Concretamente, en el Reino Unido se realizó un estudio sobre el rendimiento de DVB-T sobre un tejado, con una recepción fija, utilizando el estándar 64-QAM [10], en el que se probaron los filtros paso-bajo diseñados por las empresas *Technetix* y *Braun*.

Por otro lado, para la banda de 700 MHz se presenta en [11] unos requisitos generales sobre la coexistencia entre DVB-T y LTE, en exteriores e interiores, con simulaciones Monte Carlo. La CEPT realizó un estudio en el que se indica el nivel de emisiones no deseado para la banda inferior del DD, que correspondería al canal 48-49 (694 MHz) [12].

La mayoría de los estudios realizados sobre la coexistencia de estos dos sistemas son trabajos específicos, como por ejemplo en una banda de guarda dada, modo de transmisión TDT, un estándar de LTE, etc., por lo que es bastante difícil extrapolarlo a diferentes escenarios. Recientemente, se ha publicado un *paper* en el que se investiga la coexistencia entre TDT y 4G LTE en las bandas del Dividendo Digital, utilizando medidas en laboratorio [5], siendo el trabajo más generalista y con más escenarios de estudio de los que se han encontrado hasta el momento.

En este TFM, se estudiará la coexistencia de LTE y TDT en las bandas de 800 MHz y de 700 MHz para distintos escenarios. Éstos serán:

-Caso 1: Sistema LTE que recibe señal transmisora interferente de TDT, para las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

-Caso 2: Sistema TDT que recibe señal de transmisión interferente de LTE, para las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

Por lo tanto, se obtendrá en un mismo documento un estudio amplio y bastante completo sobre la coexistencia de ambos sistemas bidireccionalmente, pues no se ha encontrado ningún trabajo en el que se traten estos aspectos en conjunto.

### **1.3 ESTRUCTURA**

Este Trabajo de Fin de Máster tiene la siguiente estructura de memoria:

- El primer capítulo trata la introducción, el estado del arte de la coexistencia entre los sistemas LTE y TDT, los objetivos y la motivación del proyecto.
- El segundo capítulo se basa en las características principales de los estándares LTE y TDT sobre los que se realizarán todos los estudios pertinentes de este trabajo.
- En el tercer capítulo se presentarán los escenarios sobre los que se realizará el estudio de la coexistencia de los sistemas y se explicará cómo se han realizado las simulaciones para poder ver las coberturas.
- El cuarto capítulo corresponde a la muestra y análisis de los resultados obtenidos tras la ejecución de las soluciones implementadas en el capítulo anterior.
- En el último capítulo se hablará de las conclusiones de este Trabajo de Fin de Máster, así como de las líneas de trabajo futuro.
- Por último, se presenta un glosario de abreviaturas utilizadas en este documento, el Anexo I en el que se recogen algunas de las características de las antenas de ejemplo para este tipo de estudio y el Anexo II con el listado de códigos implementados para las simulaciones de ambos escenarios.

## 2. SISTEMAS IMPLICADOS: LTE Y TDT

En este capítulo, teniendo en cuenta los objetivos y motivación de este TFM y antes de proceder a su implementación, se hará una explicación sobre los sistemas implicados en el estudio. Es necesario tener una idea clara sobre las tecnologías, las principales características, las modulaciones que utilizan y las codificaciones de canal de LTE y TDT para, posteriormente, poder simular su comportamiento y realizar un buen trabajo sobre la coexistencia entre ambos.

### 2.1 SISTEMA LTE

En los tiempos actuales, cada vez es más utilizado el acceso a internet, ya sea para descargar aplicaciones, jugar on-line, mantenerse informado a través de los periódicos, etc., por lo que el número de dispositivos que se encuentran en los mercados ha crecido considerablemente. Así, *Long Term Evolution* (LTE), tecnología de transmisión de datos de banda ancha inalámbrica, ha sido diseñada para dar soporte, de bajada y subida de datos a internet, de millones de teléfonos y dispositivos móviles, permitiendo dar un mejor servicio y mejorando la red.

#### 2.1.1 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL

Antes de entrar en detalle en el sistema LTE, se procede a realizar una breve explicación sobre la historia de la tecnología móvil a lo largo del tiempo.

Ésta lleva en el mundo desde los años 70, pero ha ido cambiando de manera tan rápida que hace que lo que actualmente se conoce tenga poco que ver con lo original. Bien es cierto que toda esta evolución ha sido bastante transparente a los usuarios, pues en 40 años las funcionalidades han mejorado y se han incrementado, el coste ha descendido y los nombres han cambiado, pero el fondo de todo esto, no ha llegado de forma clara a toda la gente [13].

##### a. Primera Generación (1G)

La primera generación de telefonía móvil trataba de un conjunto de celdas interconectadas, dando servicio a los usuarios que se encontraban dentro de la zona de cobertura de la torre transmisora.

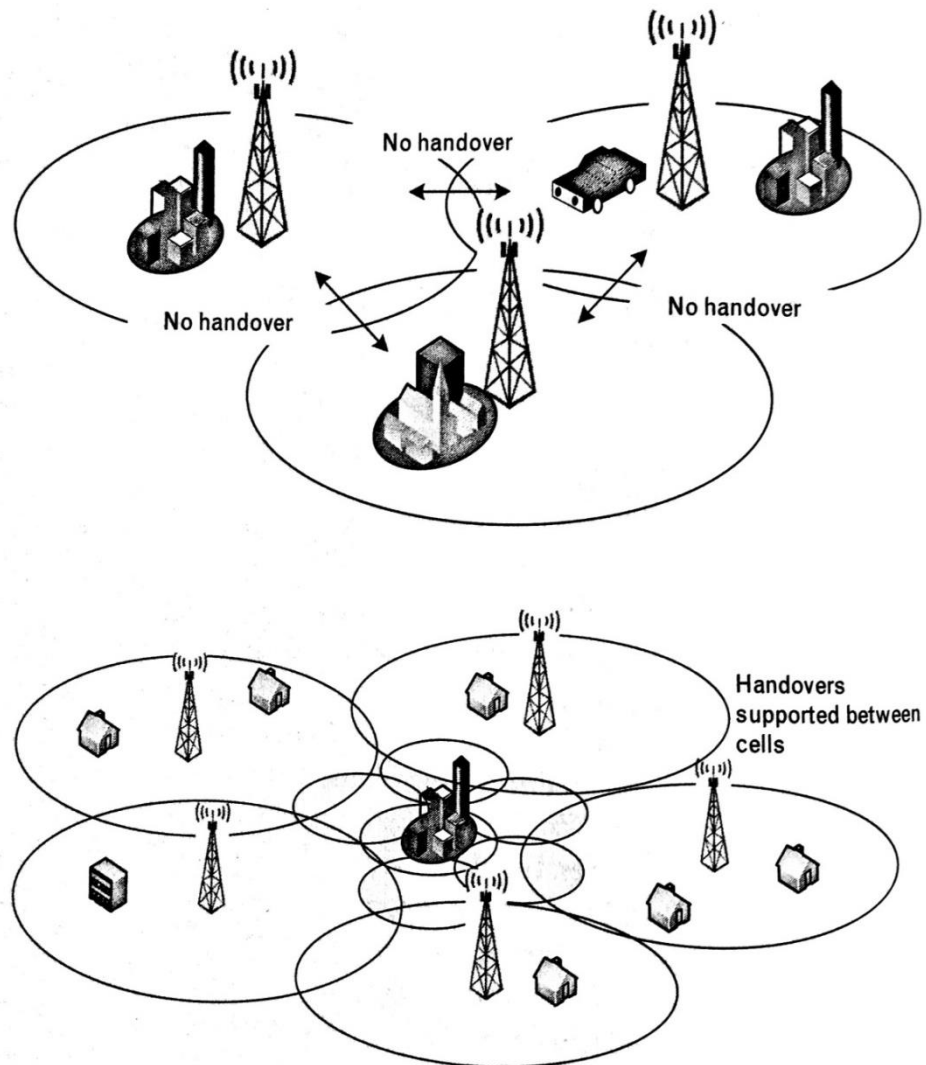
Fue en los años 70 cuando se realizó la primera llamada desde un teléfono, pero hasta los años 80 no se lanzó el sistema *Nordic Mobile Telephony* 450 MHz por Ericsson. Bien es cierto que el primer sistema de radio-telefonía salió a la luz poco después de la Segunda Guerra Mundial, en los Estados Unidos, pero al ser radio, no permitía *handover* ni *roaming* (ver Figura 6). El

número de llamadas simultáneas era muy reducido, pues se necesitaba un canal de frecuencia separado para cada una. Por tanto, la primera generación móvil supuso un gran avance, pues se podían reutilizar las frecuencias, las redes soportaban *handover*, el usuario podía desplazarse de una estación base a otra y seguir manteniendo la conversación.

Se trataba de una generación de comunicación todavía analógica con la que se podía establecer una comunicación por voz, pero solamente alcanzando frecuencias de unos 900 MHz.

Los protocolos en los que se basaban las redes dependían de los fabricantes, por lo que era difícil la utilización de los dispositivos en distintas redes y su interconexión.

A pesar de que la capacidad para transmitir datos, las baterías y la calidad de voz eran bajas, 1G salió adelante y consiguió tener alrededor de 20 millones de usuarios.



**Figura 6. Sistema de radiotelefonía y sistema celular, respectivamente.**

## b. Segunda Generación (2G)

La segunda generación nació en los años 90 cuando se introdujeron las redes basadas en un protocolo estándar conocido como GSM (*Global System for Mobile Communications*). El objetivo de éste era interconectar las redes y dar la posibilidad de conectarse con un mismo terminal a ellas (concepto de *roaming*). Con esta generación se dio paso a la comunicación digital, tanto para señales como tráfico, en frecuencias entre 900 MHz y 1800 MHz, en Europa, consiguiendo que la calidad de voz y la velocidad para transmitir datos fuera mayor, así como dar la posibilidad de enviar SMS y faxes. Mientras que 1G sólo podía tener una llamada por cada canal de frecuencia (sistema *full-duplex*), la segunda generación tiene cada canal dividido entre varios usuarios con técnicas de *time-division* o *code-division*, llevando a incrementar la capacidad (ver Figura 7).

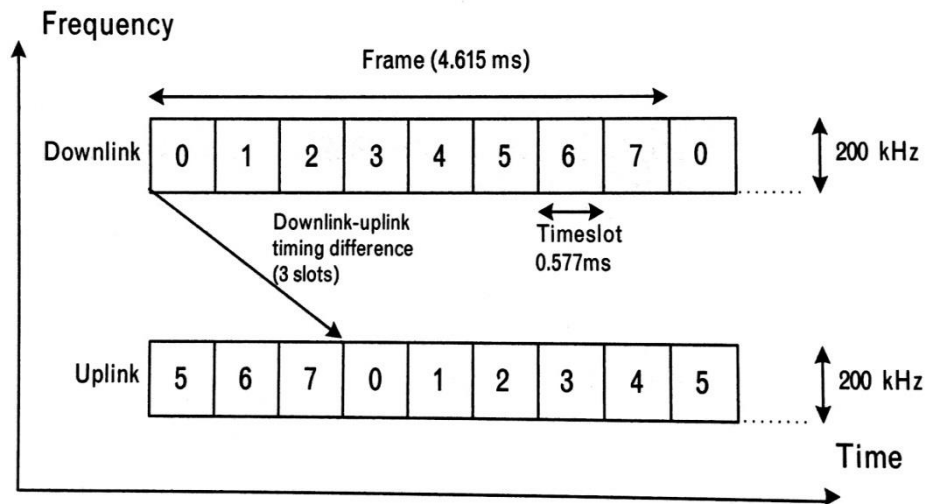


Figura 7. Estructura de frame GSM.

Aunque se utilizó durante mucho tiempo, la tasa de bajada era bastante baja (9,6 kbps), pero gracias al 2G la popularidad de los servicios de telefonía móvil creció y permitió seguir mejorando, consiguiendo transmitir datos a 56 kbps y 114 kbps, envío y recepción de imágenes y dio la posibilidad de navegar por Internet, pues se implantó en las redes la tecnología GPRS (*General Packet Radio Service*). También, se desarrolló la tecnología EDGE (*Enhanced Data rates for Global Evolution*) que permitía una tasa de bajada de hasta 384 kbps. Todo esto se encuentra dentro de una generación intermedia entre la segunda y la tercera, conocida como 2.5G.

## c. Tercera Generación (3G)

Gracias al éxito, como se comentó con anterioridad, que tuvo la segunda generación, se necesitó una mayor capacidad y mayor velocidad. Con la

tercera generación se consigue una mejora en la potencia de las antenas, lo que conlleva a poder tener más conexiones, una mayor calidad de voz y velocidad más alta para transmitir datos -hasta 2 Mbps-.

Gracias a la velocidad conseguida, se pudieron desarrollar aplicaciones de audio, imágenes con comunicación en tiempo real, etc. Además, se amplió el *roaming* de voz y mensajes y se incluyó la transferencia de datos. Todo esto con algunas limitaciones que vinieron dadas por la capacidad de la red o las antenas.

Esto fue posible debido a la aparición del estándar UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) -que utiliza la tecnología WCDM (*Wideband Code Multiple Access*)- basado en el protocolo IP con paquetería, que permite la integración con internet, manteniendo la velocidad de crecimiento de los servicios móviles. Esta tecnología tiene dos modos: *frequency division duplex* (FDD) and *time division duplex* (TDD). En el modo FDD, el uplink y downlink utilizan bandas de frecuencia separadas, mientras que el modo TDD utiliza en UL y DL la misma frecuencia.

#### **d. Cuarta Generación (4G)**

El nombre de 4G es como se conoce coloquialmente a *Long Term Evolution* (LTE). En un principio, los requisitos que se establecieron por la ITU para que fuesen cumplidos por LTE, no se consiguieron, por lo que se recomendó asociar LTE a 3.9G y establecer el estándar *LTE-Advanced* como el 4G real.

La transición entre el primer LTE y LTE-A es menor que la sufrida de UMTS a LTE, pues ésta última ya incluía la mayoría de los cambios, como la nueva interfaz basada en OFDMA, que se explicará en el apartado 2.1.2.

LTE-A es compatible con los dispositivos 4G, pero no con los 3G. Esta tecnología ofrece grandes ventajas a los usuarios, en particular en la transferencia de datos, seguridad y optimización, pues combina las tecnologías que presentan mejor rendimiento. Así, esta tecnología es la clave del despliegue masivo de internet móvil.

La cuarta generación, conocida también como la generación de Alta Velocidad, permite una velocidad de conexión a Internet que empieza a ser comparable con la de la fibra óptica. Se han introducido mejoras en las antenas, su cobertura, capacidad y calidad de señal. Se puede navegar con los dispositivos móviles hasta 120 Mbps teóricos con un ancho de banda de 20 MHz, lo que permite poder disfrutar de todas las comodidades del tiempo real, contando con una calidad muy alta.

### **2.1.2 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE**

Cuando dos o más nodos o estaciones están conectadas y utilizan un acceso común es lo que se conoce como acceso múltiple. Es este apartado, se presentarán primero los



protocolos de acceso múltiple correspondiente a la canalización, para posteriormente llegar a explicar la técnica OFDMA utilizada en LTE.

La canalización es un método de multiplexación en el que el ancho de banda disponible del enlace se comparte en el tiempo, frecuencia o a través de códigos. Así se tiene (ver Figura 8):

**a. Frequency Division Multiple Access (FDMA)**

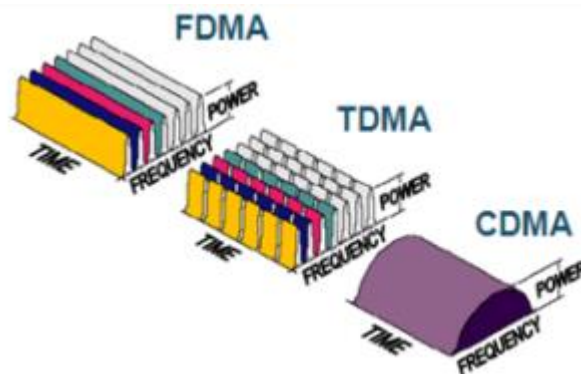
El ancho de banda disponible se divide en bandas de frecuencia, por lo que cada estación base tiene una banda asignada para enviar datos. Para evitar algunas interferencias se utilizan bandas de guarda.

**b. Time Division Multiple Access (TDMA)**

En este caso, las estaciones comparten el ancho de banda del canal, pero cada una tiene asignada una ranura de tiempo durante la que pueden enviar los datos. Se necesita situar al principio de cada ranura unos bits de sincronización para conseguir ésta y, para reducir los retardos de propagación producidos por grandes distancias, se insertan tiempos de guarda.

**c. Code Division Multiple Access (CDMA)**

Esta técnica utiliza una tecnología de espectro expandido y un esquema especial de codificación, en el que a cada transmisor se le asigna un código único y ortogonal respecto al resto y, en el receptor, se captan las señales emitidas por todos los transmisores al mismo tiempo, seleccionando la señal adecuada gracias al esquema de codificación. Por lo tanto, todos los usuarios pueden transmitir simultáneamente, sin existir separación en el tiempo y con el mismo ancho de banda.



*Figura 8. Técnicas de acceso múltiple por canalización*

En los sistemas de comunicación de tercera generación utilizaban la interfaz WCDMA -forma parte de las técnicas de CDMA- que contaba con buena calidad, pero como

los requisitos han cambiado y se ha evolucionado a una nueva generación, los sistemas basados en OFDM (*Orthogonal Frequency División Multiplexing*) son los que pueden conseguir llegar a cumplir las expectativas para LTE, con algunas excepciones.

OFDM es un sistema en el que la banda ancha portadora está compuesta por muchas sub-portadoras, mientras que en WCDMA sólo se utiliza una, siendo ésta la mayor diferencia entre ambos sistemas. La tecnología OFDM es algo antigua, ha sido utilizada para muchos sistemas, como *wireless LAN* estándar 802.11<sup>a</sup>/g/n, DVB-T y para WiMAX móvil, que es el otro estándar de 4G que existe hoy en día.

OFDMA (*Orthogonal Frequency División Multiple Acces*) es, simplemente, una variante de OFDM (ver Figura 9) en la que distintas sub-portadoras OFDM pueden ser repartidas entre diferentes usuarios. Esto transforma OFDM en un esquema de acceso múltiple, permitiendo que varios usuarios accedan a los recursos del sistema de manera simultánea. Se puede entender como una combinación de OFDMA con TDMA y se parece a CDMA, ya que asigna un código a cada transmisor.

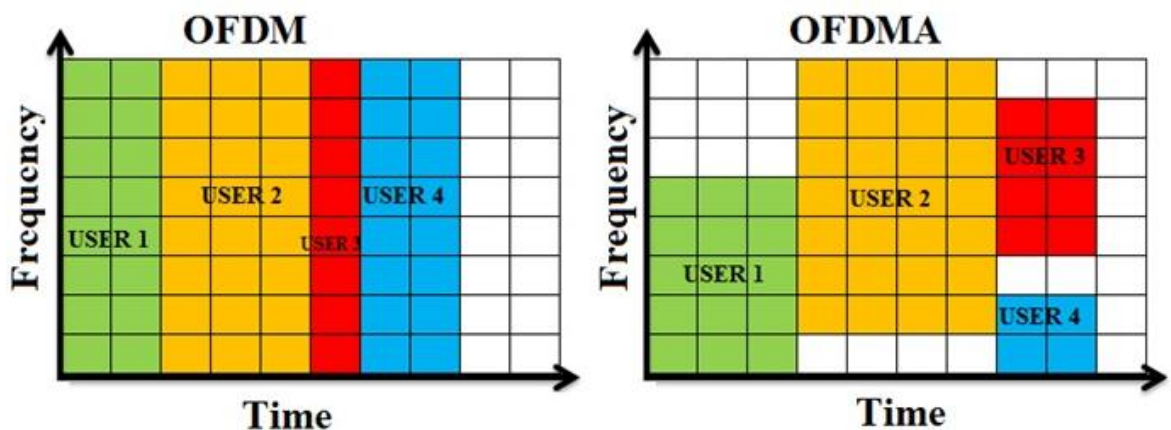


Figura 9. Diferencias entre OFDM y OFDMA

OFDM es utilizado de distinta manera en LTE *downlink* y *uplink* (ver Figura 10). Para el DL, LTE utiliza OFDMA quien manda la utilización de MIMO (*multiple in, multiple out*). Contar con MIMO significa que los dispositivos tienen múltiples conexiones para una celda, lo cual incrementa la estabilidad de la conexión, reduce la latencia e incrementa el rendimiento de la conexión.

En el caso del UL, LTE utiliza un esquema para generar la señal SC-FDMA, siendo ésta mejor para el *uplink* porque tiene un *peak-to-average power ratio* (PAPR) mejor que OFDMA. Así, esta técnica combina las ventajas de los sistemas OFDM con un PAPR bajo. Es parecido a OFDM, excepto que al principio de la cadena de transmisión la señal basada en tiempo es convertida a frecuencia utilizando la FFT, extendiendo la información a todas las sub-portadoras, en contraposición al *downlink* donde los bits son enviados paralelamente, en sub-portadoras separadas.

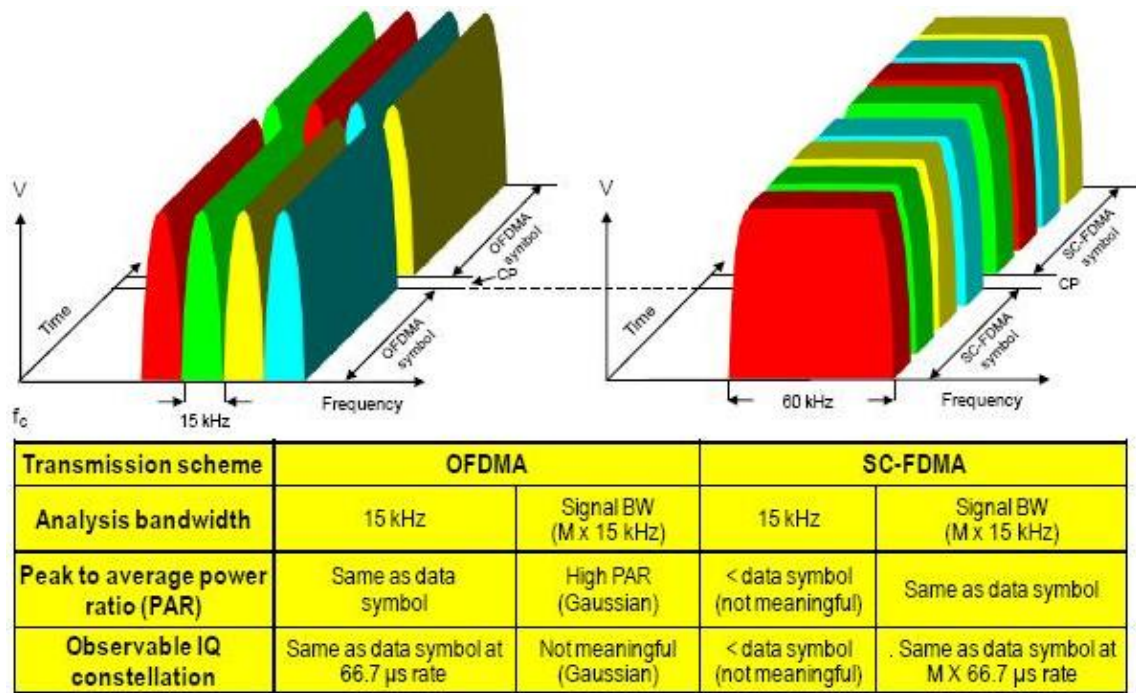


Figura 10. Comparación entre técnicas utilizadas en DL y UL de LTE

### 2.1.3 ESQUEMAS DE MODULACIÓN

La modulación engloba un conjunto de técnicas que se utilizan para transportar información sobre una onda portadora. Según la *American National Standard for Telecommunications*, la modulación es el resultado del proceso de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. Con esto se permite aprovechar el canal consiguiendo transmitir más información de manera simultánea y mejorar frente a interferencias o ruidos.

Existen dos tipos de modulación: analógica, que se realiza a partir de señales analógicas de información, y digital, a partir de señales generadas por fuentes digitales. En el caso de estudio, LTE utiliza modulaciones digitales y dentro de éstas, dependiendo del tipo de enlace, las pertenecientes al grupo de *Phase Shift Keying* (PSK) y *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

#### a. Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

En la modulación por desplazamiento de fase (PSK) se varía la fase de la portadora entre un número de valores discretos.

En LTE se utiliza *Quadrature PSK*. Esta modulación digital se presenta en la constelación por cuatro puntos equidistantes del origen de coordenadas (ver Figura 11). QPSK puede codificar dos bits por símbolo y la asignación de éstos se hace con el código Gray –entre dos símbolos contiguos, éstos solo se diferencian en 1 bit, por lo que la tasa de error de bits es menor-.

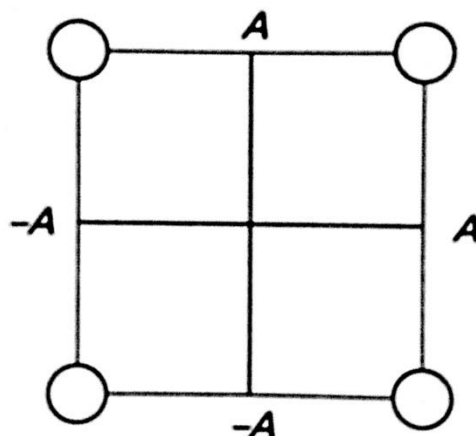


Figura 11. Constelación QPSK.

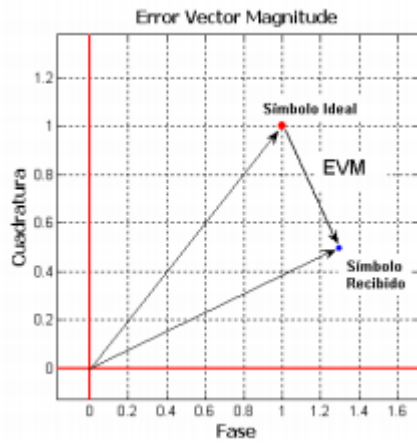
Un sistema QPSK puede utilizarse para duplicar la tasa de datos manteniendo el ancho de banda o mantener la tasa de datos en comparación con BPSK (*Binary PSK* –2 símbolos con 1 bit de información cada uno-) dividiendo a la mitad el ancho de banda.

Aunque QPSK puede verse como una modulación cuaternaria, es más sencillo verla como dos portadoras en cuadratura moduladas de forma independiente. Así, los bits impares (o pares) se utilizan para modular la componente en cuadratura de fase de la portadora y los demás se usan para modular la componente en fase de ésta.

La modulación QPSK es una de las técnicas de modulación más populares y se suele utilizar para la comunicación por satélite y red de cable debido a que es resistente, fácil de implementar y mejor que otras técnicas en cuanto a soportar el ruido. También se utiliza en el acceso múltiple de división de código (como es el caso que se va a estudiar).

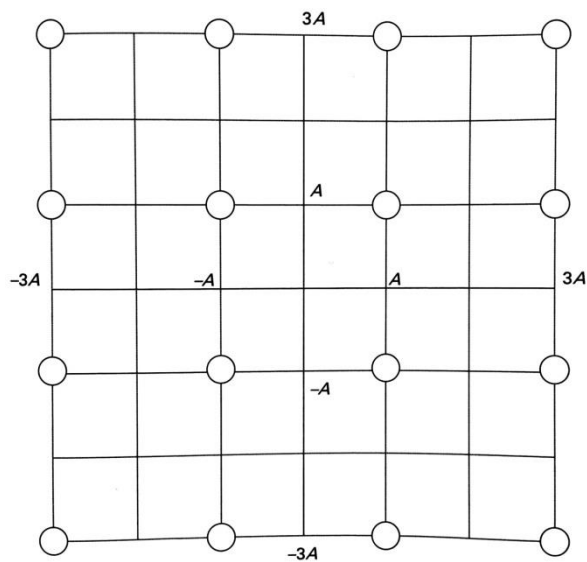
#### b. 16QAM y 64 QAM

El uso de sistemas de modulación QAM es necesario en esta interfaz (LTE) para conseguir aumentar la velocidad de transmisión de los datos, ya que modulaciones de más alto nivel aportan mayor número de bits eficaces por símbolo y, consecuentemente, mayor tasa binaria. Como inconveniente de éstas se puede decir que las constelaciones que presentan son más complejas y más sensibles a interferencias, por lo que necesitan mayores requisitos de potencia para mantener el mismo EVM (*Error Vector Magnitude*) (ver Figura 12) –representa la diferencia vectorial entre la posición ideal del símbolo en la constelación frente al valor detectado en condiciones no ideales de interferencia, cuantificado como el módulo del vector diferencia entre ambos [14]-.



**Figura 12. Error Vector Magnitude (EVM)**

En el caso de LTE, en concreto, se utilizan las modulaciones 16QAM con 4 bits por símbolo y 64QAM con 6 bits por símbolo. Al cambiar a una constelación de orden superior (ver Figura 13 y 14), es posible transmitir más bits por símbolo, pero si la energía media de la constelación se mantiene, los puntos estarán más cerca siendo más susceptibles al ruido y a la distorsión, haciendo que la tasa de bits de error sea más alta. Esto se traduce en que las modulaciones QAM de orden superior tienen la posibilidad de ofrecer más datos, pero menos fiables.



**Figura 13. Constelación 16QAM.**

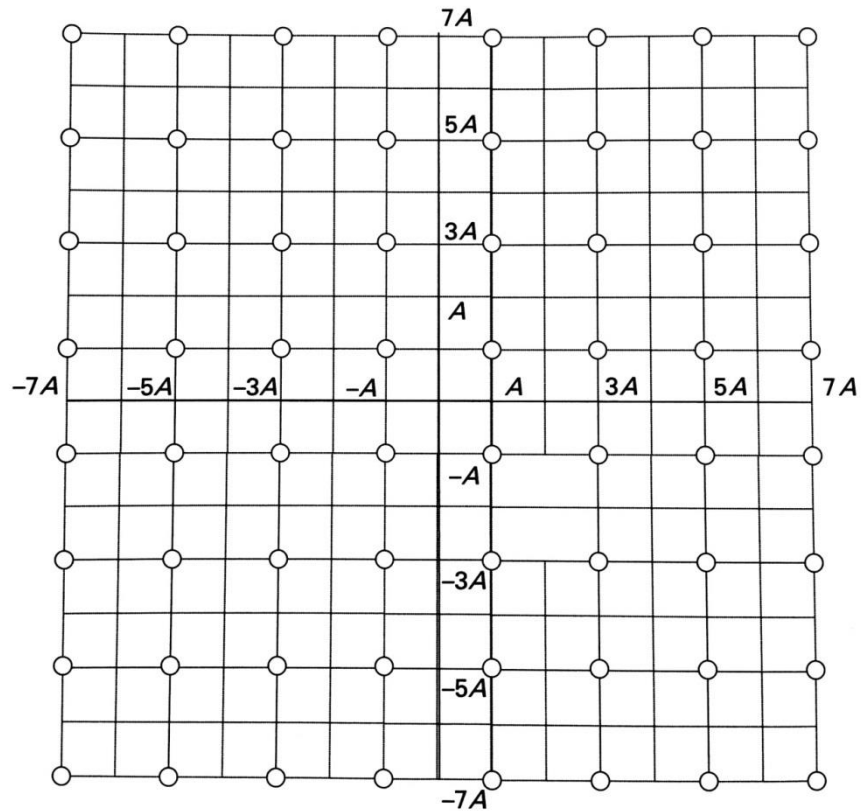
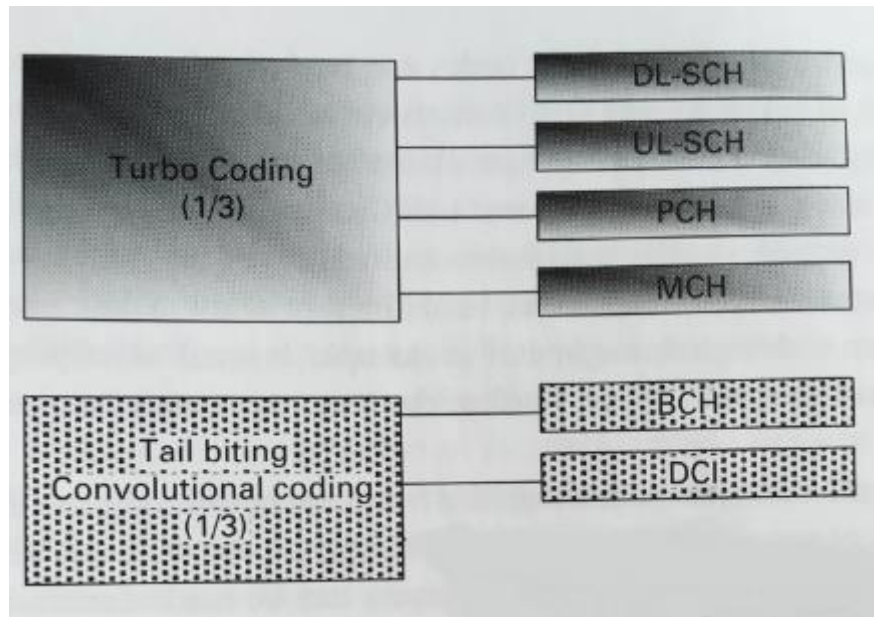


Figura 14. Constelación 64QAM.

#### 2.1.4 CODIFICACIÓN DE CANAL

Como se ha comentado anteriormente, OFDM presenta muchas ventajas frente a las modulaciones que utilizan una única portadora, pero tiene algunas vulnerabilidades que hacen que su funcionamiento no sea el esperado en entornos inalámbricos móviles. Por lo tanto, en estos sistemas se producen pérdidas de información contenida en las portadoras al transmitirse en canales con desvanecimientos. Así es necesaria la utilización de técnicas de corrección de errores, siendo las más utilizadas las técnicas de codificación de canal.

Los principales esquemas de codificación de canal que se utilizan para los diferentes canales de transporte en los sistemas LTE se resumen en la Figura 15. Los turbo códigos son utilizados para grandes paquetes de datos, como es el caso de la transmisión de datos del *downlink* y *uplink*, paginación y multidifusión *broadcast* (MBMS). Los códigos convolucionales *tailbiting* se usan para bloques que contienen poca información, como en el control *downlink* y *uplink*, así como en el control *broadcast* (BCH).



**Figura 15. Esquema de códigos de canal en sistema LTE.**

Tanto los turbo códigos como los códigos convolucionales que se utilizan en LTE producen códigos sistemáticos. En éstos, todos los bits redundantes son añadidos al final de la palabra código, mientras que en los no sistemáticos, estos bits se mezclan con los bits de información de la salida de la función de codificación. También, en ambos, la salida está compuesta por tres cadenas: la primera contiene los bits de información y las otras dos tienen los bits de paridad.

#### **a. Turbo códigos**

Los turbo códigos se emplean en la mayoría de los sistemas móviles de nueva generación, pues tienen una gran capacidad correctora de errores y no son muy complejos. Son bastante eficientes, ya que pueden estar cerca de alcanzar el límite teórico fijado por la Ley de Shannon. En éstos, la salida del proceso de decodificación es utilizada para reajustar los datos de entrada y al tratarse de un proceso iterativo aumenta la calidad de la salida del decodificador. El codificador utilizado en LTE se muestra en la Figura 16 y está compuesto por dos codificadores convolucionales en paralelo separados por un entrelazador (*interleaver*) [15], que consiste en una matriz rectangular. Cada bloque de datos se codifica dos veces: la primera alimenta el codificador convolucional con la secuencia de bits original y la segunda alterando el orden de la misma con el entrelazador.

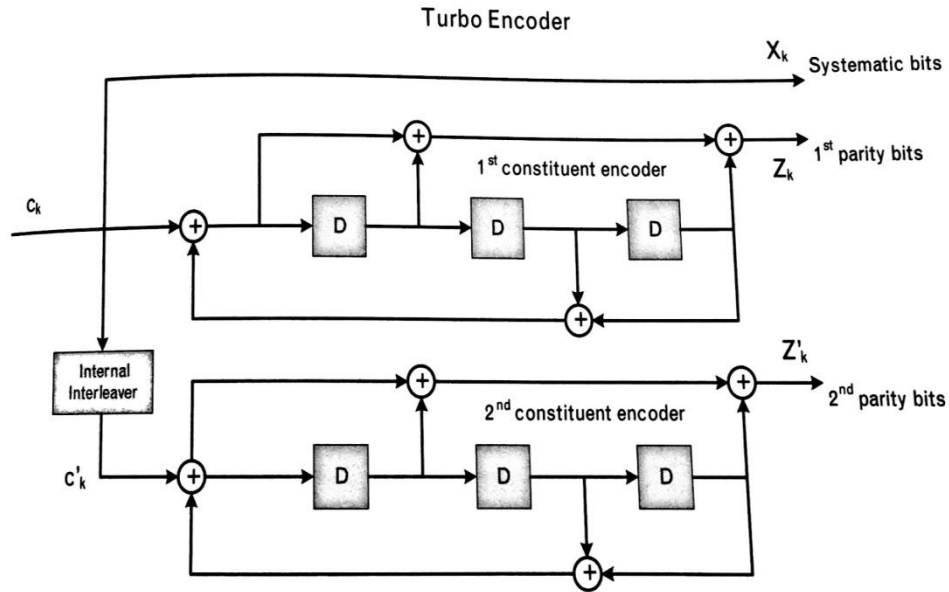


Figura 16. Turbo encoder.

El decodificador se puede ver en la Figura 17 y consiste en dos decodificadores SISO (*soft input soft output*) conectados por entrelazadores y un desentrelazador. La información extrínseca es retransmitida de vuelta desde la salida del segundo decodificador a la entrada del primero. Cada iteración aumenta la estimación de la información, la cual incrementa la estimación de los datos de decodificados.

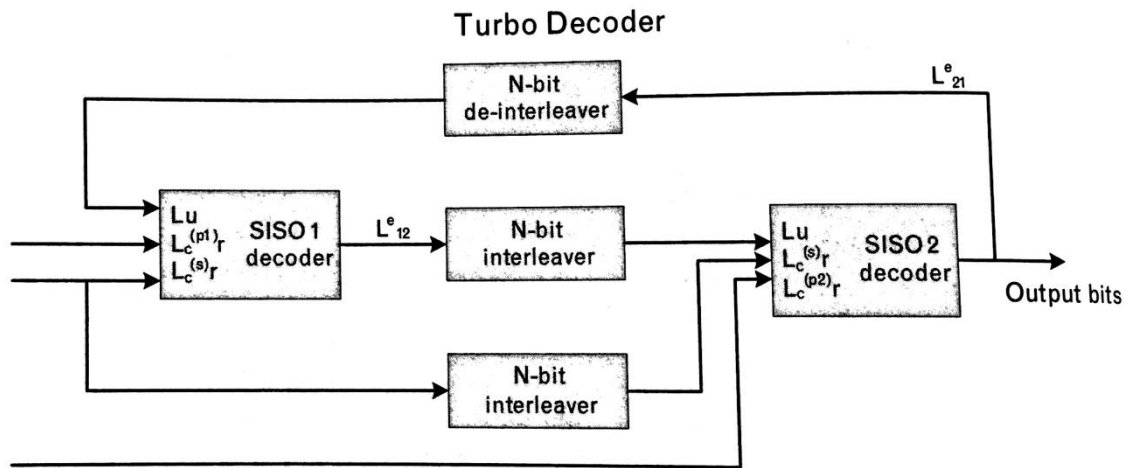


Figura 17. Turbo decoder.

Los parámetros que definen el comportamiento de los turbo códigos son cuatro [16]: la estructura del código convolucional, el método de terminación del *trellis*, el entrelazador empleado y el algoritmo de decodificación implementado en el receptor –es lo único que se puede elegir, los otros tres parámetros están fijados



por el propio sistema-. Como algoritmos que consiguen realizar una decodificación óptima están: *Maximum A Posteriori* (MAP), MAP en el dominio logarítmico (max-log-MAP), SOVA –basado en *Viterbi*-, pero no se detallarán, ya que no es el objetivo del estudio.

### b. Códigos convolucionales *tailbiting*

El esquema de codificación de canal más básico es el de los códigos convolucionales, que se basan en la alimentación de una serie de registros de desplazamiento con una secuencia de símbolos de entrada a codificar. El codificador calcula las salidas con sumas de módulo 2 del contenido de parte de los registros de desplazamiento y de la entrada en cada instante de tiempo. Dependiendo del método utilizado para la inicialización de la memoria del codificador (ver Figura 18) se tienen: códigos *zero tail* o códigos *tailbiting* [16]. Los primeros inicializan el contenido de la memoria del codificador a cero y añaden, al final de cada bloque de datos, otro grupo de ceros para resetear esa memoria facilitando la decodificación, pues el código empieza y termina en un estado conocido. En los códigos *tailbiting* se inicializa la memoria con los últimos bits de bloque que se está codificando, consiguiendo así que el código empiece y termine de la misma manera. Por tanto, las desventajas que añadían los grupos de ceros –incremento de *overheads* (pueden ser bastante significativos para transmisiones de bloques de pequeños tamaños, como es el caso de los canales de control) y pérdida de potencia de transmisión- se solucionan. Además, la tasa de codificación no empeora al evitarse los bits de reseteo.

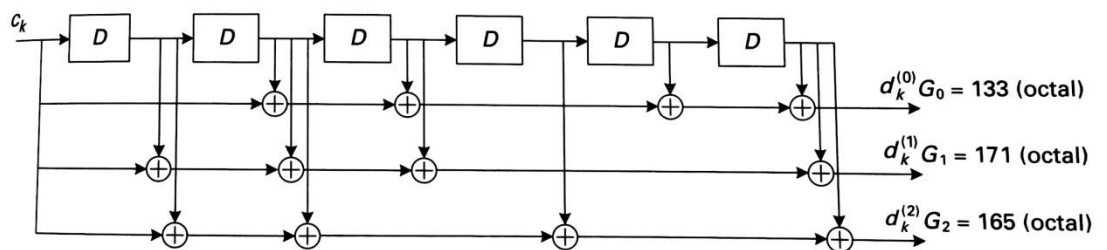


Figura 18. Tailbiting convolutional encoder.

El decodificador puede ser implementado utilizando el algoritmo de *Viterbi*, pero supone que su implementación sea prácticamente inviable en sistemas reales, proponiéndose diversos algoritmos sub-óptimos con carga computacional menor.

El esquema de *tailbiting* puede ser aplicado a turbo códigos, pero la reducción del *overhead* comparado con la complejidad que supondría para éstos es la razón por la que se decidió utilizarlo solamente en códigos convolucionales para sistemas LTE.

## **2.2 SISTEMA TDT**

La radiodifusión se puede dividir en dos grandes grupos: analógica y digital. Los sistemas digitales transmiten video, color y audio en el ancho de banda disponible conjuntamente y, en ellos se pueden transmitir varios canales a la vez ocupando el mismo ancho de banda que un canal analógico, gracias a las técnicas de compresión. Además, son más fáciles de distribuir que estos últimos, ya que tienen menos interferencias y cuentan con una mayor definición y calidad de imagen.

La Televisión Digital Terrestre (TDT) es la transmisión de imágenes en movimiento y su sonido asociado, mediante codificación binaria, a través de una red de repetidores terrestres. Utiliza la tecnología digital más actual y ofrece, además, otros servicios interactivos o de acceso a la información.

### ***2.2.1 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE***

Las ventajas de la TDT son parecidas a las de otros medios de transmisión digital respecto a los analógicos. Algunas de ellas son [18]:

- La calidad de las imágenes es alta, la señal es más inmune a las interferencias y, también, permite la transmisión en alta definición.

- Uso más eficiente del espectro radioeléctrico al transmitir mediante multiplexación más de una señal televisiva. Gracias al diseño de la red de distribución de la señal se pueden utilizar todos los canales de la banda.

- Proporciona la misma cobertura que la televisión analógica, pero con una menor potencia de emisión.

- Es posible la utilización de redes de frecuencia única (SFN) –todos los transmisores radian la misma señal modulada de forma sincronizada y en la misma frecuencia-.

Pese a las ventajas de la transmisión, se encuentran algunos inconvenientes como:

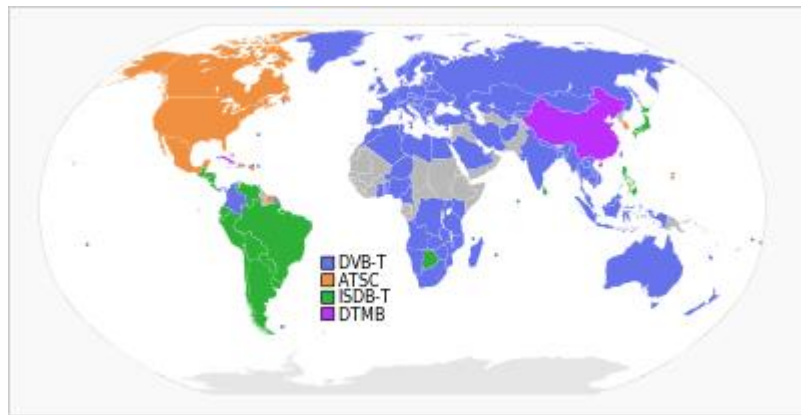
- En los sistemas analógicos, según se va degradando la calidad de la señal en la antena, también se degrada la imagen de la pantalla, pero ésta se sigue viendo, mientras que en uno digital existe un cambio muy rápido entre estar viendo una imagen perfecta y no ver nada.

- No todos los receptores funcionan de la misma manera ante la climatología. Existe poca estabilidad de la señal recibida frente a ésta.

- Es necesario elegir una antena muy selectiva y hay que reducir al máximo el ruido impulsivo.

### 2.2.2 ESTÁNDAR DVB-T2

Existen diferentes estándares aplicables a la Televisión Digital Terrestre, dependiendo de la zona geográfica en la que se encuentre (ver Figura 19). En Europa el estándar que se utiliza es el DVB-T (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial*). Su primera versión apareció en el año 1997 y actualmente se trabaja con una segunda versión DVB-T2. Este estándar no se ha diseñado para reemplazar al primero, sino que por el momento van a coexistir.



**Figura 19. Difusión de los sistemas de televisión digital terrestre en el mundo.**

DVB-T2 es un sistema que transmite audio digital comprimido, vídeo y otros datos en *Physical Layer Pipes* (PLP), utilizando la modulación COFDM, la cual se explicará en el siguiente apartado. Al ofrecer una mayor tasa de bits que DVB-T hace que sea un sistema apto para llevar las señales de televisión de alta definición en el canal de televisión terrestre. En la práctica, debido a las mejoras de la capacidad que aumentan la robustez de la señal, se obtiene un 30% más de ésta pudiendo lanzar *bit-rates* superiores. Además, proporciona la firmeza de la señal contra el exterior y lo consigue utilizando la técnica de rotación de constelaciones y el tiempo e intercalado de frecuencia. Las constelaciones giradas aseguran que la pérdida de información de uno de los componentes del canal pueda ser recuperado en otro. Se asignan los datos como siempre sobre QAM y luego se gira en el plano 'IQ'. Los componentes de 'I' y de 'Q' se envían en momentos diferentes utilizando distintas celdas para garantizar la recuperación de la información si se necesitara.

La nueva versión de DVB-T conlleva un mejor uso del espectro –entre un 30-50% más de ancho de banda-. Para tener una buena protección en cuanto a los altos niveles de ruido e interferencias, se hace uso de LDPC (*Low Density Parity Check*) en combinación con los códigos BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquengham*).

Otra de las características principales del estándar es que permite la reducción de pico de la potencia media utilizada en la estación transmisora. El pico amplificador de

potencia puede ser reducido en un 25%, lo que disminuye la cantidad total de energía que debe ponerse a disposición de la transmisión de altas potencias.

### **2.2.3 TÉCNICA DE MODULACIÓN COFDM**

Para que la Televisión Digital Terrestre suponga una mejora importante frente a la televisión analógica, se debe emplear una modulación robusta frente a multitrayectos. Esta mejora debe permitir la incorporación de nuevos servicios y el aprovechamiento máximo del espectro. Así, es la modulación COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*) la que se utiliza para ello.

Esta técnica consiste en utilizar un número grande de portadoras equiespaciadas en frecuencia y moduladas cada una de ellas en QPSK o QAM, permitiendo que la información que se va a transmitir se reparta entre todas ellas. El ancho de banda del canal es ocupado por todas las portadoras y el espectro de las sub-portadoras se superpone consiguiendo una alta definición espectral.

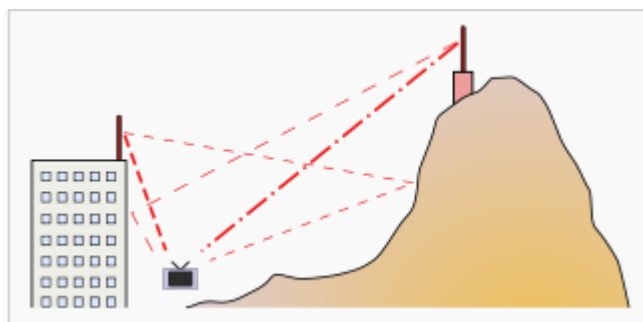
Una ventaja de COFDM es que utiliza una modulación jerárquica que permite integrar la modulación QPSK dentro de la constelación de 16QAM o superior, haciendo posible la transmisión de dos servicios al mismo tiempo.

COFDM es una mejora respecto de OFDM para canales muy selectivos o variantes, ya que puede soportar multitrayecto severo, cancelación de la señal, ruido de impulsos, reducción rápida de la amplitud de la señal y presencia de interferencias de banda estrecha co-canal, pues si se pierde la información de una portadora debido a estas interferencias se pierde una pequeña porción de información que no tiene por qué ser relevante para la calidad de la transmisión.

Este sistema tiene dos modos de operación: 2k y 8k. Entre ellos no existe ninguna diferencia de prestaciones, son dos versiones del mismo sistema cada una preparada para actuar en distintas condiciones de propagación. 2k se utiliza en redes de frecuencia única muy densas –distancias entre transmisores de entre 10-20 km- y 8k para redes de frecuencia única poco densas –distancias del orden de 40-80 km-. En redes de frecuencia múltiple se pueden usar los dos métodos. En España se utiliza el modo de 8k para ambos tipos de redes.

La velocidad de símbolo de cada portadora se hace coincidir con la distancia entre portadoras, por lo que dependerá de la separación de éstas o, para un ancho de banda de canal dado, del número de ellas. Ya que el régimen binario se reparte entre las portadoras, cada una transmitirá a una velocidad más lenta de lo normal.

Al aumentar el número de portadoras, cada símbolo tendrá mayor duración temporal y no afectarán los ecos multitrayecto, pues al mantener cada símbolo más tiempo, éstos traen la misma información reforzando la señal, en vez de interferir con ella. Este caso se da a menudo en las grandes ciudades, donde se puede recibir una señal directa del transmisor más una cierta cantidad de señales retardadas por las reflexiones con los edificios (ver Figura 20).



**Figura 20. Ecos producidos por múltiples caminos de la señal en su propagación.**

La señal modulada tiene un intervalo de guarda –periodo en el que la señal permanece constante, repitiendo un símbolo- así, las señales que lleguen con un retardo menor a este intervalo se pueden aprovechar como señales constructivas para mejorar la recepción.

Por último, comentar un aspecto muy importante de COFDM como es la compartición de un mismo canal por diferentes emisores operando en el mismo territorio estando sincronizados. Esto es lo que se ha comentado en las ventajas de TDT como red de frecuencia única.

#### **2.2.4 CODIFICACIÓN DE CANAL**

El estándar DVB-T2 utiliza dos tipos de codificación de canal que justifican la letra ‘C’ en COFDM: códigos de bloque y códigos convolucionales.

##### **a. Código de bloque**

La fuente de información es segmentada en bloques ‘u’ de longitud fija de largo ‘k’ bits y se codifica en bloques ‘v’ de ‘n’ bits de código (>‘k’), dando una tasa de código  $r = k/n$  [19].

El principio que se utiliza en los códigos de bloque consiste en estructurar los datos en bloques de longitud fija y añadir a cada bloque un cierto número de bits (bits de redundancia). Sólo algunas combinaciones de bits son aceptables y forman una colección de palabras de código válidas.

Cuando los datos se transmiten al receptor puede ser que la palabra que se recibe sea una palabra de código válida o no, por lo que, en este último caso, el receptor puede recrear el bloque original FEC (*Forward Error Correction*) o puede pedir que se retransmita el bloque ARQ (*Automatic Repeat reQuest*).

## **b. Código convolucional**

Como se explicó para el caso de LTE, se basa en registros de memoria y sumas de módulo-2. Estos códigos son recursivos, pues la salida depende de la entrada actual y de las anteriores. La señal de salida, normalmente, tiene un *bit-rate* (velocidad) doble, triple, etc. que la entrada.

En DVB-T2 se usa una doble codificación de canal empleando un código de bloque y un código convolucional. Además, se emplean técnicas de entrelazado (*interleaving*) para evitar bloques de errores a la salida de un demodulador. El entrelazador introduce un cierto desorden de manera que las portadoras adyacentes no sean moduladas por datos consecutivos. Si se produce una pérdida de información llevada por portadoras adyacentes, al deshacer el desorden, el error queda aislado, acortándose la longitud de ráfaga.

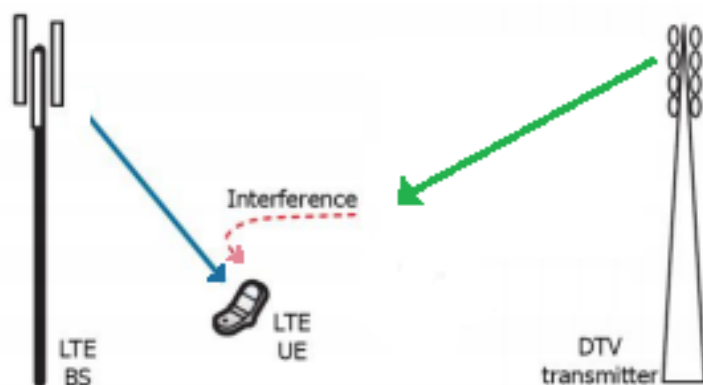
### 3. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y TDT

Una vez analizados los sistemas sobre los que se quiere estudiar la coexistencia, se procede en este capítulo a explicar la metodología seguida –escenarios de trabajo escogidos, parámetros de los sistemas utilizados, etc.-, pues para realizar un buen documento es necesario investigar y definir, de manera adecuada y clara, aquellos puntos importantes sobre los que se va a cimentar éste y tener en cuenta todos los posibles efectos y problemas que pueden causar los sistemas que se van a estudiar. Por lo tanto, se analizarán tanto los aspectos positivos como negativos y las características principales (parámetros) de LTE y TDT para sacar adelante un estudio interesante y útil.

#### 3.1 ESCENARIOS DE TRABAJO ESCOGIDOS

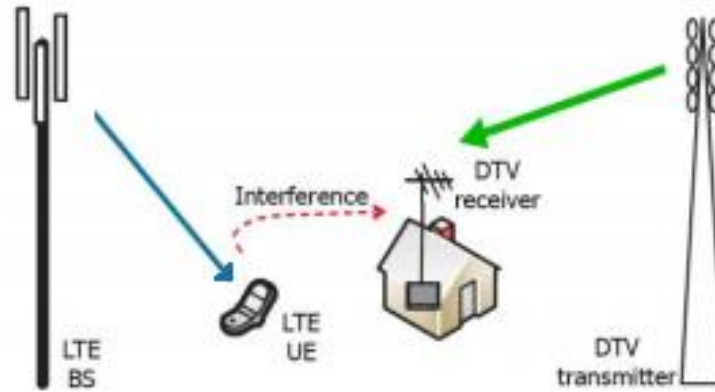
A la hora de escoger los escenarios sobre los que se quiere estudiar la coexistencia entre LTE y TDT, es necesario tener en cuenta que existe una clasificación dependiendo del tipo de enlace de LTE –*downlink* o *uplink*- y el tipo de recepción de TDT –móvil, exterior fijo o interior-. Las situaciones que se van a estudiar en este trabajo se centran en el tipo de enlace de LTE DL y la recepción de TDT en exterior.

El primer escenario a estudiar trata la interferencia producida por la señal de transmisión de una estación base TDT sobre la señal LTE recibida por un usuario que dispone de un dispositivo móvil (ver Figura 21).



*Figura 21. Escenario 1 -señal TDT interfiriendo sobre señal LTE.*

El segundo escenario tratará el caso de una señal LTE en DL interfiriendo sobre una señal receptora TDT (ver Figura 22).



**Figura 22. Escenario 2 -señal LTE interfiriendo sobre señal TDT.**

Todo el estudio se realizará sobre el radio de cobertura para la modulación QPSK -ya que es la que marcará el límite mínimo de señal necesaria para disponer de red LTE o TDT- de la estación base de LTE, encontrándose ésta en el centro, teniendo la estación base TDT en una posición de  $90^\circ$  respecto a la primera y con una distancia entre ambas que se irá variando para que el trabajo sea completo. Se consideraran las bandas de 800 MHz y 700 MHz, como se indicó al principio de esta memoria.

### **3.2 PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO**

En este apartado se resumirán, en la Tabla 1, los valores de los parámetros escogidos para realizar el estudio sobre la coexistencia de LTE y TDT sobre el escenario 1 y 2.

Aclaración: En aquellos casos en los que se muestran dos valores para un mismo parámetro se refiere, respectivamente, a cada uno de los escenarios propuestos, a excepción de la frecuencia, que se indican los valores para cada una de las bandas que se van a estudiar.



|  | Valor     |
|--|-----------|
| Posición Tx TDT [°]                    | 90        |
| Potencia Tx LTE [dBm]                  | 46        |
| Ganancia Tx LTE [dB]                   | 15        |
| PIRE LTE [dBm]                         | 61        |
| PIRE TDT [dBm]                         | 75        |
| Ganancia Rx LTE [dB]                   | 0         |
| Ganancia máxima Rx TDT [dB]            | 12        |
| Altura usuario [m]                     | 1,5 y 15  |
| Altura BS LTE [m]                      | 30        |
| Altura Tx TDT [m]                      | 200       |
| Frecuencia [MHz]                       | 700 y 800 |
| Ancho de banda canal LTE [MHz]         | 5         |
| Ancho de banda canal TDT [MHz]         | 8         |
| Factor de ruido (NF) [dB]              | 7         |
| Pérdidas por Multitrayecto LTE [dB]    | 10 y 6    |
| Pérdidas por <i>Shadowing</i> LTE [dB] | 10 y 6    |
| Pérdidas por Multitrayecto TDT [dB]    | 5 y 2     |
| Pérdidas por <i>Shadowing</i> TDT [dB] | 5 y 2     |

**Tabla 1.** Valores de los parámetros para el estudio de la coexistencia.

### 3.3 MODELO DE PROPAGACIÓN

Se entiende por modelo de propagación a un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos utilizados para representar las características de un sistema inalámbrico en su medio de propagación. Estos modelos son muy importantes en el diseño de sistemas celulares para predecir comportamientos de aspectos diferentes como potencia de transmisión, frecuencia de utilización, altura de las antenas, etc. [17]. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal puede tener entre una estación base y un receptor.

Para el estudio de este TFM, en el que se tienen sistemas LTE y TDT, se ha decidido utilizar el modelo de propagación *Okumura-Hata*, ya que se trata de uno de los mejores modelos en cuanto a precisión en cálculo de las pérdidas por trayecto. Se basa en los datos de pérdidas por propagación de *Okumura* y es válido en las frecuencias de 150 MHz a 1500 MHz, la altura de la antena transmisora deber medir de 30 a 200 metros y la de la antena receptora de 1 a 10 metros.

La ecuación de las pérdidas de este modelo de propagación es la siguiente:

$$L_p [dB] = 69.55 + 26.16 * \log_{10} f_c [MHz] - 13.82 * \log_{10} h_{bs} - a(h_u) + \\ +(44.9 - 6.55 * \log_{10} d [km]) ) \quad (3.1)$$

Donde,

- $f_c$  es la frecuencia de la portadora.

- $h_{bs}$  es la altura de la estación base transmisora.

- $h_u$  es la altura del receptor.

- $a(h_u)$  es el factor de corrección por altura efectiva del usuario receptor.

- $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

Se pueden definir diferentes valores de  $a(h_u)$  para diferentes ambientes de propagación. Para el caso de este TFM, se utilizará la ecuación para ciudades grandes, que depende de la frecuencia:

$$a(h_u) = 8.29[\log_{10}(1.54 * h_u)]^2 - 11 \quad f_c \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.2)$$

$$a(h_u) = 3.2[\log_{10}(11.75 * h_u)]^2 - 4.97 \quad f_c \geq 400 \text{ MHz} \quad (3.3)$$

En el estudio realizado en este Trabajo de Fin de Master se analizarán éstas pérdidas para una distancia máxima de 67 km (radio de cobertura de TDT) entre el transmisor TDT y la estación base LTE.

### **3.4 EFECTO DEL *LEAKAGE***

El *leakage* es un efecto que se produce en señales de longitud finita o segmentos finitos extraídos de señales infinitas donde parece como si parte de la energía se hubiese filtrado desde el espectro original de la señal hacia otras frecuencias (ver Figura 23).

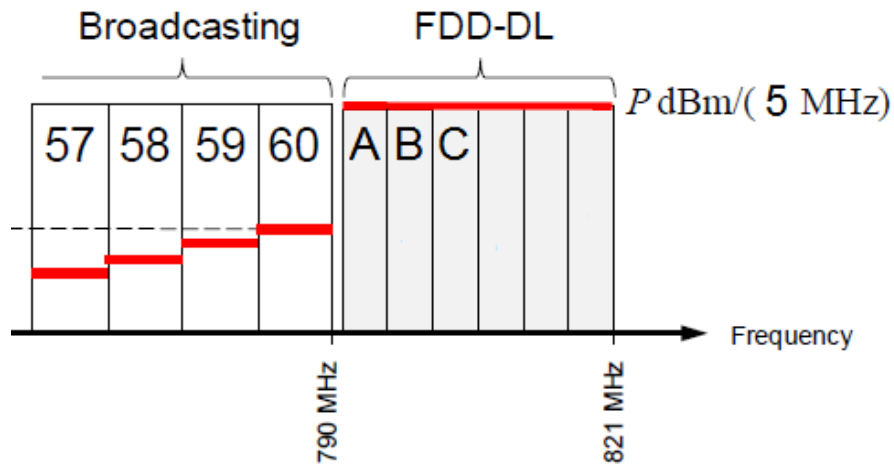


Figura 23. Explicación visual del leakage.

Para proteger los servicios de radiocomunicaciones, se definen máscaras del espectro en la proximidad de las emisiones principales. Así, para el escenario 1, se ha utilizado la máscara de la Figura 24 para el transmisor TDT con una anchura de canal de 8 MHz.

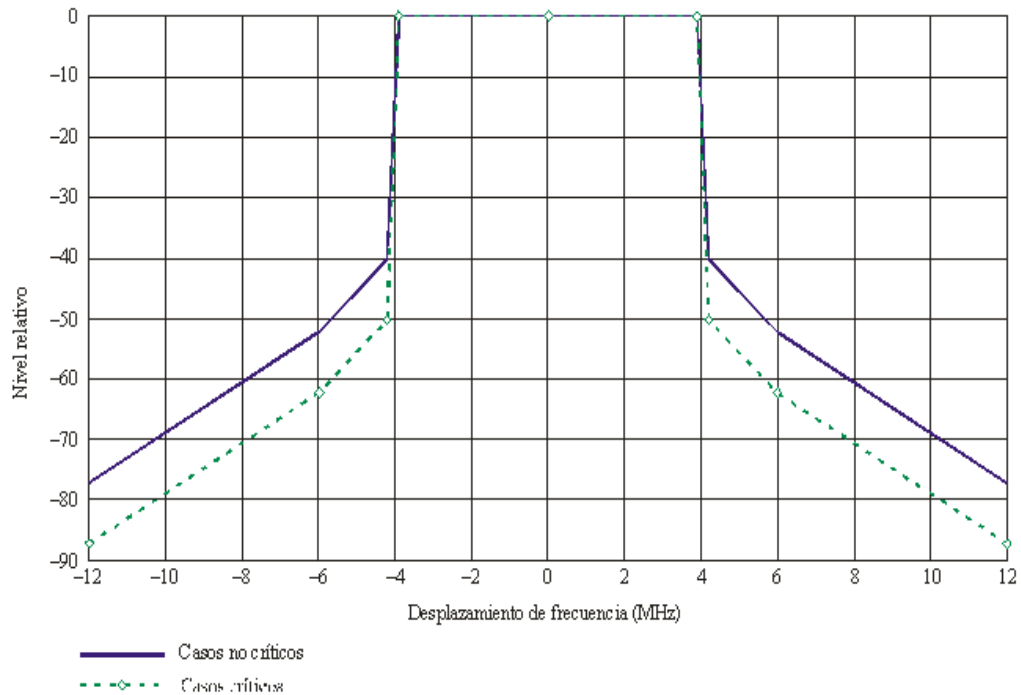


Figura 24. Máscara transmisor TDT (Bw = 8 MHz).

La primera etapa del receptor LTE es un duplexor, que se utiliza para separar el *downlink* del LTE del *uplink* del mismo. El elegido para el estudio en la banda de 800 MHz de este TFM es el 856979 de TriQuint Semiconductor, cuya respuesta en frecuencia se

muestra en la Figura 25. Con ésta, se obtienen los valores en dB que se filtran de la señal LTE a los canales de TDT (ver Tabla 2), lo que provocará mejores resultados en las interferencias que reciben los canales de LTE. El efecto del duplexor sobre los 59 y 58 de TDT es marginal, pues los valores son muy altos.

|      | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|------|----------|----------|----------|
| [dB] | -10,4    | -44,3    | -51,3    |

Tabla 2. Efecto del duplexor sobre los canales de TDT (800 MHz).

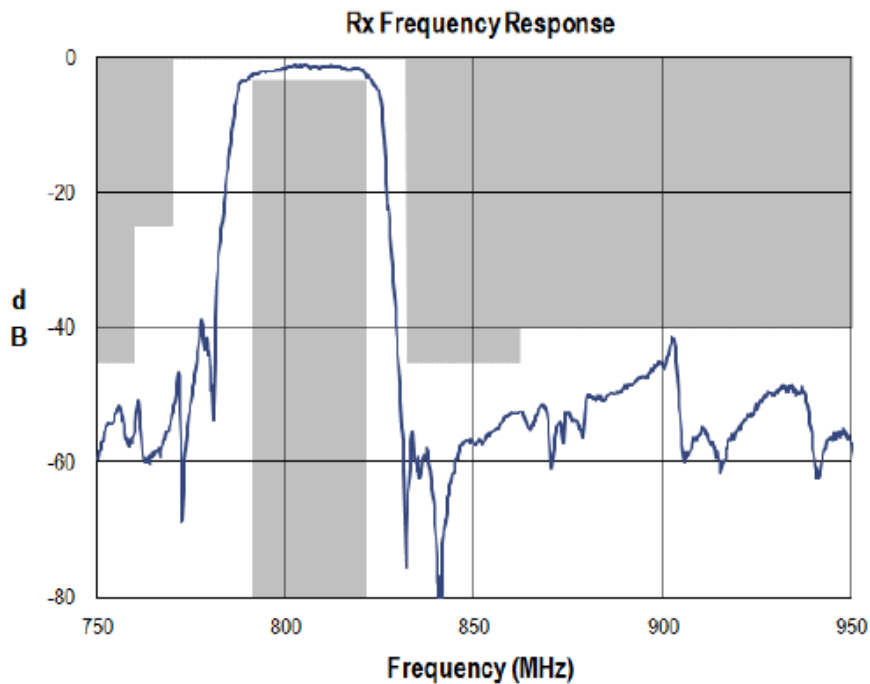


Figura 25. Respuesta en frecuencia Rx del duplexor.

Además, el receptor de la antena LTE, cuenta con un filtro IF (854660 de SAWTEK - compañía de TriQuint-) que tiene la respuesta en frecuencia que se muestra en la Figura 26.

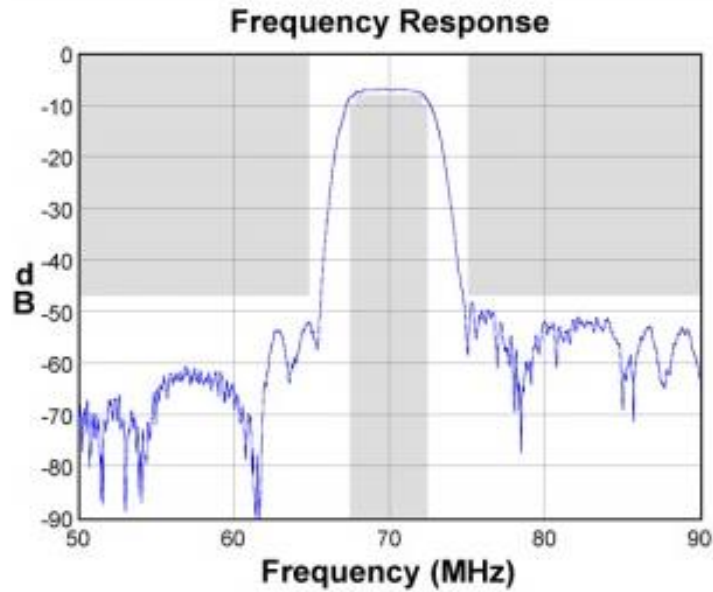


Figura 26. Respuesta en frecuencia del filtro IF del receptor LTE.

Ya que todos estos elementos no son ideales, hay que tener en cuenta el efecto que tienen sobre las señales de los canales que se van a estudiar. Así, en las Tabla 3 y 4, se presentan los valores calculados según las gráficas de las figuras anteriores para la banda de 800 MHz. Una vez se tienen éstos, se calcula el *leakage* total que se tendrá en cuenta en el programa al calcular el valor de la interferencia de la señal.

| [dB]     | Canal A | Canal B | Canal C |
|----------|---------|---------|---------|
| Canal 60 | -52,8   | -72,6   | -78     |
| Canal 59 | -78     | -78     | -78     |
| Canal 58 | -78     | -78     | -78     |

Tabla 3. Efecto del transmisor TDT (800 MHz).

| [dB]    | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|---------|----------|----------|----------|
| Canal A | -33,7    | -64,8    | -70      |
| Canal B | -66,6    | -69,7    | -70      |
| Canal C | -67,5    | -70      | -70      |

Tabla 4. Efecto del filtro IF de LTE (800MHz).

En el caso del escenario 1, pero para la banda de 700 MHz, el efecto del transmisor es igual para todos los canales, por la máscara del transmisor TDT elegido, siendo éste -78 dB; el del duplexor (*B8538 de TDK*) se recoge en la Tabla 5, y el del filtro IF de LTE es de -70 dB.

|      | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|------|----------|----------|----------|
| [dB] | -39,6    | 41       | -45,6    |

Tabla 5. Efecto del duplexor sobre los canales de TDT (700 MHz).

En cuanto al escenario 2, como máscara de emisión de LTE se ha tomado la de la Figura 27, de la cual se ha obtenido el efecto sobre los canales de TDT haciendo una aproximación sobre el rango de valores mostrado en azul.

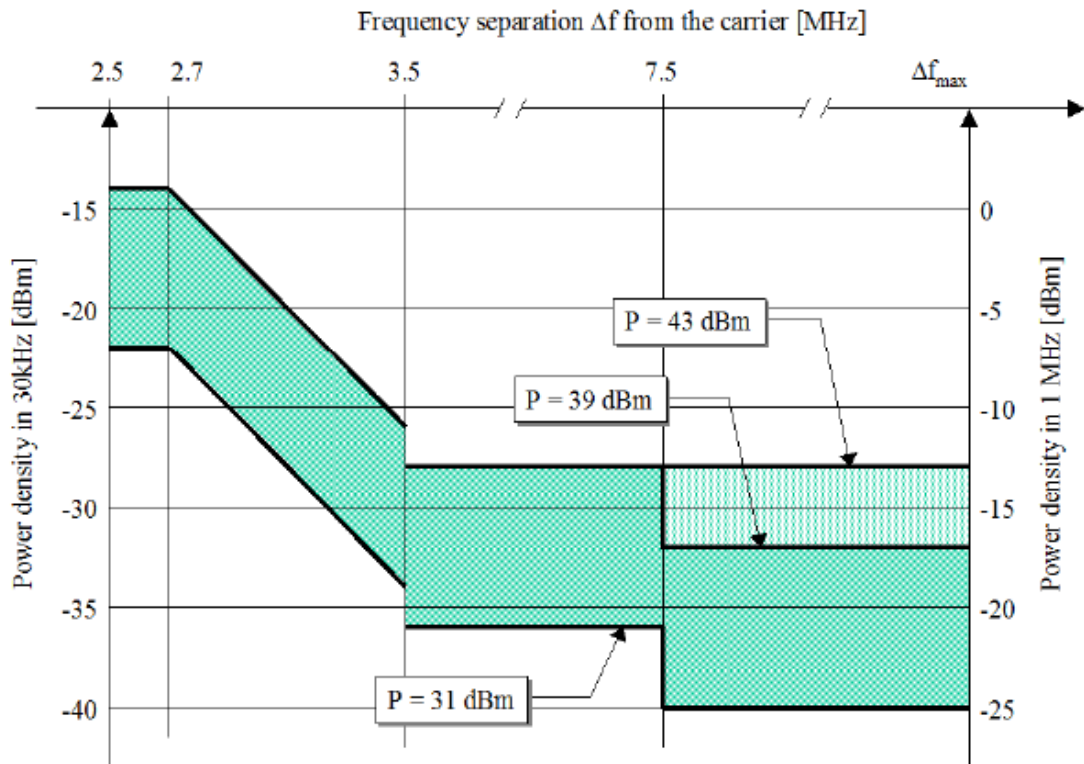


Figura 27. Máscara de emisión de LTE.

El receptor de la antena de Televisión Digital Terrestre cuenta con un filtro RF - SLTE de Spau- (ver Figura 28) y un filtro IF -TB0386A de TAI SAW Technology CO. LTD.- (ver Figura 29).

## SLTE 60 Standard

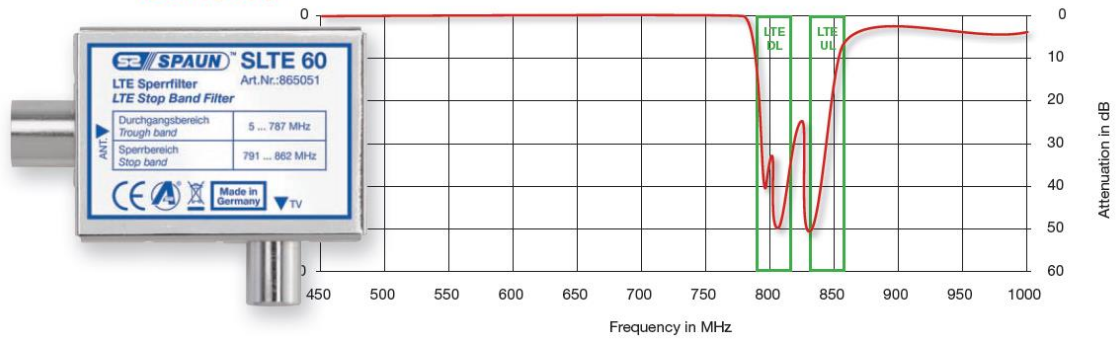


Figura 28. Respuesta en frecuencia del filtro RF TDT.

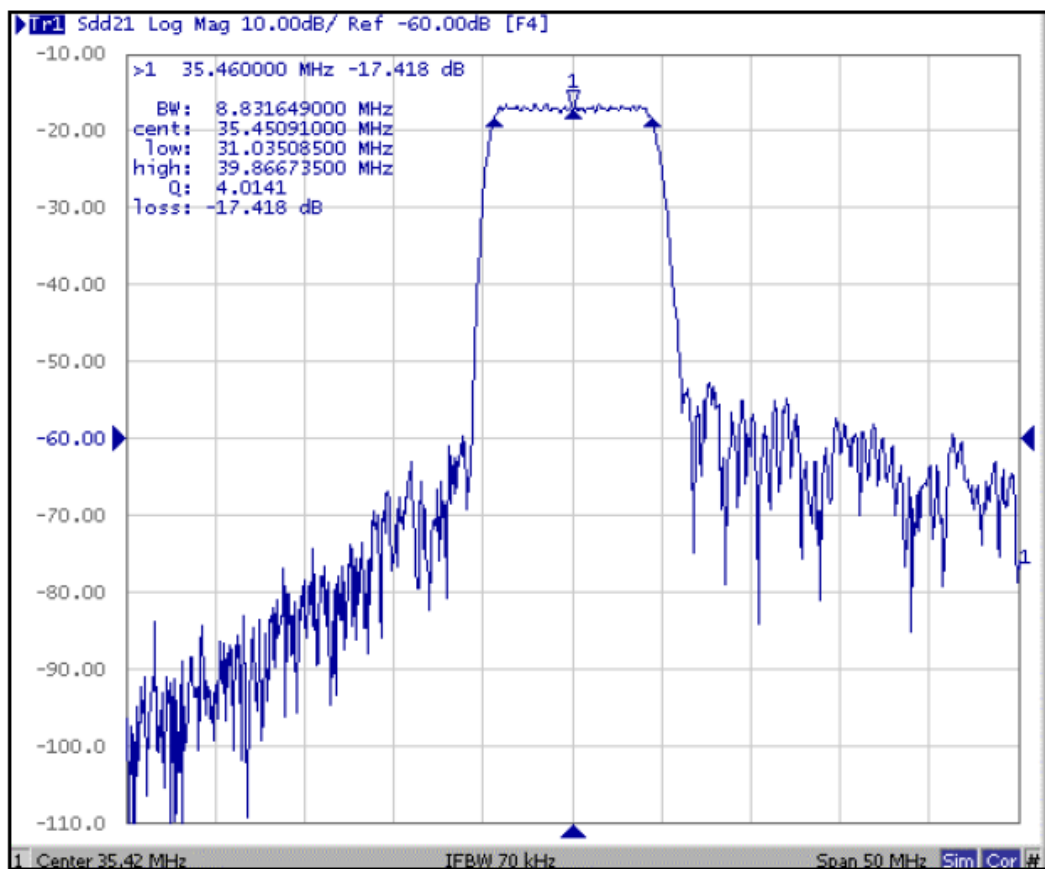


Figura 29. Respuesta en frecuencia del filtro IF TDT.

Como se hizo anteriormente, se presentarán en las Tablas 6, 7 y 8 los valores de los efectos de éstos en los canales de la TDT para la banda de 800 MHz, y en la Tabla 9, el efecto del filtro RF TDT para la banda de 700 MHz. El efecto del transmisor LTE y el del filtro IF TDT para esta banda es igual para todos los canales, siendo -51 dB y -65 dB, respectivamente.

| [dB]    | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|---------|----------|----------|----------|
| Canal A | -47      | -49      | -51      |
| Canal B | -49      | -51      | -51      |
| Canal C | -51      | -51      | -51      |

**Tabla 6. Efecto del transmisor LTE en la banda de 800 MHz.**

| [dB]      | Canal A | Canal B | Canal C |
|-----------|---------|---------|---------|
| Filtro RF | -16,1   | -35     | -37     |

| [dB]      | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|-----------|----------|----------|----------|
| Filtro RF | -3,9     | 0        | 0        |

**Tabla 7. Efecto del filtro RF TDT en la banda de 800 MHz.**

| [dB]     | Canal A | Canal B | Canal C |
|----------|---------|---------|---------|
| Canal 60 | -17     | -40,5   | -45     |
| Canal 59 | -43     | -45     | -48     |
| Canal 58 | -46,5   | -46,5   | -48     |

**Tabla 8. Efecto del filtro IF TDT en la banda de 800 MHz.**

| [dB]      | Canal A | Canal B | Canal C |
|-----------|---------|---------|---------|
| Filtro RF | -52     | -52     | -52     |

| [dB]      | Canal 60 | Canal 59 | Canal 58 |
|-----------|----------|----------|----------|
| Filtro RF | -2       | -1,5     | -1       |

**Tabla 9. Efecto del filtro RF TDT en la banda de 700 MHz.**

A la hora de calcular el efecto total del *leakage* en el código implementado, se haría de la siguiente manera (se muestra sólo el caso de la señal TDT con interferencia del transmisor LTE):

```
txLTE_nat=10.^(txLTE+efectoRF/10); %Efecto del txLTE y filtroRFTDT
rxDTT=rxRFDTT+rxIFDTT; %Efecto del filtroRFTDT + filtroIFTDT [dB]
rxDTT_nat=10.^(rxDTT/10); %Efecto del receptor TDT
leakage_nat=txLTE_nat+rxDTT_nat; %Efecto total uni.naturales
leakage=10*log10(leakage_nat); Efecto total [dB]
```



### 3.5 RADIO DE COBERTURA

El estudio sobre la coexistencia de los sistemas LTE y TDT se realizará sobre el radio de cobertura completo de la estación base LTE, como se comentó en el apartado 3.1. Para poder calcular éste, es necesario conocer los valores de SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) y de las pérdidas de propagación de los sistemas, teniendo en cuenta la modulación sobre la que se va a trabajar, en este caso QPSK.

El SINR es una medida que relaciona la potencia de la señal con la suma de la potencia de ruido y la de las interferencias. Todas las potencias involucradas en esta medida tienen que tomarse en un mismo punto del sistema y para el mismo ancho de banda. Su unidad es el decibelio.

$$SINR [dB] = P_{señal} - (P_{ruido} + P_{interferencia}) \quad (3.4)$$

Aunque los resultados se presentarán sobre la modulación QPSK, se muestran en la Tabla 10 los valores seleccionados de SINR para cada una de las modulaciones de LTE y TDT, respectivamente. Se ha decidido trabajar con la modulación QPSK, ya que es la que tiene un nivel de SINR menor, por lo que sería el mínimo de señal que se podría recibir para tener cobertura.

| SINR [dB] | QPSK | 16QAM | 64QAM |
|-----------|------|-------|-------|
| Esc.1     | 3,5  | 11,5  | 14,7  |

| SINR [dB] | QPSK | 16QAM | 64QAM |
|-----------|------|-------|-------|
| Esc.2     | 7,7  | 13,9  | 20,1  |

**Tabla 10. Valores de SINR para el estudio.**

Para el cálculo del radio de cobertura (d), se utilizará la fórmula del modelo de propagación escogido y explicado en el apartado 3.3. A estas pérdidas del modelo de *Hata* hay que añadirle las pérdidas por Multitrayecto –fenómeno consistente en la propagación de una onda por varios caminos diferentes- y por efecto *Shadowing* –desvío de la atenuación que sufre una frecuencia emitida-. Así el proceso que se llevará a cabo para obtener el parámetro que se necesita será el siguiente:

```
Smin=Pn+SINR; %Señal mínima
Lcomp=PIRE_LTE+Grx_LTE-Smin; %Pérdidas compensables
L_LTE =Lcomp-Lmt_LTE-Lshadow_LTE; %Pérdidas Hata
d=10.^((L_LTE-L1km_LTE)/(44.9-6.55*log10(hbs_LTE)));
```

Donde,

- $h_{bs\_LTE}$  es la altura de la estación base LTE.

- $PIRE\_LTE$  es la potencia PIRE de la señal LTE.

- $Grx\_LTE$  es la ganancia de recepción LTE.

- $P_n$  es la potencia de ruido calculada según:

$$P_n = -114 + 10 * \log_{10} Bw + NF \quad (3.5)$$

- $L_{mt\_LTE}$  son las pérdidas por Multitrayecto.

- $L_{shadow\_LTE}$  son las pérdidas por el efecto *Shadowing*.

- $L_{1km\_LTE}$  responde a parte de la fórmula de *Lhata*:

$$L_{1km\_LTE} = 69,55 + 26,16 * \log_{10} f - 13,82 * \log_{10} h_{bs\_LTE} - a(h_u) \quad (3.6)$$

A continuación, en la Tabla 11, se muestran los radios de cobertura obtenidos para las bandas de frecuencia de 800 MHz y 700 MHz, para cada una de las modulaciones.

|         | QPSK   | 16QAM  | 64QAM  |
|---------|--------|--------|--------|
| 800 MHz | 2,2 km | 1,3 km | 1 km   |
| 700 MHz | 2,4 km | 1,4 km | 1,1 km |

**Tabla 11. Radio de cobertura LTE.**

Como puede verse, la modulación QPSK tiene un alcance mayor que 16QAM y 64QAM. Esto es debido a que las modulaciones QAM son menos robustas y al transmitir más bits por símbolo necesitan una relación SINR mayor para poder trabajar. Así, como se dijo anteriormente, en el estudio de este TFM se utilizará QPSK para las simulaciones, pues con ella se obtiene el radio de cobertura máximo de LTE.

## 3.6 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

Para realizar el estudio que se propone en este TFM, se han implementado los escenarios descritos en el apartado 3.1 utilizando el programa *Matlab R2014a*. En este apartado se procederá a explicar en detalle el código que permite simular los sistemas y observar los efectos que se producen al tener éstos en bandas de frecuencia adyacentes. Se hablará del caso de la banda de frecuencia de 800 MHz con modulación QPSK, ya que el proceso sería el mismo para la banda de 700 MHz.

### 3.6.1 SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA DE SEÑAL TDT

Primero, sabiendo en la banda de frecuencia en la que se va a trabajar se declara esta variable, así como el resto de parámetros que se indicaron en los apartados 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5. Posteriormente, se pasa a escribir el bucle principal que permitirá ver, mediante un *plot*, los resultados de la cobertura que en el capítulo siguiente se mostrarán y se comentarán, siendo el propósito de este TFM.

Se trata de dos bucles 'for' anidados que recorrerán el radio de cobertura de la estación base LTE completo. Dentro de ellos, se calculará el valor de la señal de transmisión LTE, siguiendo la fórmula:

$$S[dB] = PIRE + Grx - Lmt - Lshadow - Lp \quad (3.7)$$

Donde,

-*Lp* son las pérdidas de propagación por *Hata* y cuya distancia depende del valor del primer bucle 'for', pues se necesita saber cuáles son éstas pérdidas en cada punto del radio de cobertura donde se encontraría el usuario receptor.

Por otro lado, también dentro del bucle anidado, se obtendrá el valor de la señal interferente TDT:

$$I[dB] = PIRE - G_{decremento} + leakage_{total} + Grx - Lmt - Lshadow - Lp \quad (3.8)$$

Donde,

-*Lp* son las pérdidas de propagación por *Hata* y cuya distancia responde a:

$$d[km] = \sqrt{\left( (distancia * \sin(posicion)) - y * radio_{cobertura} \right)^2 + \left( (distancia * \cos(posicion)) - x * radio_{cobertura} \right)^2} \quad (3.9)$$

Siendo,

$$x = i * \cos(j) \quad (3.10)$$

$$y = i * \sin(j) \quad (3.11)$$

-i: iteración primer bucle 'for'.

-j: iteración Segundo bucle 'for'.

$$- G_{decremento} = \max\left(-12 * \left(\frac{\theta}{10}\right)^2, -15\right) \quad (3.12)$$

En la cual,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(h_{bs} - h_u)}{d} \quad (3.13)$$

Una vez conseguido el valor de la señal y la interferencia, se pasa a calcular el SINR, que se comparará con el SINR de la modulación escogida y si es mayor que éste, será que llega a haber algo de cobertura en la zona, pintando un punto. Esto se hará en cada iteración del bucle, obteniendo al final una imagen en la que se verá en que zonas del radio de cobertura LTE existe ésta y en cuáles no.

```
SINR=Señal-10*log10(potencia_ruido+interferencia);
if SINR>=SINRQPSK;
    plot(x*radio_cobertura,y*radio_cobertura,'+');
    hold on
end
```

### **3.6.2 SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA DE SEÑAL LTE**

En este caso, el procedimiento se realizaría de la misma manera que en el apartado 3.6.1, pero intercambiando los roles de la señal y la interferencia. Así, ahora la señal sería TDT, mientras que la interferencia será LTE.

$$S[dB] = PIRE + Grx_{m\acute{a}x} - Lmt - Lshadow - Lp - efectoRF \quad (3.14)$$

Donde,

- $Grx_{m\acute{a}x}$  es la ganancia de recepci3n m\acute{a}xima de la antena *Yagi*.

- $Lp$  son las p\erdid as de propagaci3n, calculadas de igual manera que se calcularon en el caso de la interferencia del apartado 3.6.1.

- $efectoRF$  es el efecto que introduce el filtro RF en el canal de TDT por no ser un filtro ideal.

$$I[dB] = PIRE + leakage_{total} + GrxYagi - Lmt - Lshadow - Lfs \quad (3.15)$$

Siendo,

- $Lfs$  son las p\erdid as por espacio libre

$$Lfs = 32,45 + 20 * \log_{10}(f) + 20 * \log_{10}(d_{primerbucle}) \quad (3.16)$$

- $GrxYagi$  es la ganancia de recepci3n de la antena *Yagi*, que var\eda seg\un la siguiente f3rmula:

$$G_{rxYagi}[dB] = \max(G_{rxmaxYagi} - 12 * \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, \theta - 3 + \frac{\theta}{180}) \quad (3.17)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{-distancia^2 + d^2 + d_{primerbucle}^2}{2 * d * d_{primerbucle}}\right) \quad (3.18)$$

En la cual,

- $d_{primerbucle}$  la posici3n del radio de cobertura en la que se encuentra el \acute{i}ndice del primer bucle.

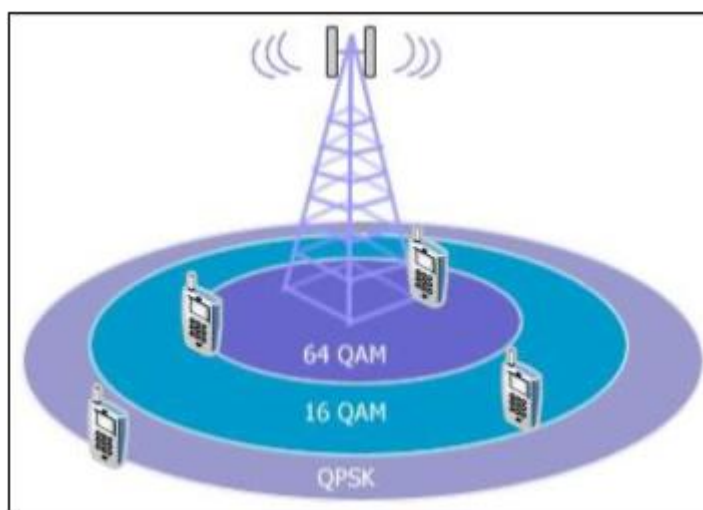
- $\theta_{3dB} = 45^\circ$ .



## 4. RESULTADOS

En este capítulo se procede a presentar los resultados de las simulaciones realizadas de los dos escenarios que se han implementado en este trabajo. Se dividirá en cinco apartados, de los cuales los cuatro primeros mostrarán la zona de cobertura para cada escenario propuesto en las bandas de 800 MHz y 700 MHz, mientras que el último reflejará el resultado que se obtendría al aplicar una mejora de las propuestas en los apartados de este mismo capítulo. La modulación que se utilizará para realizar el estudio será QPSK, pues el radio de cobertura suele referirse a la modulación más baja como se muestra en la Figura 30.

Para el estudio se ha colocado una estación base LTE en el centro y un transmisor TDT a 90° con respecto a la primera. Tanto la implementación como la simulación y los resultados se han realizado utilizando la herramienta *Matlab R2014a*.



*Figura 30. Modulaciones en LTE.*

### 4.1 SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA TDT (800 MHz)

Como se comentó en el apartado 3.1, el primer escenario que se desea estudiar es el caso en el que una señal LTE sufre interferencias producidas por la señal de un transmisor de TDT en la banda del Dividendo Digital elegido por Europa (800 MHz). A continuación, se presentarán los parámetros principales y los resultados obtenidos al estudiar el efecto que los canales 60, 59 y 58 de TDT provocan sobre los canales A, B y C de LTE.

### 4.1.1 EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE A

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -52,8 |
| Duplexor [dB]      | -10,4 |
| Filtro IF [dB]     | -33,7 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 12. Parámetros para el efecto del canal 60 sobre A.

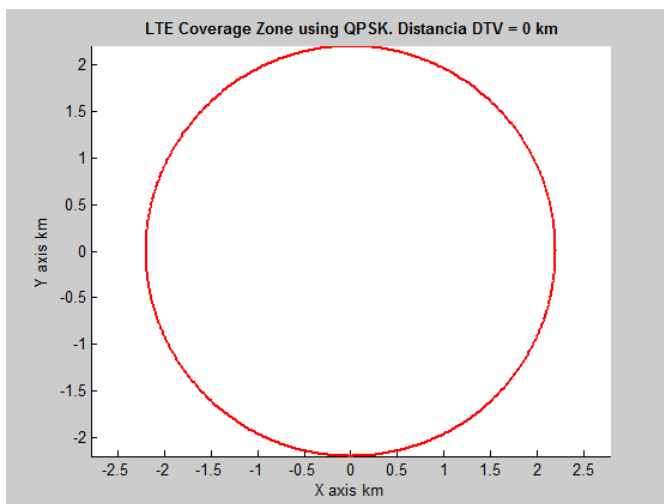


Figura 31. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

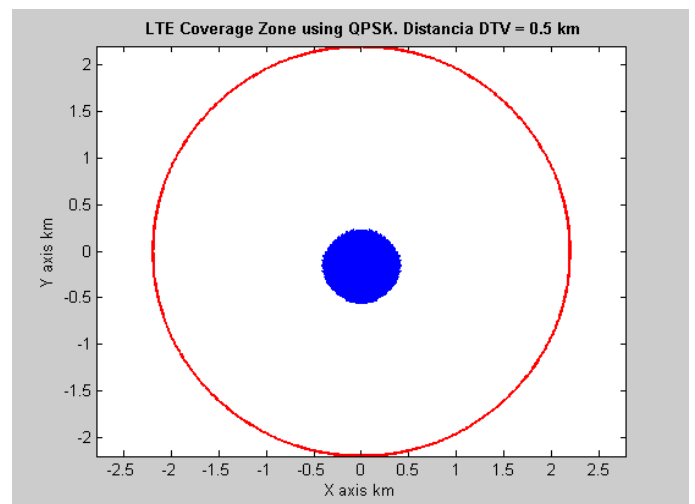


Figura 32. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.

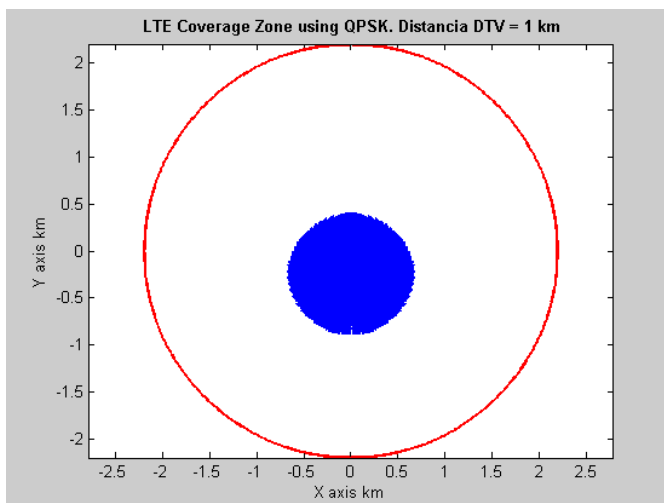


Figura 33. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.

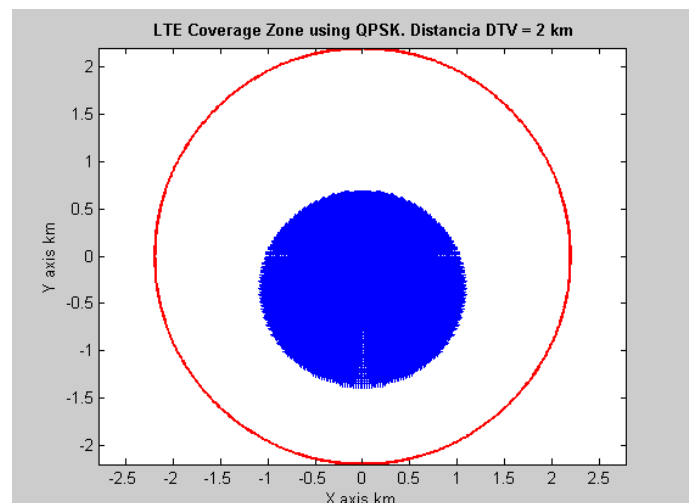


Figura 34. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2 km.



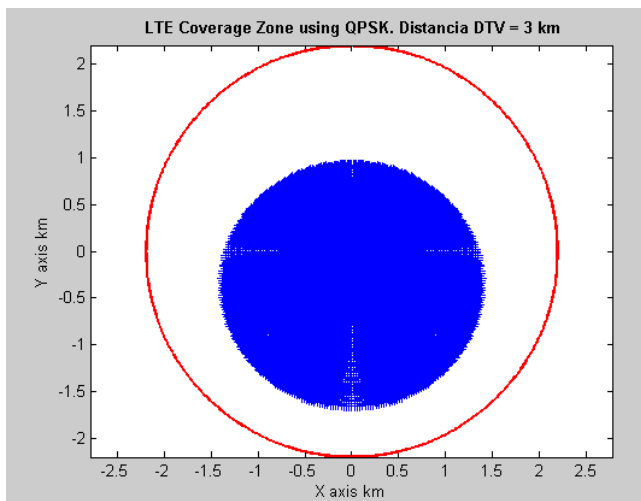


Figura 35. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3 km.

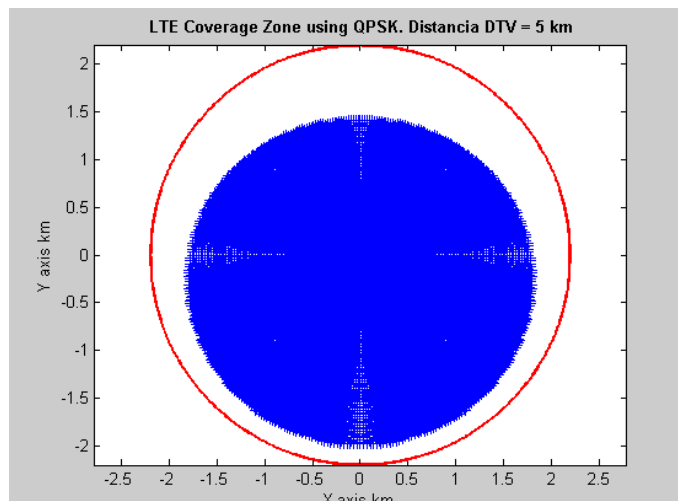


Figura 36. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 5 km.

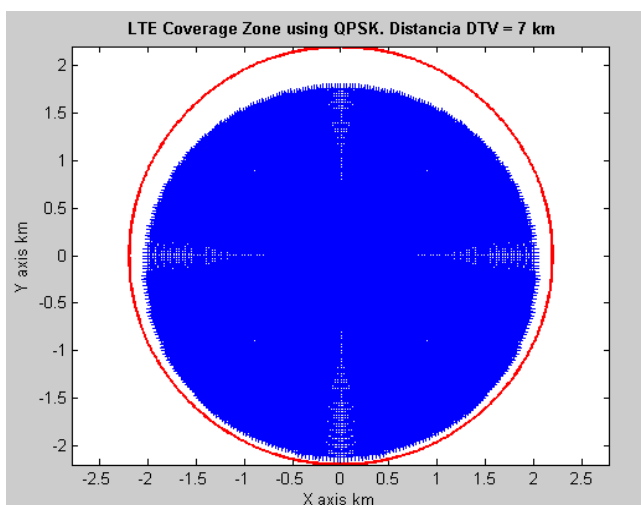


Figura 37. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 7 km.

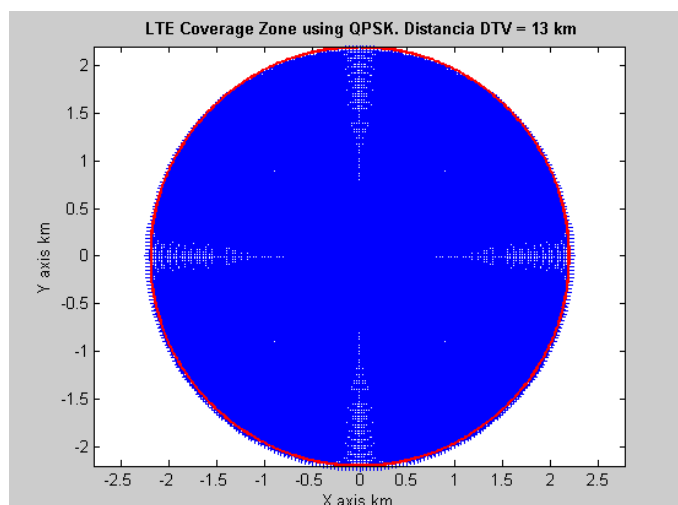


Figura 38. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 13 km.

Siguiendo la secuencia de imágenes (de la Figura 31 a la 38) puede comprobarse que al tener la estación base de LTE en el mismo punto en el que está el transmisor TDT, la zona de cobertura LTE es nula, mientras que si se van alejando éstas, comienza a aparecer señal por las zonas más cercanas a la estación base central hasta llegar a una distancia entre ambas en la que el alcance de la señal abarca todo el radio de cobertura para la modulación QPSK.

Puede verse, también, que la señal LTE no llega a todas las partes del radio de cobertura por igual, no mostrándose un círculo. Esto es debido a que los usuarios que se encuentran en las zonas donde el transmisor apunta directamente y están más cerca de él, sufren más interferencias que los que reciben la señal indirectamente o están más alejados. Así, por ejemplo, en la Figura 37, se aprecia que en las zonas cercanas a la parte baja de la imagen, alrededor del máximo del radio de cobertura reciben señal, mientras que en la parte de arriba de la imagen no, pues están más lejos del transmisor TDT, por lo que la señal de éste les interfiere en menor medida. Los laterales de la imagen reciben mayor señal que la parte de arriba, pues la dirección de la radiación no es directa, siendo esto lo más perjudicial para la cobertura.

Al ser este el peor de los casos que se van a tratar, pues la separación que existe entre el Canal 60 de TDT y el Canal A de LTE es sólo de 1 MHz, los resultados que se muestran sufren unas interferencias altísimas, teniendo que tener muchísimo cuidado de dónde se colocan los transmisores de los sistemas para intentar perjudicar lo menos posible a los usuarios, ya que no deberían ser afectados de ninguna manera.

#### 4.1.2 EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE B

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -72,6 |
| Duplexor [dB]      | -10,4 |
| Filtro IF [dB]     | -66,6 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 13. Parámetros para el efecto del canal 60 sobre B.

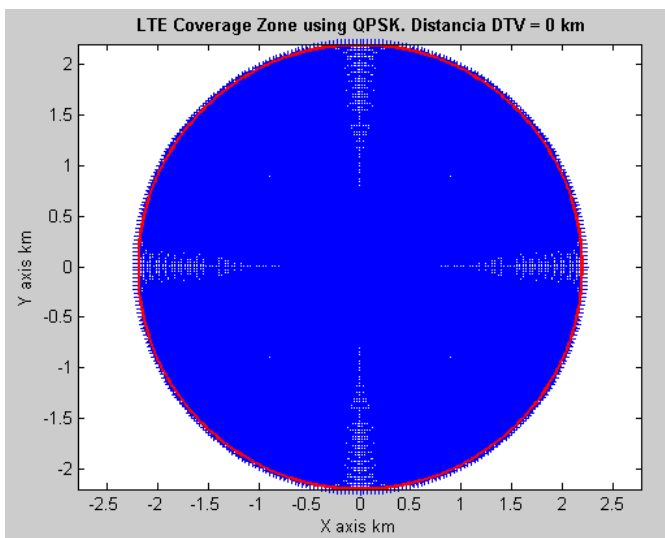


Figura 39. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

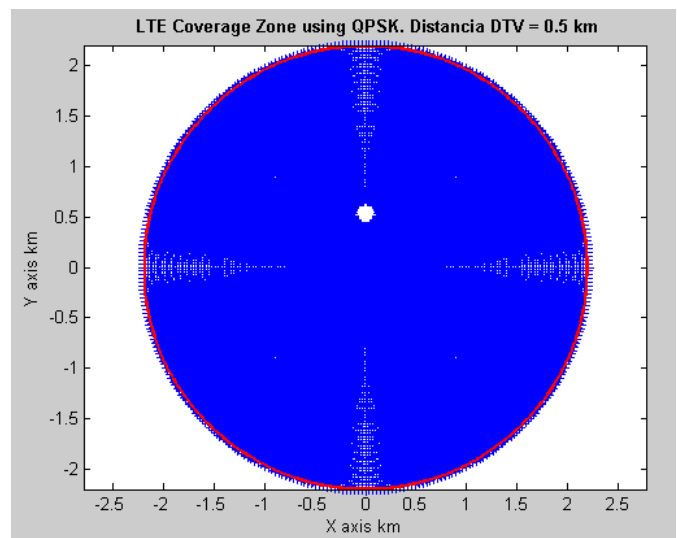
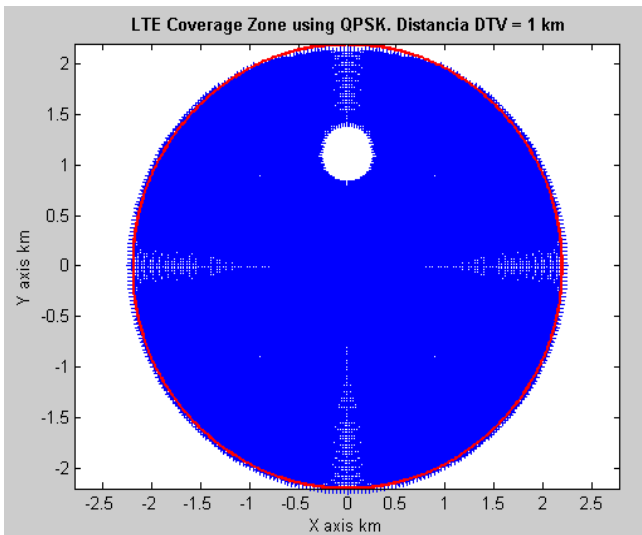
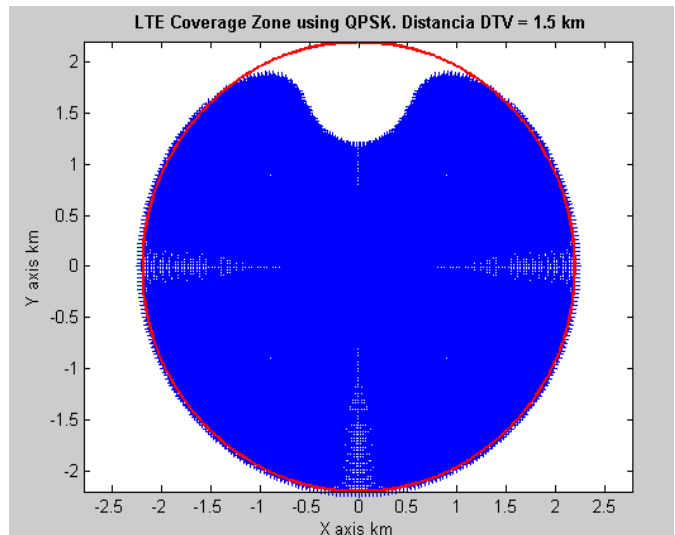


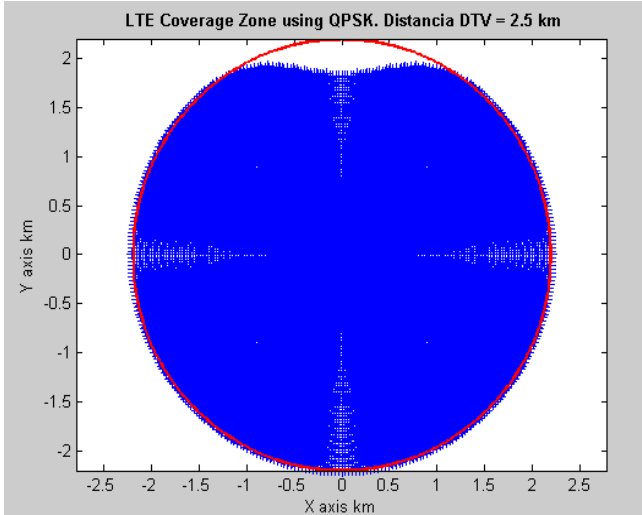
Figura 40. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.



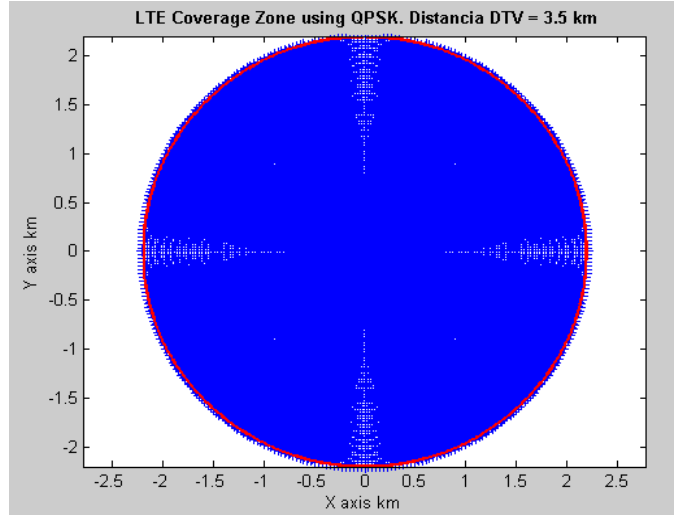
**Figura 41. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.**



**Figura 42. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 km.**



**Figura 43. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2,5 km.**



**Figura 44. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3,5 km.**

En este caso, la separación que existe entre los canales bajo estudio es de 6 MHz, y como puede verse en las figuras superiores (Figuras 39 a 44), los efectos que produce la señal transmitida TDT sobre el Canal B de LTE, es mucho menor que en el caso del apartado 4.1.1.

Cuando las estaciones se encuentran en el mismo punto (ver Figura 39), la señal LTE que llega al receptor es lo suficientemente potente como para permitir superar el nivel de SINR mínimo necesario para poder trabajar con la modulación QPSK, aunque la señal interferente del transmisor TDT sea alta. En el momento que se empiezan a separar, por ejemplo el caso de la Figura 41, los usuarios que se encuentran cerca de la antena transmisora TDT, reciben una señal interferente fuerte, y al contar con una señal LTE más débil, no llegan a alcanzar el mínimo SINR necesario para poder tener cobertura.

La zona de la macrocelda sin señal LTE irá siendo mayor según se alejen las estaciones, pues la señal cada vez será menos potente, afectando la interferencia en gran medida. Esto será así hasta llegar a una distancia en la que la separación sea tal que la

interferencia no llegue a afectar sobre el radio de cobertura QPSK –en este caso es a 3,5 km, como se ve en la Figura 44-.

### 4.1.3 EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -10,4 |
| Filtro IF [dB]     | -67,5 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 14. Parámetros para el efecto del canal 60 sobre C.

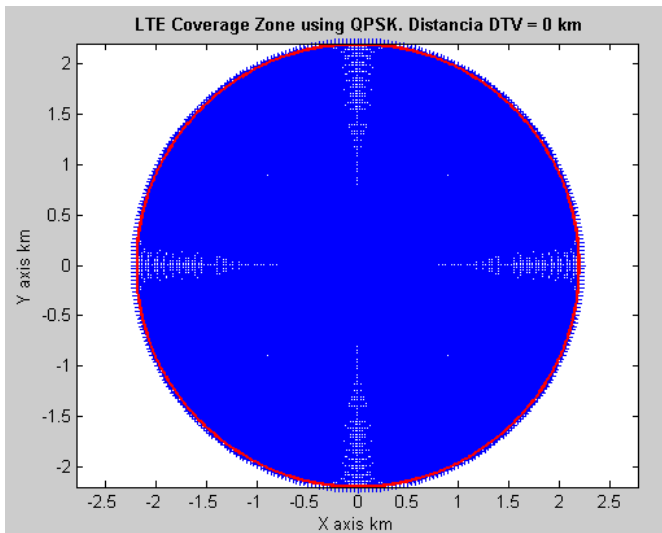


Figura 45. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

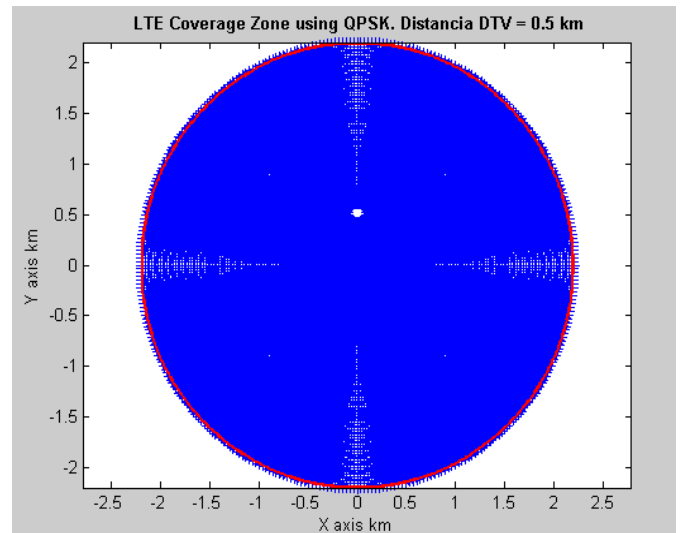


Figura 46. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.

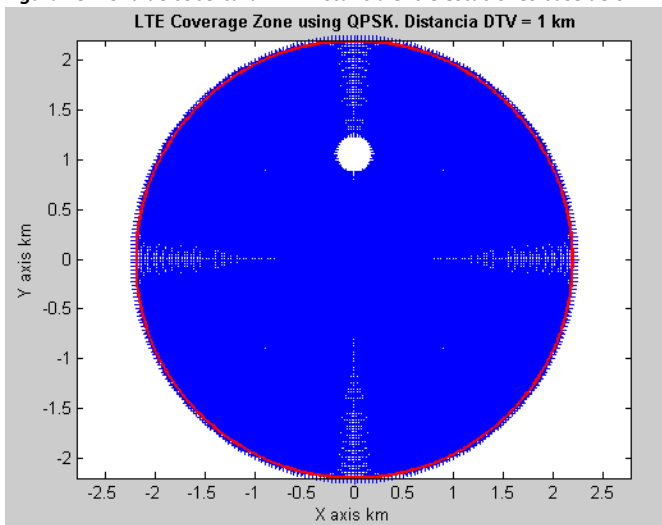


Figura 47. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.

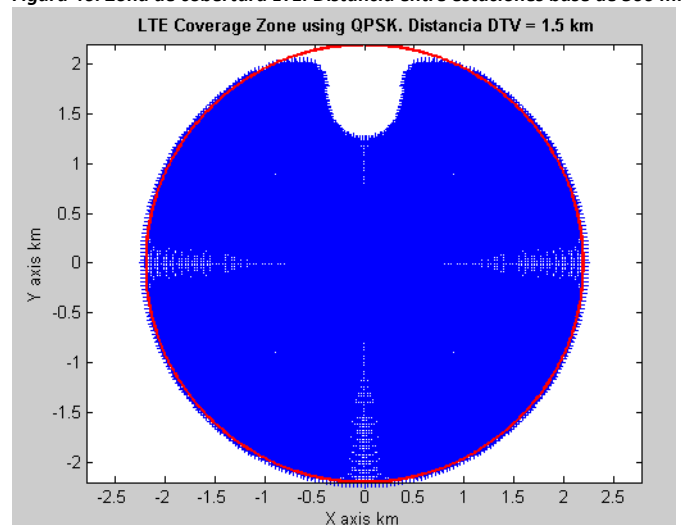


Figura 48. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 km.

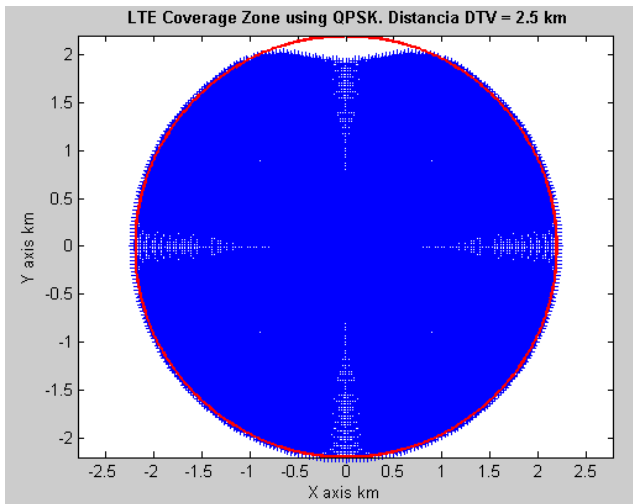


Figura 49. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2,5 km.

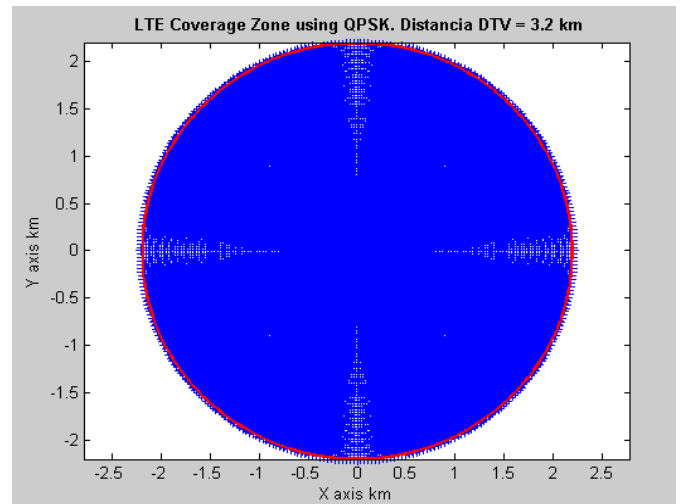


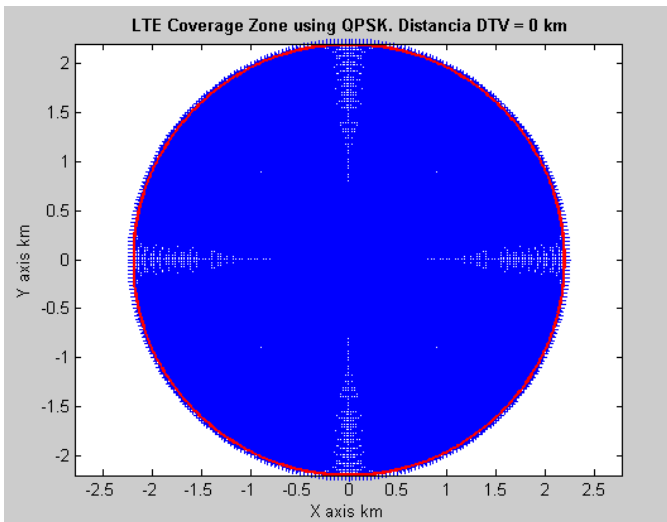
Figura 50. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3,2 km.

En este caso, el efecto que se produce sobre el canal de LTE es menor que en el caso del efecto del Canal 60 sobre B, y es debido a que la banda de separación de los canales que se están estudiando es de 11 MHz, siendo el *leakage* más bajo, como se vio en las tablas del apartado 3.4, obteniéndose mejores resultados.

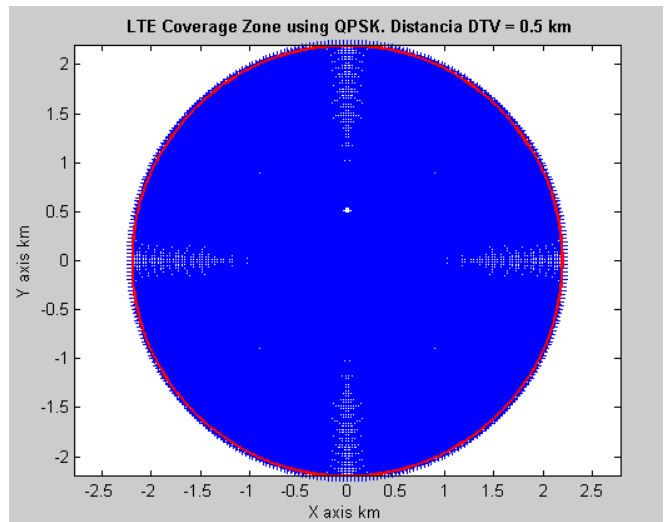
#### 4.1.4 EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE A

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -44,3 |
| Filtro IF [dB]     | -64,8 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

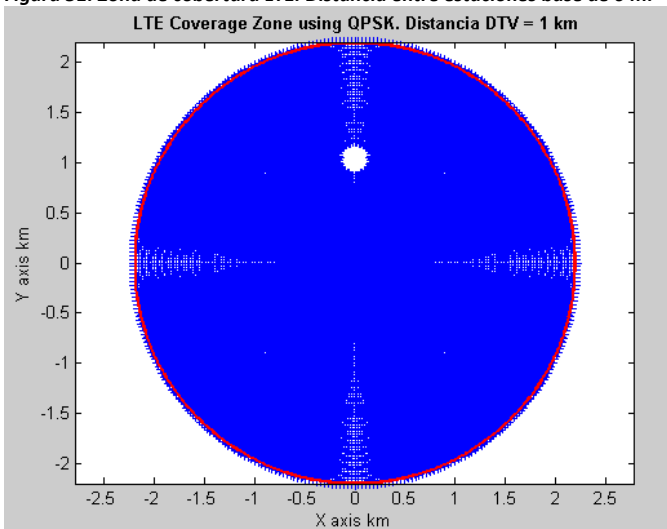
Tabla 15. Parámetros para el efecto del canal 59 sobre A.



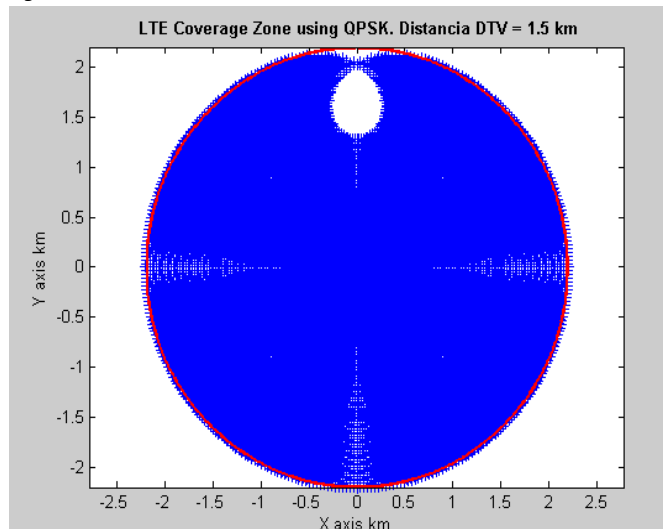
**Figura 51. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.**



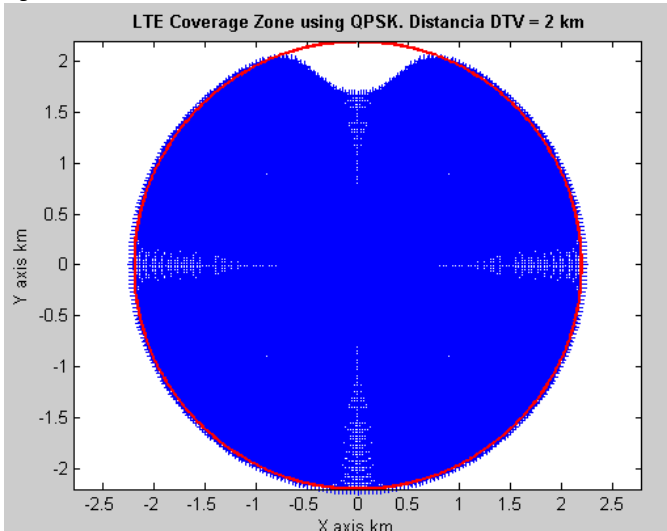
**Figura 52. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.**



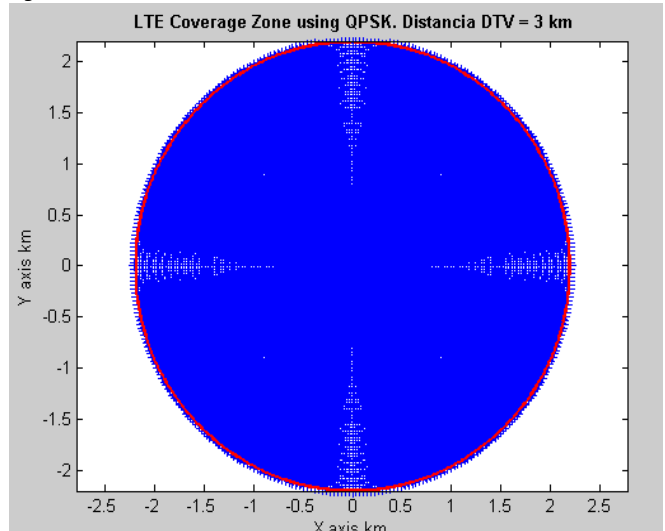
**Figura 53. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.**



**Figura 54. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 km.**



**Figura 55. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2 km.**



**Figura 56. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3 km.**

El efecto que produce el Canal 59 de TDT sobre el canal A de LTE, puede verse que es menor que el producido por los casos de los apartados anteriores. Esto es porque la

separación entre ellos es de 9 MHz, pues un canal TDT ocupa 8 MHz –tamaño del canal 60 que ahora no se tienen en cuenta- más 1 MHz de banda de guarda del primer caso crítico.

#### 4.1.5 EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE B

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -44,3 |
| Filtro IF [dB]     | -69,7 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 16. Parámetros para el efecto del canal 59 sobre B.

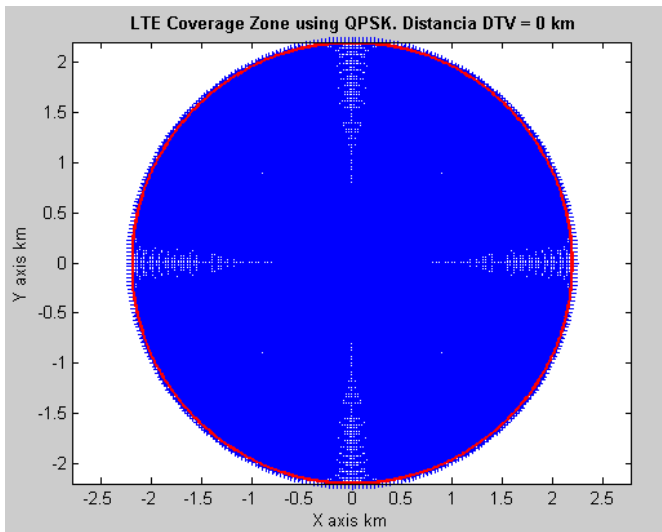


Figura 57. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

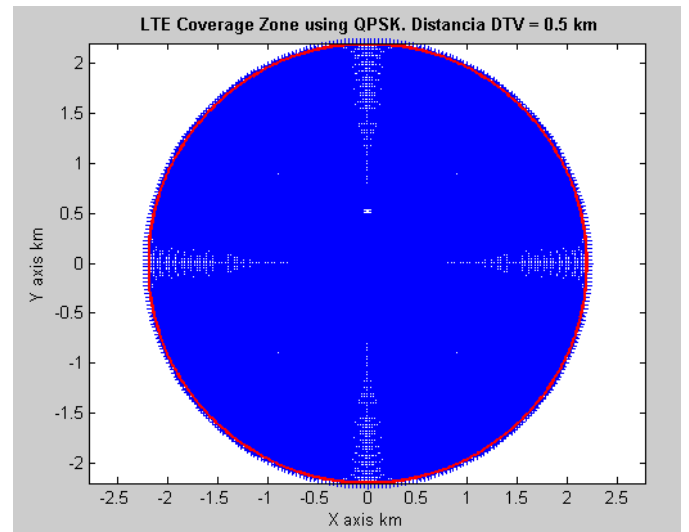


Figura 58. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.

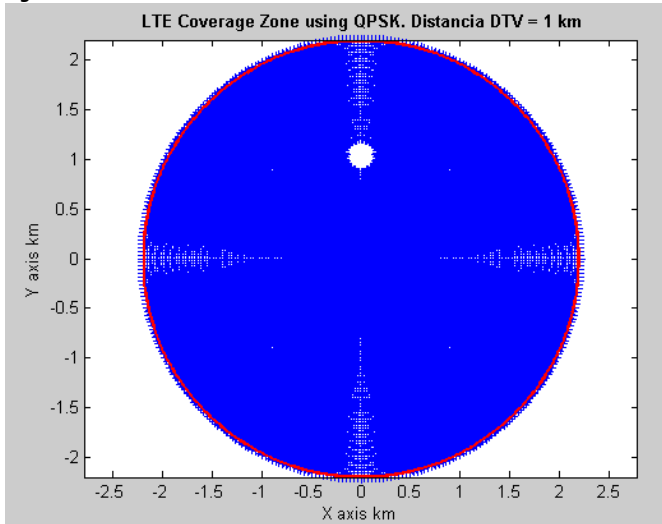


Figura 59. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.

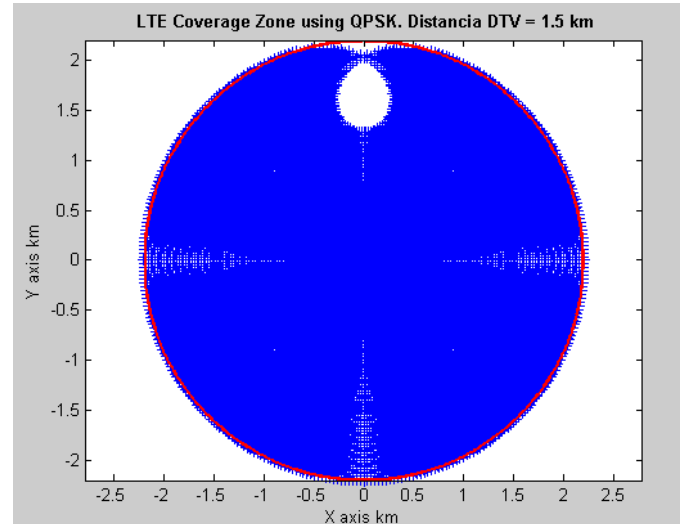


Figura 60. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 km.

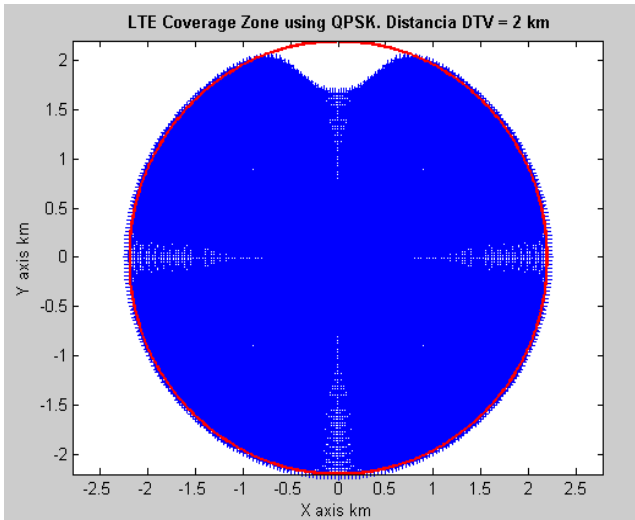


Figura 61. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2 km.

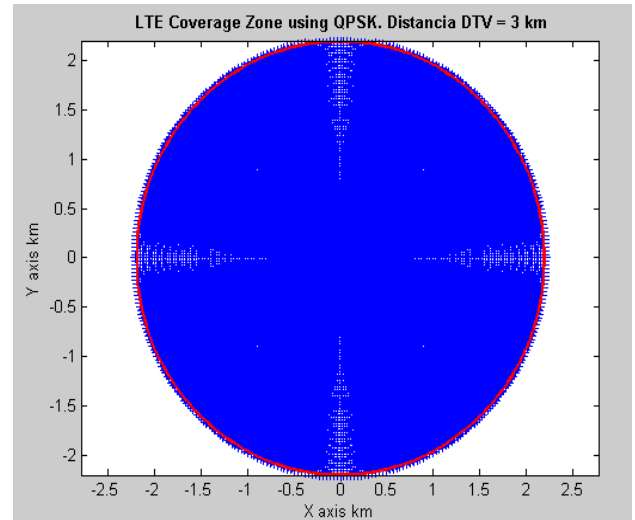


Figura 62. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3 km.

En lo que respecta a este caso, la banda de frecuencias de separación entre los canales bajo estudio es de 14 MHz. Según esto, debería producirse una mejora considerable respecto al caso anterior, pero como puede verse esto no es así. Llega un momento en que por mucho que se deje más distancia entre canales, no se produce un aumento de la zona de cobertura visible, y esto es debido a las características no ideales de los elementos utilizados para realizar las simulaciones.

Es por esto, que en muchos países del resto del mundo, se decidió que la banda de guarda entre los sistemas de LTE y TDT fuera de 9 MHz, consiguiendo así, de manera sencilla, una cobertura de señal aceptable sin llegar a implementar soluciones más complicadas.

#### 4.1.6 EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -44,3 |
| Filtro IF [dB]     | -70   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 17. Parámetros para el efecto del canal 59 sobre C.



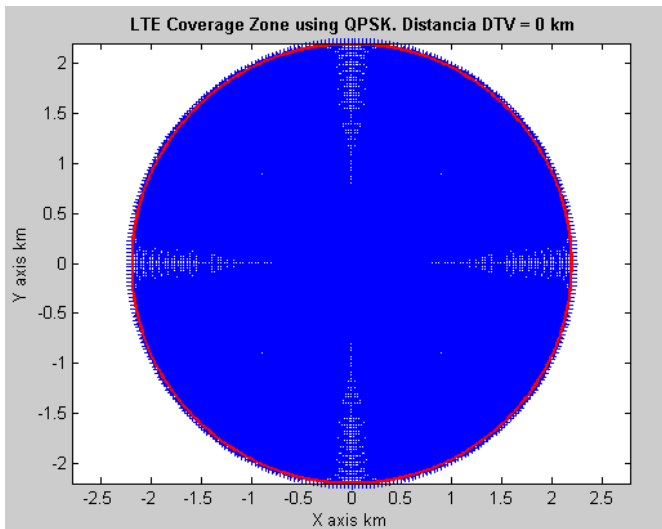


Figura 63. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

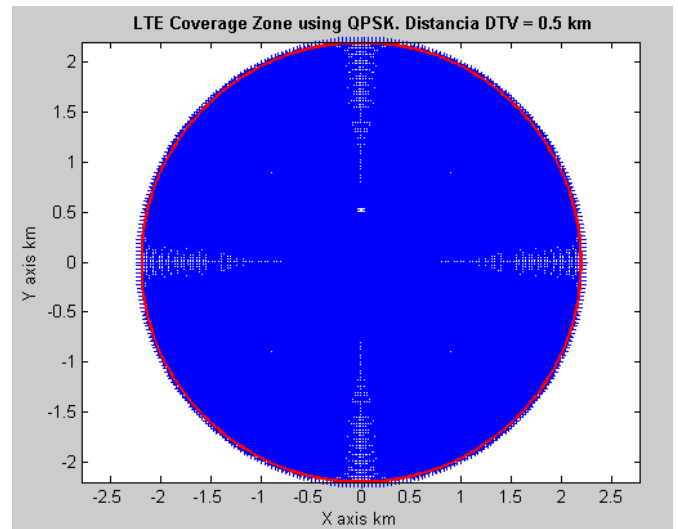


Figura 64. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.

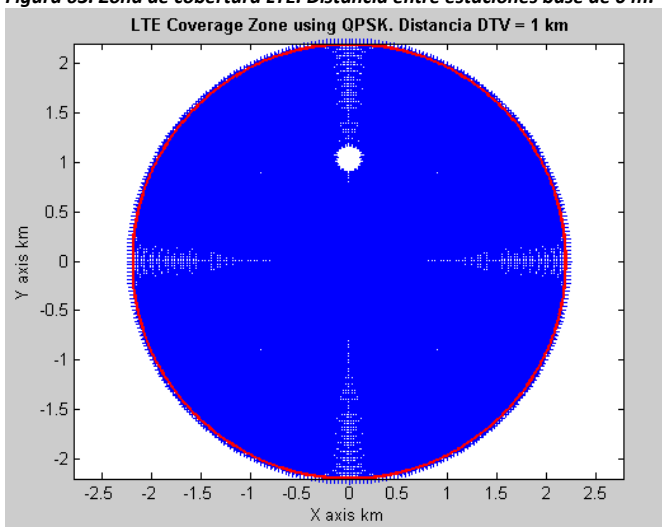


Figura 65. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.

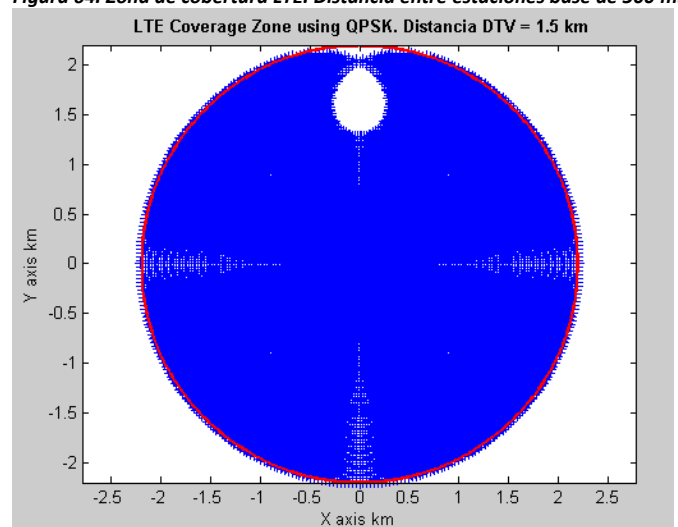


Figura 66. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 km.

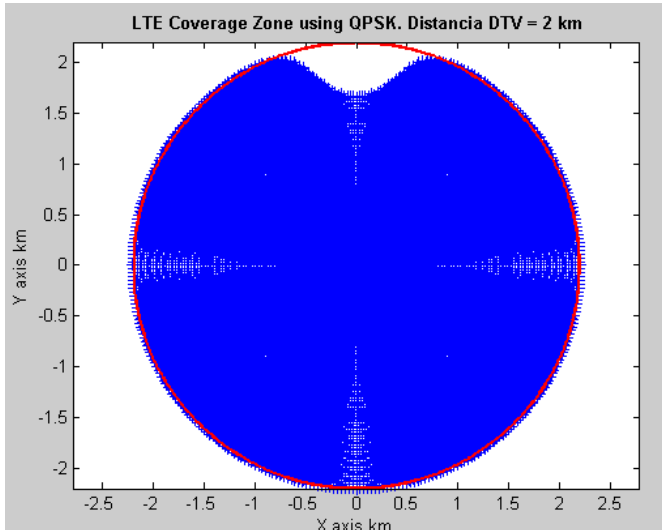


Figura 67. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2 km.

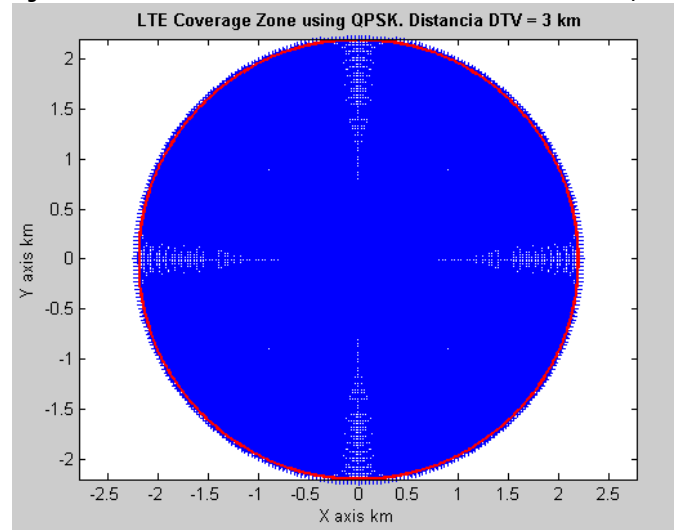


Figura 68. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3 km.

Como se comentó en el apartado anterior, aunque la banda de frecuencia entre los canales que se estudian aumente, en el caso 4.1.5 se llegó a la máxima mejora de la cobertura.

#### 4.1.7 EFECTO DEL CANAL 58 SOBRE A, B Y C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -51,3 |
| Filtro IF [dB]     | -70   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 18. Parámetros para el efecto del canal 58 sobre A, B y C.

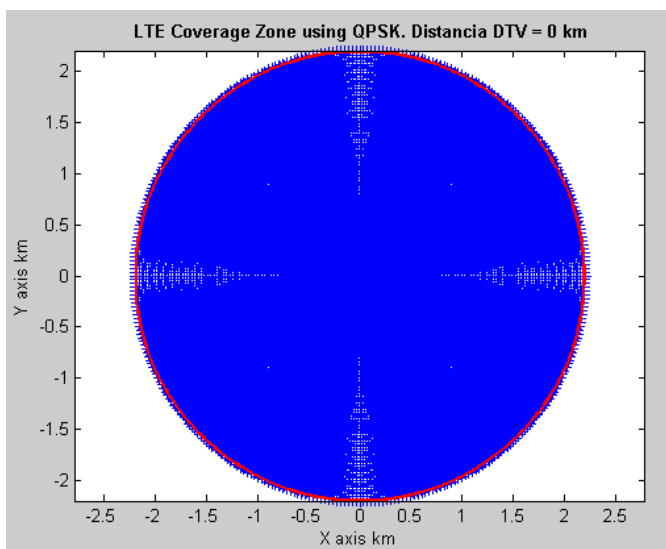


Figura 69. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 0 m.

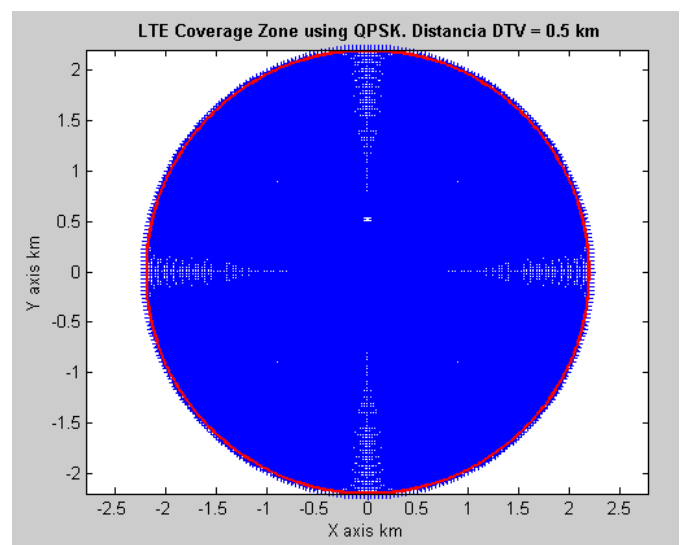


Figura 70. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 500 m.

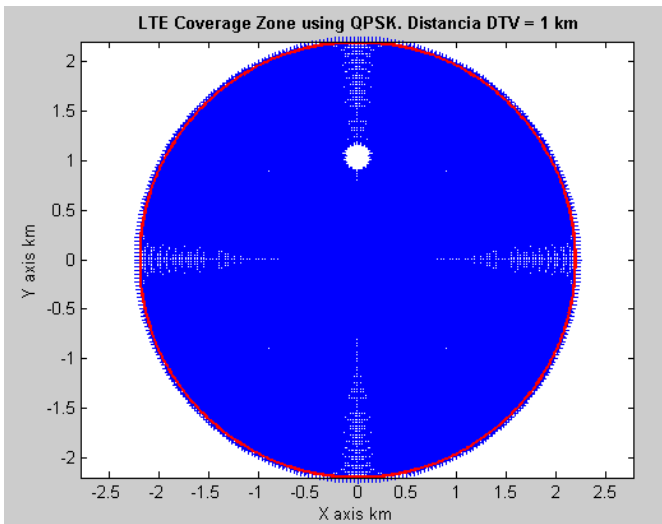


Figura 71. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1 km.

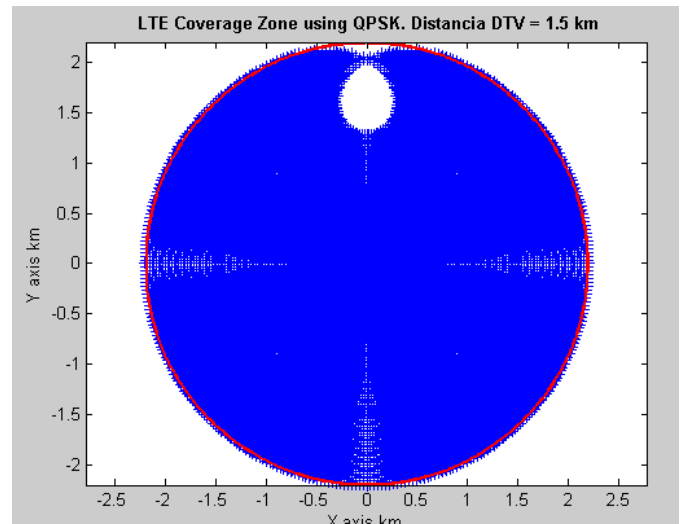


Figura 72. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 1,5 m.

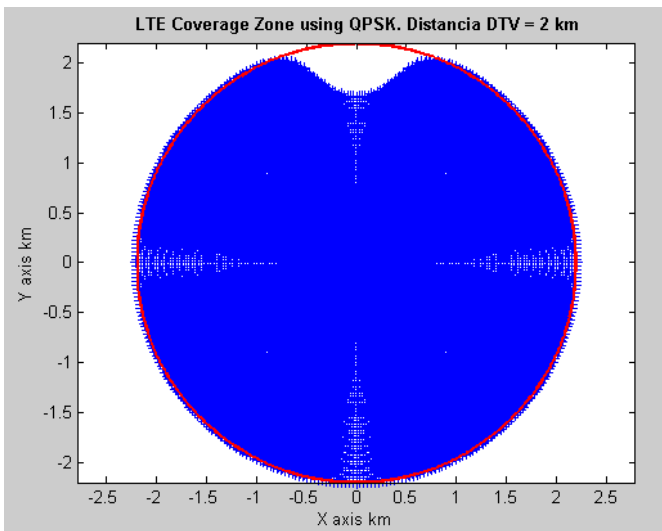


Figura 73. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 2 km.

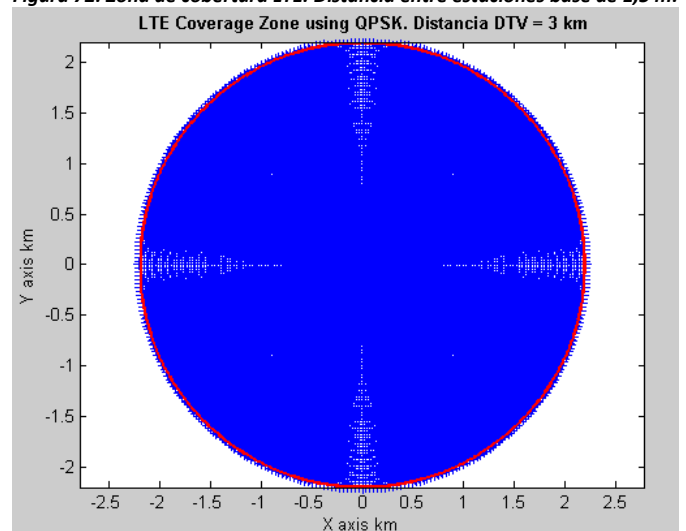


Figura 74. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones base de 3 km.

El efecto del Canal 58 sobre A, B y C es el mismo, debido a los parámetros de los elementos utilizados como transmisor TDT, transmisor y receptor de LTE, así como por lo comentado en los últimos apartados.

## 4.2 SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA LTE (800MHz)

En este apartado se estudiará el caso en el que una señal TDT sufre interferencias producidas por un transmisor de LTE, en la misma banda de frecuencias que el caso 4.1 (800 MHz). A continuación, se presentarán los resultados de la zona de cobertura TDT, dentro de la macrocelda LTE, obtenidos al estudiar el efecto de los canales A, B y C de LTE sobre los canales 60, 59 y 58 de TDT.

### 4.2.1 EFECTO DEL CANAL A SOBRE 60

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -47   |
| Filtro RF [dB]     | -16,1 |
| Efecto RF-TDT [dB] | -3,9  |
| Filtro IF [dB]     | -17   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 19. Parámetros para el efecto del canal A sobre 60.

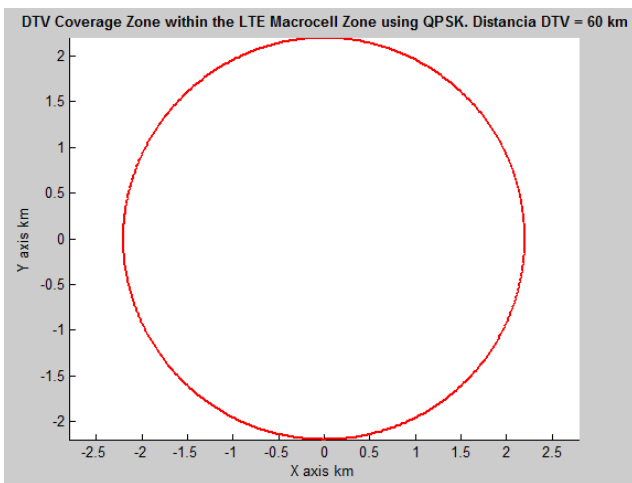


Figura 75. Zona de cobertura TDT en Macrocela LTE. Distancia BS 60 km.

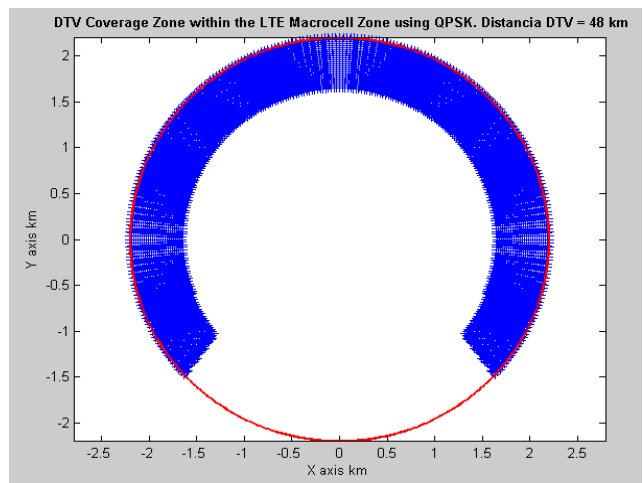


Figura 76. Zona de cobertura TDT en macrocela LTE. Distancia BS 48 km.

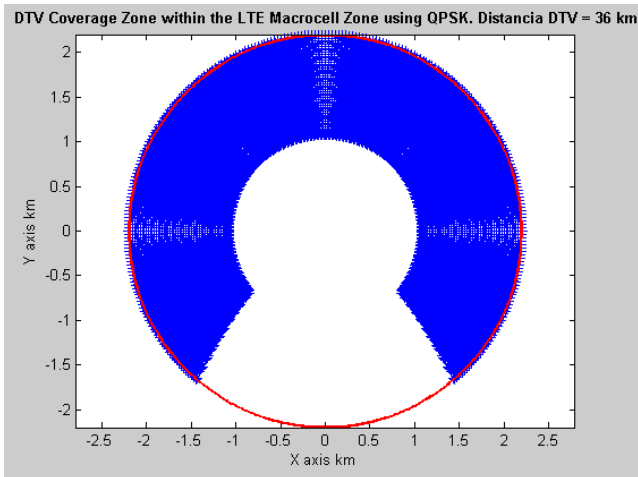


Figura 77. Zona de cobertura TDT en macrocela LTE. Distancia BS 36 km.

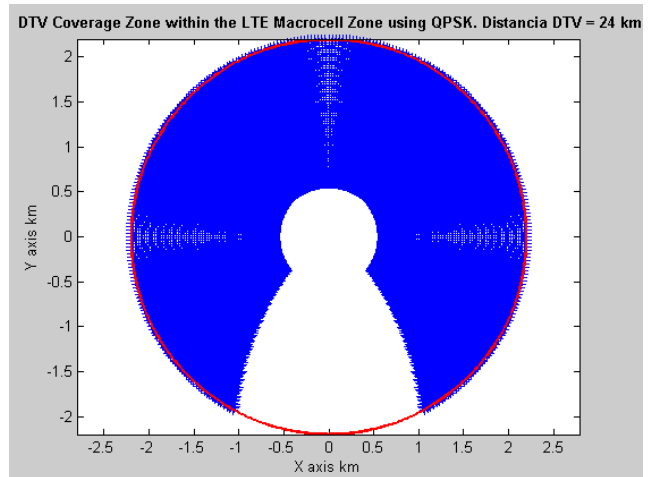


Figura 78. Zona de cobertura TDT en macrocela LTE. Distancia BS 24 km.

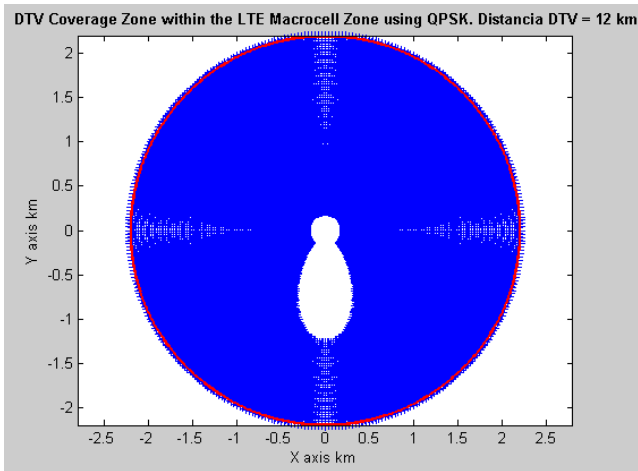


Figura 79. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 12 km.

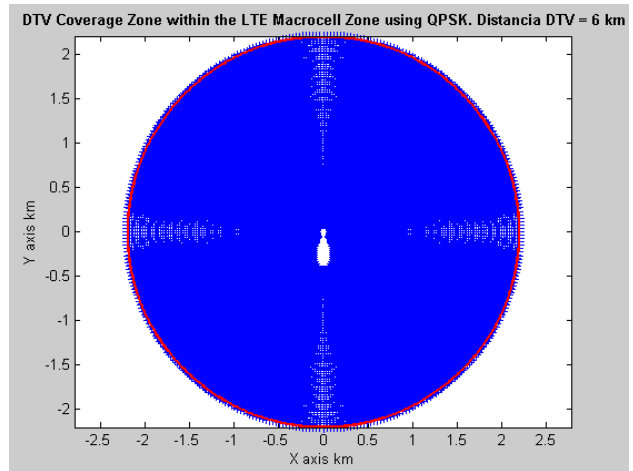


Figura 80. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 6 km.

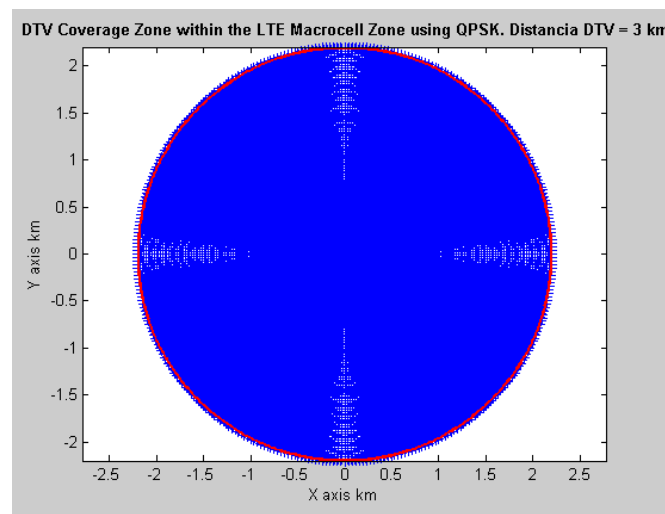


Figura 81. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 3 km.

En este apartado se estudia el peor de los casos del escenario 2, puesto que la separación de los canales 60 y A es solamente de 1 MHz, la banda de guarda asignada en el DD. Como puede apreciarse en la secuencia de figuras (Figura 75 a 81) cuánto más cerca están las estaciones base LTE y TDT, mayor es la zona de cobertura de TDT dentro de la macrocelda de LTE. Así, a 60 km, como se muestra en la Figura 75, la señal transmitida LTE es muy potente, mientras que la señal TDT en los puntos tan distantes es baja, por lo que la interferencia que produce la primera sobre estos receptores TDT hacen que la cobertura de este último sistema sea nula en el radio de alcance de la modulación QPSK de LTE.

Como en el caso contrario, las señales no afectan de igual manera a todos los usuarios, ya que depende de la posición de éste respecto a la dirección en la que se transmite la señal LTE y la señal TDT. En el escenario de estudio, el transmisor LTE se encuentra en el centro de la imagen dirigiendo la señal hacia  $90^\circ$ , lugar donde se encuentra el sistema TDT, que transmite la señal en dirección a la estación base LTE, y el usuario recibe con la antena en la misma dirección que el sistema LTE, por lo que las interferencias

más altas se producen alrededor del transmisor LTE y en la zona más alejada del transmisor TDT, formándose esa figura sin cobertura que se ve en las imágenes.

#### 4.2.2 EFECTO DEL CANAL A SOBRE 59

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -49   |
| Filtro RF [dB]     | -16,1 |
| Efecto RF-TDT [dB] | 0     |
| Filtro IF [dB]     | -43   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 20. Parámetros para el efecto del canal A sobre 59.

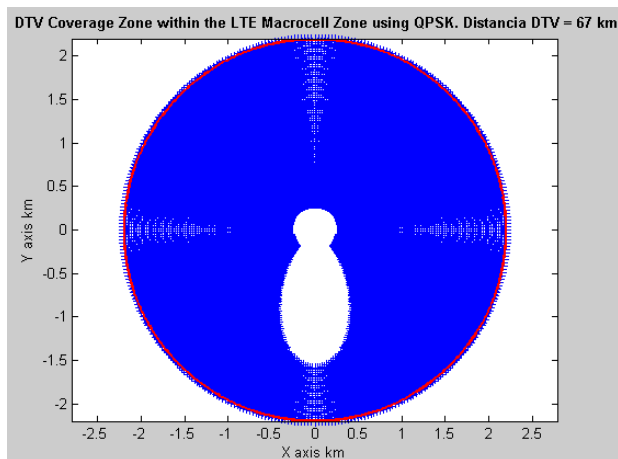


Figura 82. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.

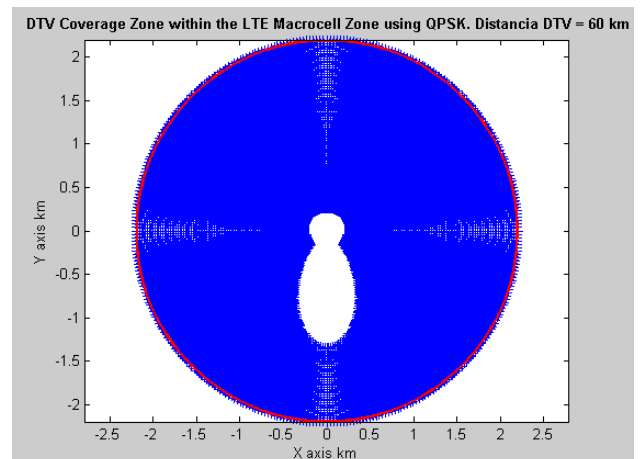
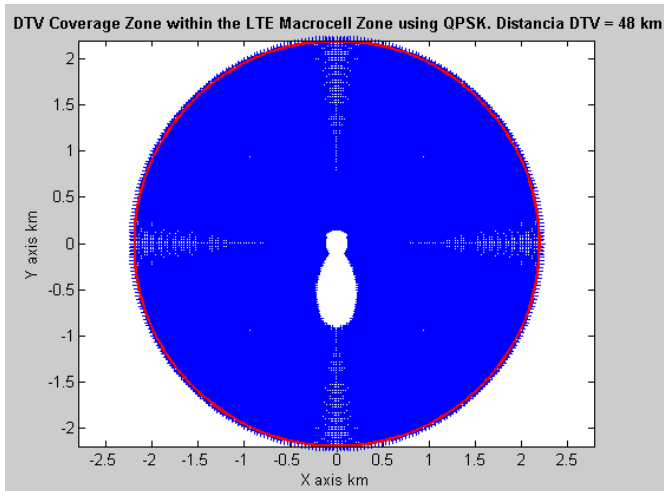
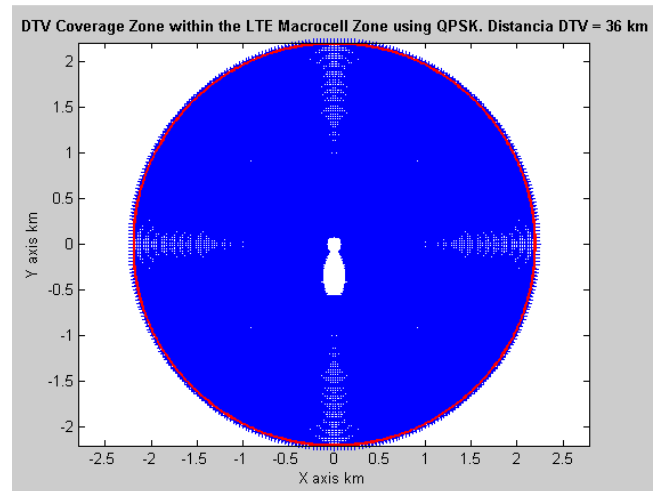


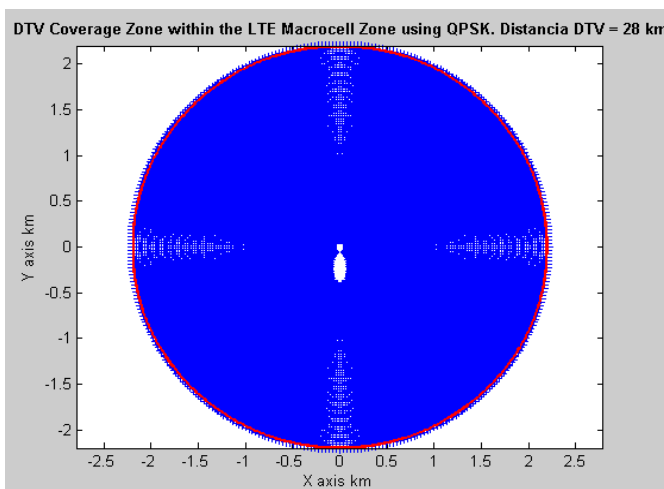
Figura 83. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.



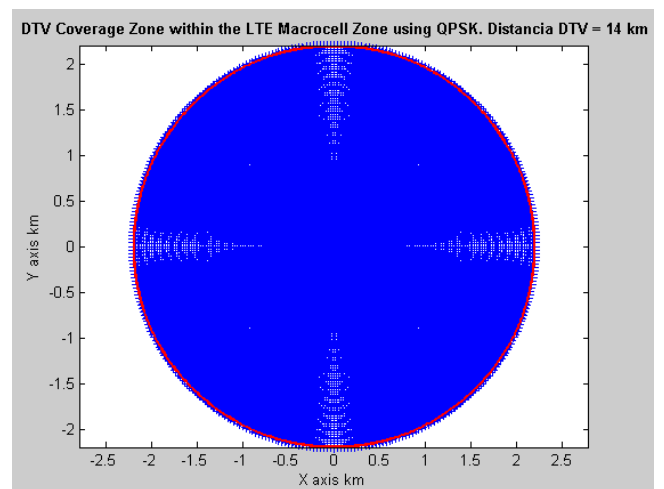
**Figura 84. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.**



**Figura 85. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.**



**Figura 86. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 28 km.**



**Figura 87. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 14 km.**

En este caso, la banda de frecuencia entre el Canal A y el Canal 59 es de 9 MHz, produciéndose una mejora significativa en lo que se refiere a la zona de cobertura TDT dentro del radio de cobertura de LTE. Así, en el caso anterior a 60 km no había cobertura, mientras que en este caso a 67 km existen bastantes puntos que tienen. Se ha dibujado la primera imagen (Figura 82) en 67 km, ya que es aproximadamente el radio máximo de cobertura del sistema TDT. Como puede verse en las Figuras 82 a 87, sigue produciéndose el mismo efecto que en el apartado 4.2.1, al acercar los sistemas, las interferencias afectan a menos usuarios, llegando a una distancia de unos 14 km, donde la cobertura es completa.

### 4.2.3 EFECTO DEL CANAL A SOBRE 58

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -16,1 |
| Efecto RF-TDT [dB] | 0     |
| Filtro IF [dB]     | -46,5 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 21. Parámetros para el efecto del canal A sobre 58.

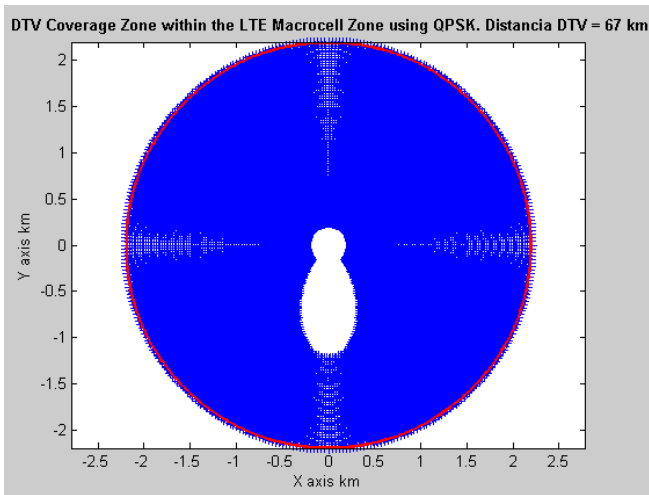


Figura 88. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.

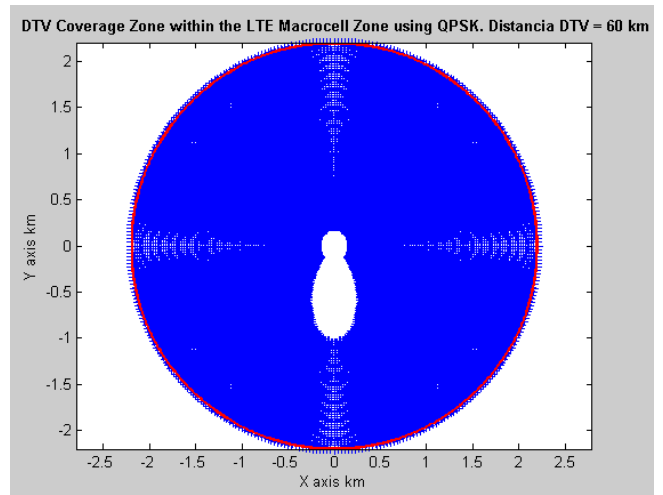


Figura 89. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.

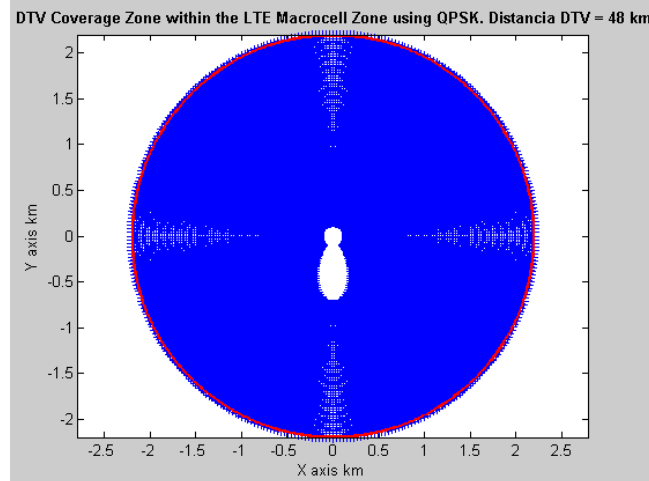


Figura 90. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.

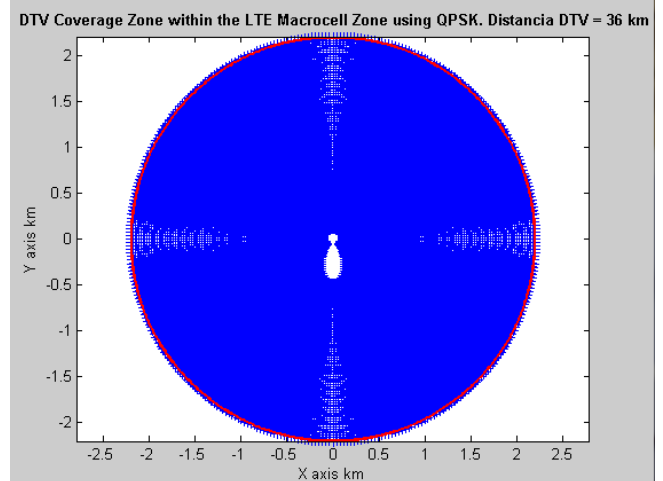


Figura 91. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.



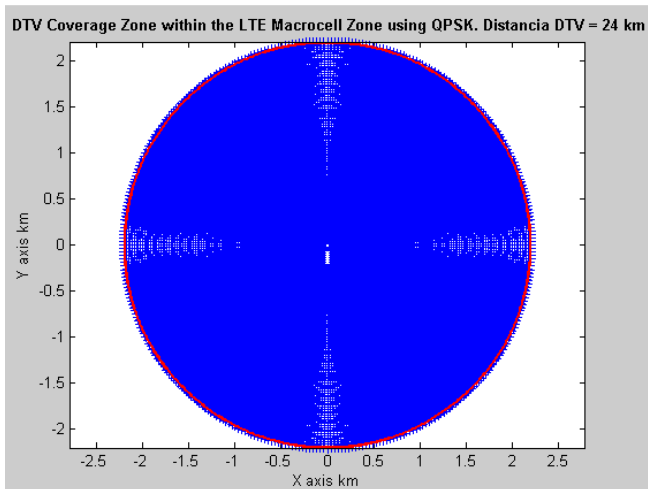


Figura 92. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.

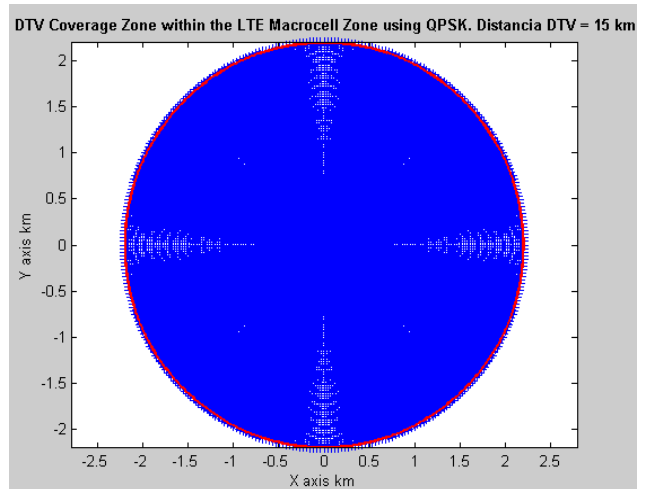


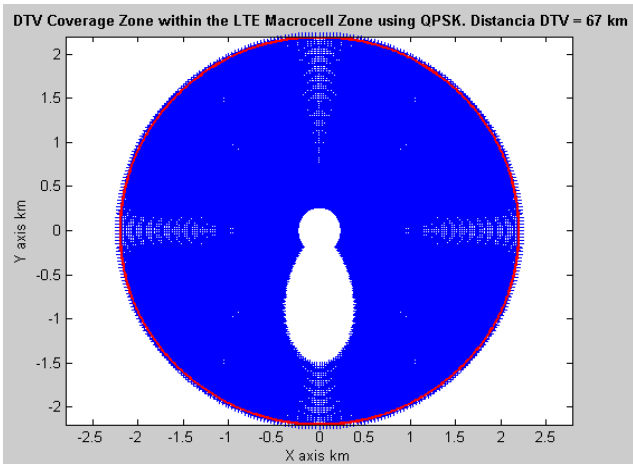
Figura 93. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 15 km.

Al fijarse en las Figuras 88 a 93, y teniendo en cuenta que la separación entre los canales bajo estudio es de 17 MHz, se aprecia una mejora de la zona de cobertura, llegando a una distancia de 24 km, donde prácticamente la cobertura es completa.

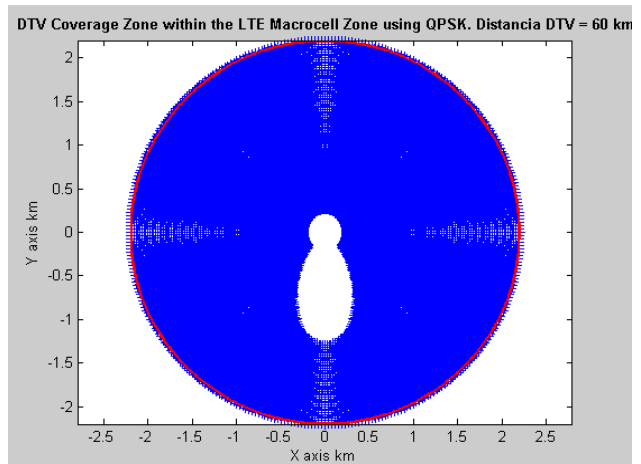
#### 4.2.4 EFECTO DEL CANAL B SOBRE 60

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -49   |
| Filtro RF [dB]     | -35   |
| Efecto RF-TDT [dB] | -3,9  |
| Filtro IF [dB]     | -40,5 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

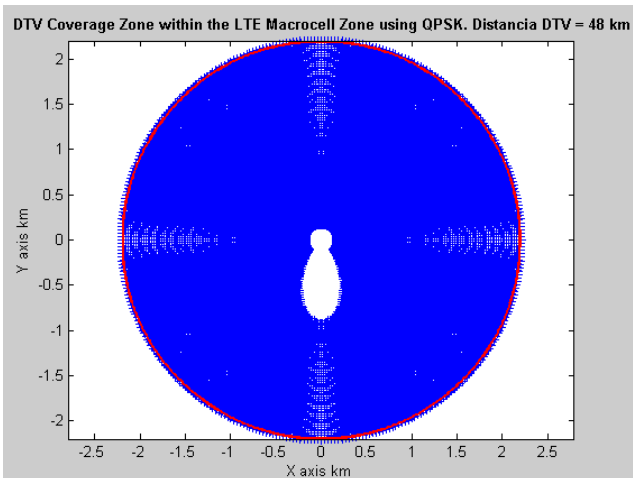
Tabla 22. Parámetros para el efecto del canal B sobre 60.



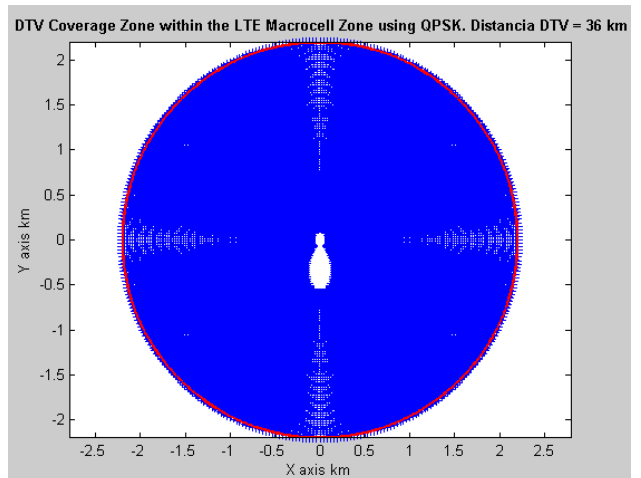
**Figura 94. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.**



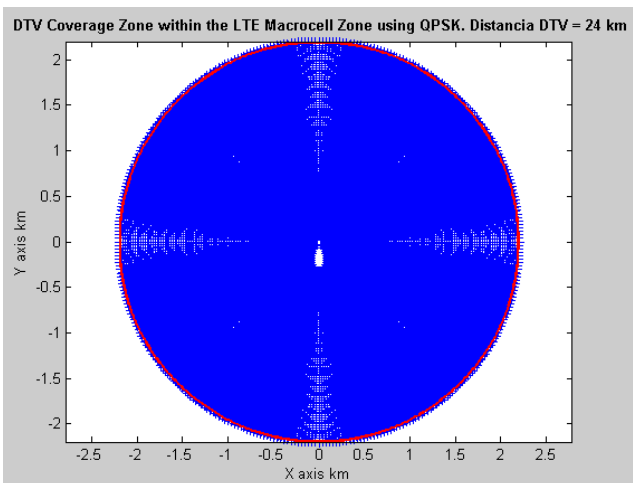
**Figura 95. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.**



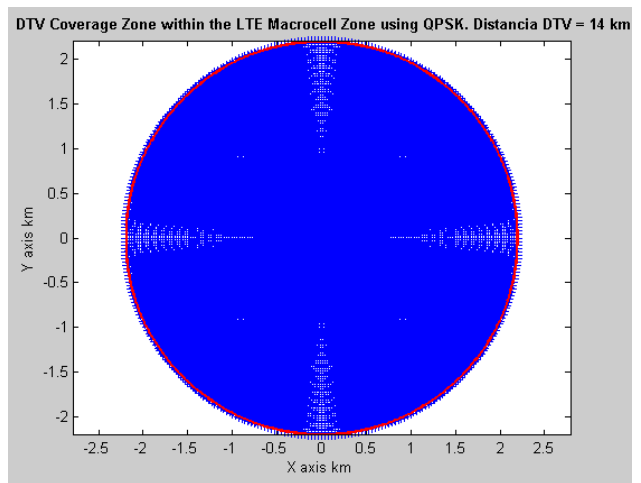
**Figura 96. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.**



**Figura 97. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.**



**Figura 98. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.**



**Figura 99. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 14 km.**

Ya que existe una distancia entre los dos canales de 6 MHz, los resultados que se obtienen son peores que en el apartado anterior, pero bastante mejores que en el primer caso, donde se estudiaba el efecto del Canal A sobre el Canal 60.

## 4.2.5 EFECTO DEL CANAL B SOBRE 59

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -35   |
| Efecto RF-TDT [dB] | 0     |
| Filtro IF [dB]     | -45   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 23. Parámetros para el efecto del Canal B sobre 59.

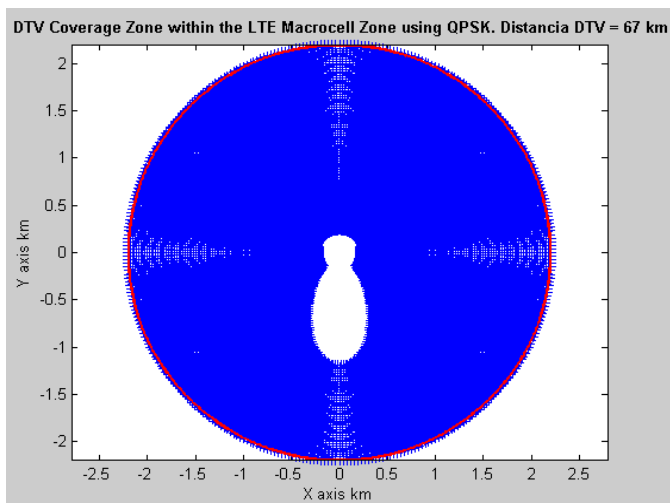


Figura 100. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.

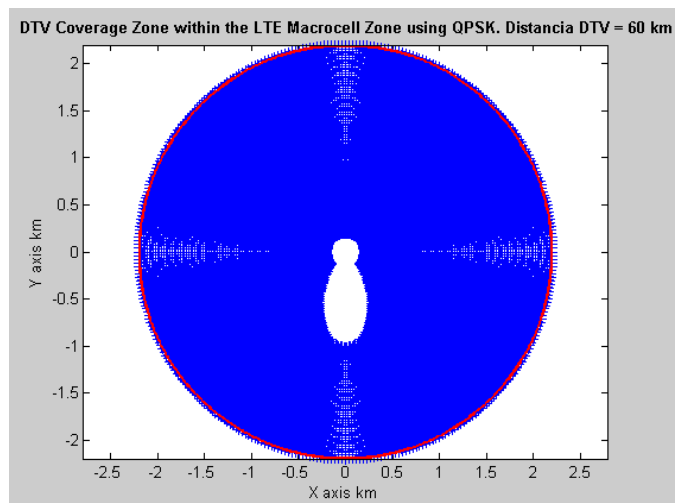


Figura 101. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.

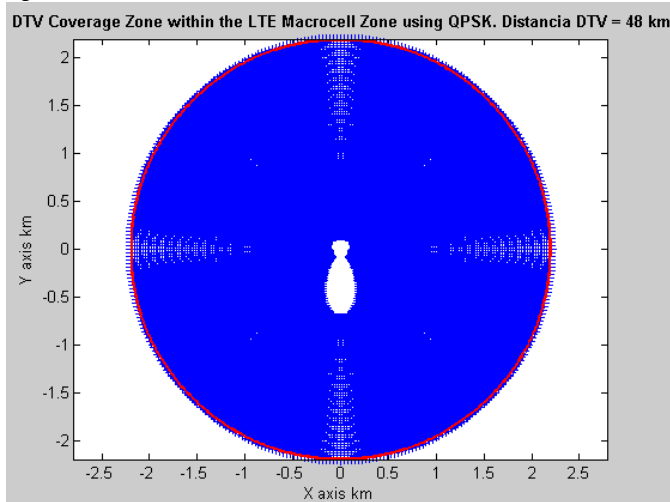


Figura 102. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.

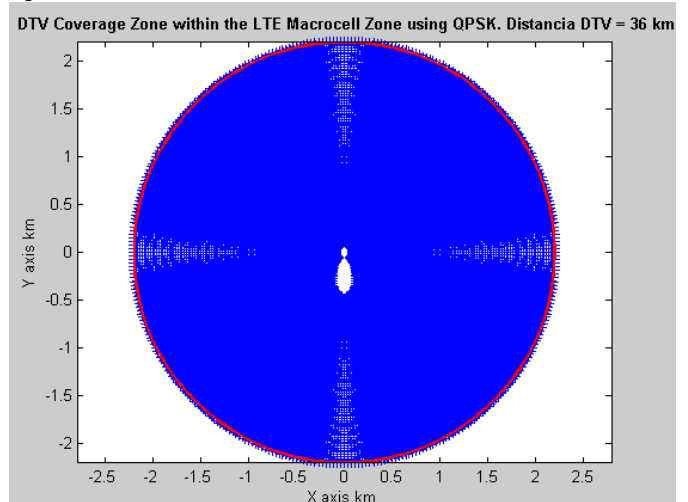


Figura 103. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.

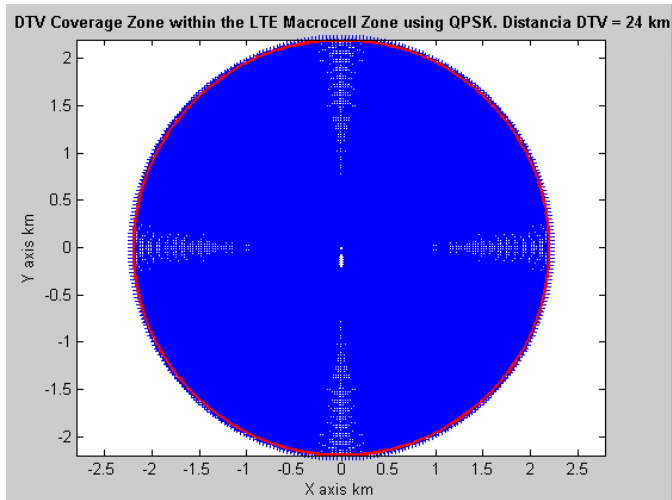


Figura 104. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.

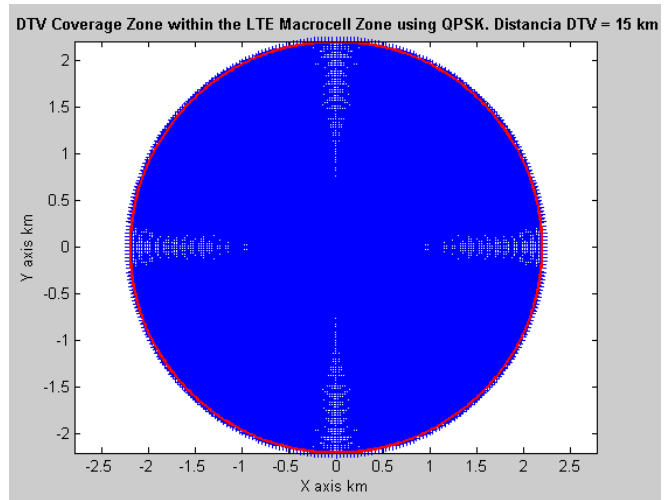


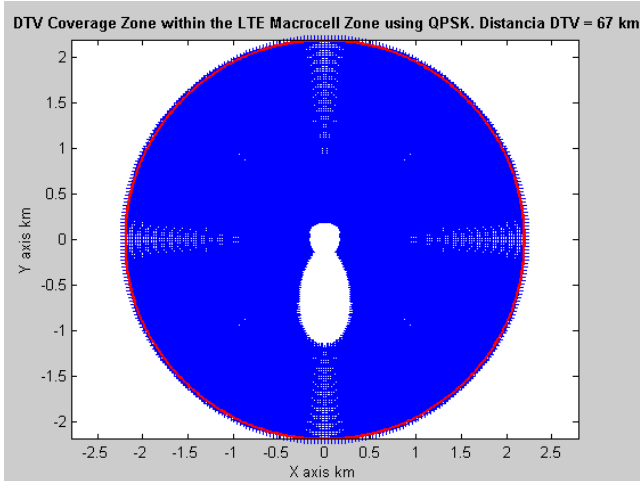
Figura 105. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 15 km.

En los resultados de este apartado puede apreciarse una mejora que los obtenidos en el caso anterior, pues la banda que separa los canales bajo estudio es de 14 MHz, 8MHz más. Probablemente se esperaría un incremento de la zona de cobertura mayor, pero por las características de los elementos utilizados, siendo los valores de los parámetros de éstos acotados, no es así.

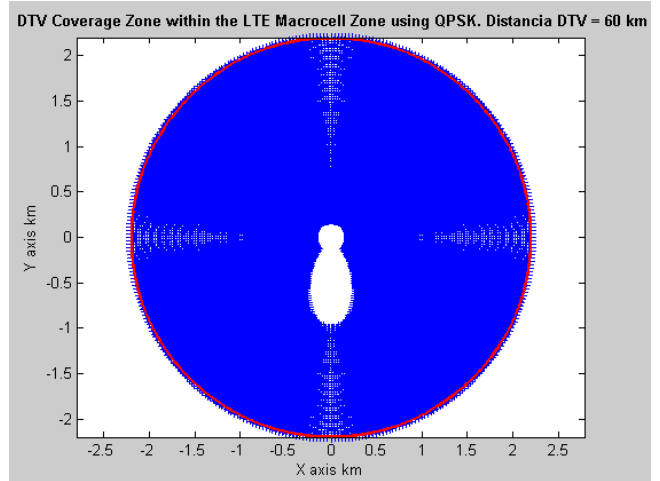
#### 4.2.6 EFECTO DEL CANAL B SOBRE 58

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -35   |
| Efecto RF-TDT [dB] | 0     |
| Filtro IF [dB]     | -46,5 |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

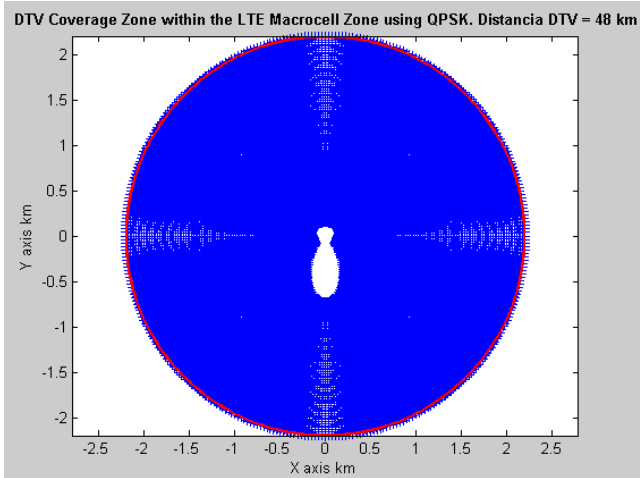
Tabla 24. Parámetros para el efecto del canal B sobre 58.



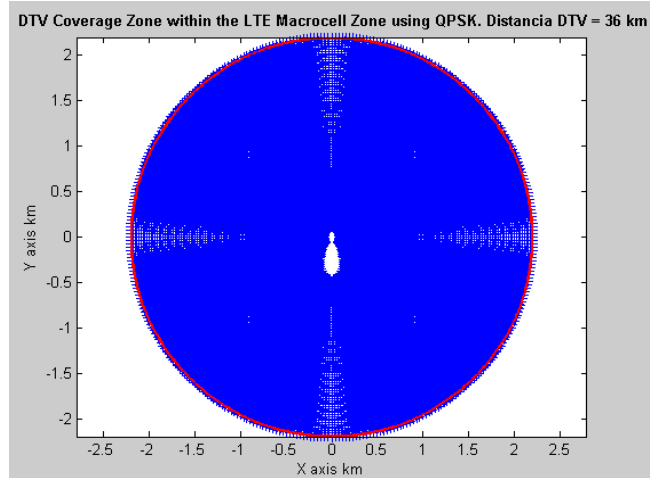
**Figura 106. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.**



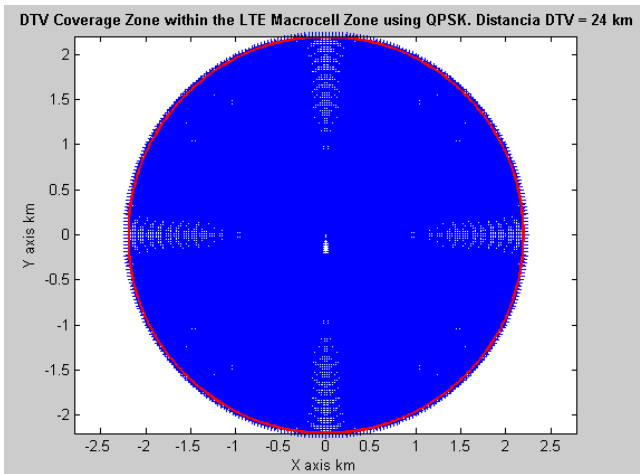
**Figura 107. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.**



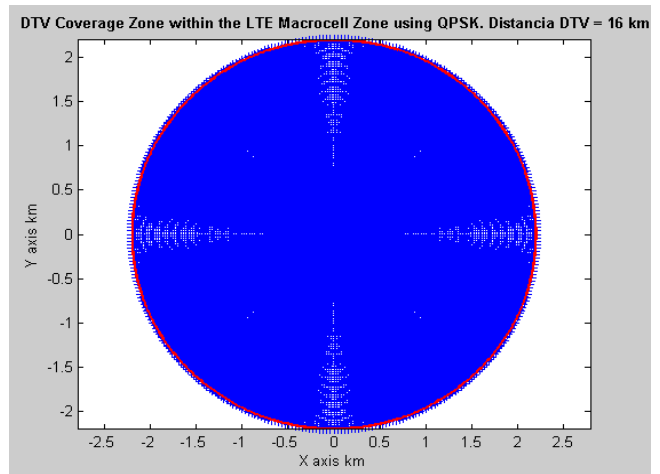
**Figura 108. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.**



**Figura 109. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.**



**Figura 110. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.**



**Figura 111. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 16 km.**

Como ocurrió con el escenario 1, debido a las características de los elementos utilizados en el estudio, llega un punto en que el aumento de la separación entre canales no produce una mejora en los resultados de la cobertura. Esto se produce en este apartado, ya que puede verse que las zonas de cobertura TDT dentro de la macrocelda LTE son prácticamente iguales que en el apartado 4.2.5.

### 4.2.7 EFECTO DEL CANAL C SOBRE 60

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -37   |
| Efecto RF-TDT [dB] | -3,9  |
| Filtro IF [dB]     | -45   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 25. Parámetros para el efecto del canal C sobre 60.

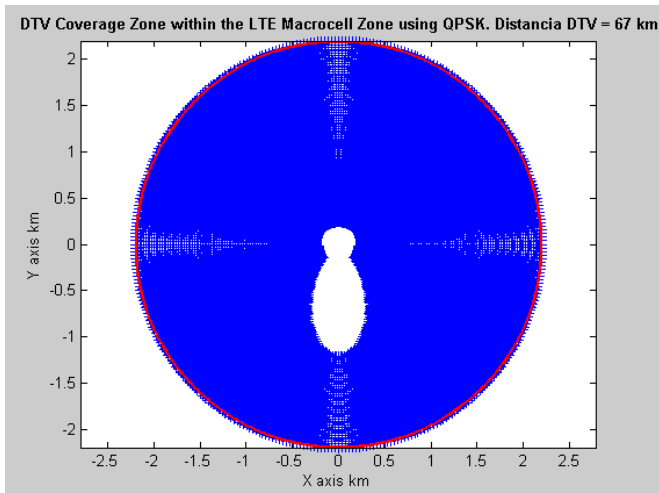


Figura 112. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.

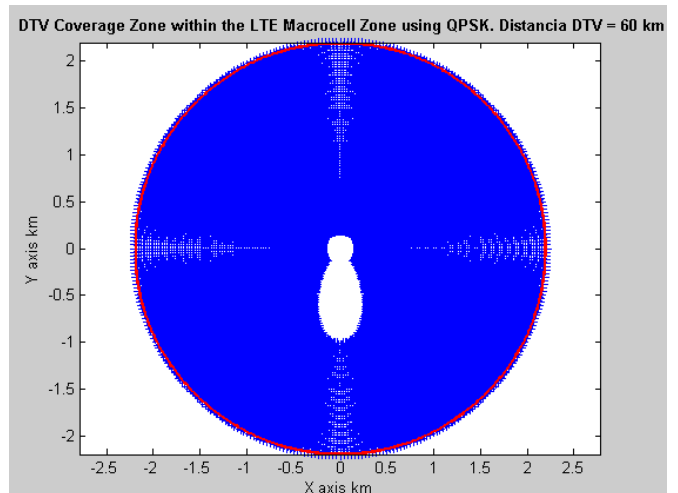


Figura 113. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.

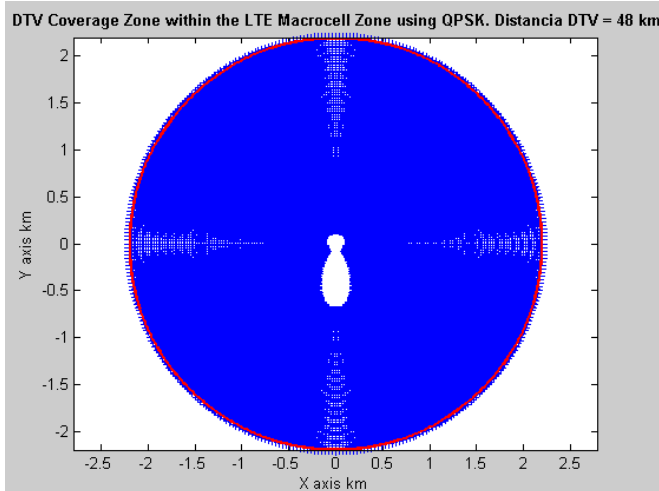


Figura 114. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.

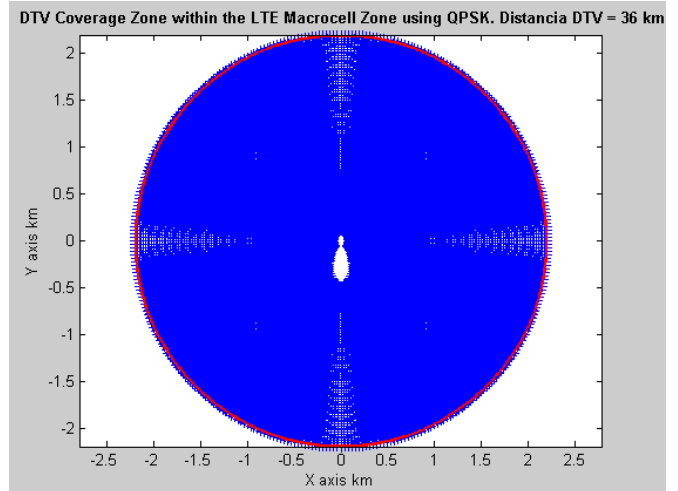


Figura 115. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.

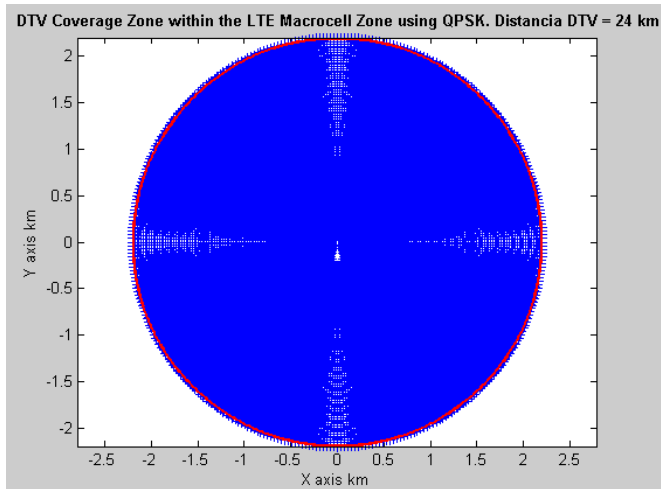


Figura 116. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.

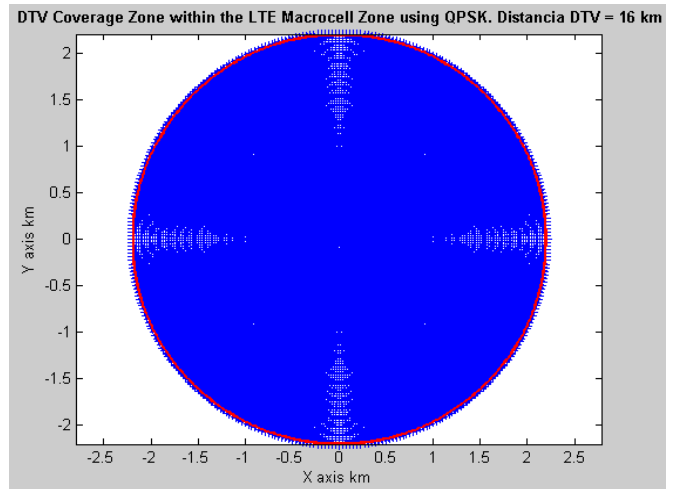


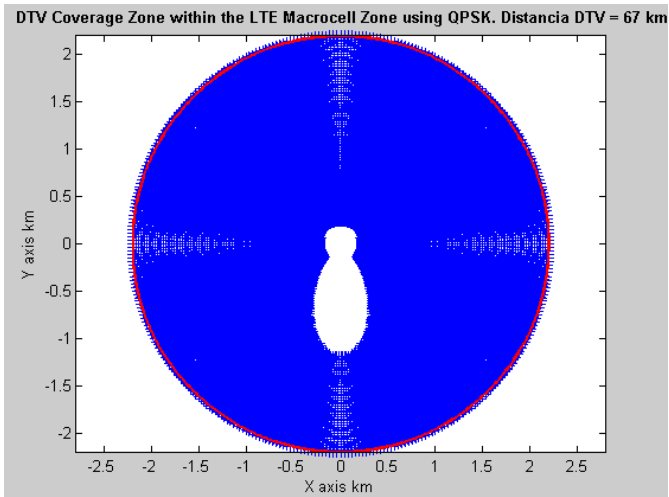
Figura 117. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 16 km.

Como se comentó, los resultados obtenidos son bastante parecidos a los del apartado anterior, ya que el efecto del *leakage* total del canal B sobre el 58 es de -51 dB y el de este caso es de -55 dB, siendo una diferencia pequeña, poco apreciable, consiguiendo la mejora mínima.

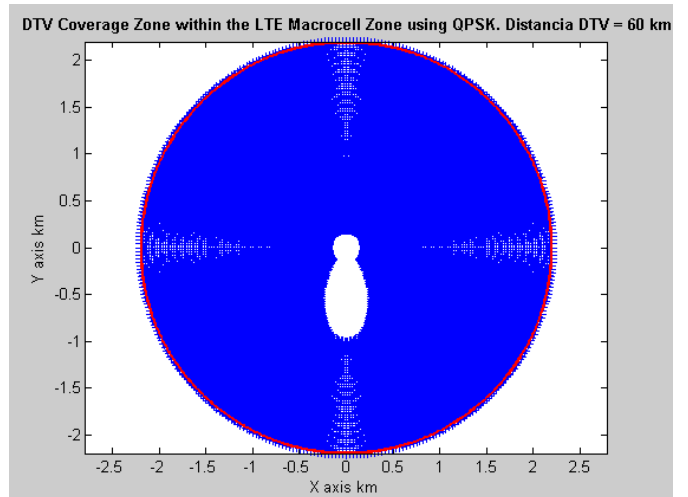
#### 4.2.8 EFECTO DEL CANAL C SOBRE 59 Y 58

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -37   |
| Efecto RF-TDT [dB] | 0     |
| Filtro IF [dB]     | -48   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

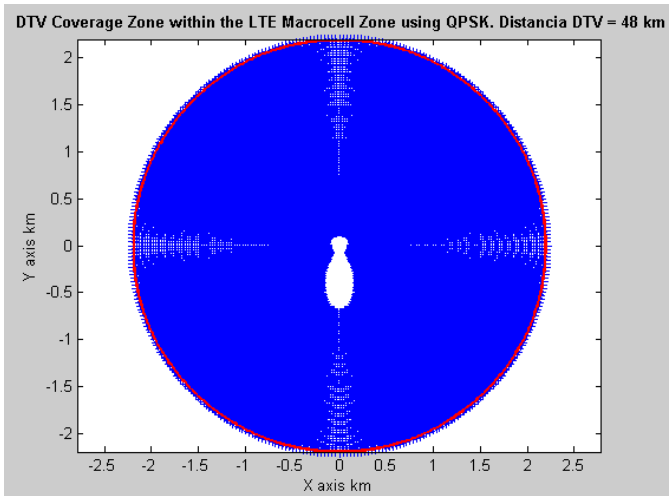
Tabla 26. Parámetros para el efecto del canal C sobre 59 y 58.



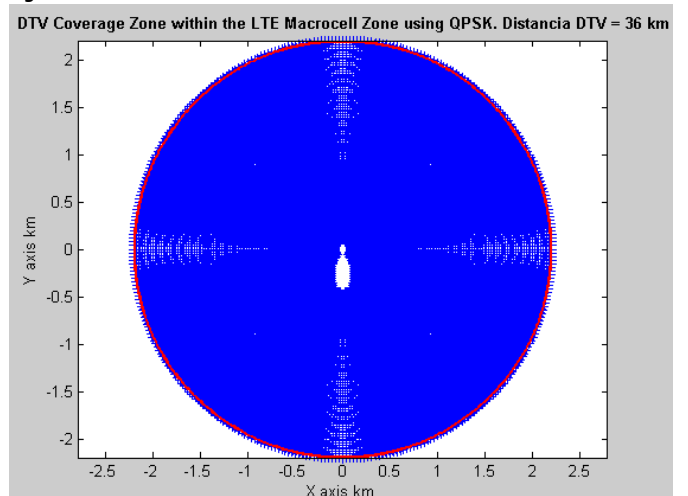
**Figura 118. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.**



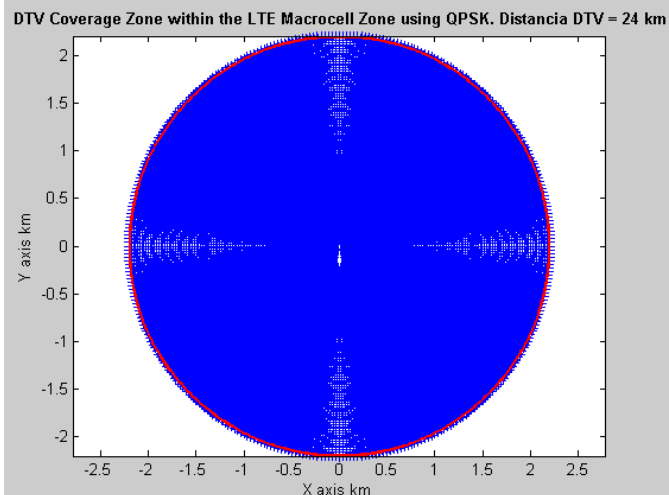
**Figura 119. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.**



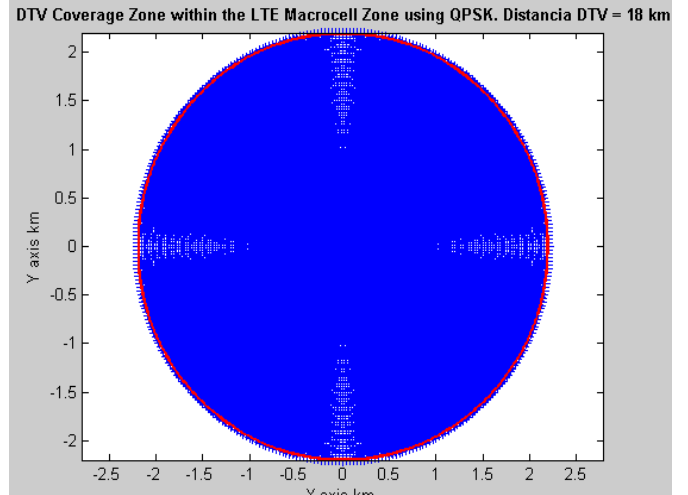
**Figura 120. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.**



**Figura 121. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.**



**Figura 122. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.**



**Figura 123. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 18 km.**



### 4.3 SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA TDT (700MHZ)

Ya que en varios países del mundo la banda asignada para la red inalámbrica de banda ancha se encuentra en 700 MHz y, además, algunos países de Europa intentarán establecer en ésta los servicios móviles provocando un nuevo y segundo Dividendo Digital, como se dijo en capítulos anteriores, se estudiará también este caso.

A continuación, se presentarán los resultados del primer escenario propuesto, obtenidos al estudiar el efecto de los canales 60, 59 y 58 de TDT sobre los canales A, B y C de LTE para esta banda de la que se habla (700MHz).

#### 4.3.1 EFECTO DEL CANAL 60 SOBRE A, B Y C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -39,6 |
| Filtro IF [dB]     | -70   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 27. Parámetros para el efecto del canal 60 sobre A, B y C.

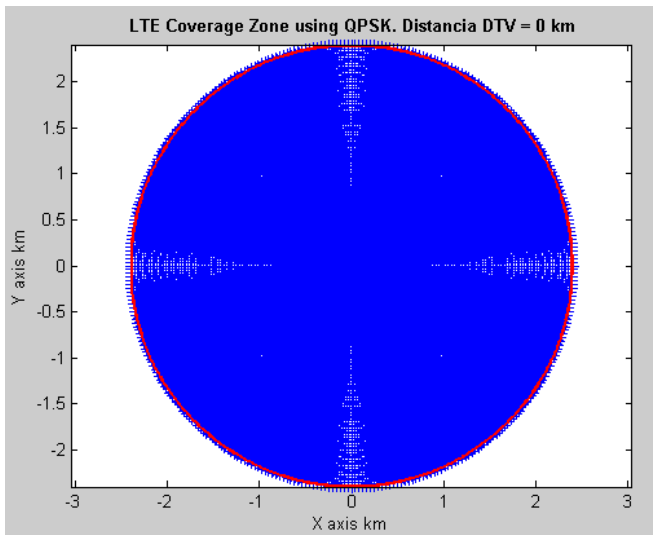


Figura 124. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 0 m.

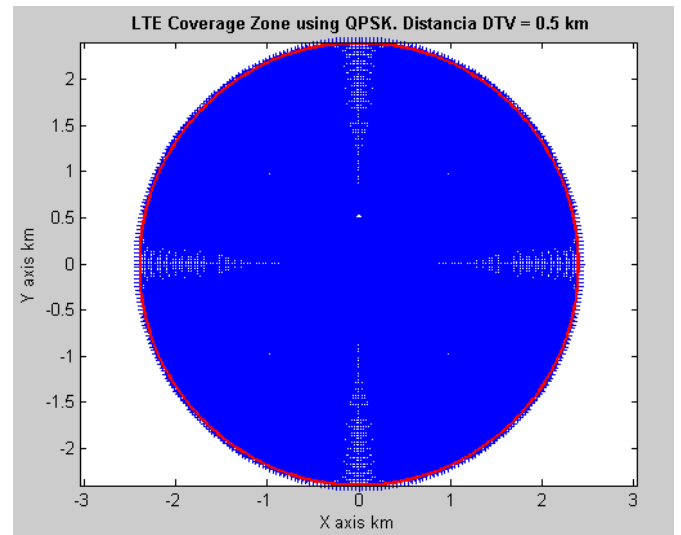
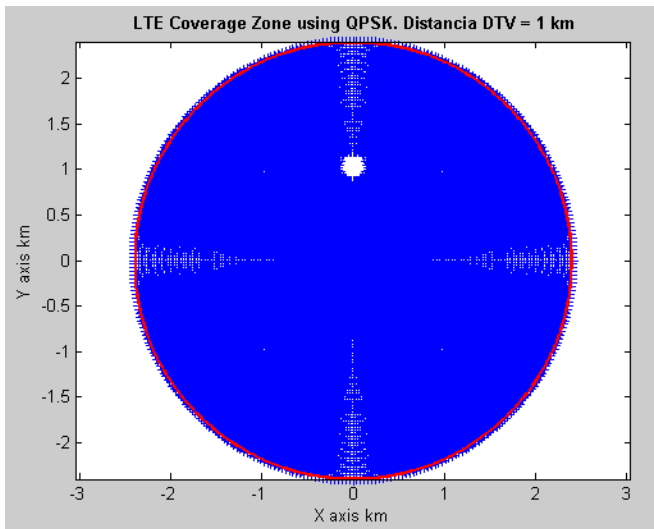
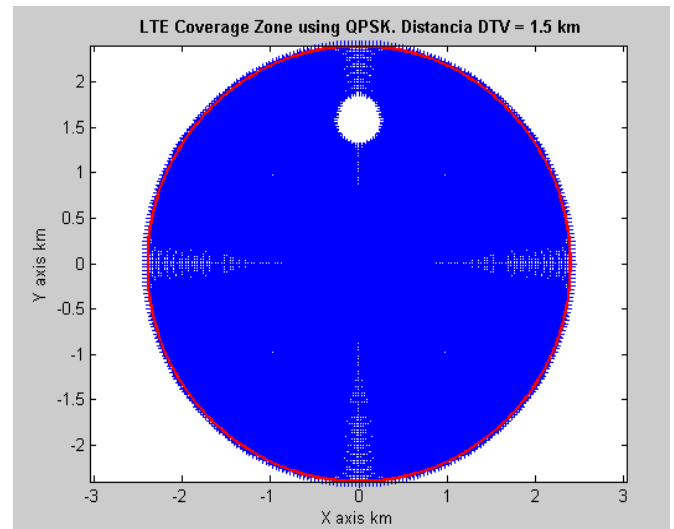


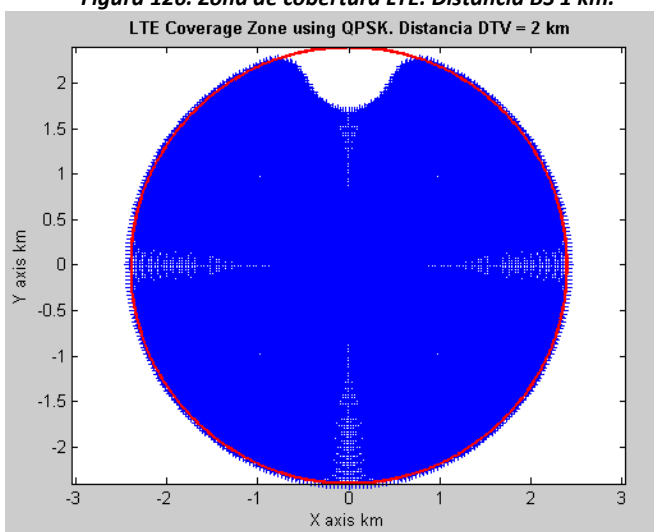
Figura 125. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 500 m.



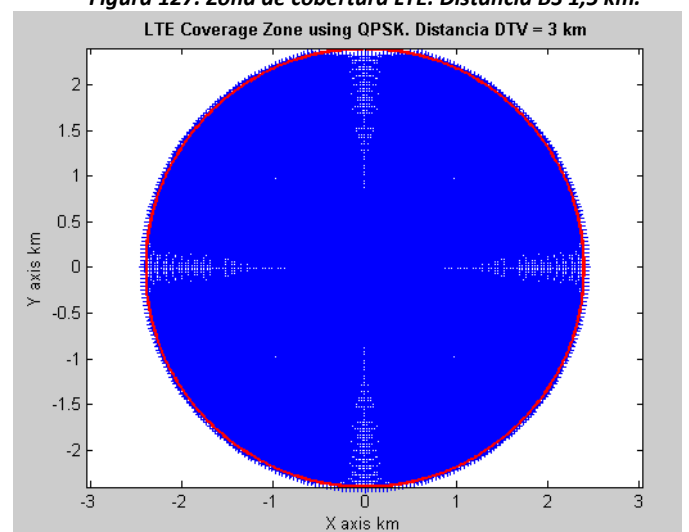
**Figura 126. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1 km.**



**Figura 127. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1,5 km.**



**Figura 128. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 2 km.**



**Figura 129. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 3 km.**

Como puede comprobarse a la vista de las Figuras 124 a la 129, al encontrarse los canales de TDT a una distancia tan grande (64 MHz) de los canales LTE DL en la banda de 700 MHz, la cobertura que se consigue para el peor caso es prácticamente igual que la conseguida en el mejor de los resultados del punto 4.1. Así, se corrobora que llega un momento en el que las mejoras de los efectos de las interferencias producidas por las señales del transmisor TDT sobre las señales LTE, se estancan debido a las condiciones impuestas por los elementos escogidos para el estudio, no siendo factible la cobertura completa de la macrocelda LTE.

A pesar de no conseguir una cobertura total, ésta es mucho mejor que la conseguida en el caso del DD de España para el peor caso, como se ha dicho, siendo por esto por lo que en otros países se decidió utilizar esta banda de 700 MHz para la emisión de banda ancha móvil y por lo que se está hablando de realizar un nuevo DD2 en Europa, en un futuro próximo.

### 4.3.2 EFECTO DEL CANAL 59 SOBRE A, B Y C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -41   |
| Filtro IF [dB]     | -70   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 28. Parámetros para el efecto del canal 59 sobre A, B y C.

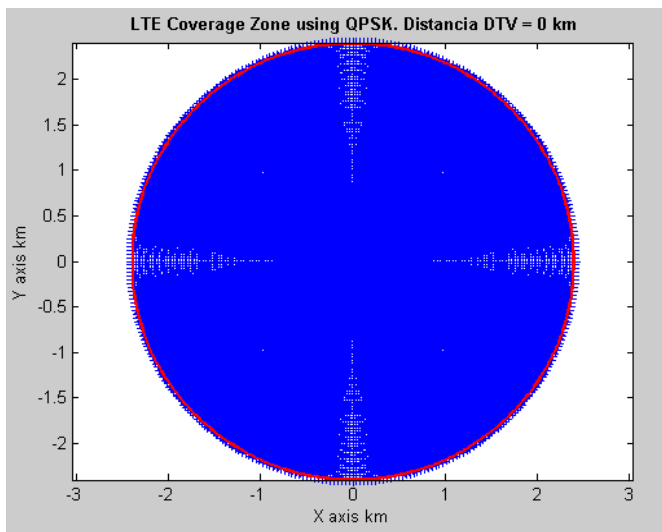


Figura 130. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 0 m.

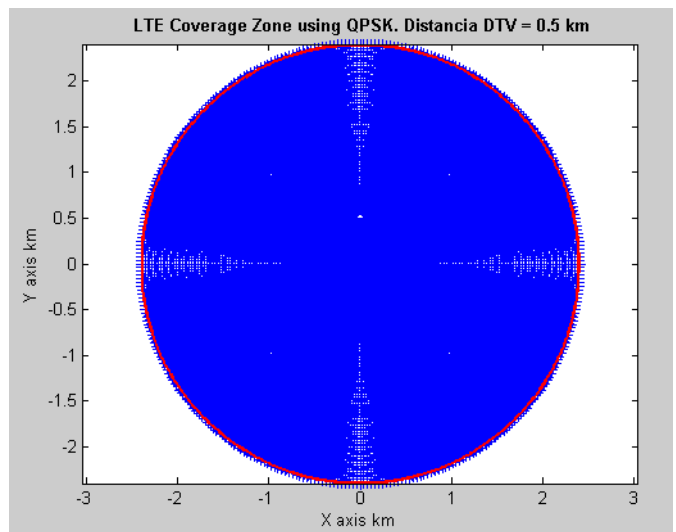


Figura 131. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 500 m.

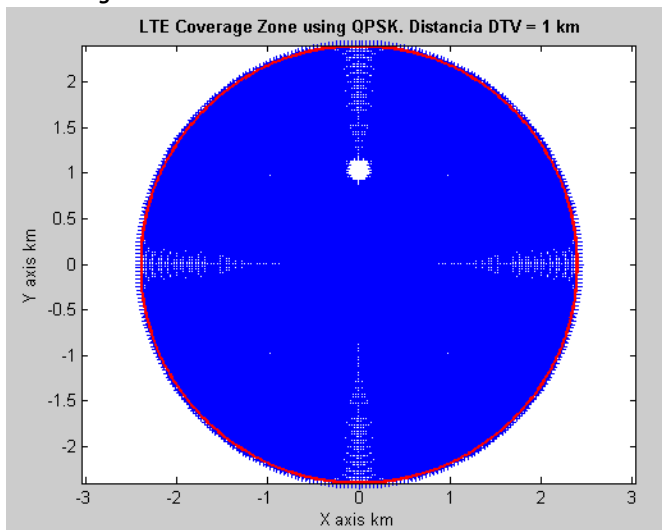


Figura 132. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1 km.

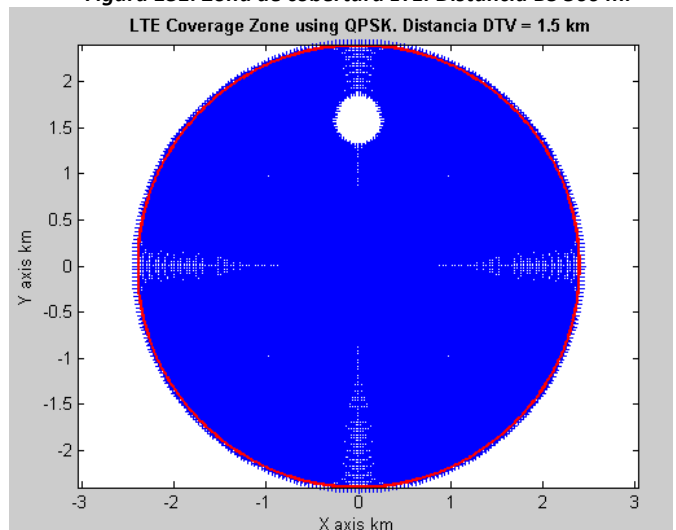


Figura 133. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1,5 km.

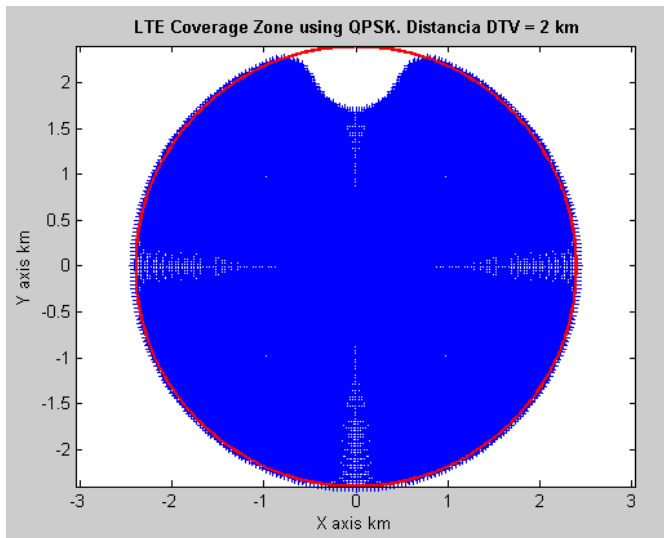


Figura 134. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 2 km.

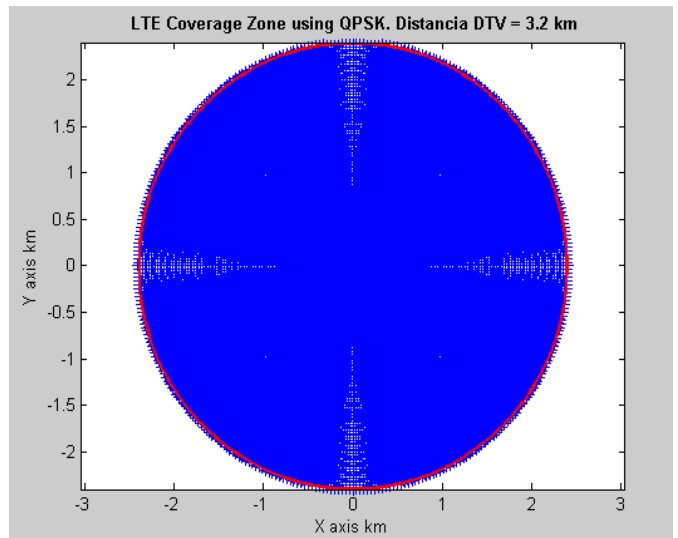


Figura 135. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 3,2 km.

### 4.3.3 EFECTO DEL CANAL 58 SOBRE A, B Y C

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx TDT [dB]        | -78   |
| Duplexor [dB]      | -45,6 |
| Filtro IF [dB]     | -70   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 3,5   |

Tabla 29. Parámetros para el efecto del canal 58 sobre A, B y C.

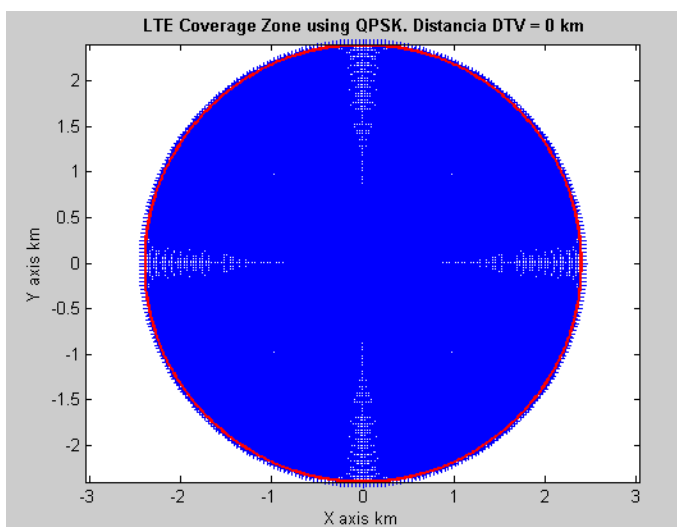


Figura 136. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 0 m.

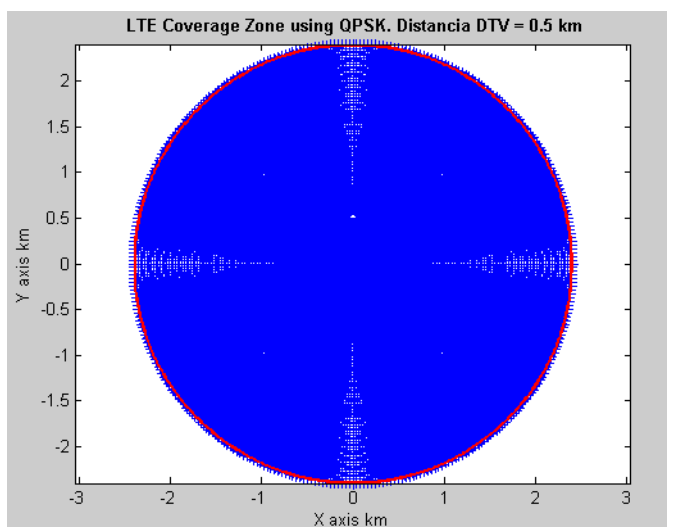
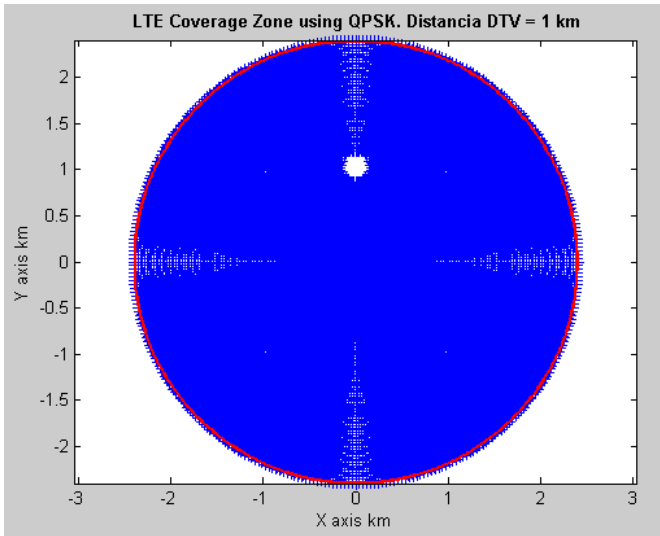
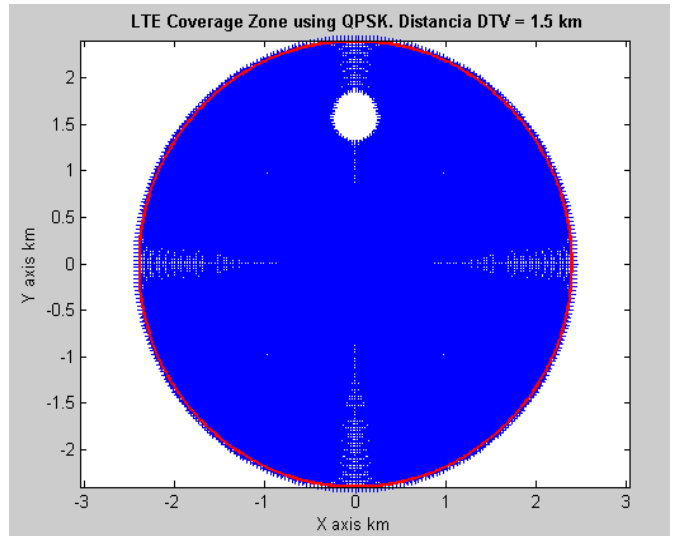


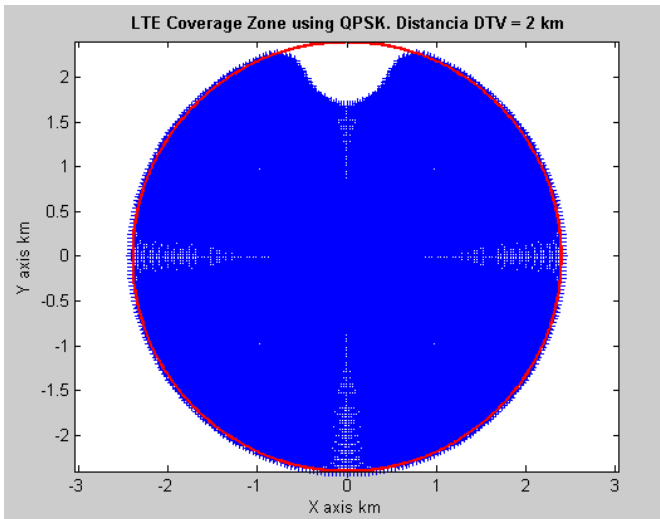
Figura 137. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 500 m.



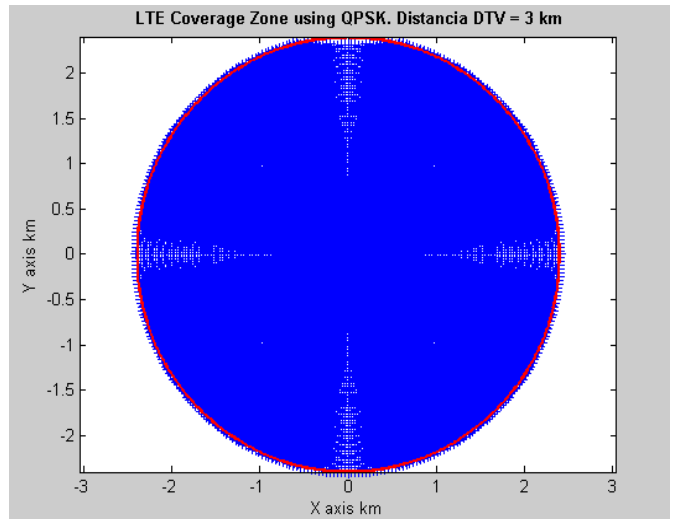
**Figura 138. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1 km.**



**Figura 139. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 1,5 km.**



**Figura 140. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 2 km.**



**Figura 141. Zona de cobertura LTE. Distancia BS 3 km.**

#### 4.4 SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA LTE (700MHZ)

Como se hizo en el apartado 4.2, pero en este caso para la banda de 700 MHz, se presentará la zona de cobertura de TDT dentro de la macrocelda LTE, estudiando el efecto de los canales A, B y C de LTE sobre los canales 60, 59 y 58 de TDT.

#### 4.4.1 EFECTO DEL CANAL A, B Y C SOBRE 60 Y 59

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -52   |
| Efecto RF-TDT [dB] | -2    |
| Filtro IF [dB]     | -65   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

Tabla 30. Parámetros para el efecto de los canales A, B y C sobre 60 y 59.

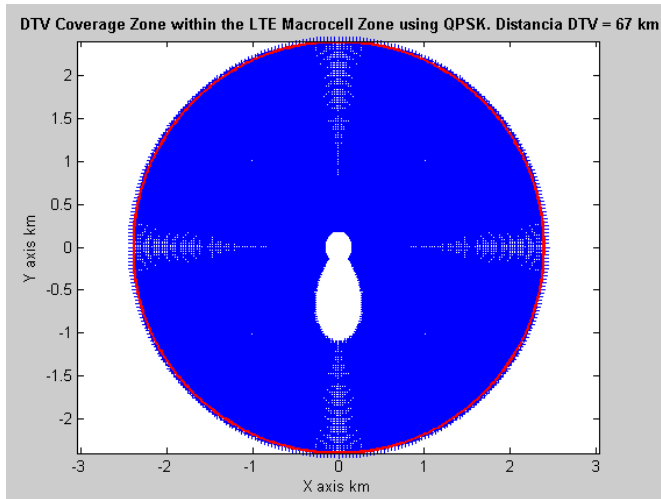


Figura 142. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.

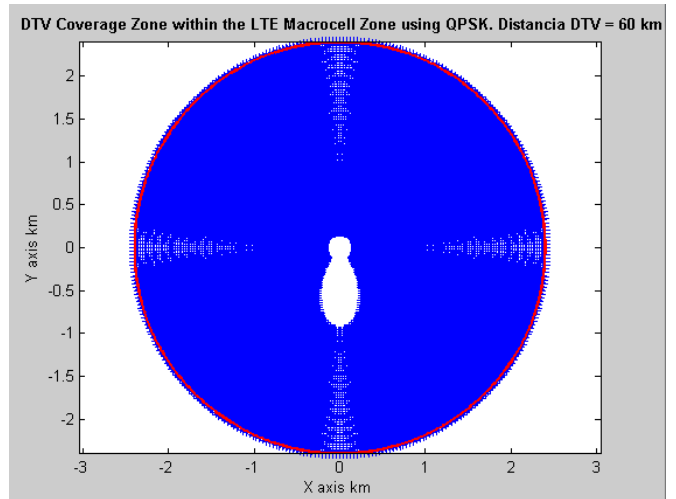


Figura 143. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.

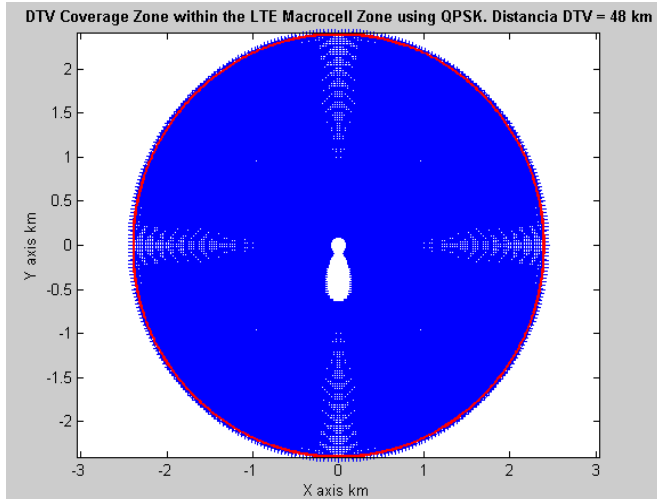


Figura 144. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.

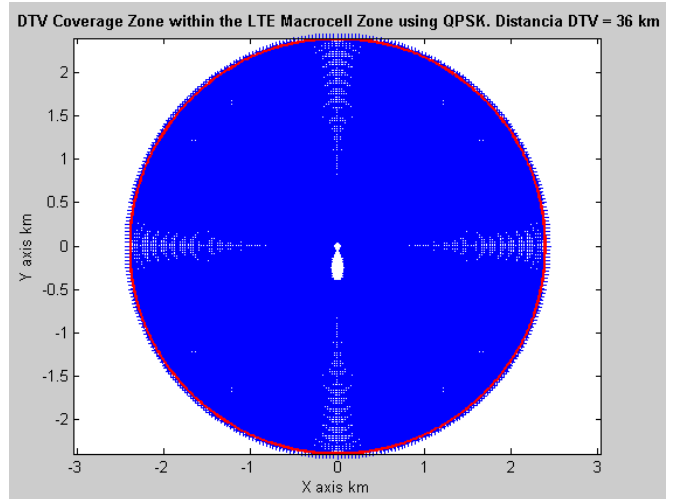


Figura 145. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.

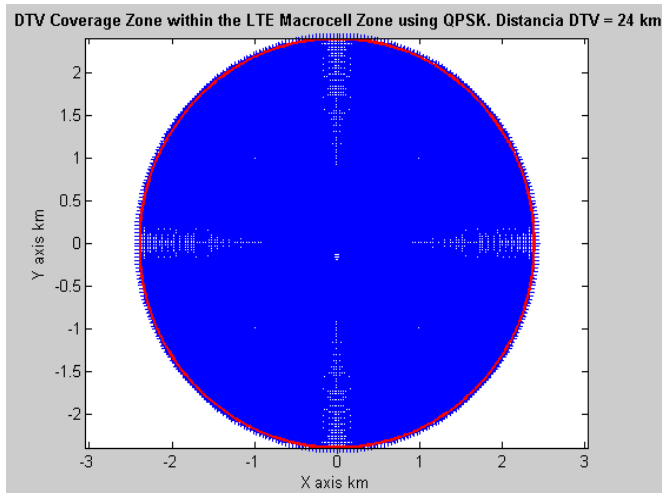


Figura 146. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 24 km.

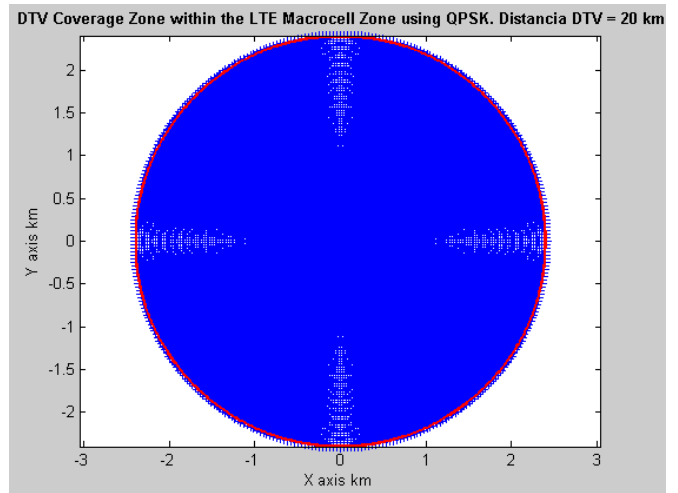


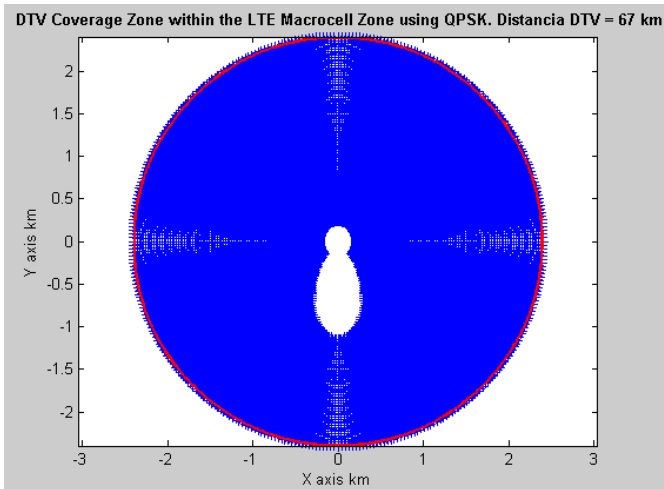
Figura 147. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 20 km.

Al existir una separación tan grande entre los primeros canales de LTE y los últimos de TDT, como se comentó en el apartado 4.3, el efecto que producen A, B y C sobre 60 y 59 son iguales, pues los elementos utilizados para realizar el estudio sobre la coexistencia entre los dos sistemas en este TFM, no permiten mejorar la zona de cobertura TDT dentro de la macrocelda LTE tanto como se quisiera, pues no son ideales.

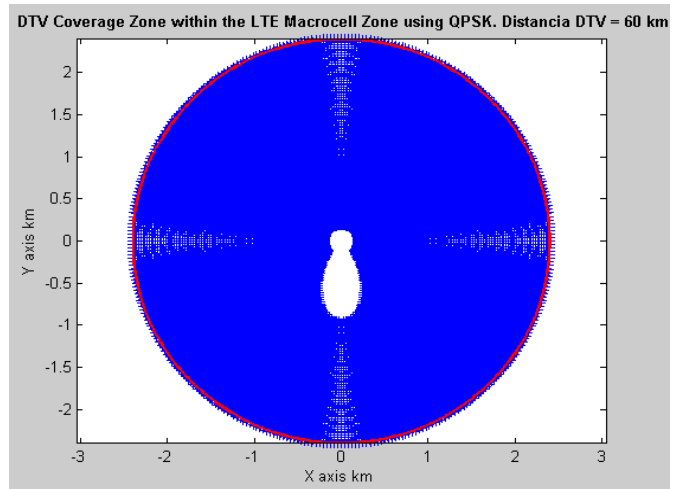
#### 4.4.2 EFECTO DEL CANAL A, B Y C SOBRE 58

|                    | Valor |
|--------------------|-------|
| PIRE LTE [dBm]     | 75    |
| PIRE TDT [dBm]     | 61    |
| Tx LTE [dB]        | -51   |
| Filtro RF [dB]     | -52   |
| Efecto RF-TDT [dB] | -1,5  |
| Filtro IF [dB]     | -65   |
| SINR QPSK LTE [dB] | 7,7   |

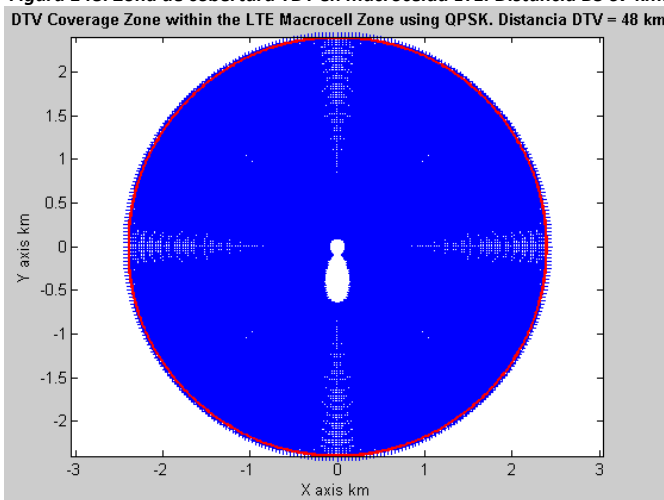
Tabla 31. Parámetros para el efecto de los canales A, B y C sobre 58.



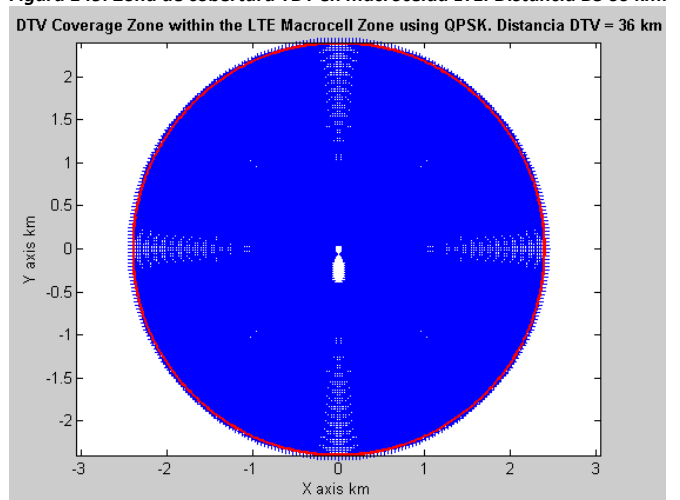
**Figura 148. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 67 km.**



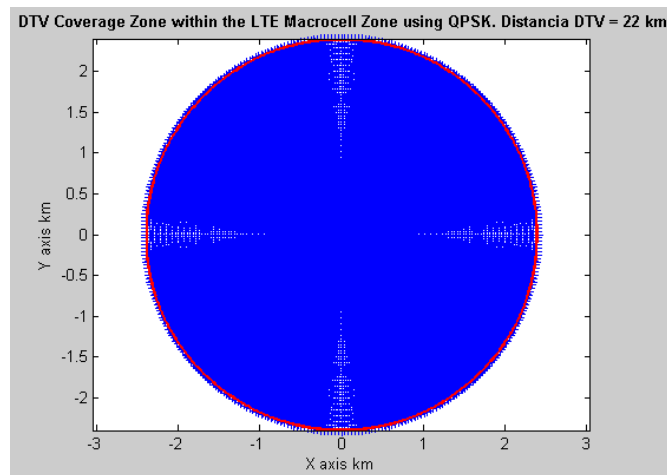
**Figura 149. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 60 km.**



**Figura 150. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 48 km.**



**Figura 151. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 36 km.**



**Figura 152. Zona de cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia BS 22 km.**

Aunque existe mayor separación entre los canales A, B y C y el canal 58, con respecto a los estudiados en el apartado anterior, se produce una mejora muy pequeña, debido a lo comentado previamente sobre los elementos de los sistemas LTE y TDT utilizados para las simulaciones.



Por lo tanto, puede concluirse:

- En el escenario 1, cuando la señal LTE sufre interferencias producidas por una señal enviada por un transmisor TDT, cuánto más lejos se encuentren las estaciones base, más completa es la zona de cobertura. Al estudiar el efecto de los canales TDT sobre LTE, pudo comprobarse que cuanto mayor es la banda de frecuencias que separan a éstos, menores son las interferencias que se producen entre ellos. Así, si todo fuera ideal, habría una separación que permitiría una cobertura completa y máxima, pero como se ha comprobado, debido a que los elementos utilizados para el estudio tienen restricciones de valores en sus parámetros, la cobertura no llega a ser la esperada, habiendo zonas en las que los usuarios no tienen posibilidad de recibir la señal.
- En el escenario 2, en el que se estudia el efecto de los canales de LTE sobre los de TDT y se muestra la zona de cobertura de este último dentro de la macrocelda de LTE, se comprobó que según se acercan las estaciones base, se mejoran las coberturas, pues la señal TDT será más potente, pudiendo contrarrestar el efecto de la interferencia. Al igual que en el caso anterior, cuanto más separados se encuentren los canales de LTE y TDT, menores son las interferencias entre ellos, pero existe, también, un momento en el que la separación de éstos no permite mejorar.
- La separación de 1 MHz entre el Canal 60 de TDT y el Canal A de LTE, no es suficiente para que la zona de cobertura, tanto de TDT como de LTE, sea lo más completa posible, como se ha demostrado en los apartados 4.1.1, 4.2.1, 4.3.1 y 4.4.1, siendo por esto por lo que en otros países la banda de guarda entre los sistemas es mayor, consiguiendo tener una mejor cobertura.

Como soluciones se proponen:

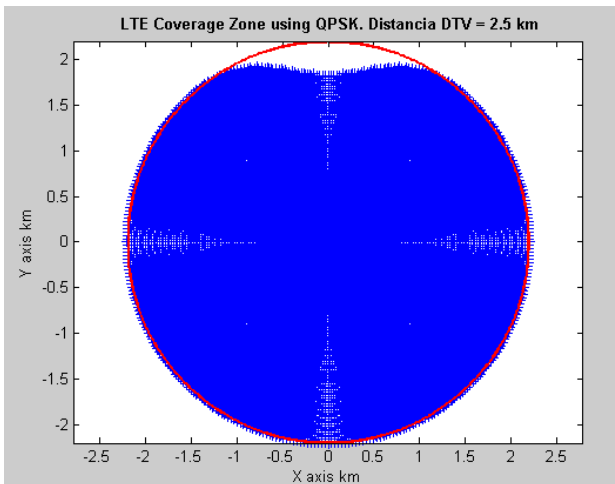
- 'Eliminar' los canales A y 60, dejando una banda de guarda mayor a 1 MHz.
- Reducir el radio de cobertura de LTE, disminuyendo la potencia de transmisión de este sistema.

#### **4.5 REDUCCIÓN DEL RADIO DE COBERTURA DE LA ESTACIÓN BASE LTE**

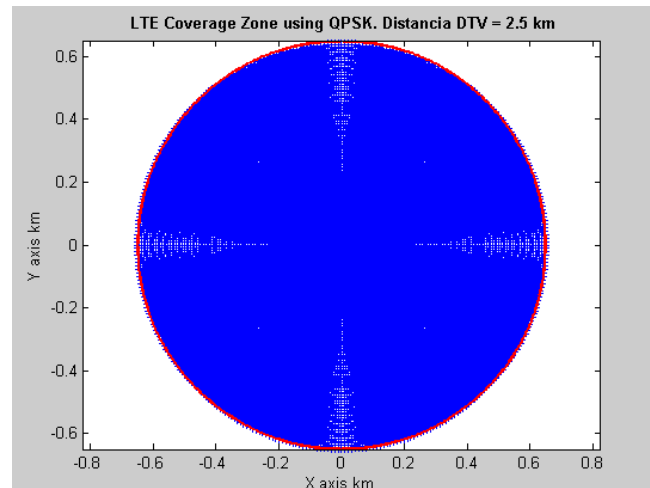
En este apartado se mostrará el resultado obtenido al disminuir la potencia de transmisión de la señal LTE, que conlleva una reducción del radio de cobertura de la estación base LTE, ya que se ha comentado en el punto 4.5 que ésta sería una de las soluciones que se podría implementar para así contar con una cobertura completa. Se

analizará solamente un caso –Efecto del Canal 60 sobre Canal B-, pues con esto será suficiente para ver el efecto que conlleva este remedio.

Al disminuir la potencia de 40 W (46 dBm) a 0,5 W (27 dBm) se consigue pasar de un radio de cobertura de 2,2 km a uno de 0,65 km para la modulación QPSK, obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 153. Zona de cobertura LTE para una Ptx de 40 W.**



**Figura 154. Zona de cobertura LTE para una Ptx de 0,5 W.**

Puede verse, que para que se consiga una cobertura completa en la zona LTE, la reducción de la potencia tiene que ser bastante alta, consiguiendo unos radios de cobertura muy pequeños, lo que llevaría a colocar transmisores LTE cada poco metros, situación que resulta de los más complicada y cara, por lo que habría que realizar un estudio sobre la viabilidad.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este Trabajo de Fin de Máster se ha realizado un estudio sobre la coexistencia de los sistemas LTE y TDT. Al migrar de la televisión analógica a la digital quedaron disponibles frecuencias que podían ser utilizadas para distintos servicios, decidiéndose que su uso fuera para servicios de banda ancha inalámbrica, pues este fin tenía una gran demanda por parte de los usuarios. Así en España, tras la reorganización del Dividendo Digital, siguiendo la propuesta de Europa para que estos servicios ocuparan la banda de 800 MHz en todo el continente, la banda de frecuencia más alta destinada a la TDT termina en 790 MHz y la banda de frecuencia más baja de LTE empieza en 791 MHz, existiendo solamente un espacio de 1 MHz sin utilización. Por lo tanto, se quiso comprobar si esta pequeña banda de guarda era suficiente para que las interferencias entre las señales sean bajas y no afecten a los usuarios en el radio de cobertura de las estaciones base o, si por el contrario, es necesario contar con una banda de guarda mayor para dar un servicio adecuado.

Para realizar el trabajo se ha implementado código en *Matlab* que simula los dos escenarios propuestos a estudio, basándose en la investigación y documentación previa sobre los sistemas LTE y TDT y su coexistencia.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que la banda de guarda de 1 MHz entre los dos sistemas no es suficiente para que las señales de ambos no interfieran y los usuarios tengan buena cobertura. Los clientes de TDT deberían tener una cobertura completa, pero con las señales de LTE que se están transmitiendo no es posible. Como solución se podría hacer como en algunos países del mundo, en los que se decidió dejar una banda de guarda de unos 6 MHz, lo que equivaldría a 'eliminar' el canal A como primer canal de LTE, empezando este sistema en lo que ahora se considera canal B (796 MHz). En los resultados mostrados, se puede ver que los efectos sobre este canal y los que éste produce son menores, aunque sigue habiendo bastantes zonas en las que la señal no llega de la manera adecuada. Para seguir mejorando, habría que ir 'eliminando' canales, alternando entre LTE y TDT, nunca varios canales seguidos de un mismo sistema.

En el caso del escenario 1, en el que la señal LTE es interferida por una señal transmitida TDT, para que la cobertura sea mayor, lo mejor sería que el transmisor TDT estuviera más alejado de la estación base de LTE, pues como se puede ver en los resultados, cuanto mayor es esta distancia, menor es la zona en la que no existe cobertura. También, si se reduce la potencia de la señal LTE, el radio de cobertura de la estación base disminuye, consiguiendo tener disponibilidad de acceso LTE con la modulación QPSK en toda la zona de cobertura de LTE.

En lo que respecta al escenario 2, sufriendo la señal TDT interferencias de una señal LTE transmitida, la distancia de las estaciones debería ser la menor posible, siendo algo complicado, por lo que no existe una solución fácil, así lo único que sería útil consistiría en la ampliación de la banda de guarda.

Los responsables de solucionar estos problemas y aquellos que deberían haberlos estudiado de manera exhaustiva antes de decidir dónde colocar los transmisores LTE para conseguir la mejor calidad de señal y la mayor cobertura para los usuarios, son los proveedores de servicio de banda ancha, ya que la TDT estaba implantada antes que LTE. Así, éstos deberán asumir el coste que conlleve la resolución de la situación.

Como trabajos futuros se proponen:

- Ampliación de este TFM para casos en los que se tengan en cuenta varias señales transmitidas TDT afectando a las señales de LTE y viceversa.
- Estudio real de la coexistencia de los sistemas TDT y LTE.
- Estudio de viabilidad económica según la solución que se decida llevar a cabo, realizando una comparativa entre el precio y las ventajas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gobierno de España, “www.televisiondigital.gob.es”, 2015.
- [2] ICT KTN Wireless Technology & Spectrum Working Group, “800MHz Interference and co-existence challenges”, Interim Rep., Agosto, 2011.
- [3] Ofcom, “Technical analysis of interference from mobile network base stations in the 800 MHz band to digital terrestrial television”, Tech. Rep., Junio, 2011.
- [4] DigiTAG, “Update on the use of the 700 MHz band in Europe,” *Newsletter*, Mar. 2015
- [5] J. Ribadeneira-Ramírez, G. Martínez, D. Gómez-Barquero, N. Cardona, “Interference Analysis Between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands”, *IEEE Transactions on broadcasting*, 2015.
- [6] DVB SB2122, “Study on specification and use of in-line filters to reduce interference in broadcast bands from mobile base stations,” DVB White Paper, Mar. 2014.
- [7] Eur. Conf. Postal Telecommun. Admin., “The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790–862 MHz for the digital dividend in the European Union,” Tech. Rep. 30, Oct. 2009.
- [8] L. Polak et al., “Study of coexistence between indoor LTE femtocell and outdoor-to-indoor DVB-T2-Lite reception in a shared frequency band” *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, Apr. 2015.
- [9] DIGITALEUROPE, “Recommendations on DTT interference avoidance from LTE transmissions”, Bruselas, Diciembre, 2012.
- [10] ERA Technology Ltd. – Ofcom, “Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interferences into DTT Receivers”, Julio 2011.
- [11] “Lower Edge of Mobile Allocation and Adjacent Band Compatibility”, CPG-PTD (13)010. WRC-15 Agenda Item 1.2, Jan., 2013.
- [12] “Lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility”, CPG-15 PTD #2. WRC-15 agenda item 1.2, Enero, 2013.
- [13] J. Korhonen, “Introduction to 4G Mobile Communications”, Ed. Artech House, 2014, ISBN: 978-1-60807-699-4.
- [14] V. Torres, F. Esparza, F. Falcone, “Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en LTE”, Pamplona, Noviembre, 2009.
- [15] F. Khan, “LTE for 4G Mobile Broadband. Air Interface Technologies and Performance”, Ed. Cambridge, 2009, ISBN: 978-0-521-88221-7.

[16] J. Ortín, “Estudio de Técnicas de Codificación de Canal en Redes Celulares OFDM” Cátedra Telefónica de la Universidad de Zaragoza, Enero, 2012.

[17] L.A. Fernández, “Estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh en el modelo de propagación de Okumura-Hata en base a Matlab”, Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Quito, Marzo, 2014.

[18] J.C. Casas, “Estudio y análisis de cobertura de la señal de Televisión Digital Terrestre en zonas rurales del municipio de Lorca. Propuesta de solución a zonas de pobre recepción de señal con la instalación de reemisores de pequeña potencia o *Gap-fillers*”, Proyecto Fin de Carrera, Febrero, 2009.

[19] “Codificación de Canal”, Referencia alternativa: J. Proakis, “Digital Communications”. 3<sup>a</sup> ed.

## GLOSARIO

|       |   |
|-------|---|
| 1G    | Primera Generación  |
| 2G    | Segunda Generación  |
| 3G    | Tercera Generación  |
| 4G    | Cuarta Generación   |
| ARQ   | <i>Automatic Repeat request</i>   |
| BCH   | <i>Bose-Chaudhuri-Hocquengham</i>   |
| BPSK  | <i>Binary Phase Shift Keying</i>  |
| CDMA  | <i>Code Division Multiple Access</i>  |
| CEPT  | <i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i> |
| COFDM | <i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>                     |
| DD    | Dividendo Digital   |
| DD2   | Segundo Dividiendo Digital  |
| DL    | <i>Downlink</i>   |
| DVB   | <i>Digital Video Broadcasting</i>   |
| DVB-T | <i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>                             |
| EDGE  | <i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>                             |
| EVM   | <i>Error Vector Magnitude</i>   |
| FDD   | <i>Frequency-Division Duplex</i>  |
| FDMA  | <i>Frequency Division Multiple Access</i>                                   |
| FEC   | <i>Forward Error Correction</i>   |
| FFT   | <i>Fast Fourier Transform</i>   |
| GPRS  | <i>General Packet Radio Service</i>   |
| GSM   | <i>Global System for Mobile Communications</i>                              |
| IP    | <i>Internet Protocol</i>  |
| ITU   | <i>International Telecommunications Union</i>                               |
| kbps  | <i>kilo bits per second</i>   |

|         |   |
|---------|---|
| LAN     | <i>Local Area Network</i>                               |
| LDPC    | <i>Low Density Parity Check</i>                         |
| LTE     | <i>Long Term Evolution</i>                              |
| LTE-A   | <i>Long Term Evolution – Advanced</i>                   |
| MAP     | <i>Maximum A Posteriori</i>                             |
| MBMS    | <i>Multimedia Broadcast Multicast Service</i>           |
| Mbps    | <i>Mega bits per second</i>                             |
| MHz     | <i>Megahercio</i>                                       |
| MIMO    | <i>Multiple In Multiple Out</i>                         |
| OFDM    | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>       |
| OFDMA   | <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>    |
| PAPR    | <i>Peak-to-Average Power Ratio</i>                      |
| PLP     | <i>Physical Layer Pipes</i>                             |
| PSK     | <i>Phase Shift Keying</i>                               |
| QAM     | <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>                  |
| QPSK    | <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>                    |
| RRC     | <i>Conferencia Regional de Radiocomunicaciones</i>      |
| SC-FDMA | <i>Single Carrier Frequency Divison Multiple Access</i> |
| SFN     | <i>Single Frequency Network</i>                         |
| SISO    | <i>Soft Input Soft Output</i>                           |
| SOVA    | <i><u>Soft output Viterbi algorithm</u></i>             |
| TDD     | <i>Time Division Duplex</i>                             |
| TDMA    | <i>Time Division Multiple Access</i>                    |
| TDT     | <i>Televisión Digital Terrestre</i>                     |
| UHF     | <i>Ultra High Frequency</i>                             |
| UL      | <i>Uplink</i>   |
| UMTS    | <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>       |
| VHF     | <i>Very High Frequency</i>                              |



WCDM *Wideband Code Multiple Access*

WCDMA *Wideband Code Division Multiple Access*

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access*



# ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS

## I.1 ANTENA TDT DE TRANSMISIÓN

**UHF Panel**

470–862 MHz

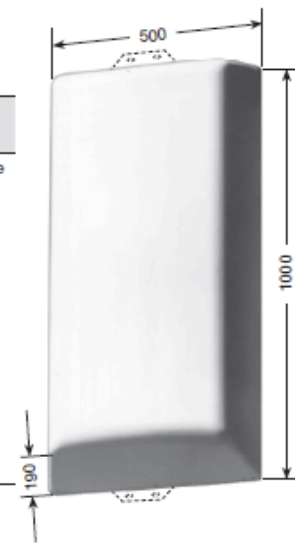
**KATHREIN**

**Polarization**

V

- All-purpose panel for mounting by fixations or to square steel spines.

| Order No.               | 601709<br>K733147                                   | 776165                                 | 776202                | 776167             |
|-------------------------|---|--|-----------------------|--------------------|
| Input                   | 7-16 female straight                                | 7-16 female elbow                      | 7/8" EIA flange elbow | 13-30 female elbow |
| Max. power              | 1 kW  | 1 kW<br>(at 40 °C ambient temperature) | 1.5 kW                | 2 kW               |
| Frequency range         | 470 – 862 MHz                                       |  |                       |                    |
| VSWR                    | < 1.12  |  |                       |                    |
| Gain (at mid-band)      | 11 dBd  |  |                       |                    |
| Impedance               | 50 Ω  |  |                       |                    |
| Polarization            | Vertical  |  |                       |                    |
| Weight                  | 12 kg   |  |                       |                    |
| Wind load (at 160 km/h) | Frontal: 565 N<br>Rearside: 815 N<br>Lateral: 250 N |  |                       |                    |
| Max. wind velocity      | 240 km/h  |  |                       |                    |
| Attachment              | Bracket   | Plate                                  | Plate                 | Plate              |



**Material:** Reflector screen and dipoles: Weather-resistant aluminum.  
Protective cover: Fiberglass.  
Attachment bracket: Hot-dip galvanized steel.  
Attachment plate: Weather-resistant aluminum.

**Radome color:** RAL 9016 (traffic white), other radome colors on request.

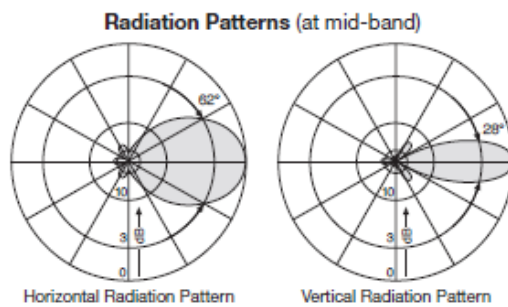
**Mounting:** Attachment bracket: E.g. by using clamps 75310411–75310415 to tubular masts of 40 – 521 mm diameter.  
Attachment plate: Using M 8 x 35 screws (supplied) to suitable attachment construction.  
See chapter "Components" for optional mounting accessories (please order separately).

**Grounding:** Via mounting parts.

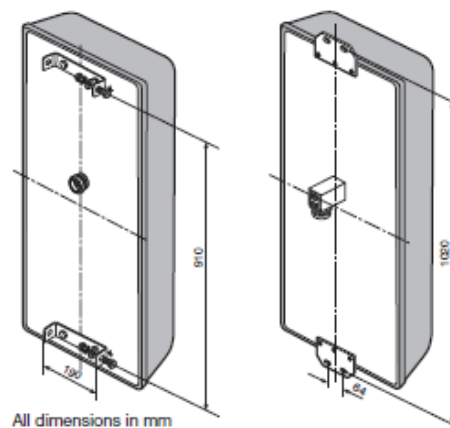
**Ice protection:** The dipoles remain fully functioning even in icy conditions as the fiberglass cover protects the whole antenna.



Vertical polarization



Examples with different connectors and attachments:



Antennas  
470–862 MHz

## I.2 ANTENAS LTE DE ESTACIÓN BASE



### CommScope - 698-896 & 1710-2180 MHz Teletilt Antenna

TESSCO SKU : 573195 Mfg Part #: SBNH-1D4545A Qty/UOM : 1 EACH UPC: 646444777957

COMMSCOPE 698-896 & 1710-2180 MHz Dual Pol Dual Band Teletilt One degree of Freedom Smartbeam Antenna. 45 degree horizontal beamwidth. RET compatible.

#### Technical Specs

GSA

#### Contract:

GS-35F-0548P

#### Schedule:

70 - Information Technology

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Specific Frequency           | 698-806 MHz / 806-896 MHz / 1710-1880 MHz / 1850-1990 MHz / 1920-2180 MHz |
| Gain dBi                     | 15.5 dBi / 15.1 dBi / 17.8 dBi / 18.1 dBi / 18.2 dBi                      |
| Gain dBd                     | 12.95 dBd / 13.35 dBd / 15.65 dBd / 15.95 dBd / 16.05 dBd                 |
| Minimum Front Back Ratio     | 30 dB   |
| Polarization                 | +/- 45 Degrees  |
| Horizontal Beamwidth         | 45 deg / 38 deg / 46 deg / 45 deg / 42 deg                                |
| Maximum VSWR                 | 1.5:1   |
| Maximum Power                | 400 W / 400 W / 300 W / 300 W / 300 W                                     |
| Lightning Protection         | DC Ground   |
| Electrical Downtilt          | Variable  |
| Variable Electrical Downtilt | 2-17 deg / 0-9 deg  |
| RF Connectors                | 7/16 DIN Female   |
| Connector Placement          | Bottom  |
| Jumper Included              | No  |
| Type of Jumper Included      | None  |
| Type of Hardware Included    | DB380, DB5083   |
| Maximum Rated Wind Velocity  | 149.8 mile/h  |
| Item Height                  | 7.1 in  |
| Item Length                  | 56.69 in  |
| Item Width                   | 16.8 in   |
| Item Weight                  | 39.68 lb  |
| Mfg. Warranty                | 1 Year  |

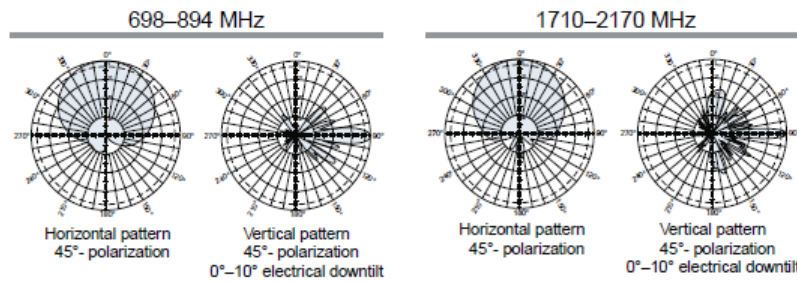
Integrated Replaceable RET Motor  
Mounting Clamps Included

**800 10766V01**  
65° Dual Band Panel Antenna

|  | Antenna 1      | Antenna 2        |
|--|----------------|------------------|
| Dual Band (MHz)  | <b>698–894</b> | <b>1710–2170</b> |
| Dual Polarization  | <b>X</b>       | <b>X</b>         |
| HPBW   | <b>65°</b>     | <b>65°</b>       |
| Adj. Electrical Downtilt<br><small>Internal remote control</small> | <b>0°–10°</b>  | <b>0°–10°</b>    |

**General specifications**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Frequency range         | 698–894 MHz // 1710–2170 MHz           |
| Impedance               | 50 ohms                                |
| VSWR                    | 1.5:1                                  |
| Intermodulation (2x20w) | IM3: -150 dBc                          |
| Polarization            | +45° and -45°                          |
| Connector               | 4 x 7-16 DIN female (long neck)        |
| Isolation               | intrasystem 30 dB // intersystem 35 dB |



Profile PA4

| Specifications  | 698–806 MHz                               | 824–894 MHz                               | 1710–1755 MHz                             | 1850–1990 MHz                             | 2110–2170 MHz                             |
|---|---|---|---|---|---|
| Gain  | 16.4 dBi                                  | 16.8 dBi                                  | 18 dBi                                    | 18.5 dBi                                  | 18 dBi                                    |
| Front-to-back ratio   | 30 dB (co-polar)<br>34 dB (average)       | 30 dB (co-polar)<br>34 dB (average)       | 27 dB (co-polar)<br>34 dB (average)       | 27 dB (co-polar)<br>34 dB (average)       | 27 dB (co-polar)<br>34 dB (average)       |
| Maximum input power per input                                       | 500 watts (at 50°C)                       | 500 watts (at 50°C)                       | 300 watts (at 50°C)                       | 300 watts (at 50°C)                       | 300 watts (at 50°C)                       |
| +45° and -45° polarization horizontal beamwidth                     | 68° (half-power)                          | 65° (half-power)                          | 63° (half-power)                          | 62° (half-power)                          | 63° (half-power)                          |
| +45° and -45° polarization vertical beamwidth                       | 9.5° (half-power)                         | 8.7° (half-power)                         | 5.8° (half-power)                         | 5.8° (half-power)                         | 5.8° (half-power)                         |
| Electrical downtilt continuously adjustable                         | 0°–10°                                    | 0°–10°                                    | 0°–10°                                    | 0°–10°                                    | 0°–10°                                    |
| Min sidelobe suppression for first sidelobe above main beam average | 0° 5° 10° T<br>16 16 16 dB<br>18 20 18 dB | 0° 5° 10° T<br>18 18 16 dB<br>20 20 20 dB | 0° 5° 10° T<br>18 18 18 dB<br>20 22 20 dB | 0° 5° 10° T<br>18 18 18 dB<br>20 22 20 dB | 0° 5° 10° T<br>18 18 18 dB<br>20 22 20 dB |
| Cross polar ratio   |   |   |   |   |   |
| Main direction  | 0°  | 0°  | 0°  | 0°  | 0°  |
| Sector  | 60°                                       | 60°                                       | 60°                                       | 60°                                       | 60°                                       |
| Tracking, avg.  | 1 dB                                      | 1 dB                                      | 1.5 dB                                    | 1.5 dB                                    | 1.5 dB                                    |
| Squint  | 2.5°                                      | 2.5°                                      | 3°  | 3°  | 3°  |





# ANEXO II. LISTA DE CÓDIGOS

## II.1 SEÑAL LTE CON INTERFERENCIA SEÑAL TDT

```
dist_DTV=0; %[0:15];
posicion_DTV=90; %Angulo de la estacion DTV
ptx_LTE=40; %W [30-40-60](Tx-antenaLTE)
Ptx_LTE=10*log10(ptx_LTE*1000); %paso a dBm
Gtx_LTE=15; %dB
PIRE_LTE=Ptx_LTE+Gtx_LTE; %dBm
%Grx_DTV=9; %dB [9-10]
PIRE_DTV=75; %dBm [70-80]
Grx_LTE=0; %dB (Rx-usuario)
hu=1.5; %m (altura usuario)
hbs_LTE=30; %m (altura bsLTE)
hbs_DTV=200;% %m (altura bsTDT)
f=800; %MHz (modelo HATA)
Bw=5; %[5-10]MHz (ancho de banda LTE)
NF=7; %[6-12] dB

SINRQPSK=3.5; %SINRmin LTE_QPSK dB

Pn=-114+10*log10(Bw)+NF; %dBm
pn=10.^(Pn/10); %Paso a naturales

Lshadow_LTE=10; %Perdidas shadowing dB
Lmt_LTE=10; %Perdidas multi-trayecto dB
Lshadow_DTV=5; %Perdidas shadowing dB
Lmt_DTV=5; %Perdidas multi-trayecto dB
a=0; %usuario de 1.5 m
L1km_LTE=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(hbs_LTE)-a;
L1km_DTV=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(hbs_DTV)-a;

%% Efecto de 60 sobre canal A
txDTV = -52.8; %dB
txDTV_nat=10.^(txDTV/10);
rxIFLTE=-33.7; %dB
efectoDuplex=-10.4; %dB
rxLTE=rxIFLTE+efectoDuplex;
rxLTE_nat=10.^(rxLTE/10);
leakage_nat=txDTV_nat+rxLTE_nat;
leakage=10*log10(leakage_nat);%dB

% Modulacion QPSK
SminQPSK=Pn+SINRQPSK; %Señal minima QPSK
LcompQPSK=PIRE_LTE+Grx_LTE-SminQPSK; %Perdidas compensables
L_LTE_QPSK=LcompQPSK-Lmt_LTE-Lshadow_LTE; %Perdidas Hata
d_QPSK=10.^((L_LTE_QPSK-L1km_LTE)/(44.9-6.55*log10(hbs_LTE)));

R_QPSK=2.2; %d_QPSK = 2.2565 (2.2)
```

```

for i=1:100
    for j=1:360
        x=i*cosd(j);
        y=i*sind(j);

        xp=i*cosd(j)*R_QPSK/100;
        yp=i*sind(j)*R_QPSK/100;

        d_LTE=i*R_QPSK/100;
        Lp_LTE=L1km_LTE+(44.9-6.55*log10(hbs_LTE))*log10(d_LTE);
        S=PIRE_LTE+Grx_LTE-Lmt_LTE-Lshadow_LTE-Lp_LTE;

        d_DTV=sqrt(((dist_DTV*sind(positcion_DTV)-
(R_QPSK*y/100)).^2)+((dist_DTV*cosd(positcion_DTV)+0.00001-
(R_QPSK*x/100)).^2));
        Lp_DTV=L1km_DTV+(44.9-6.55*log10(hbs_DTV))*log10(d_DTV);
        theta = atand((hbs_DTV-hu)/d_DTV);
        decG = max(-12*((theta/10)^2), -15);
        I=PIRE_DTV-decG+leakage+Grx_LTE-Lmt_DTV-Lshadow_DTV-Lp_DTV;
        interf=10.^(I/10);

        SINR=S-10*log10(pn+interf);
        if SINR>=SINRQPSK;
            plot(xp,yp,'+');
            hold on
        end
    end
end
end

```

## II.2 SEÑAL TDT CON INTERFERENCIA SEÑAL LTE

```

dist_DTV=67; %[0:67] km
positcion_DTV=90; %Angulo de la estacion DTV
ptx_LTE=40; %W [30-40-60](Tx-antenaLTE)
Ptx_LTE=10*log10(ptx_LTE*1000); %paso a dBm
Gtx_LTE=15; %dB
PIRE_LTE=Ptx_LTE+Gtx_LTE; %dBm max 63dBm
%Grx_DTV=9; %dB [9-10]
PIRE_DTV=75; %dBm [70-80]
Grx_LTE=0; %dB (Rx-usuario)
GrxmaxDTV_Yagi=12; %dB
hu=15; %m (altura usuario)
hbs_LTE=30; %m (altura bsLTE)
hbs_DTV=200; %m (altura bsTDT)
f=800; %MHz (modelo HATA)
Bw=5; %MHz (ancho de banda LTE)
NF=7; %[6-12] dB

SINRQPSK=7.7; %SINRmin DTT_QPSK dB

theta3dB=45;
Pn=-114+10*log10(Bw)+NF; %dBm
pn=10.^(Pn/10); %Paso a naturales

```



```

Lshadow_LTE=6; %Perdidas shadowing dB [6]
Lmt_LTE=6; %Perdidas multi-trayecto dB [6]
Lshadow_DTV=2; %Perdidas shadowing dB [2]
Lmt_DTV=2; %Perdidas multi-trayecto dB [2]
a=(3.2*(log10(11.75*hu)).^2)-4.97; %correccion por altura-ciudad
grande-f>=400MHz
L1km_LTE=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(hbs_LTE)-a;
L1km_DTV=69.55+26.16*log10(f)-13.82*log10(hbs_DTV)-a;
Lfs_1km=32.45+20*log10(f);

%% Efecto de A sobre canal 60
efectoRF=3.9; %dB
txLTE = -51-efectoRF; %dB
txLTE_nat=10.^(txLTE/10);
rxRFDTT=-37;%dB
rxIFDTT=-45;%dB
rxDTT=rxRFDTT+rxIFDTT;
rxDTT_nat=10.^(rxDTT/10);
leakage_nat=txLTE_nat+rxDTT_nat;
leakage=10*log10(leakage_nat);%dB

R_QPSK=2.2; %d_QPSK = 2.2565 (2.2)

for i=1:100
    for j=1:360
        x=i*cosd(j);
        y=i*sind(j);

        xp=i*cosd(j)*R_QPSK/100;
        yp=i*sind(j)*R_QPSK/100;

        d_DTV=sqrt(((dist_DTV*sind(posicion_DTV)-
(R_QPSK*y/100)).^2)+((dist_DTV*cosd(posicion_DTV)+0.00001-
(R_QPSK*x/100)).^2));
        Lp_DTV=L1km_DTV+(44.9-6.55*log10(hbs_DTV))*log10(d_DTV);
        Lfs_DTV=Lfs_1km+20*log10(d_DTV);
        S=PIRE_DTV+GrxmaxDTV_Yagi-Lshadow_DTV-Lmt_DTV-Lp_DTV-efectoRF;

        d_LTE=i*R_QPSK/100;
        Lp_LTE=L1km_LTE+(44.9-6.55*log10(hbs_LTE))*log10(d_LTE);
        Lfs_LTE=Lfs_1km+20*log10(d_LTE);

        theta=acosd((-dist_DTV.^2+d_DTV.^2+d_LTE.^2)/(2*d_DTV*d_LTE));
        GrxLTE_Yagi=max(GrxmaxDTV_Yagi-12*((theta/theta3dB)^2), -
3+theta/180);
        I=PIRE_LTE+leakage+GrxLTE_Yagi-Lshadow_LTE-Lmt_LTE-Lfs_LTE;

        interf=10.^(I/10);
        SINR=S-10*log10(pn+interf);
        if SINR>=SINRQPSK;
            plot(xp,yp,'+');
            hold on
        end
    end
end
end

```