



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA INTERFERENCIA
ELECTROMAGNÉTICA EN ENTORNOS HOSPITALARIOS

Amaia Ortiz de Lejarazu Montoya

Francisco Falcone Lanas

Pamplona, 29 de Abril de 2015

Resumen

El proyecto que se presenta a continuación está basado en el estudio de la interferencia electromagnética (EMI), y centra su contenido en los entornos hospitalarios, más concretamente en la zona de urgencias. El planteamiento desarrollado está basado en el uso de las simulaciones realizadas con el programa de trazados de rayos, creado por alumnos de la Universidad Pública de Navarra. Se pretende analizar cómo se ven afectadas, tanto las comunicaciones inalámbricas, como el funcionamiento de los dispositivos médicos sobre los que pudieran influir las interferencias que el uso tanto de los primeros como los segundos puedan generar, degradando así la calidad del servicio. Se estudiará si cumplen los requerimientos que imponen los estándares sobre la compatibilidad electromagnética y en caso de que no lo hagan se propondrán soluciones para que así sea.

En definitiva lo que persigue este proyecto, es estudiar y caracterizar el comportamiento de las señales electromagnéticas en la zona de urgencias de un hospital, para poder así definir la solución óptima que permita la coexistencia de diversas tecnologías inalámbricas sin que ello conlleve el funcionamiento defectuoso de algunas de ellas.

Abstract

The following project is based on the Electromagnetic Interference (EMI) studio, it is focused in Hospital facilities, and more concretely in the Emergency area. The proposal done consists on the use of the simulations done with the Ray Launching program created by some students of the Navarre's Public University (Universidad Pública de Navarra). It is studied how wireless communications and medical devices are affected by the electromagnetic interference that the first ones could create in the second ones, and the other way round, degrading the quality of service. It also will be studied if the requirements imposed by standards about electromagnetic compatibility are satisfied and if they are not, solutions will be proposed in order to accomplish them.

In the end, the final aim of this project, is to study and characterize the behaviour of electromagnetic signals in the emergency area of a hospital so that an optimal solution is given in order to allow the coexistence of diverse wireless technologies avoiding the bad operation of any of them.

Agradecimientos

Me gustaría mencionar brevemente a todas aquellas personas que desde el principio hasta el último día han estado apoyándome incondicionalmente y me han dado fuerzas y positividad para llevar a cabo este proyecto. En general por todo, y en particular por lo que me han ayudado en lo que al proyecto se refiere.

A mi familia por estar ahí siempre, creer en mí y ayudarme a enfocar las cosas de manera objetiva y factible y aconsejarme sabiamente cuando lo necesito.

A mi tutor, Francisco Falcone, por guiarme y aconsejarme, y en general a todos los profesores que han hecho posible llegar hasta aquí.

A mis amigas de Vitoria por estar ahí siempre a pesar de mis largas ausencias, apoyarme en la distancia y motivarme con su presencia.

A mis amigas de Pamplona, que aunque no llevan muchos años en mi vida, se han convertido en un pilar importante de mi vida y me han animado para que no dejara de luchar.

A mis amigas de la carrera, que aunque ya no nos veamos a menudo, se han preocupado y me han animado en todo momento. En especial quiero agradecerle a Edurne que haya estado ahí en todo momento y me haya sabido tranquilizar y dar esperanza, con mucha paciencia por su parte sobre todo en los momentos más duros.

A mi novio, al que no puedo dejar de agradecerle, que con todo lo que hemos pasado a lo largo del tiempo que me ha llevado el proyecto, la paciencia y el aguante que ha tenido que me han dado fuerzas y me ha hecho luchar por lo que quería hasta el final.

Índice

Índice.....	2
Índice de figuras.....	5
Índice de tablas.....	10
1. Introducción.....	11
1.1. Contexto del proyecto.....	11
2. Objetivo.....	14
3. Estado del arte.....	15
3.1. Sistemas de comunicación.....	16
3.1.1. Principios de la Radiocomunicación.....	17
3.2. Tecnologías empleadas y sus usos.....	32
3.2.1. WIFI.....	35
3.2.2. GSM.....	37
3.3.3. Zigbee.....	39
3.3. Entornos hospitalarios.....	41
3.3.1. Contexto.....	41
3.3.2. Estructura interna de un hospital.....	42
3.3.3. Bandas de frecuencia y servicios.....	44
3.3.4. Equipamiento médico.....	48
3.3.5. Normativa.....	49
3.4. La interferencia electromagnética en entornos hospitalarios.....	53
3.4.1. Causas.....	54
3.4.2. Efectos.....	56
3.4.3. Seguridad.....	58
4. Estudio de la interferencia electromagnética.....	59
4.1. Plan de trabajo.....	59
4.2. Entorno de estudio.....	59
4.2.1. Código de lanzamiento de Rayos.....	60
4.2.2. Planos edificio de urgencias.....	62
4.2.3. Zonas de estudio.....	63
4.3. Simulaciones.....	65
4.3.1. Simulaciones de las potencias útiles.....	65
4.3.2. Simulaciones de las potencias interferentes.....	70
5. Análisis de los resultados.....	75

Resultados a 868 MHz.....	77
Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes	83
Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes	84
Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera	85
Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos.....	86
5.1. Resultados a 1,8 GHz.....	87
Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes	93
Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxe	94
Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera	95
Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos.....	96
5.2. Resultados a 2,4 GHz.....	97
Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes	102
Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes	103
Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera	104
Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos.....	105
5.3. Discusión de los resultados	106
5.3.1. Potencias útiles	106
5.3.2. Potencias interferentes	106
5.3.3. Resultados.....	107
6. Conclusiones y líneas futuras	110
6.1. Conclusiones.....	110
6.2. Líneas futuras	111
Bibliografía	112
ANEXOS	114
1. Normativa.....	114
1.1. Relativa a la compatibilidad electromagnética.....	114
1.2. Relativa a los equipos de comunicaciones y productos sanitarios	114
2. Más resultados y planos.....	116
2.1. Resultados de simulaciones de potencias útiles.....	116
2.2. Resultados de simulaciones de potencias interferentes.....	120
2.3. Resultados a 868 MHz	133
2.4. Resultados a 1,8 GHz.....	137
2.5. Resultados a 2,4 GHz.....	141

Índice de figuras

Figura 1. Edificio de Urgencias Virgen del Camino del Complejo Hospitalario de Navarra	13
Figura 2. Espectro radioeléctrico y aplicaciones	15
Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación	16
Figura 4. Onda electromagnética y sus parámetros	18
Figura 5. Espectro electromagnético y usos	19
Figura 6. Ley de Snell. Rayos incidente, reflejado y refractado	20
Figura 7. Fenómeno de difracción.....	22
Figura 8. Fenómeno de dispersión	22
Figura 9. Resumen de fenómenos de propagación.....	23
Figura 10. Polarización de la onda electromagnética	23
Figura 11. Tipos de polarización.....	24
Figura 12. Propagación multitrayecto.....	24
Figura 13. Tipos de interferencia	25
Figura 14. Propagación multitrayecto, rayo directo e indirecto	25
Figura 15. Esfera para determinar el lugar de recepción del rayo.....	31
Figura 16. Bandas de frecuencia y sus nombres	33
Figura 17. Clasificación de las tecnologías inalámbricas.....	34
Figura 18. Red inalámbrica de área local	35
Figura 19. Clasificación del estándar 802.11.....	36
Figura 20. Logotipo de WIFI y sus variantes.....	36
Figura 21. Topología de red GSM.....	38
Figura 22. Topología de red ZigBee.....	40
Figura 23. Organigrama genérico de la estructura de un hospital.....	43
Figura 24. Plano del recinto de urgencias del Hospital Virgen del Camino	44
Figura 25. Tecnologías que dan soporte a las aplicaciones hospitalarias	45
Figura 26. Ejemplos de equipamiento médico.....	48
Figura 27. Diagrama de bloques de los elementos que intervienen en un problema EMI.....	54
Figura 28. Clasificación de los tipos de ruido	55
Figura 29. Plano de urgencias en Matlab.....	63
Figura 30. Plano original de urgencias con leyenda.....	63
Figura 31. Pasillos de estudio	64
Figura 32. Posición de las antenas transmisoras.....	65
Figura 33. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 8668 MHz.....	66
Figura 34. Localización de y mapas de cobertura de las antenas P3 y P4.	67
Figura 35. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 1,8 GHz.....	67
Figura 36. Localización y mapas de cobertura de las antenas P1 y P2.....	68
Figura 37. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 2,4 GHz.....	68
Figura 38. Localización de y mapas de cobertura de la antena P5	69
Figura 39. Posiciones de las antenas que emiten las potencias interferencias	70
Figura 40. Mapa de cobertura de las potencias interferentes radiando a la vez	71
Figura 41. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I1, I8 e I16	71
Figura 42. Mapa de cobertura de las potencias interferentes.....	72

Figura 43. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I2, I9 e I15.....	72
Figura 44. Mapa de cobertura de las potencias interferentes.....	73
Figura 45. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I4, I7 e I12	73
Figura 46. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes	77
Figura 47. Zonas de estudio: Pasillo boxes y reanimación (a) y pasillo consultas (b)	77
Figura 48. Radiales de P1(30, 38.5, 1.1) y P4(41.5,15,1.1) en el pasillo boxes (a) y pasillo zona consultas (b)	78
Figura 49. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P1.....	78
Figura 50. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P1	79
Figura 51. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P4.....	79
Figura 52. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P4	79
Figura 53. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b)	80
Figura 54. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 1 Kbps	81
Figura 55. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 250 Kbps	81
Figura 56. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia.....	82
Figura 57. Perfiles de retardo de potencia medidos en distintos puntos	82
Figura 58. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14	83
Figura 59. SNR entre las potencias útiles y las potencias I8, I12 e I14.....	83
Figura 60. Radiales de P1(30,38.5,1.1) del pasillo donde se encuentran las interferencias.....	83
Figura 61. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I4, I8 y I12.....	84
Figura 62. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14	84
Figura 63. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias	84
Figura 64. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3	85
Figura 65. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3.....	85
Figura 66. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias.....	85
Figura 67. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14	86
Figura 68. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14	86
Figura 69. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) de los pasillos donde se encuentran las interferencias	86
Figura 70. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes	87
Figura 71. Zonas de estudio: Pasillo sala médicos (a) y pasillo zona espera (b)	87
Figura 72. Radiales de P2(8,15,1.1) y P3(30,27,1.1) en Pasillo espera (a) y Pasillo sala de médicos (b).....	88
Figura 73. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P2.....	88
Figura 74. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P2	89
Figura 75. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P3.....	89
Figura 76. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P3	90
Figura 77. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b)	90

Figura 78. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 9,6 Kbps..... 91

Figura 79. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 14,4 Kbps..... 91

Figura 80. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia..... 92

Figura 81. Perfiles de retado de potencia medidos en distintos puntos 92

Figura 82. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14 93

Figura 83. SNR entre las potencias útiles y las potencias I8, I12 e I14..... 93

Figura 84. Radiales de P1(30,38.5,1.1) del pasillo donde se encuentran las interferencias..... 93

Figura 85. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I8, I12 y I14 94

Figura 86. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14..... 94

Figura 87. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias 94

Figura 88. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3 95

Figura 89. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3..... 95

Figura 90. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias..... 95

Figura 91. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14 96

Figura 92. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14..... 96

Figura 93. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias 96

Figura 94. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes 97

Figura 95. Zonas de estudio: Pasillo despachos y admisión..... 97

Figura 96. Radiales de P5(55,25,1.1) en el pasillo despachos y admisión 98

Figura 97. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P5..... 98

Figura 98. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P5..... 99

Figura 99. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b) 99

Figura 100. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 12 Mbps..... 100

Figura 101. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 20 Mbps..... 100

Figura 102. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia..... 101

Figura 103. Perfiles de retado de potencia de P5(55,25,1.1) medidos en distintos puntos.... 101

Figura 104. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14 102

Figura 105. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14..... 102

Figura 106. Radiales de P1(30,38.5,1.1) en el pasillo donde se encuentran las interferencias 102

Figura 107. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I8, I12 y I14 103

Figura 108. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14..... 103

Figura 109. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias 103

Figura 110. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3 104

Figura 111. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3..... 104

Figura 112. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias.. 104

Figura 113. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14 105

Figura 114. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e I14..... 105

Figura 115. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) de los pasillos donde se encuentran las interferencias	105
Figura 116. Antena P1	116
Figura 117. Antena P2	116
Figura 118. Antena P3	116
Figura 119. Antena P4	117
Figura 120. Antena P5	117
Figura 121. Antena P1	117
Figura 122. Antena P2	118
Figura 123. Antena P3	118
Figura 124. Antena P4	118
Figura 125. Antena P5	119
Figura 126. Antena P1	119
Figura 127. Antena P2	119
Figura 128. Antena P3	120
Figura 129. Antena P4	120
Figura 130. Antena P5	120
Figura 131. Interferencia I1	121
Figura 132. Interferencia I2	121
Figura 133. Interferencia I3	121
Figura 134. Interferencia I4	121
Figura 135. Interferencia I5	122
Figura 136. Interferencia I6	122
Figura 137. Interferencia I7	122
Figura 138. Interferencia I8	122
Figura 139. Interferencia I9	123
Figura 140. Interferencia I10	123
Figura 141. Interferencia I11	123
Figura 142. Interferencia I12	123
Figura 143. Interferencia I13	124
Figura 144. Interferencia I14	124
Figura 145. Interferencia I15	124
Figura 146. Interferencia I16	124
Figura 147. Interferencia I1	125
Figura 148. Interferencia I2	125
Figura 149. Interferencia I3	125
Figura 150. Interferencia I4	125
Figura 151. Interferencia I5	126
Figura 152. Interferencia I6	126
Figura 153. Interferencia I7	126
Figura 154. Interferencia I8	126
Figura 155. Interferencia I9	127
Figura 156. Interferencia I10	127
Figura 157. Interferencia I11	127
Figura 158. Interferencia I12	127

Figura 159. Interferencia I13	128
Figura 160. Interferencia I14	128
Figura 161. Interferencia I15	128
Figura 162. Interferencia I16	128
Figura 163. Interferencia I1	129
Figura 164. Interferencia I2	129
Figura 165. Interferencia I3	129
Figura 166. Interferencia I4	129
Figura 167. Interferencia I5	130
Figura 168. Interferencia I6	130
Figura 169. Interferencia I7	130
Figura 170. Interferencia I8	130
Figura 171. Interferencia I9	131
Figura 172. Interferencia I10	131
Figura 173. Interferencia I11	131
Figura 174. Interferencia I12	131
Figura 175. Interferencia I13	132
Figura 176. Interferencia I14	132
Figura 177. Interferencia I15	132
Figura 178. Interferencia I16	132
Figura 179. Radial antena P2.....	133
Figura 180. Radial antena P3.....	133
Figura 181. Radial antena P5.....	133
Figura 182. Ruido intersystem e intrasystem.....	134
Figura 183. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	135
Figura 184. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	135
Figura 185. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	136
Figura 186. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	136
Figura 187. Radial de la antena P1	137
Figura 188. Radial de la antena P4	137
Figura 189. Radial de la antena P5	137
Figura 190. Ruido intersystem e intrasystem.....	138
Figura 191. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	139
Figura 192. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	139
Figura 193. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	140
Figura 194. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	140
Figura 195. Radial de la antena P1	141
Figura 196. Radial antena P2.....	141
Figura 197. Radial de la antena P3	141
Figura 198. Radial antena P4.....	141
Figura 199. Ruido intersystem e intrasystem.....	142
Figura 200. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	143
Figura 201. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	143
Figura 202. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	144
Figura 203. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias.....	144

Índice de tablas

Tabla 1. Aplicaciones de las distintas bandas frecuenciales	33
Tabla 2. Aplicaciones de las distintas bandas frecuenciales	34
Tabla 3. Bandas frecuenciales empleadas en GSM	37
Tabla 4. Servicios que se prestan dentro de las bandas ICM	46
Tabla 5. Servicios utilizados en entornos hospitalarios fuera de las bandas ICM.....	47
Tabla 6. Normativa no técnica relativa a los equipos de comunicaciones y productos sanitarios	51
Tabla 7. Normativa aplicable a equipos genéricos para cualquier banda de frecuencia.....	52
Tabla 8. Normativa aplicable directamente a los dispositivos de tipo médico.....	53
Tabla 9. Dispositivos que pueden fallar y la fuente de origen de su fallo.....	57

1. Introducción

En la realidad actual, en que la comunicación resulta imprescindible para el intercambio de datos, de información, el medio apenas se entiende como problema sabiendo que desde el cable hasta el aire una gran parte de opciones quedan cubiertas y por tanto la “tele”-comunicación (entendida ésta como comunicación a distancia) queda resuelta. Un ámbito de la vida en el que se le saca, y se le puede sacar mucho más provecho a todo esto, es la medicina. En los hospitales (como cualquier otro centro) disponen de sistemas que permiten la comunicación. Además de la comunicación que se produce hacía el exterior, también existe la necesidad de comunicarse en el ámbito interno, es decir, dentro del propio hospital, y no solo para la comunicación entre personas, sino también para la comunicación entre dispositivos y entre dispositivos y personas.

1.1. Contexto del proyecto

En la actualidad, el creciente y continuo avance tecnológico se produce a gran velocidad. Esta evolución se da sobre todo en Internet y las comunicaciones móviles, tanto por la naturaleza de sus aplicaciones, como por su extensión de alcance a ámbitos sociales y laborales.

Un ejemplo en el que el desarrollo de la Sociedad de la Información y su incorporación a las TIC (Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones) ofrece grandes posibilidades y soluciones, es la salud.

Dicho avance ofrece un amplio rango de oportunidades para facilitar y mejorar la atención de pacientes, y esto beneficia tanto a los propios pacientes como a los trabajadores de los hospitales. Un claro ejemplo de todo ello son los dispositivos médicos que se emplean para el diagnóstico, para realizar operaciones, etc. Pero la tecnología médica no se queda solo aquí, sino que abarca también la tele-asistencia o la monitorización de los pacientes en el propio hospital. El desarrollo de las comunicaciones móviles hace posible aplicaciones que faciliten el desempeño del trabajo del personal sanitario pudiendo tener acceso al historial médico o cualquier dato relativo al paciente dónde y cuándo quieran. Otra aplicación de la tecnología muy útil en entornos hospitalarios es la localización de pacientes en el propio entorno hospitalario y más concretamente en el área de urgencias, lo cual facilitaría mucho la asistencia “in situ”.

Obviamente toda esta información tiene que ser transmitida al especialista correspondiente para que pueda darle un uso adecuado. Para ello se requiere de una red de comunicación integrada tanto por sensores (caso de localización o monitorización), como por sistemas de transmisión, generando así una cadena de recogida y entrega de la información.

En el caso de las redes de sensores (**Wireless Sensor Network**), éstas emergen como una tecnología significativa y atraen a un gran número de aplicaciones como las ya mencionadas para el caso de la salud. Un aspecto a tener en cuenta es que el funcionamiento de una WSN depende del nivel de señal que llegue a los nodos de distribución y por ello resulta indispensable para el diseño de la red de sensores, disponer de modelos de propagación

precisos para entornos complejos que ayuden a que la comunicación entre nodos sea lo más eficiente y con el menor error posible.

En cuanto a los medios de transmisión de la información, como se ha comentado anteriormente, pueden ser tanto cable como aire. Ambos medios coexisten en el interior del entorno hospitalario, siendo el segundo el que mayores problemas puede generar por las consecuencias que pueda tener en los dispositivos médicos. Es precisamente en este punto en el que se detiene el estudio realizado para este proyecto, para investigar y valorar tanto el estado actual como las posibles mejoras futuras.

El incremento de los avances tecnológicos, produce a su vez un crecimiento del uso de dispositivos eléctricos y electrónicos, que llevan consigo un incremento del número y la tipología de las fuentes de interferencia. Éstas pueden ser clasificadas en base a su naturaleza o a su procedencia.

En lo que a la naturaleza de la interferencia electromagnética, EMI (ElectroMagnetic Interference) se refiere, puede ser producida tanto por fuentes creadas por el ser humano (sistemas eléctricos y electrónicos, sistemas usuarios del espectro electromagnético, etc.), o por fuentes naturales (rayos, efectos solares). Sin embargo en lo que a su procedencia respecta, la interferencia puede ser tanto interna, caso del ruido térmico o ruido de shot, como externa, cuyo origen son agentes ajenos al sistema y por ello la que es más significativa en el estudio de compatibilidad electromagnética que estamos realizando.

Las emisiones interferentes pueden propagarse usando distintas formas y pueden darse aislada o simultáneamente. Los mecanismos pueden ser, por conducción, por acoplamiento o por radiación. Éste último es el que nos ocupa ya que se estudiarán las interferencias que puedan originar los sistemas inalámbricos de comunicación y cómo éstos pueden afectar a sistemas imprescindibles del entorno hospitalario. El caso de la propagación de interferencias por radiación se da a frecuencias superiores a 30MHz, que son precisamente las que se estudiarán.

Éstas interferencias pueden generar grandes problemas cuando afectan a temas de seguridad o salud pública, entre otros. Por lo tanto es necesario prestar un especial cuidado para que no se excedan los límites de las EMI.

Con el fin de enfocar un poco esta problemática, se centrará el estudio en un escenario concreto como es el recinto de Urgencias Materno Infantiles en el Hospital Virgen del Camino. Éste recinto estaba destinado a ser el de Urgencias del Complejo Hospitalario de Navarra (CHN), pero posteriormente se ha creado otro recinto con más recursos, pasando a ser el edificio de urgencias y dejando el de Hospital Virgen del Camino como urgencias materno infantil. Así pues nos centramos en este segundo ya que tenemos a disposición los planos del mismo.



Figura 1. Edificio de Urgencias Virgen del Camino del Complejo Hospitalario de Navarra

El estudio se realizará mediante simulación gracias al programa de trazado de rayos implementado por unos compañeros dentro de la propia Universidad Pública de Navarra. Así pues introduciéndole al programa un plano del recinto, éste simulará el comportamiento que tendrían las ondas electromagnéticas mediante algoritmos basados en el trazado de rayos. De esta forma se ofrecen unos resultados que serán bastante aproximados a la realidad y permitirán caracterizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas en entornos tan complejos.

2. Objetivo

Es objetivo del presente estudio analizar la interferencia electromagnética y determinar si cumple con los estándares de compatibilidad establecidos. Mediante el análisis realizado, basado en simulaciones, se observa el comportamiento de la misma en el recinto de Urgencias materno-infantiles del Hospital Virgen del Camino, perteneciente al Complejo Hospitalario de Navarra, obteniendo así conclusiones que ayuden a caracterizar el recinto para poder así hacer un buen diseño de la infraestructura de comunicaciones, pudiendo éstas coexistir sin interferir en el correcto funcionamiento de los dispositivos médicos.

El análisis se realizará mediante unas simulaciones que se harán sobre planos de la zona de Urgencias y estarán definidos con las mismas características de los materiales reales del recinto, creando así un modelo muy fiel a la realidad, de forma que los resultados obtenidos sean coherentes con los que se obtendrían en la realidad.

El fin de este estudio es el de permitir realizar configuraciones óptimas de las redes de telecomunicaciones, en lo que a calidad de servicio se refiere, logrando así que la coexistencia de las comunicaciones inalámbricas y los dispositivos electrónicos médicos no repercuta negativamente entre sí.

3. Estado del arte

El tema que aborda el presente proyecto trata de un problema que existe desde que los sistemas de comunicación inalámbrica comenzaron a usarse y que se viene dando en muchos ámbitos de la vida cotidiana, aunque por ahora solo nos centraremos en los entornos hospitalarios. En la actualidad se han resuelto muchos de los problemas que se observaron en su inicio y a su vez se han creado muchas normas con el fin de regularlo. Por ello el planteamiento que se ofrece aquí no es simplemente el de estudiarlo y analizarlo, sino también el de proponer una solución cara a futuras configuraciones de redes de telecomunicaciones.

Con el fin de poder comprender la situación que hallamos en la actualidad en los hospitales, es necesario explicar ciertos aspectos que son fundamentales para entrar en materia. Para ello resulta útil responder a algunas de estas preguntas: ¿Qué tipo de dispositivos médicos podemos hallar en un hospital? ¿Cuáles de ellos interfieren con las comunicaciones inalámbricas? ¿Cómo se producen dichas comunicaciones inalámbricas? ¿Por qué y dónde se sitúan los dispositivos para las comunicaciones? ¿Cómo interfieren unos con otros? ¿Qué problemas surgen a partir de estas interferencias?

La interferencia electromagnética, como ya se ha dicho ha sido un tema muy tratado y estudiado, sin embargo el tratamiento que se le pretende dar en este proyecto se centra más concretamente con las comunicaciones que se den en la banda de las comunicaciones inalámbricas. A continuación en la imagen se muestra el espectro electromagnético:

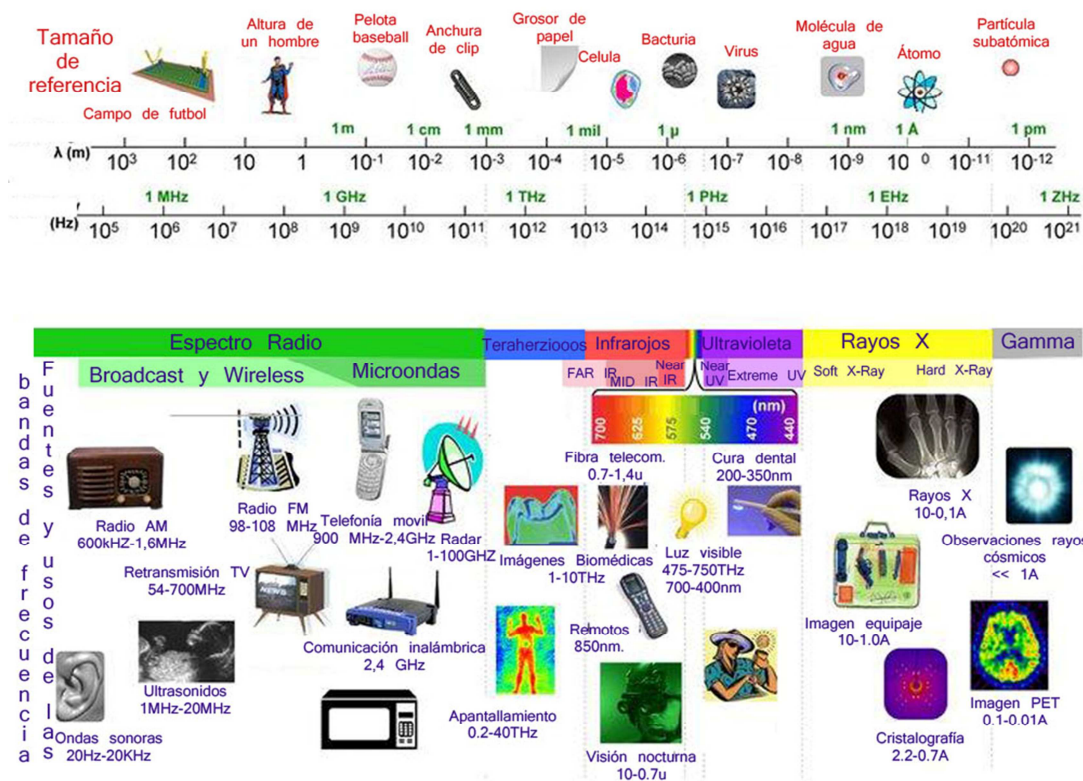


Figura 2. Espectro radioeléctrico y aplicaciones

Cómo se puede comprobar a primera vista, los rangos de frecuencias dedicados a las telecomunicaciones y a las aplicaciones médicas no están cercanos a priori, con lo cual, no se deberían de encontrar problemas de interferencias entre ellos. Sin embargo está estudiado, y se demostrará más adelante que sí que interfieren las emisiones electromagnéticas emitidas tanto por los dispositivos médicos cómo por los dispositivos de comunicaciones.

En este apartado se pondrá en situación al lector explicando tres aspectos básicos que ayuden a la comprensión del estudio. Inicialmente se explicará qué son y cómo funcionan los sistemas de comunicación. A continuación se dará una visión global de la estructura interna de un hospital. Finalmente relacionando los dos puntos anteriores se dará una explicación de qué es la interferencia electromagnética y cómo ésta afecta en los entornos hospitalarios.

3.1. Sistemas de comunicación

La comunicación entre dos entidades se puede dar por distintos medios como son medios guiados, es decir cable, entre los que encontramos el par trenzado, el coaxial o la fibra óptica, y los no guiados donde el medio es el aire, y la forma de transmisión de la información son las ondas electromagnéticas que son emitidas y recibidas gracias a las antenas. La comunicación producida por medio no guiado, se conoce también como Radiocomunicación.

Un sistema de comunicaciones está compuesto por los siguientes elementos:

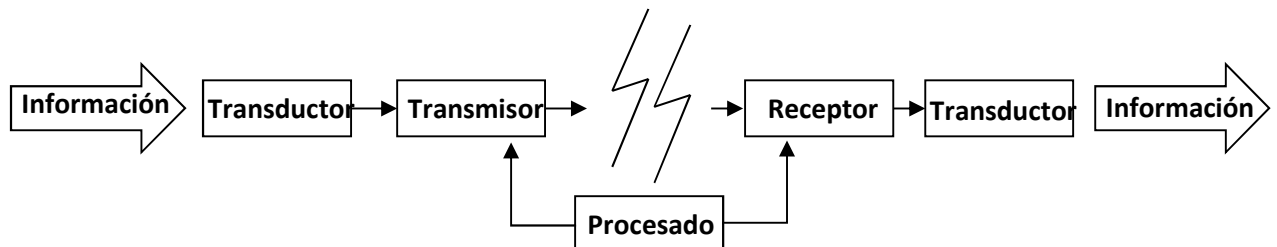


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación

La **información** que es lo que se quiere hacer llegar al extremo opuesto, puede darse en diversos formatos, ya sea voz, imagen, texto, etc. Sea como fuere, la traducción de estos datos siempre resulta en una señal que bien puede ser analógica, como puede ser digital y que tiene que ser entendida por los sistemas de comunicación. De este paso se encarga el **transductor**, que es capaz de interpretar la información de entrada y convertirla en una señal eléctrica, cuando nos referimos al punto de entrada, y viceversa en el punto de salida. El **transmisor** se encarga de emitir la señal al canal para lo cual la tiene que procesar bajándola a banda base y modulándola como resulte más conveniente (este sería el bloque del **procesado**). A su vez el receptor realiza la tarea inversa, demodulando y tratando oportunamente la información para pasársela así al transductor del destino que volverá a pasar la información a su formato original.

En el proceso de comunicación existen ciertos factores a tener en cuenta para que se produzca una correcta transmisión de la información. Y es que desde que se emite hasta que llega, la información pasa por muchos puntos en los cuales va perdiendo calidad. Sobre todo un punto crítico de la comunicación se produce cuando se emite por el canal y más cuando éste es el aire. Con el fin de obtener un nivel lo suficientemente aceptable para que sea interpretable por el sistema receptor, es necesario que la información viaje por un buen sistema de comunicación que ha sido previamente diseñado al efecto. Para dicho diseño, un parámetro que se ha de tener en cuenta es la relación señal ruido. Éste es uno de los parámetros necesarios para conocer la calidad del enlace, y determina cuánto superior es el nivel de potencia de la señal que transporta la información respecto del nivel del ruido que se encuentra a lo largo de la comunicación. Se profundizará en este aspecto más adelante.

3.1.1. Principios de la Radiocomunicación

Como primera parte de esta introducción al lector al campo de interés, se explicarán ciertas nociones de cómo se produce la radiocomunicación, y qué factores hay que tener en cuenta para que se dé.

Por definición, la radiocomunicación es la comunicación por medio de ondas radioeléctricas, que son aquellas ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio y llegan hasta los 3 THz.

El proceso de comunicación por medio de ondas de radio es igual al explicado en el punto anterior. Cuando la información convenientemente tratada pasa a la antena en forma de señal eléctrica, ésta la emite en forma de onda electromagnética que viaja por el espacio hasta llegar a la antena receptora.

3.1.1.1. Aspectos teóricos de las ondas electromagnéticas

La radiación electromagnética es la energía que se transmite a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas, como su propio nombre indica, están compuestas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes, y sus direcciones son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Estos aspectos que las caracterizan se muestran en la imagen siguiente:

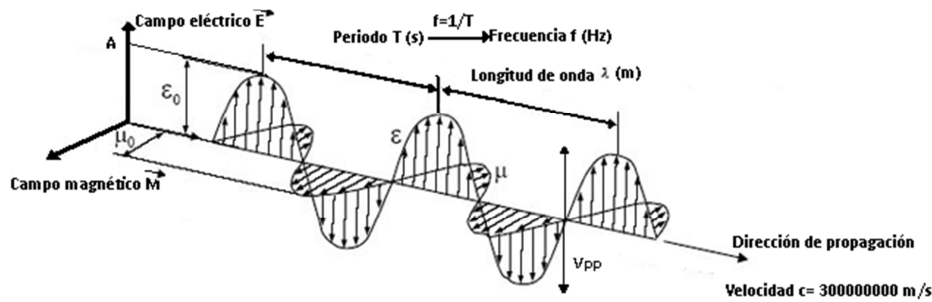


Figura 4. Onda electromagnética y sus parámetros

Las componentes de una onda electromagnética se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y) \cdot e^{-(\alpha + j\beta)z} \cdot e^{-2\pi ft}$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y) \cdot e^{-(\alpha + j\beta)z} \cdot e^{-2\pi ft}$$

Entre los parámetros que caracteriza la onda, encontramos la longitud de onda, λ (m), que es la distancia en metros que recorre la onda en un tiempo igual al periodo, T (s), que es el intervalo de tiempo entre dos puntos equivalentes de la onda. La frecuencia, f (Hz), se calcula como la inversa del periodo, y define el número de ciclos que realiza en cada segundo. La frecuencia y la longitud de onda están relacionadas mediante la velocidad de la luz ya que $c = \lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8$ (m/s), y por tanto son inversamente proporcionales, ya que cuando una aumenta, la otra disminuye. Esto permite una interacción completamente distinta con la materia en función de la frecuencia ya que a muy altas frecuencias la longitud de onda es cada vez más pequeña y puede atravesar más materiales que si la frecuencia es inferior y por tanto su longitud de onda es mayor. Claro ejemplo de ello son los rayos X y resonancias electromagnéticas, donde las imágenes se obtienen gracias a que la radiación es de frecuencia tan alta y longitud de onda tan pequeña que es capaz de atravesar materia como las células de la piel. Se dice espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas en el que coexisten las distintas aplicaciones en función de la frecuencia y que están reguladas según el cuadro nacional de atribución de frecuencias. Se muestra a continuación el espectro electromagnético donde se pueden ver las aplicaciones a cada frecuencia. Desde las más bajas hasta las más altas frecuencias nos podemos encontrar con las radiofrecuencias, que son las utilizadas en aplicaciones de telecomunicaciones, pasando por la zona de infrarrojos, luz visible y ultravioletas, hasta llegar a los rayos gamma que son los empleados en aplicaciones médicas.

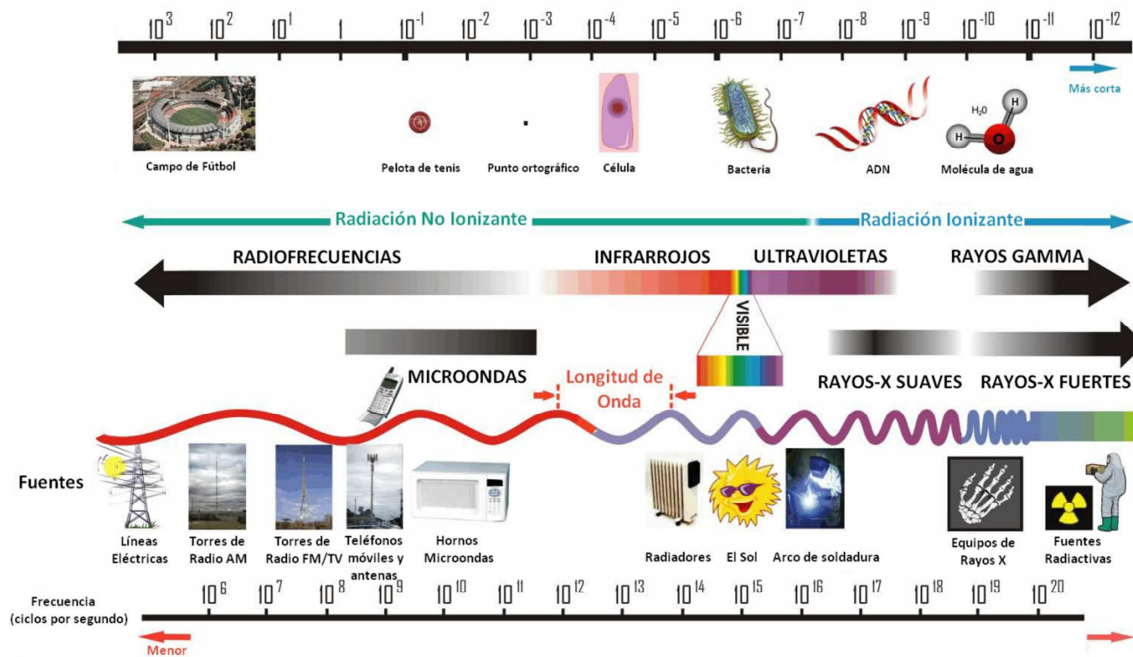


Figura 5. Espectro electromagnético y usos

Las frecuencias en las que se centra este proyecto son 868 MHz, 1,8GHz y 2,4 GHz que corresponden a la parte del espectro de radiofrecuencias y cuyas aplicaciones pueden ser entre otras las de ZigBee, GSM y Wi-Fi respectivamente, entre otras.

3.1.1.2. Fenómenos de propagación

En el siguiente apartado se verán los fenómenos que sufren las ondas electromagnéticas al propagarse en el espacio libre, es decir, cómo se comportan en el trayecto desde el transmisor y el receptor. Estas propiedades de propagación determinan la calidad de la transmisión de la información y son los factores críticos a evaluar a la hora de diseñar un sistema de comunicaciones.

Pérdidas de propagación

Desde que se transmite hasta que llega al origen la onda electromagnética se va atenuando por causa de la distancia, es decir su intensidad va disminuyendo. La intensidad de la potencia de la onda se mide en Wattios, y por tanto esa es la medida que nos permite cuantitativamente definir lo que va perdiendo la señal, lo más habitual suele ser representarla de forma logarítmica, en decibelios. Como se ha dicho la atenuación es función de la distancia, pero también de la frecuencia ya que también disminuye conforme esta aumenta.

Queda reflejado por tanto que existe una forma de cuantificar potencia recibida que son los modelos de propagación en espacio libre. Se parte de considerar que la fuente transmisora es una fuente puntual isotrópica cuya potencia radiada produce un frente de ondas esférico.

Estas fuentes isotrópicas en la realidad no existen, así pues se consideran antenas omnidireccionales. La potencia radiada en dicha esfera vendrá dada por:

$$P(r) = \frac{P_{rad}}{(4\pi r^2)} \qquad P_{rad} = \text{Potencia radiada en Watt} \\ (4\pi r^2) = \text{Área de la esfera}$$

Como se ve en la fórmula, conforme aumenta la distancia la potencia recibida es menor cumpliendo la cuadrática inversa, es decir la densidad de potencia disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente transmisora.

El modelo de propagación en el espacio libre predice que la potencia recibida decrece a medida que la separación entre las antenas transmisora y receptora aumenta y tiene en cuenta parámetros propios de los elemento. De esta forma la energía que llega a la antena receptora es:

$$P_{rx}(d) = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx}}{L} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Esto se resume en que la potencia recibida, ($P_{rx}(d)$), es igual a la potencia transmitida (P_{tx}) a una longitud de onda (λ) a la que se le aplican los factores de ganancia de ambas antenas ($G_{tx} G_{rx}$), así como el factor de pérdidas del sistema no relacionado con la propagación (L) y las pérdidas relativas a la atenuación por distancia $\frac{1}{(4\pi r^2)}$.

Absorción, reflexión y refracción

Para evaluar el comportamiento de una onda electromagnética propagándose por el espacio libre resulta necesario predecir los efectos que se producen cuando la onda cambia de medio o se encuentra con un objeto ya que la energía de ésta se puede ver reflejada, refractada o absorbida. Las ondas de radio que se propagan en el espacio libre tienen una velocidad $v = \frac{c}{n} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, sin embargo, al encontrarse con un obstáculo sufren los fenómenos conocidos como refracción y reflexión cumpliendo la Ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

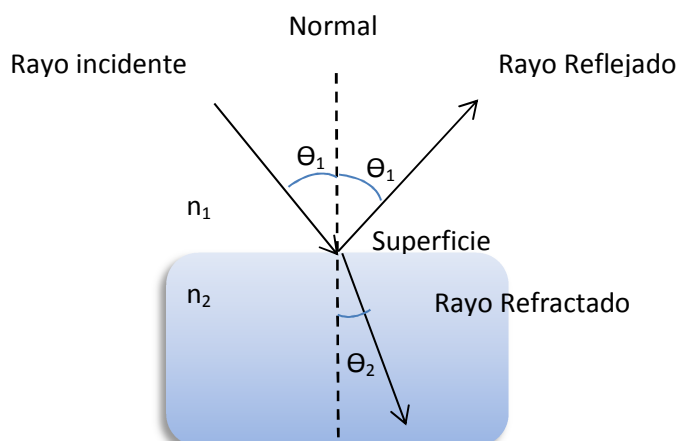


Figura 6. Ley de Snell. Rayos incidente, reflejado y refractado

Es decir, al incidir sobre un medio distinto del que se propaga cuyo índice de refracción $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$, que depende de la permitividad y permeabilidad del medio, es distinto, se cumple que el rayo refractado incidirá en el segundo medio con un ángulo que viene determinado por la ley de Snell antes citada, variando así su dirección de propagación. La velocidad de propagación también variará ya que ésta viene dada por $v = \frac{c}{n}$ y por tanto si el medio sobre el que incide tiene un índice de refracción alto su velocidad disminuirá y si es menor aumentará. Sin embargo el rayo reflejado rebotará con un ángulo igual al relativo entre el rayo incidente y la normal al plano.

En definitiva cuándo una onda electromagnética llega a un objeto, parte de su energía se transmite al objeto, otra se refleja y otra parte es absorbida dentro del propio objeto, es decir, se convierte en calor.

En lo que a radiocomunicación se refiere, hay dos consecuencias destacables que influyen en la calidad de la señal recibida.

Por una parte está la absorción que sufren las ondas al encontrar los obstáculos (muebles, paredes, plantas, árboles, superficies de agua, etc) que influye en la potencia final que se recibe, es por ello que es un factor importante a la hora de considerar el comportamiento de la onda al propagarse para el diseño de un sistema de comunicación.

Por otro lado, tenemos la reflexión que se repite desde el momento que la antena transmisora emite hasta que la onda electromagnética llega a la antena receptora. Éste fenómeno tiene como consecuencia que la señal de origen tome diversos caminos, lo cual es conocido como **Propagación Multitrayecto**. El hecho de que se produzca la reflexión tiene consecuencias positivas y negativas. La parte positiva es que cuando la comunicación se produce en un entorno con muchos obstáculos, las múltiples reflexiones permiten que la señal alcance los lugares más recónditos. La negativa, son las interferencias que se producen. Esto sucede debido a que la señal que recoge el receptor es la suma de rebotes que son causados por la interacción objetos y paredes con la señal. Estos rayos reflejados llegan con distintos tiempos, amplitudes y fases. Todo esto implica que la suma de señales que se realiza en el receptor propicien las interferencias constructivas y destructivas. Las primeras se producen cuando las señales recibidas están en fase y al sumarse, sus amplitudes aumentan. Las segundas ocurren cuando las señales no están en fase y al sumarse sus amplitudes disminuyen, o incluso se anulan si es caso de que llegan en contrafase.

Difracción/ Dispersión

Otros fenómenos que degradan la calidad de la señal y pueden ser motivos de interferencia son la difracción y la dispersión.

La difracción ocurre cuando el frente de onda se encuentra con un obstáculo (un vértice, un orificio...) de dimensiones menores y del orden de su longitud de onda. Cuando la onda se encuentra con el orificio, su propagación deja de ser en línea recta y de hecho, dicho punto se convierte en una nueva fuente secundaria de emisión tal y como predice el principio de Huygens. Ese cambio de dirección que sufre la señal al incidir en el objeto, está relacionado con el tamaño de obstáculo y la longitud de onda de la señal.

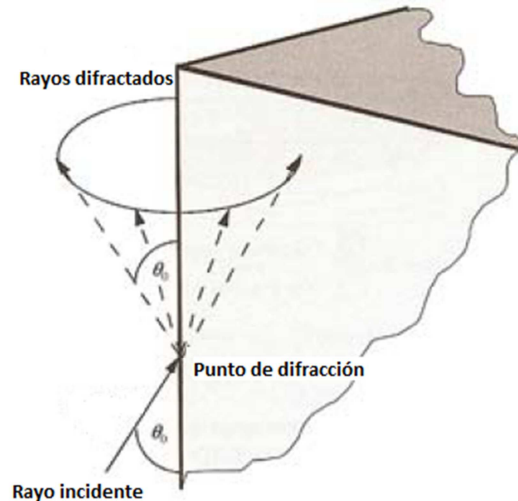


Figura 7. Fenómeno de difracción

No obstante, aunque la difracción puede provocar pérdidas a la señal, también permite que las señales de radiofrecuencia se propaguen tanto sobre la curva de la tierra (más allá del horizonte), como que superen obstáculos permitiendo que exista la comunicación aun cuando no haya vista directa entre el transmisor y el receptor.

La dispersión por su parte, ocurre cuando la señal se encuentra con una superficie áspera o rugosa que hace que ésta se disperse en distintas direcciones, estas superficies pueden ser árboles, postes de luz, la vegetación, etc. Lo que determina la rugosidad de la superficie es su altura crítica, h_c , que ha de ser menor que la diferencia entre las alturas de la protuberancia más alta y la más baja. Dicha altura crítica se calcula a partir del criterio de Rayleigh que determina que:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta}$$

Siendo λ la longitud de onda de la señal en metros y θ en ángulo con el que incide la señal en obstáculo.

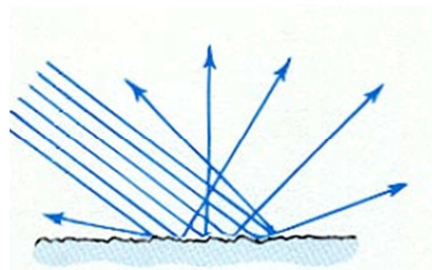


Figura 8. Fenómeno de dispersión

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo estos fenómenos afectan a la recepción de la señal.

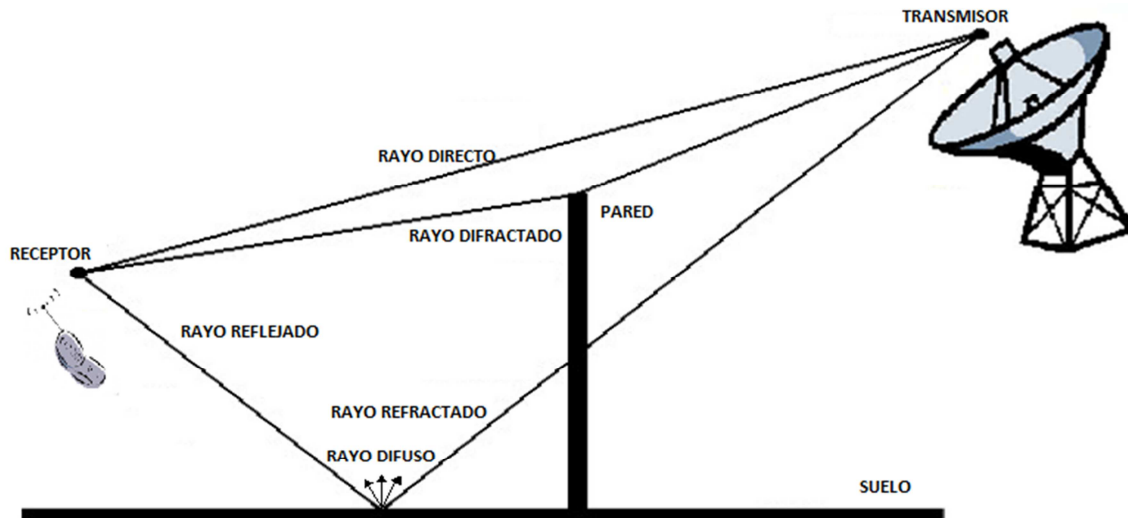


Figura 9. Resumen de fenómenos de propagación

Polarización

Otra de las propiedades de las ondas electromagnéticas es la **polarización**, que determina la dirección del campo eléctrico y su variación con el tiempo. Dicha polarización puede ser tanto vertical como horizontal, siendo vertical cuando el campo eléctrico es vertical y el magnético horizontal, y viceversa.

Esta propiedad es importante en el caso de las ondas electromagnéticas ya que la perturbación que se propaga, que son los campos eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{H}) son perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de propagación. El campo eléctrico es el que determina el plano de oscilación.

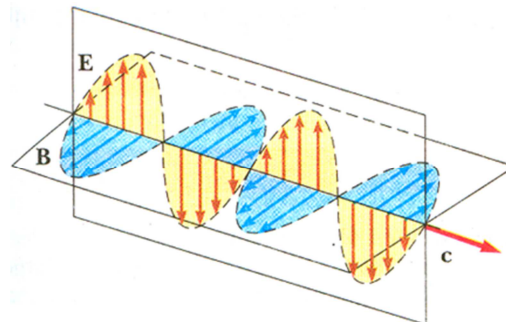


Figura 10. Polarización de la onda electromagnética

Existen diferentes tipos de polarizaciones que vienen determinadas por la curva de Lissajous, que es la forma trazada sobre un plano fijo por el vector de campo eléctrico de una onda plana que pasa sobre él. Estos tipos de polarizaciones pueden ser, lineales, circulares y elípticas. La primera se produce cuando la figura geométrica que traza la suma de las componentes vectoriales transversales es una recta. La segunda se da cuando existe una diferencia de fase de 90° entre las dos ondas electromagnéticas y con igual amplitud. Finalmente la polarización elíptica se da cuando aparte de estar desfasadas 90° , sus amplitudes también son diferentes.

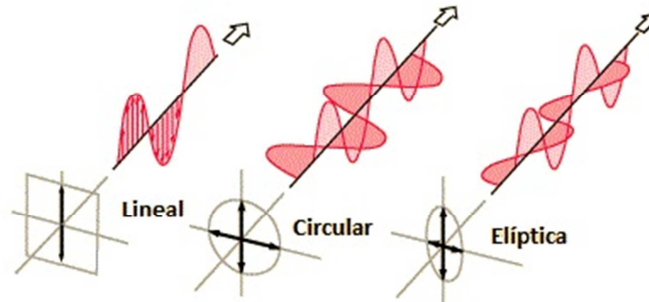


Figura 11. Tipos de polarización

Interferencia

La interferencia es de los fenómenos de propagación que más relevancia tienen a la hora de la correcta transmisión de la información, y es de hecho el tema fundamental sobre el que versa el proyecto. Por ello será tratado con mayor profundidad más adelante y se centrará en mayor medida en la interferencia que se produce en los entornos hospitalarios. Sin entrar en especificaciones, se puede decir que la interferencia se produce cuando dos ondas coinciden en una misma región del espacio en el mismo instante. La interferencia se produce en los puntos que coinciden y a la suma de los mismos se denomina el Principio de superposición.

Propagación multitrayecto.

Cuando se ha hablado de la reflexión, una de las consecuencias citadas era la propagación multitrayecto, es decir, el hecho de que la señal tome diversos caminos.

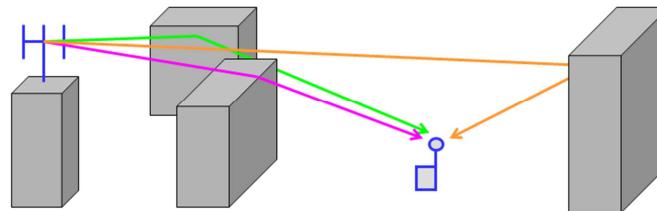


Figura 12. Propagación multitrayecto

La propagación multitrayecto, es el fenómeno por el cual la propagación de las señales de radio llega al receptor por diversos caminos. Entre las causas que lo producen están la reflexión y refracción ionosférica, el reflejo de los cuerpos de agua y objetos terrestres como montañas y edificios, etc.

Las consecuencias que conlleva la propagación multitrayecto pueden ser tanto beneficiosas como perjudiciales. Y es que el hecho de que las señales reboten con los obstáculos que se encuentran y se reflejen y difracten permite que se sigan transmitiendo y se amplíe la cobertura. Sin embargo también se produce el algo no deseado como son las interferencias destructivas que producen el desvanecimiento. Nos podemos encontrar con dos tipos de interferencias, destructivas y constructivas, siendo las primeras las no deseadas y las segundas las deseadas.

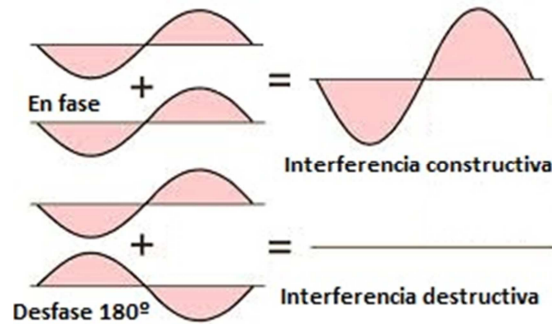


Figura 13. Tipos de interferencia

Esto sucede porque las señales llegan al receptor con distinta fase en función del camino que hayan recorrido, en el supuesto de que el transmisor y el receptor sean estáticos. El desfase, $\Delta\theta$, viene dado por:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi f}{c}(d_1 - d_2)$$

Donde f , es la frecuencia de la señal, c , velocidad de la luz y d_1 y d_2 las distancias que recorre la señal en cada camino:

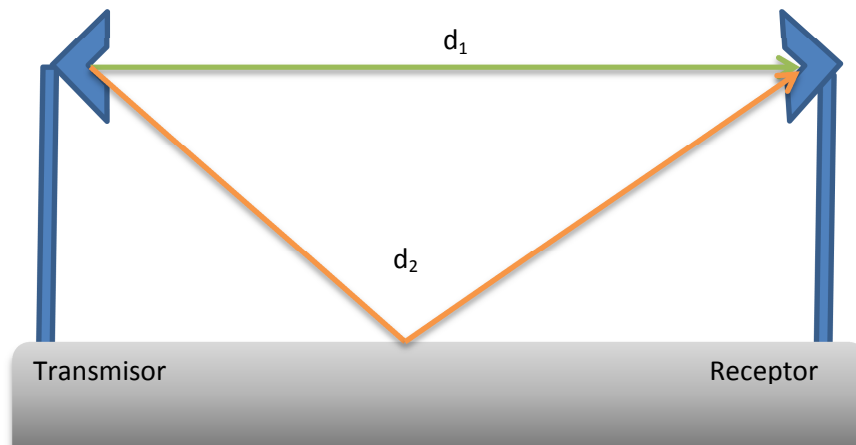


Figura 14. Propagación multitrayecto, rayo directo e indirecto

Cuando dicho desfase, que puede tomar valores entre $-\pi$ y π , es igual a $\pm\pi$, es cuando están en contrafase y se anulan las señales, de forma que no llegue potencia al receptor. Sin embargo, cuando llegan en fase ($\Delta\theta = 0^\circ$), las señales se suman constructivamente aumentando la potencia de la señal.

Existen ciertos parámetros que ayudan a predecir o intuir las pérdidas que se pueden dar por causa de la propagación multitrayecto, ya que resulta difícil hacerlo teniendo en cuenta que las características físicas de cada entorno son variables. Es por ello, que para caracterizar dicha propagación multitrayecto se emplean parámetros como:

- Delay Excess: diferencia entre el primer y el i -ésimo eco.
- Delay Spread (DS): dispersión de retardo que se obtiene del delay excess.
- Time Selective Fading (TSF): desvanecimiento selectivo en tiempo producido por las variaciones de frecuencia.

- **Power Delay Profile (PDP):** perfil de retardo de potencia que muestra la potencia de las distintas componentes multirrayecto que llegan a un mismo punto. Solo se tienen en cuenta las componentes que están por encima del umbral de ruido.

Más adelante, en la sección de resultados, se verán perfiles de retardo de potencia de distintos puntos del escenario estudiado.

3.1.1.3. Modelos de propagación

Con todo lo visto en el punto anterior, queda patente que el hecho de predecir cómo se comportará una señal desde que se transmite hasta que llega al receptor, es un problema con muchas variables a tener en cuenta para poder resolverlo. Es por ello que cuando se va a diseñar un sistema de comunicación se utilizan los modelos de propagación para prever a grandes rasgos lo que le sucederá a la señal a lo largo del camino, y con cuánta potencia llegará al receptor. Y es que a fin de cuentas, los modelos de propagación son representaciones simplificadas de la realidad, que se crean a partir de hipótesis y restricciones. Existen múltiples tipos de modelos en función de si el estudio se realiza para interiores o para exteriores, en el caso que ocupa a este proyecto, se trata de un escenario en interiores, así pues principalmente se hablará de dichos modelos. Así mismo también se pueden clasificar en función de la precisión del modelo, lo cual viene determinado por las técnicas de construcción del mismo. La clasificación en base a la precisión del modelo sería la siguiente:

- **Modelos matemáticos:** basados en procedimientos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno modelado. En función de la complejidad matemática que puedan suponer, pueden conllevar una gran carga computacional.
- **Modelos empíricos o estadísticos:** A partir de las medidas del fenómeno que se realizan sobre el terreno, se hace una extrapolación estadística de los resultados. Tienen en cuenta las influencias propias del entorno de forma implícita y no cada una de ellas de manera aislada, lo cual supone una ventaja. Sin embargo existe el inconveniente de que la precisión de los resultados depende directamente de la similitud que tenga el entorno estudio con el entorno en el que se realizaron las medidas.
- **Modelos teóricos:** Se basan en los principios fundamentales del medio que se va a modelar, es por ello que pueden ser aplicados en diferentes entornos sin que se vea afectada su precisión. Completas bases de datos con características relativas al entorno resultan imprescindibles para este tipo de modelos, pero en la práctica son difíciles de conseguir con tanta precisión como se requiere. Otro inconveniente que presentan es que emplean algoritmos muy complejos y poco eficientes computacionalmente hablando, por ello es mejor restringir su uso a áreas pequeñas. Sin embargo si su implementación es correcta resultan mucho más precisos que los modelos empíricos.
- **Modelos deterministas:** En estos modelos, los valores sólo dependen de las condiciones de simulación (parámetros de entrada) y sus resultados no tienen ninguna

distribución de probabilidad. Es decir, con una misma entrada, siempre se tendrá la misma salida.

- **Modelos estocásticos:** En este tipo de modelos, los resultados sí que tienen una función de probabilidad y en consecuencia, la misma entrada no tiene necesariamente que producir la misma salida cada vez.
- **Modelos de caja negra:** En estos modelos solo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin preocuparse de lo que sucede en el interior.

Modelos de propagación en exteriores

Una gran cantidad de los modelos de propagación son de exteriores ya que son los que antes comenzaron a usarse y son ampliamente empleados por la importancia que tienen para ayudar a realizar un diseño de la que ofrezca la mayor cobertura posible.

Existen modelos para un diverso número de áreas de aplicación, desde las más grandes a las más pequeñas, áreas urbanas, entornos naturales, etc. Entre éstos podemos encontrar modelos usados tanto en macroceldas como microceldas, el de HATA, utilizado para entornos urbanos, que es una fórmula empírica del modelo de Okumura, el COST231-Walfish-Ikegami que hace uso del modelo Walfish-Bertoni, entre otros.

Así pues se puede clasificar en base al área de cobertura. Las microceldas son aquellas que tienen una extensión de 200 a 1000 metros, cuyas emisiones tienen una potencia de 10mW a 1W y antenas de 3 a 10 metros. Un ejemplo claro sería una calle con edificios y antenas en sus tejados. Entre los modelos de microceldas se puede encontrar el modelo de dos rayos, teoría de imágenes múltiples, modelos basados en UTD (Teoría uniforme de la difracción), modelo Lee para microceldas, etc.

Las macroceldas por su parte cubren áreas de 2 a 20 kilómetros, las emisiones de potencia obviamente son más elevadas y las antenas también están más elevadas. Como se ha dicho existen una gran cantidad de modelos para macroceldas entre los que podemos encontrar el modelo ITU (CCIR), los antes mencionados HATA, Okumura y COST 231-Walfish-Ikegami, el modelo de ERICSSON 9999, AMN y muchos más.

Modelos de propagación en interiores

Como ya se ha mencionado, los modelos de propagación se emplean para predecir el comportamiento que tendrá la señal, y cómo se verá afectada por los distintos fenómenos que producen las pérdidas de propagación. El modelo se construye a partir de expresiones matemáticas basadas en hipótesis y restricciones. Las variables a tener en cuenta son aleatorias, es por ello que los modelos pueden construirse a partir de los datos recogidos (empíricos) o en base a las estadísticas (estadísticos), pero también pueden ser deterministas basados en los fenómenos de propagación de las ondas.

Cuando nos encontramos en entornos de interiores resulta útil utilizar algún modelo que garantice una buena cobertura e interferencias mínimas. Sin embargo un entorno interior

puede resultar muy complicado de analizar si tienen en cuenta la diversidad de obstáculos y materiales que se pueden encontrar. Es por ello que estos modelos difieren de los de exteriores principalmente en dos aspectos:

1. Las distancias cubiertas son mucho menores
2. El entorno está constituido por multitud de elementos diversos y menores distancias entre transmisor y receptor y por ello la componente variable es mucho menor.

Empíricos o estadísticos

La precisión de este tipo de modelos depende sobre todo de la cantidad de información recopilada y de la similitud entre el espacio donde se recogen las medidas y el espacio a analizar ya que basan sus resultados en dichas mediciones previamente realizadas. A continuación se comentan algunos de ellos.

Modelo de propagación en espacio libre

Cuando se ha hablado previamente de las pérdidas de propagación, en realidad se estaba tratando el modelo de propagación en espacio libre. Como ya se ha dicho las pérdidas que se consideran en este modelo son las relativas a la pérdida de la potencia de la señal cuando ésta se aleja de su fuente siguiendo la ley cuadrática inversa de la distancia. De hecho en la fórmula antes mencionada, $P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{rx} G_{tx}}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$, los términos que se tienen en cuenta para el cálculo de la potencia recibida son, aparte de la potencia de transmisión y ganancias tanto de transmisión como recepción, las pérdidas. Dichas pérdidas consideradas son las relativas a las pérdidas propias de los elementos que componen el sistema de comunicación y por otro lado las que produce el incremento de la distancia respecto al punto de origen. Otro factor a tener en cuenta es el área efectiva, que es lo que determina la relación entre las dimensiones de la antena y la frecuencia de la portadora.

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Friis y es solo válida como modelo cuando se desea predecir la potencia recibida en condiciones de campo lejano. Esto significa que la separación entre el transmisor y el receptor es mayor que la distancia de Fraunhofer, la cual viene determinada por la longitud de onda de la portadora y la mayor dimensión de la apertura numérica de la antena transmisora:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Donde D es la dimensión física mayor de la antena. Además para que se cumpla el hecho de estar en la región de campo lejano se tiene que dar que $d_f \gg D$ y $d_f \gg \lambda$.

Otra condición que debe de cumplirse es que el haya línea de visión directa entre transmisor y receptor. En definitiva, este modelo es solo aplicable los a casos que cumplan unas determinadas condiciones. Así mismo cabe comentar que hay muchas otras variables de la propagación que no tiene en cuenta y por tanto no se puede considerar un modelo muy completo para según que aplicaciones.

Modelo de pérdida de trayecto basado en COST 231

El modelo basado en COST 231 en principio fue diseñado para entornos exteriores, de hecho se trata de un modelo semi-empírico que está basado en modelos teóricos y en medidas en ciudades europeas, y por tanto es generalmente aplicado en macrocélulas. No obstante existe una aproximación que puede ser empleada en interiores. Dicho modelo se define de la siguiente manera:

$$L = L_{FS} + L_C + \sum K_{wi}L_{wi} + n \left(\frac{n+2}{n+1} b \right) \cdot L_f$$

L_{FS} = la pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor

L_C = una constante de pérdida (se fija normalmente en 37 dB)

K_{wi} = número de paredes tipo i penetradas

n = número de suelos penetrados

L_{wi} = pérdida debida a muro de tipo i

L_f = pérdida de entre suelos adyacentes

b = parámetro empírico

Como se aprecia por los parámetros que se tienen en cuenta, este modelo es más completo que el anterior ya que tiene en consideración, aparte de las pérdidas de propagación en espacio libre, las pérdidas originadas por suelos, paredes y techos penetrados en el trayecto directo entre el transmisor y el receptor.

Este modelo de propagación es muy utilizado por ejemplo en UMTS.

Recomendación ITU-R

La recomendación propuesta por la ITU recoge características de otros modelos, entre ellos el COST 231, y en general todos aquellos que tienen en cuenta las pérdidas causadas por paredes, suelos y techos, con vista directa, con difracción, etc. también recoge valores típicos de dispersión y modelos de dispersión multitrayecto. Existe una aproximación de este modelo tanto para microcélulas como para edificios.

En el caso del modelo para edificios, se suman como se ha dicho las pérdidas producidas por paredes, suelos, difracciones y dispersiones. Desde su desarrollo en 1992, el modelo ha ido sufriendo modificaciones que lo han llevado a ser más preciso, teniendo en cuenta características más específicas del entorno. Así pues el modelo queda finalmente definido de la siguiente forma:

$$L_{total} = 20 \log f + 10N \log d + L_f(n) - 28$$

N = coeficiente de pérdida de potencia.

L_f = pérdida de penetración en el suelo.

n = número de pisos.

Como se ve, en este caso se tienen en cuenta las pérdidas en el mismo piso por atravesar muros que se incluyen implícitamente cambiando el exponente en la pérdida de trayecto.

Deterministas

Este tipo de modelos se construyen teniendo en cuenta los fenómenos de propagación de las ondas y por tanto requieren de una gran cantidad de cálculos realizados a partir de enormes bases de datos, lo que los convierte por una parte en muy costoso computacionalmente hablando, pero a su vez muy precisos independientemente del lugar del estudio. Es precisamente por el hecho de que requieran tantos datos y cálculos, que sus resultados se deben restringir a espacios más pequeños. No obstante, las mejoras continuas de hardware que conllevan mayor memoria, hacen que su uso sea más habitual permitiendo obtener resultados muy próximos a la realidad. Entre otros podemos encontrar los siguientes modelos:

- Modelo basado en el trazado de rayos
- Modelos FTD
- Modelos basados en el método del momento.

Pasamos directamente a comentar el basado en el trazado de rayos, ya que es el modelo mediante el cual se han obtenido los resultados.

Modelo basado en el trazado de rayos

Se trata de uno de los métodos más antiguos que se utilizan para alta frecuencia puesto que fue desarrollado en su origen para estudiar la propagación de la luz. En esta teoría se considera el transporte de energía en rayos. Se trata de un modelo de constitución muy compleja que tiene en cuenta muchas variables, y es por ello que también es uno de los más precisos que existen. Por otro lado, también tiene el inconveniente de tener que tratar una gran cantidad de datos, y por ello el coste temporal que requiere es muy grande. Se puede implementar el modelo tanto en 2D como en 3D, siendo el primero más rápido pero con menos consideraciones que el segundo. También es posible construir un modelo en 3D a partir de uno 2D mediante una reconstrucción en altura.

Con este método, se obtiene el nivel de señal en un punto determinado por la suma de los de todos los componentes posibles existentes entre el transmisor y el receptor, logrando a su vez predecir de forma precisa la dispersión en tiempo de la señal.

- Este modelo se basa en la teoría de la Óptica Geométrica y la teoría uniforme de la difracción para su predicción de la respuesta del canal de comunicaciones. La consideración que se toma y que simplifica en gran manera el modelo, es que la energía transmitida se comporta como un rayo óptico, ya que conforme aumenta la frecuencia la primera zona de Fresnel, que es la que concentra la mayor parte de la energía, se estrecha. El comportamiento de dicho rayo, sigue los principios de propagación de ondas previamente mencionados, sufriendo en el camino los fenómenos de reflexión, refracción, difracción y difusión previamente citados. La óptica geométrica, considera que:
 - Los rayos siguen un camino recto más corto en un entorno heterogéneo, según el principio de Fermat.
 - Los rayos sufren reflexiones al incidir con los objetos según la ley de Snell, llegando a cada punto únicamente los rayos provenientes de unos puntos concretos de reflexión.

- La ley de conservación de energía es la que determina la variación de la amplitud del campo a lo largo del recorrido de los rayos.

El modelo de trazado de rayos tiene dos versiones sobre su implementación. La primera denominada Ray Launching (técnica empleada en este proyecto), consiste en el seguimiento del lanzamiento de rayos desde el transmisor con un ángulo de separación constante. La segunda es mediante el método de las imágenes basado en la generación de imágenes a partir de las posibles reflexiones que puedan producirse en el entorno.

En el presente proyecto se usa un software basado en el Ray Launching, y por ello pasaremos directamente a explicar su funcionamiento.

En el caso de trazado de rayos, la exactitud del modelo se debe a la resolución espacial disponible que viene determinada por la distancia entre el transmisor y el receptor y el número de rayos considerados. Lo que se hace es determinar la cantidad finita de posibles direcciones desde la fuente con una separación angular constante. Cuando un rayo es interceptado por un objeto, se generarán un rayo reflejado y otro difractado, y si lo que intercepta es de un tamaño mucho menor que su longitud de onda, entonces se generan un conjunto de rayos difractados. Para determinar si un rayo es recibido se definen esferas (cuando se trabaja en 3D) receptoras que describen las zonas que reciben un único rayo, y si son atravesadas por el rayo, entonces éste se toma como recibido. Obviamente el tamaño de la esfera es importante ya que si es demasiado grande se pueden recibir más de un rayo, y contar el mismo rayo especular dos veces. Por el contrario, si es demasiado pequeño puede suceder que ningún rayo alcance la esfera de recepción. En la siguiente figura se ve un ejemplo de cómo han de ser dichas esferas.

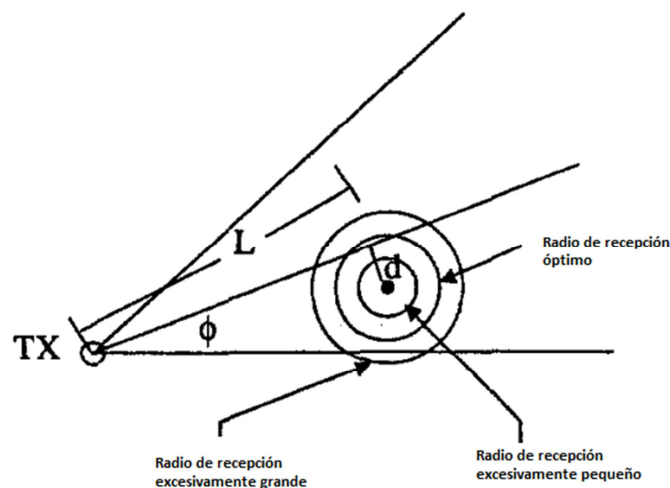


Figura 15. Esfera para determinar el lugar de recepción del rayo

La determinación de la posición del receptor se hace en base a la distancia perpendicular del receptor al rayo, d , y la longitud total de la fuente al punto de proyección perpendicular, L . Si es mayor que $\frac{\phi L}{3}$, en el caso tridimensional, se dice que el rayo no alcanza al receptor. Siendo Φ el ángulo entre dos rayos.

En el método tridimensional 3D, el transmisor y el receptor se modelan como puntos fuente. Para determinar los posibles rayos que puedan salir y llegar del transmisor al receptor, resulta preciso considerar todos los posibles ángulos de salida y llegada. Los ángulos de salida son θ , ángulo de elevación y ϕ ángulo de acimut. También se incorpora el modelo de la antena para incluir los efectos de amplitud de rayo de la antena en los ángulos θ y ϕ .

Otro aspecto imprescindible es que cada chorro de rayos ocupe el mismo ángulo sólido $d\Omega$, ya que cada frente de onda tiene la misma forma y tamaño a un cierta distancia r del transmisor. A su vez deben de ser tales que puedan ser subdivididos para poder manejar la resolución creciente del rayo. La superficie hay que dividirla de tal forma que quede completamente cubierta y puede ser en esferas, hexágonos y triángulos, siendo estos siempre del mismo tamaño.

También hay que tener en cuenta los materiales que se encuentran y sus índices de refracción para modelar correctamente el comportamiento del rayo.

En resumen, se ve que éste es sin duda unos de los modelos de propagación más precisos que tiene muy en cuenta el entorno a evaluar y para el que resulta imprescindible un gran base de datos.

3.2. Tecnologías empleadas y sus usos.

Las comunicaciones inalámbricas, como su propio nombre indica son aquellas que se producen sin necesidad de un medio de transmisión guiado como pueden ser los cables (par trenzado, coaxial o fibra óptica) o las guías de onda. En el sector de las TIC el desarrollo de aplicaciones y servicios de transmisión de datos a través de medios inalámbricos evoluciona constantemente, son sin duda el segmento más dinámico y de mayor crecimiento. La mejor prueba de ello es el gran impacto económico y social que han provocado las tecnologías como la telefonía móvil (GSM, 3G, LTE, 4G), las redes inalámbricas de acceso a internet (Wifi, WiMax, etc.), los sistemas de conexión inalámbricos de periféricos (Bluetooth, Ultrawideband, etc.) y las redes inalámbricas de sensores, entre otros

Como se verá más adelante en este proyecto se estudia las posibilidades de cobertura en función del diseño para tres frecuencias, que son 868 MHz, 1,8 GHz y 2,4 GHz. Estas frecuencias son habitualmente usadas para las comunicaciones inalámbricas. Diferentes tecnologías son usadas a dichas frecuencias, por tanto se comentarán inicialmente de manera general, para pasar posteriormente a explicar con mayor detalle su funcionamiento.

Este tipo de comunicación es omnidireccional, lo cual resulta obvio ya que sería imposible tener un solo transmisor por cada receptor que exista, dado que la comunicación puede darse tanto entre un transmisor y un receptor, como varios receptores.

A continuación se muestra de forma gráfica la parte del espectro electromagnético correspondiente a estas bandas de frecuencia.

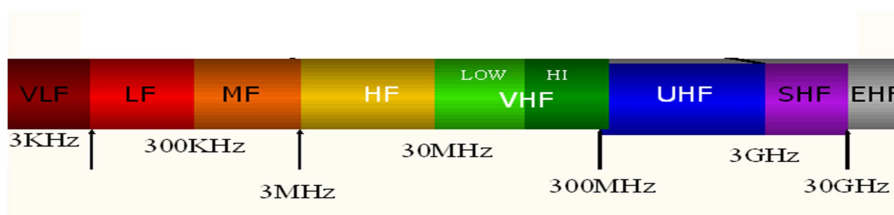


Figura 16. Bandas de frecuencia y sus nombres

Las bandas de frecuencias en las que se producen las comunicaciones por ondas de radio son: Low Frequency (de 30 a 300 KHz), Medium Frequency (de 0.3 a 3 MHz), High Frequency (de 3 a 30 MHz), Very High Frequency (de 30 a 300 MHz) y Ultra High Frequency (de 300 MHz a 3 GHz). Todas ellas reúnen ciertas propiedades como, que son fáciles de generar, que atraviesan largas distancias, atraviesan paredes de edificios, son absorbidas por la lluvia y están sujetas a interferencias causadas por las emisiones de otros equipos.

Obviamente no todas ellas reúnen las mismas propiedades, y de hecho, es por ello que se realiza esa clasificación por grupos de frecuencias. Por ejemplo a bajas frecuencias cruzan los obstáculos, mientras que a altas frecuencias rebotan en ellos y tienden a viajar en línea recta.

El alcance que tienen depende entre otros factores, de la potencia de transmisión, de la sensibilidad del receptor (capacidad del receptor para detectar señales débiles), de las condiciones atmosféricas y del relieve del terreno.

En cuanto a las aplicaciones de cada banda frecuencial, tenemos por ejemplo:

Baja frecuencia	LF	Radio ayuda, señales de tiempo, radiodifusión en AM (onda larga) (Europa y partes de Asia), RFID, Radioafición
Frecuencia media	MF	Radiodifusión en AM (onda media), Radioafición, Balizamiento de Aludes
Alta frecuencia	HF	Radidifusión en Onda corta, Banda ciudadana y radioafición, Comunicaciones de aviación sobre el horizonte, RFID, Radar, Comunicaciones ALE, Comunicación cuasi-vertical (NVIS), Telefonía móvil y marina
Muy alta frecuencia	VHF	FM, Televisión, Comunicaciones con aviones a la vista entre tierra-avión y avión-avión, Telefonía móvil marítima y terrestre, Radioaficionados, Radio meteorológica
Ultra alta frecuencia	UHF	Televisión, Hornos microondas, Comunicaciones por microondas, Radioastronomía, Telefonía móvil, Redes inalámbricas, Bluetooth, ZigBee, GPS, Comunicaciones uno a uno como FRS y GMRS, Radioafición

Tabla 1. Aplicaciones de las distintas bandas frecuenciales

Cuando pasamos a frecuencias más altas, nos encontramos con las bandas de las frecuencias de microondas que son: Super High Frequency (de 3 a 30 GHz) y Extreamly High Frequency (de 30 a 300 GHz). En estos casos las longitudes de ondas son muy pequeñas y para su transmisión y recepción se precisa de antenas parabólicas. Se pueden recorrer grandes distancias, unos 80 km con alturas de 100 m siempre y cuando el receptor y transmisor estén en la línea de visión

(Line Of Sight). Otra característica es que rebotan en los metales, propiedad muy útil para aplicaciones de radar.

Las aplicaciones en estas bandas frecuenciales son:

Súper alta frecuencia	SHF	Radioastronomía, Comunicaciones por microondas, Redes inalámbricas, radares modernos, Comunicaciones por satélite, Televisión por satélite, DBS, Radioafición
Frecuencia extremadamente alta	EHF	Radioastronomía, Transmisión por microondas de alta frecuencia, Teledetección, Radioafición, armas de microondas, Escáner de ondas milimétricas

Tabla 2. Aplicaciones de las distintas bandas frecuenciales

Finalmente se muestra un resumen de clasificación de las distintas tecnologías inalámbricas:

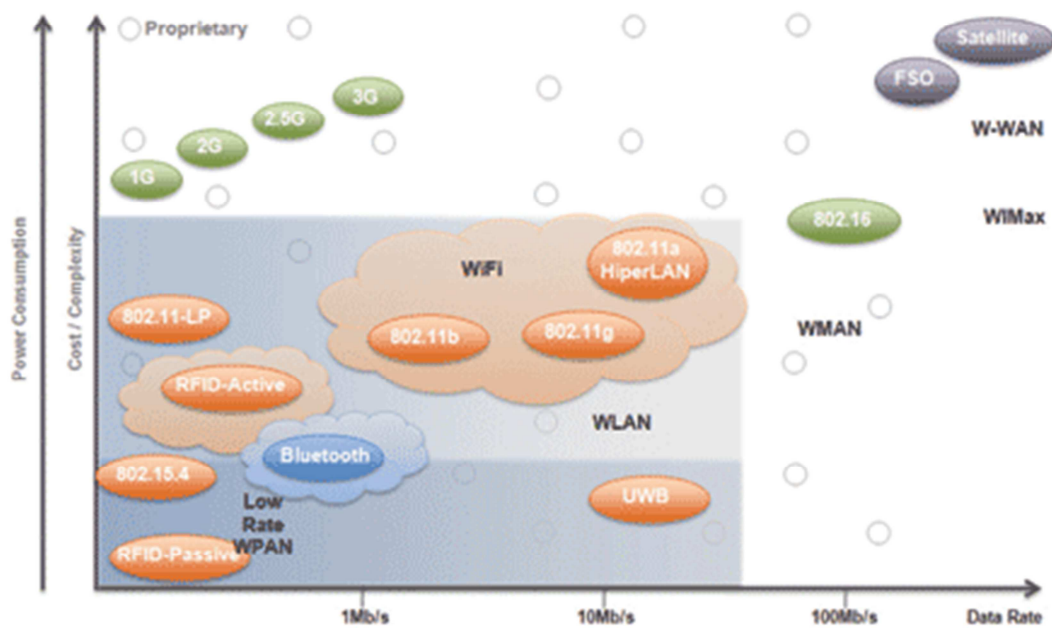


Figura 17. Clasificación de las tecnologías inalámbricas

Una vez se ha visto de manera un tanto global las características de las frecuencias que se emplean para las comunicaciones inalámbricas, pasaremos a ver algunas de las tecnologías en las que se emplean.

3.2.1. WIFI



Uno de los estándares más usados en las comunicaciones inalámbricas asociado a la transmisión de datos entre ordenadores, es el 802.11 de IEEE, más conocido comúnmente por WiFi. Algunos textos dicen que viene de Wireless Fidelity, aunque lo cierto es que procede del nombre de la organización comercial Wi-Fi Alliance que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplen los estándares 802.11 relacionados con las redes inalámbricas de área local.

Con el fin de establecer un mecanismo de conexión inalámbrica que certificara la interoperabilidad entre equipos, en año 2000 la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance, asociación de distintas empresas que buscaban este fin) sacó a la luz la norma 802.11b bajo la marca Wi-Fi. Gracias a ello se podía asegurar la conexión inalámbrica entre distintos terminales en una red de área local donde exista un punto de acceso (Access Point). Este tipo de redes se denominan de área local por el alcance que tienen, que en interiores es de unos 40 m y mayor si es al aire libre. Las redes de área local (Local Area Network, LAN), son redes Ethernet cableadas y la diferencia con las redes inalámbricas de área local (Wireless LAN, WLAN), aparte de lo obvio, es el cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos, el resto es igual.

El funcionamiento de una red inalámbrica de área local a grandes rasgos se podría decir que es como sigue:

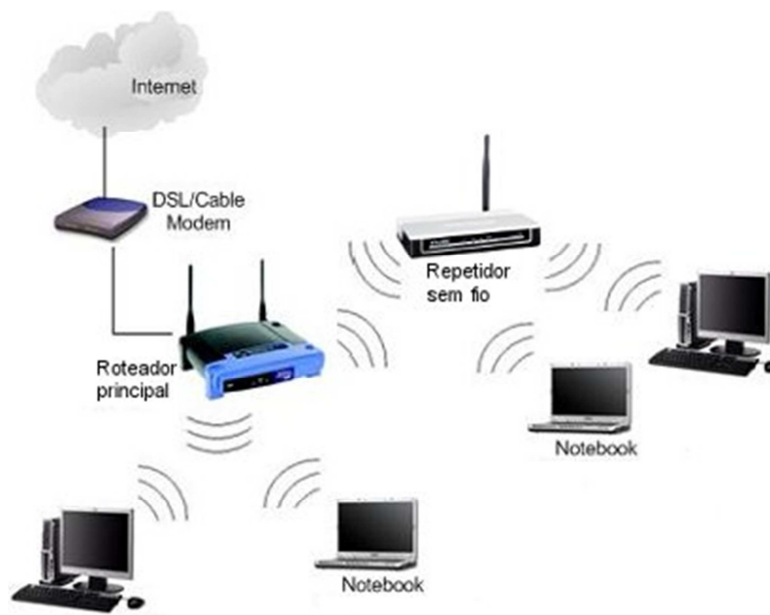


Figura 18. Red inalámbrica de área local

Los dispositivos terminales, que se denominan estaciones, cuando se conectan al punto de acceso, crean una red denominada BSS (Basic Service Set). No debe existir más de una BSS en un mismo local y es importante que reciba un identificador de conjunto de servicio (SSID), es decir, el nombre de la red inalámbrica. Se trata de una conexión bidireccional, de una parte el dispositivo de Ethernet por cable proporciona la conectividad a Internet envía la información al

enrutador inalámbrico, el cual traduce las señales y las transmite a la tarjeta adaptadora inalámbrica de la estación correspondiente. De forma inversa, la tarjeta adaptadora de red del ordenador convierte los datos en señales de radio que se transmiten por una antena, las cuales recibe el router que las decodifica, para luego enviar la información a internet mediante una red LAN o Ethernet por cable.

Al tratarse de una comunicación inalámbrica hay que tener especial cuidado con la seguridad, ya que puede resultar mucho más fácil que en el caso de las redes cableadas el hecho de interceptar la señal y obtener los datos que se envían o reciben. En un principio la seguridad que empleaba este tipo de comunicaciones era WEP, pero ha ido evolucionando y actualmente se usa WPA o WPA2. Son protocolos de cifrado de datos que se encargan de codificar la información transmitida para proteger su confidencialidad. El cifrado de datos mediante el protocolo WEP tiene dos niveles de seguridad de 64 y 128 bits, los datos se codifican con una clave antes de enviarlos al aire. Por su parte WPA presenta ciertas mejoras respecto a WEP como puede ser la generación dinámica de la clave de acceso y que las claves se insertan como dígitos alfanuméricos. Finalmente en WPA2, que es una mejora de WPA es el protocolo más seguro para WiFi en la actualidad.

Desde la certificación de este estándar, se han ido haciendo mejoras en lo que a velocidades de transmisión y alcance se refiere tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Estándar	Nombres comerciales	Velocidad máxima teórica
IEEE 802.11	-	2 Mbps
IEEE 802.11a	802.11A	54 Mbps
IEEE 802.11b	802.11B, Wi-Fi B	11 Mbps
IEEE 802.11g	802.11G, Wi-Fi G	54 Mbps
IEEE 802.11n	802.11N, Wi-Fi N	600 Mbps
IEEE 802.11ac	802.11AC, Wi-Fi AC	1.3 Gbps (*)

Figura 19. Clasificación del estándar 802.11

El último que aparece el 802.11ac, también conocido como WiFi 5, opera en la banda de 5 GHz y disfruta de una operatividad con canales relativamente limpios. Aunque el estándar permita velocidades más altas los certificados por WiFi Alliance llegan a las velocidades mencionadas. El resto se mueven en los canales en torno a la frecuencia de 2.4 GHz.



Figura 20. Logotipo de WiFi y sus variantes

3.2.2. GSM



Las siglas GSM que significan Global System Mobile, representan un sistema global para comunicaciones móviles estándar de telefonía móvil digital. Es considerado un estándar de segunda generación, es decir, 2G, por tanto, obviamente no es de los últimos disponibles en el mercado ya que se ha extendido a 3G y 4G con mayores velocidades de conexión. Las ventajas que ofrecía GSM frente a la telefonía móvil anterior, son entre otras, el servicio de mensajes cortos (SMS), que un cliente puede conectarse a través de su teléfono con su ordenador y enviar y recibir mensajes por correo electrónico, faxes, navegar por internet, etc.

El estándar GSM comenzó a desarrollarse en 1982 por el grupo de trabajo Groupe Spécial Mobile (GSM), formado por 25 compañías europeas, que tenía como fin desarrollar un estándar europeo de telefonía móvil digital. El primer estándar GSM-900 salió en 1990 y un año después el DCS-1800 y se presentaron los primeros prototipos de telefonía móvil. En 1992 se introdujeron los primeros móviles GSM e iniciaron su actividad las primeras redes GSM-900. Más adelante en el 2000 se pasó al grupo TSG GERAN (Technical Specification Group GSM EDGE Radio Access Network) para desarrollar la tercera generación de telefonía móvil 3G. El sucesor de GSM, UMTS se introdujo en 2001 con lenta aceptación ya que hasta 2010 siguieron usando GSM. En la actualidad se ha llegado al 4G y en un futuro se seguirá con el 5G.

Las bandas frecuenciales en las que se ha implementado GSM son las citadas en la siguiente tabla:

Banda	Nombre	Canales	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Notas
GSM 850	GSM 850	128 - 251	824,0 - 849,0	869,0 - 894,0	Usada en los EE.UU., Sudamérica y Asia.
	P-GSM 900	0-124	890,0 - 915,0	935,0 - 960,0	La banda con que nació GSM en Europa y la más extendida
GSM 900	E-GSM 900	974 - 1023	880,0 - 890,0	925,0 - 935,0	<i>E-GSM</i> , extensión de GSM 900
	R-GSM 900	n/a	876,0 - 880,0	921,0 - 925,0	<i>GSM ferroviario (GSM-R)</i> .
GSM1800	GSM 1800	512 - 885	1710,0 - 1785,0	1805,0 - 1880,0	
GSM1900	GSM 1900	512 - 810	1850,0 - 1910,0	1930,0 - 1990,0	Usada en Norteamérica, incompatible con GSM-1800 por solapamiento de bandas

Tabla 3. Bandas frecuenciales empleadas en GSM

El principal problema a resolver en las comunicaciones móviles es el reparto del ancho de banda. Y es que cada conversación generada por cada usuario requiere un ancho de banda, por otro lado cada compañía telefónica tiene un ancho de banda determinado asignado, por

tanto resulta necesario un control de acceso al medio ordenado de forma que todos los usuarios puedan disfrutar del servicio cuando lo necesiten. La solución elegida por GSM consiste en combinar los siguientes modelos de reparto del espectro disponible:

- **SDMA:** Acceso múltiple por división de espacio, consiste en el empleo de celdas contiguas a distintas frecuencias.
- **TDMA:** Acceso múltiple por división de tiempo, consiste en la división del tiempo de emisión y recepción.
- **FDMA:** Acceso múltiple por división de frecuencia, consiste en la separación de bandas para la emisión y recepción y subdivisión en canales radioeléctricos.
- **FHMA:** Acceso múltiple por saltos de frecuencia, consiste en una variación pseudoaleatoria de la frecuencia de la portadora de envío de terminal a la red.

A continuación se muestra un esquema de la arquitectura de red donde se encuentran todos los elementos que se comunican mediante interfaces de red, que soportan el diálogo entre los diferentes equipos y permiten el correcto inter funcionamiento de la red.

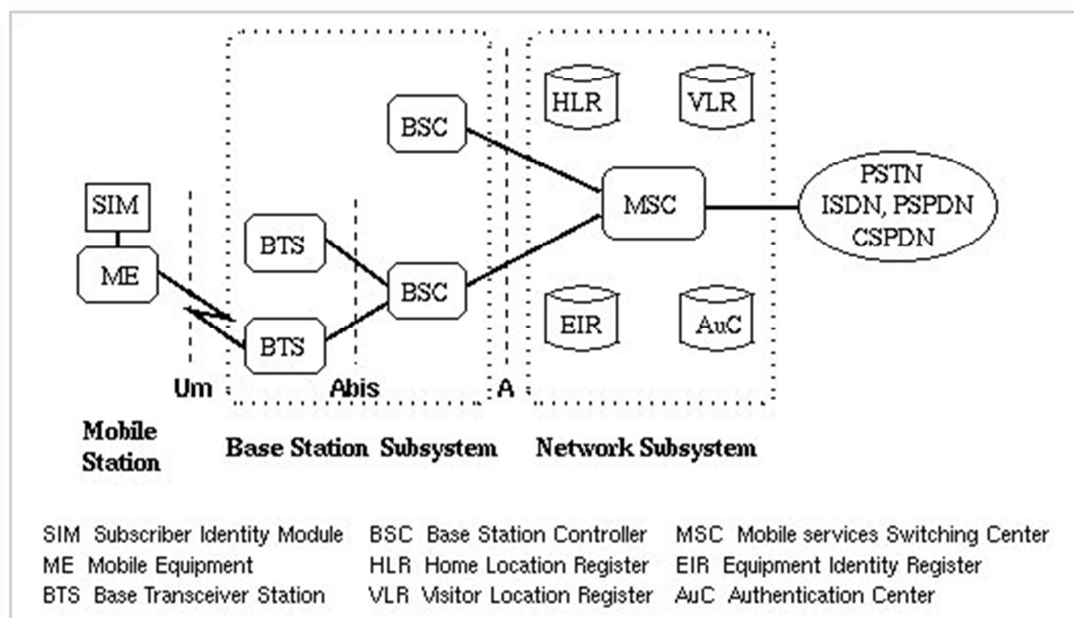


Figura 21. Topología de red GSM

Se resumen a continuación qué es cada elemento y cuál es su misión:

- **Mobile Station:** Estación móvil o terminal del abonado, es decir, lo que es el dispositivo, el teléfono móvil. Necesita de una tarjeta SIM que es la que le da la identidad de suscriptor.
- **Base Transceiver Station:** Estación base, es el emisor/recetor de radio capaz de enlazar las MS con la infraestructura fija de la red. Garantiza la cobertura radioeléctrica en la célula de la red y proporciona el punto de entrada a la red de las MS's. Se pueden controlar bien localmente o mediante su controlador de estación base.
- **Mobile Switching Centre:** Conmutador de red encargado de interconectar la red de telefonía convencional a la red radiotelefónica. También accede al centro de

autenticación para verificar derechos de los clientes y participa en la gestión de movilidad de los abonados y su localización en la red.

- Base Station Controller: Controlador encargado de gestionar una o varias estaciones base. Es un concentrador para el tráfico de los abonados y un enrutador hacia la estación base destinataria para el tráfico proveniente de un conmutador. Es decir, actúa como un repetidor para datos de control de la BS hacia el centro de control y mantenimiento, y también como controlador de la estación base permitiendo su gestión, mantenimiento y almacenamiento de información de la BS.
- Home Location Register: Se trata de una base de datos que contiene información relativa a los abonados de una red. También describe las opciones y servicios contratados por el abonado. A su vez almacena la última localización conocida del abonado el cual identifica gracias a la información almacenada en la SIM.
- Visitor Location Register: Es la base de datos asociada a un conmutador MSC que almacena la identidad de los abonados a la red. Se usa para controlar la ubicación de un abonado.
- Authentication Centre: Base de datos que almacena información confidencial de cada abonado de red. Para autenticarse en dicha base de datos el abonado tiene que acceder a su tarjeta SIM mediante el pin.

En cuanto a las agrupaciones de los elementos de la arquitectura de red, nos encontramos por un lado con la BSS (Base Station Subsystem) que es el conjunto de BS's y su controlador BSC. Por el otro lado con NSS (Network Station Subsystem) que es el conjunto formado por el MSC, el AUC y los V/HLR.

3.3.3. ZigBee



La tecnología ZigBee, desarrollada por el grupo comercial ZigBee Alliance, está basada en el estándar 182.15.4, y da especificaciones sobre la capa MAC (acceso al medio) y la capa física. Se trata de una WPAN (Wireless Personal Area Network), es decir una red inalámbrica de área personal, que ofrece comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y con baterías de larga vida útil. En su mayoría, las aplicaciones están dirigidas sobre todo a redes de sensores, y su uso más previsto es en el ámbito de la domótica.

El uso de ZigBee enfocado a aplicaciones médicas e industriales, para lo cual se usa la banda ISM (Industrial Scientific Medical) que entre otras contiene la frecuencia de 868 MHz. No obstante y dado que la banda de 2,4 GHz es libre en todo el mundo, muchas empresas optan por ella a la hora de diseñar sus dispositivos.

Hasta su aparición, las redes inalámbricas de área local más usadas eran las de Bluetooth, pero desde la aparición de ZigBee, los usos de cada una de ellas se escogen en base a las ventajas que ofrecen. A continuación se citan algunas de ellas:

- Las redes ZigBee pueden estar constituidas por muchos más nodos que las de Bluetooth, subredes de 255 nodos en ZigBee frente a los 8 nodos de Bluetooth.

- Los dispositivos de ZigBee tienen un consumo más bajo, lo que hace que la vida útil de sus batería sea mucho mayor. En ZigBee hablamos de 30 mA cuando transmite y 3 μ A cuando está dormido, frente a los 40 mA en transmisión y 0,2 mA dormido de Bluetooth.
- La velocidad de transmisión de datos en ZigBee es de 250Kbps, mientras que en Bluetooth se alcanzan velocidades de 3 Mbps. En este aspecto Bluetooth sale ganando, pero en realidad para el uso que está pensado, domótica, sensores médicos, etc. la velocidad que ofrece ZigBee es suficiente. Sin embargo la que ofrece Bluetooth es más útil para aplicaciones de telefonía móvil e informática casera.

A continuación se muestra un ejemplo de red ZigBee:

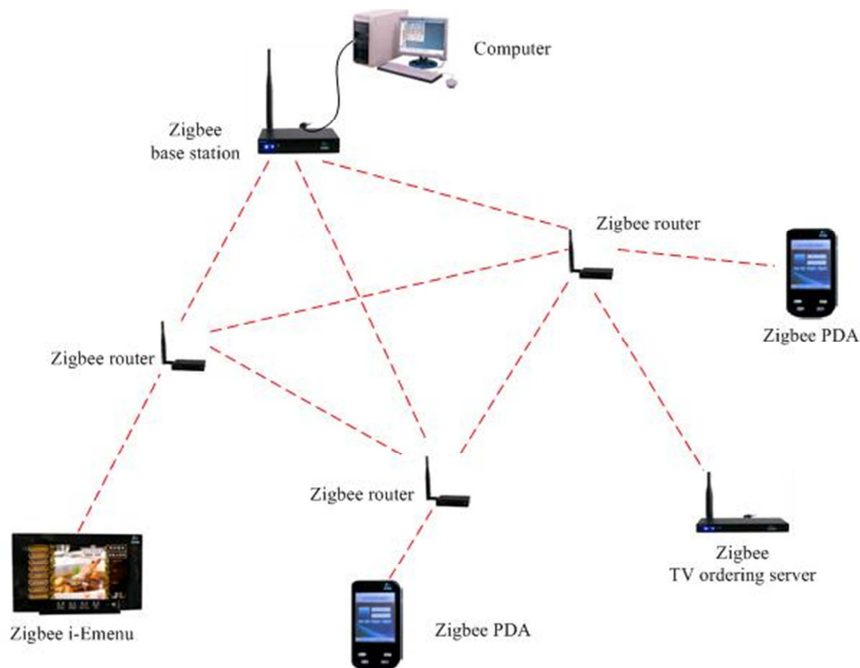


Figura 22. Topología de red ZigBee

Entre los dispositivos que encontramos en una red ZigBee, tenemos el coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC), que es el que se encarga de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos. Siempre debe de haber uno en cada red. El router ZigBee (ZigBee Router, ZR) que es el encargado de interconectar los dispositivos de la red y ofrece un nivel de aplicación al usuario. Por último nos encontramos con el dispositivo final (ZigBee End Device, ZED) que se conecta con el nodo padre para comunicarse con él ya que no puede transmitir información destinada a otros nodos. Estos dispositivos, tienen requerimientos mínimos de memoria y por eso son más baratos.

3.3. Entornos hospitalarios

Dado que el presente estudio se centra en los entornos hospitalarios, se verá a continuación de forma global la estructura interna de un hospital, su funcionamiento y los requerimientos que tienen en materia de telecomunicaciones. No obstante antes de comenzar con ello veremos ciertos aspectos relacionados con las interferencias electromagnéticas.

Respecto a las emisiones electromagnéticas y sus consecuencias en el ámbito de la medicina, existen ciertos aspectos a considerar como los que se citan a continuación y se verán un poco más en profundidad más adelante:

- Necesidad de fiabilidad y seguridad en aplicaciones de monitorización de pacientes.
- Necesidad de respetar las condiciones de funcionamiento y exposición a radiación electromagnética, debido al aumento de los sistemas de comunicación, biotelemedicina, señalización, alarma, etc. para evitar riesgos.
- Necesidad de establecer condiciones que faciliten y hagan compatible el funcionamiento de las diversas instalaciones radioeléctricas y los servicios a los que dan soporte, respetando las restricciones relacionadas con la exposición de las personas a los campos electromagnéticos.
- Necesidad de aislamiento radioeléctrico de los dispositivos, debido a la gran cantidad de equipos diversos que involucra la medicina, para no deteriorar su funcionamiento.
- Necesidad de normas que garanticen la inmunidad electromagnética.

3.3.1. Contexto

Las TIC han colaborado en la mejora del funcionamiento de todas las instituciones en las que son empleadas, y sin duda los entornos hospitalarios son una parte de estas instituciones que se ha visto muy beneficiada por ellas. Y es que en las instituciones sanitarias, las redes de comunicación juegan un papel muy importante en lo que a la salud y seguridad de sus pacientes se refiere. Teniendo en cuenta que la vida de los pacientes pudiera estar en juego, resulta imprescindible asegurar una transmisión de datos sin fallos en la conexión. Así mismo el hecho de que se pueda acceder a la información del paciente, gracias a la Historia Clínica Electrónica, en tiempo real ayuda a agilizar de manera muy eficiente los trámites a realizar, e incluso puede ser vital en ocasiones en las que el tiempo juegue un papel crítico a la hora de salvar una vida. Otros ejemplos de cuan útiles pueden resultar las TIC en esta área son la tele asistencia médica, para la prestación de servicios al paciente de forma remota y que engloba soluciones para home-care, tele diagnóstico o tele hospitalización, la tele asistencia social, etc.

Por otra parte hay que considerar que en un entorno hospitalario la cantidad de datos a almacenar y transmitir puede ser enorme, y es que aparte de la información relativa a los pacientes, sus historias clínicas, informes, etc. Existen otro tipo de archivos como pueden ser los relativos a resonancias magnéticas, rayos X, imágenes médicas en general, que ocupan un gran ancho de banda. Por todo ello, resulta crucial diseñar un sistema de comunicación robusto, libre de fallos de transmisión, con gran capacidad de almacenamiento y transmisión.

Todo ello resulta imprescindible ya que a pesar de las ventajas que puedan aportar el uso de las tecnologías inalámbricas, también implican inconvenientes como puedan ser las interferencias, no solo entre los sistemas de radiocomunicación y el equipamiento médico y clínico, sino también entre los distintos sistemas de radiocomunicaciones, y entre los sistemas de radiocomunicaciones y las aplicaciones sanitarias de gestión y de información para médicos y pacientes.

En toda esta implantación de las TIC en las instituciones sanitarias, las comunicaciones inalámbricas juegan un papel muy importante, ya que permite un funcionamiento más eficiente y competitivo en el entorno sanitario. Ofrecen ventajas como, permitir a los pacientes mayor movilidad, instalaciones más rápidas y económicas, mejoras en la gestión, utilización de las TIC para la formación y muchas otras.

3.3.2. Estructura interna de un hospital

Un hospital está estructurado de una forma jerárquica tal y como se muestra a continuación en el organigrama genérico, que engloba a grandes rasgos todas las áreas que se pueden encontrar.

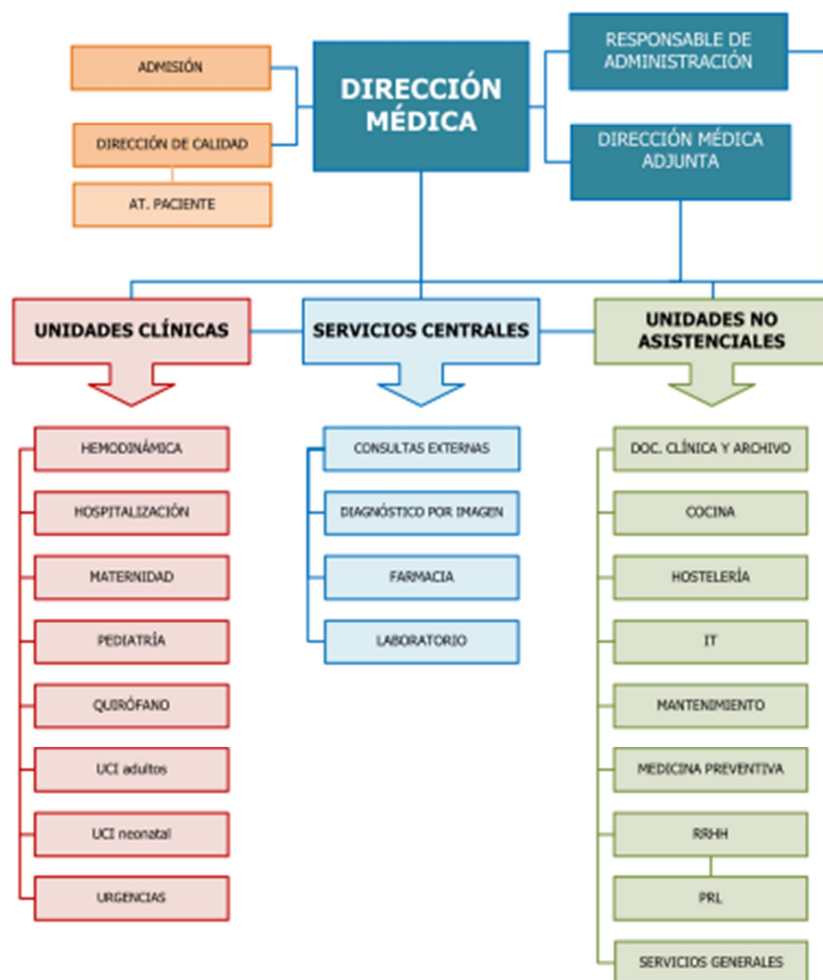


Figura 23. Organigrama genérico de la estructura de un hospital

Como podemos ver hay distintos servicios, entre los cuales nos encontramos áreas de despachos y salas de juntas, donde se encuentran los administrativos, gerentes, directores.

Unidades no asistenciales donde se hallan algunos departamentos que no están directamente ligados a procesos hospitalarios (en cuanto a medicina se refiere) y que sin embargo son completamente indispensables, como pueden ser; archivo, cocina, mantenimiento, recursos humanos, etc.

Por otro lado también nos encontramos con los servicios generales donde encontraríamos entre otros, las consultas externas, farmacia, laboratorio.

Finalmente están las unidades clínicas en donde se encuentran los lugares que generalmente más frecuentan los pacientes. Encontramos en este punto desde los despachos de los médicos que pasan consulta hasta las salas de urgencias, pasando por los quirófanos, las unidades de cuidados intensivos, hemodinámica y las distintas especialidades. Para tal despliegue de servicios resulta indispensable un gran recinto dividido en distintas zonas como son los despachos donde se pasa consulta, los quirófanos, las zonas de imágenes médicas, las unidades de cuidados intensivos, la zona de urgencias, etc.

Precisamente para el caso que ocupa a este PFC, es en este último punto en el que nos vamos a centrar, el recinto de urgencias, más concretamente y dado que se está utilizando para varios estudios que se están haciendo en la UPNA, el recinto que se va a analizar el de urgencias del Complejo Hospitalario de Navarra en el edificio de Virgen del camino.

A continuación se muestra un plano del recinto donde se ven las distintas divisiones del mismo:

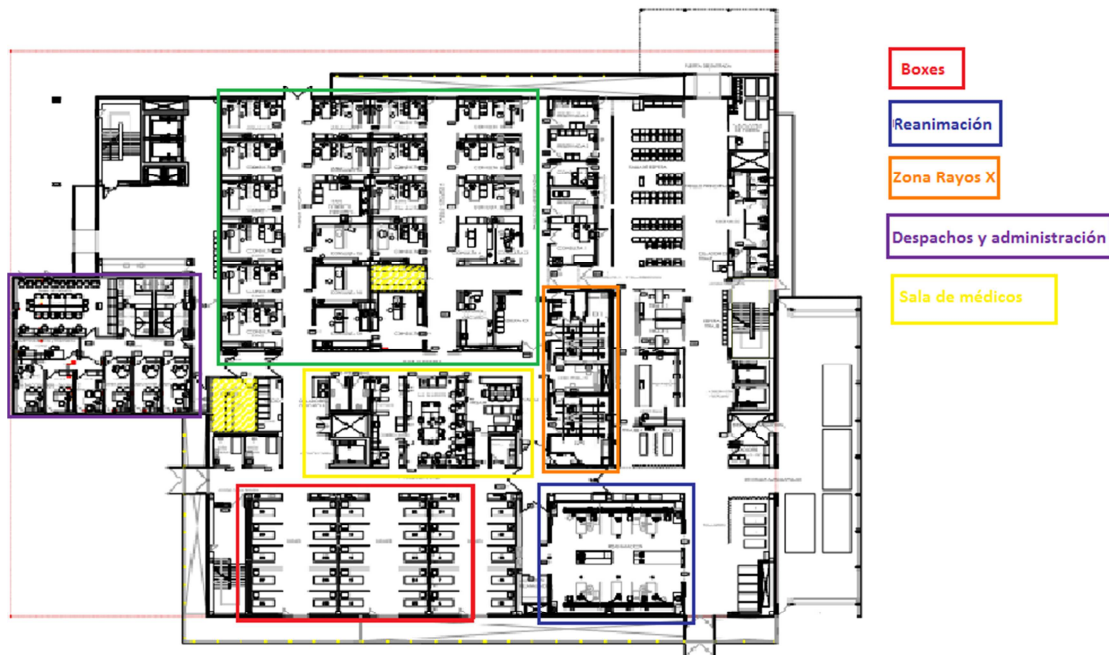


Figura 24. Plano del recinto de urgencias del Hospital Virgen del Camino

Las simulaciones realizadas para establecer el comportamiento de las señales radioeléctricas dentro del recinto se han hecho sobre un modelo de escenario basado en el recinto real y con idénticas características en cuanto a dimensiones y materiales se refiere.

3.3.3. Bandas de frecuencia y servicios

Como ya hemos visto el espectro radioeléctrico abarca determinadas frecuencias que en función de las características que ofrecen para la comunicación son usadas en unos ámbitos o en otros. De hecho cada grupo frecuencial de los vistos en el punto 3.2 está destinado a un tipo de aplicación, pero a pesar de esta división, resulta imprescindible el reparto del espectro electromagnético ya que por ejemplo dentro de la banda de las comunicaciones inalámbricas son muchos los usuarios y una falta de reparto podría suponer un uso improductivo del mismo, a parte de los consecuentes fallos que pudiera ocasionar. De hecho existen ciertos ámbitos donde la garantía de comunicación resulta imprescindible, como puedan ser casos de seguridad, militares, científicos, industriales y médicos. Es por ello que se reservan ciertos

rangos de frecuencias con el fin de que hagan uso de ellas únicamente las aplicaciones que tienen permisos. En el caso de la medicina también tiene su rango frecuencial reservado y se denomina IMC, Industrial Médico Científico, garantizando así disponibilidad de frecuencias libre de emisiones intencionadas por parte de transmisores de aplicaciones no médicas.

Antes de comenzar a especificar como se reparten las bandas frecuenciales para aplicaciones IMC, se muestra un esquema gráfico de las distintas tecnologías que dan soporte a las aplicaciones sanitarias:

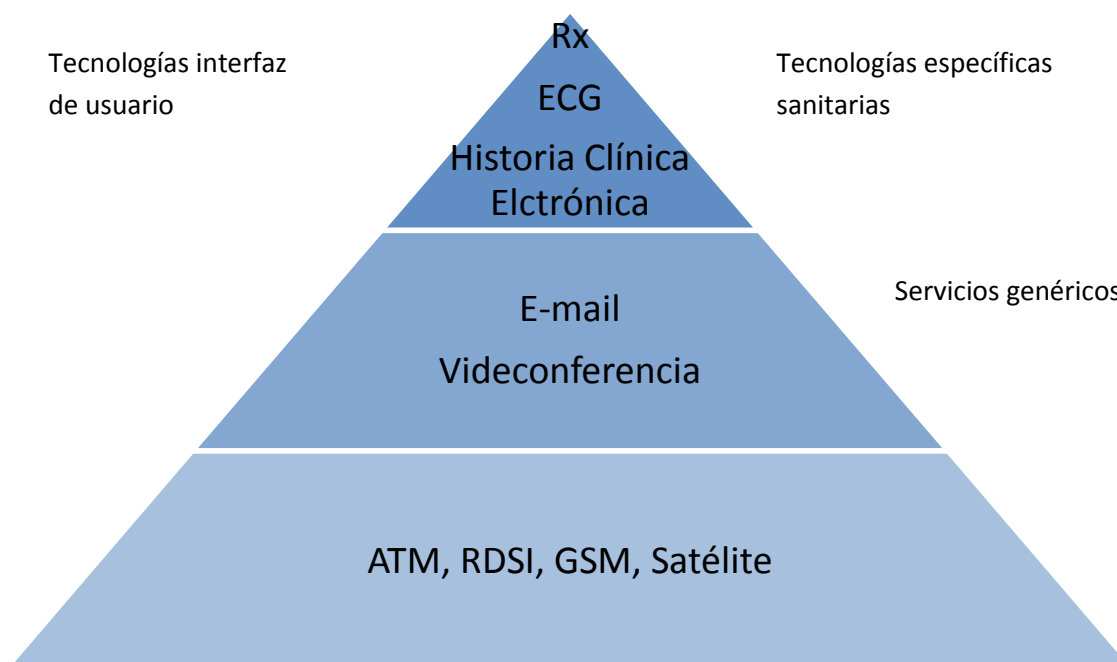


Figura 25. Tecnologías que dan soporte a las aplicaciones hospitalarias

Según el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) se usan 8 bandas de frecuencias destinadas a fines Industriales, Científico y Médico. Son frecuencias de uso común, es decir, su uso está regulado pero no requiere de título habilitante. El uso común no garantiza la protección frente a otras utilidades ni puede causar perturbaciones a otros servicios existentes legalmente autorizados y deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones. Las 8 bandas citadas son las siguientes:

- **ICM 1:** 13,553-13,567 MHz
- **ICM 2:** 26,957-27,283 MHz
- **ICM 3:** 40,660-40,700 MHz
- **ICM 4:** 433,050-434,790 MHz
- **ICM 5:** 2400-2500 MHz
- **ICM 6:** 5725-5875 MHz
- **ICM 7:** 24,00-25,25 GHz
- **ICM 8:** 61.00-61.50 GHz

En la tabla que se muestra a continuación se exponen los servicios que se prestan dentro de las bandas ICM:

Tipo de dispositivo o servicio	Frecuencias empleadas
Dispositivos de baja potencia conocidos como de bucle inductivo	Bandas: 20,05 – 70 KHz, 70 – 119 KHz, 119 – 135 KHz, 135 – 140 KHz, 140 – 148,5 KHz, 148,5 – 1600 KHz, 6765 – 6795 KHz, 7350 – 8800 KHz y 13,553 – 13,567 MHz (ICM 1).
Dispositivos de corto alcance para aplicaciones de baja potencia no específicas	Bandas: 6765 – 6795 KHz, 13,553 – 13,567 MHz (ICM 1), 40,660 – 40,700 MHz (ICM 3), 433,050 – 434,790 MHz (ICM 4), 868 – 870 MHz, 2400 – 2483,5 MHz (ICM 5), 5725 – 5875 MHz (ICM 6), 24,0 – 24,25 GHz (ICM 7), 61,0 – 61,5 GHz (ICM 8).
Banda ciudadana CB–27	Se dispone de 40 canales con separación entre los adyacentes de 10 KHz, donde los canales del 1 al 28 quedan dentro de la banda 26,965 – 27,285 MHz (ICM 2).
Walkie-talkies	Se designan 40 canales en las frecuencias de 26,990 MHz a 27,410 MHz (ICM 2), con potencias de hasta 100 mW.
Sistemas de radiocomunicaciones de telemando, teleseñalización y usos afines de baja potencia	Se designan las frecuencias 26,995 MHz, 27,045 MHz, 27,145 MHz y 27,195 MHz (ICM 2)
Tele mando y tele medida	Se destinan las frecuencias 40,665 MHz 40,675 MHz 40,685 MHz y 40,695 MHz (ICM 3)
Telemando, telemedida y tele alarmas	Bandas: 433,050–434,790 (10 mW de PRA), 433,050–434,790 (1 mW de PRA), y 434,040–434,790 (10 mW de PRA). Se designan, transitoriamente, para estos sistemas los canales de frecuencias: 433,075 MHz, 433,100 MHz, 433,125 MHz, 433,150 MHz, 433,175 MHz, 433,200 MHz, 433,225 MHz, 433,250 MHz, 433,275 MHz, 433,300 MHz, 433,325 MHz y 433,350 MHz (ICM 4), con una potencia radiada aparente (PRA) igual o inferior a 100 mW.
Radioenlaces fijos y radioenlaces móviles de televisión (ENGs)	Banda: 2300 – 2483,5 MHz (ICM 5)
RLAN (redes de área local)	Banda: 2400 – 2483,5 MHz (ICM 5)
Enlaces de vídeo de corto alcance	Banda: 2421 MHz, 2449 MHz y 2477 MHz (ICM 5)
Dispositivos de radiofrecuencia para aplicaciones de identificación (RFID)	Banda: frecuencias 2446 – 2454 MHz (ICM 5)
Dispositivos genéricos de corto alcance	Banda: 5725 – 5875 MHz (ICM 6)
Dispositivos de baja potencia por encima de 10 GHz	Banda: 10517,5 – 10537,5 MHz y 24,05 – 24,25 GHz (ICM 7)

Tabla 4. Servicios que se prestan dentro de las bandas ICM

Por otro lado también existen servicios que no utilizan a priori las bandas de ICM y que sin embargo son utilizados en entornos hospitalarios. Se resumen en la tabla que se muestra a continuación:

Tipo de dispositivo o servicio	Frecuencias empleadas
GSM-900 Y DCS 1800	Sub-bandas 890 a 915 MHz (estaciones de abonado) y 935 a 960 MHz (estaciones de base) para las redes del sistema móvil paneuropeo GSM, para una utilización con carácter de uso privado. Se reservan las bandas de frecuencia 1710 a 1785 MHz y 1805 a 1880 MHz para el sistema DCS-1800 en la nota de Utilización Nacional UN-48.
UMTS	Bandas: 1900 – 1980 MHz, 2010 – 2025 MHz y 2110 – 2170 MHz para la componente terrenal de los sistemas móviles de tercera generación (UMTS/IMT-2000) Bandas 1980 – 2010 MHz y 2170 – 2200 MHz para la componente espacial de dichos sistemas.
DECT	Banda: 1880 – 1900 MHz al sistema digital europeo sin cordón (DECT)
TETRA	Bandas: 410 – 415,3 MHz; 420 – 425,3 MHz; 454,3125 – 458,0125 MHz; y, 464,3125 – 468,0125 MHz y, para su utilización por sistemas móviles digitales de acceso aleatorio de canales basados en la normativa TETRA (Terrestrial Trunked Radio).
TRAC	Bandas: 874–876 MHz y 919–921 MHz al servicio de telefonía Rural de Acceso Celular (TRAC) hasta su total migración a otras bandas de frecuencias. Por otra parte, en la nota de Utilización Nacional UN-41, se destinan en exclusiva las bandas de frecuencia 880–886 MHz y 925–931 MHz al servicio de Telefonía Rural de Acceso Celular (TRAC) hasta su total migración a otras bandas de frecuencias.
Radiodifusión	Banda: 526,5–1606,5 KHz para la prestación de servicios de radiodifusión sonora en onda media de acuerdo con el Plan Técnico de Radiodifusión Sonora en Ondas Medias. Se reserva exclusivamente la banda de frecuencia 87,5–108 MHz para la prestación de los servicios de radiodifusión sonora en ondas métricas con modulación de frecuencia, de acuerdo con el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Ondas Métricas con Modulación de Frecuencia.
Televisión	Banda: frecuencias 470 a 830 MHz
RLAN	Banda: 2400 – 2483,5 MHz (ICM 5)
Militares y estado	Bandas: 1,215–1,240 GHz; 1,240–1,260 GHz; 1,260–1,350 GHz; 3,1–3,4 GHz; 5,255–5,350 GHz preferentemente para uso militar en el servicio de radiolocalización con carácter primario. La banda de frecuencias 2,7–2,9 GHz se destina preferentemente a uso militar en el servicio de radiolocalización con carácter secundario. Las bandas de frecuencia 3,4–3,6 GHz y 17,3–17,7 GHz se destinan a uso exclusivamente militar en el servicio de radiolocalización con carácter secundario.
GPS	Banda: 1559 – 1610 MHz para los sistemas de gran cobertura de determinación de posición y direccionamiento por radio (GPS).

Tabla 5. Servicios utilizados en entornos hospitalarios fuera de las bandas ICM

3.3.4. Equipamiento médico

En este punto se hablará sobre el equipamiento que hace uso de las comunicaciones inalámbricas ya es el punto que se puede ver afectado por las interferencias que se puedan dar en el entorno, dado que su fallo podría tener graves consecuencias en los pacientes. Cuando se habla del equipamiento no se refiere únicamente al equipamiento propio utilizado por médicos y enfermeros, sino todo aquel material que se usa en el entorno hospitalario. Por definición, un dispositivo médico es cualquier instrumento, aparato, implante, reactivo o calibrador in vitro, artículo o similar que se utiliza para diagnosticar, prevenir o tratar la enfermedad, previsto para ser empleado en seres humanos, solo o en combinación para cualquiera de los siguientes propósitos:

- El diagnóstico, prevención, monitorización, tratamiento o alivio de una enfermedad o lesión
- Investigación, reemplazo, modificación o soporte de la anatomía de un proceso fisiológico.
- Soporte o mantenimiento de la vida.
- Control de la concepción.
- Desinfección de dispositivos médicos.



Figura 26. Ejemplos de equipamiento médico

A los equipos médicos también se les denomina equipo IMC (Industrial Científico Médico), ya que trabajan en dicha banda frecuencial y están diseñados para usar en espacios reducidos.

Los dispositivos médicos se pueden clasificar por cómo utilizan la energía de radiofrecuencia, en base a ello tendríamos tres grupos diferenciados:

- Los que la usan solo internamente, también denominados Equipos IMC del **grupo I**, son aquellos que requieren de la energía de radiofrecuencia para su funcionamiento interno, y por ello la generan intencionadamente. Por ejemplo los equipos de ultrasonidos y cavitación entrarían en este grupo.
- Los que la usan externamente, también denominados Equipos IMC del **grupo II**, son los que generan la energía intencionadamente para usarla en forma de energía radioeléctrica para el tratamiento de los pacientes. En este grupo se pueden encontrar:
 - Los dispositivos para el tratamiento local del cáncer
 - Los usados para la fijación de tejidos
 - Los dispositivos de generación de imágenes de resonancia magnética
 - Los usados para la aceleración de los análisis químicos
- El resto de dispositivos, son los denominados Equipos electromédicos, es decir, los que tienen componentes eléctricos o electrónicos.

Todos los dispositivos médicos han de cumplir ciertas normas que se comentarán más adelante ya que es imprescindible considerar las interferencias que puedan sufrir debido a las graves consecuencias que pueden conllevar. Así mismo, algunos de dichos dispositivos pueden tener como función la de monitorizar las constantes vitales del paciente, dichas señales pueden ser de muy baja intensidad y se podrían ver afectadas por el ruido electromagnético, por este motivo, también resulta imprescindible que el fabricante revele los niveles para los cuales el equipo obedece la norma y especificar los requisitos electromagnéticos del entorno.

En el caso de los dispositivos que se encargan de la monitorización remota de la situación del paciente, conocido también como telemetría biomédica, su funcionamiento consiste en la interacción de un sensor, un procesador de señal, un dispositivo de presentación o almacenamiento de datos y un equipo de comunicación. Los datos capturados deben de ser enviados, para lo cual es necesaria la generación de energía electromagnética que dependiendo de la aplicación o el lugar necesitará una determinada potencia. Es precisamente en este punto donde radica la dificultad de este tipo de aplicaciones, ya que se requiere de una gran precisión y fiabilidad. Un ejemplo claro sería el caso de un hospital donde se estén recibiendo las señales correspondientes a los sensores de cada paciente.

Dentro de la casuística comentada, también hay que considerar el equipamiento médico de grupo I y II propio del hospital y los sistemas de comunicación ajenos a la medicina. Todo ello implica un campo de radiaciones electromagnéticas de distintas aplicaciones muy propensas a interferir entre sí.

3.3.5. Normativa

El marco normativo que regula las telecomunicaciones en el ámbito médico es muy extenso y trata diferentes temas. Se presenta a continuación un resumen de dicha normativa en base a su aplicación.

Por un lado, nos encontramos con la normativa no técnica relativa a los equipos de comunicaciones y productos sanitarios. A continuación se resume dicha normativa en la siguiente tabla:

Norma	Explicación	Nota
RD444/1994	Se establecen procedimientos de evaluación de la conformidad y requisitos de protección relativos a la compatibilidad electromagnética de equipos sistemas e instalaciones.	
RD1950/1995	Modificación del anterior. Establece que el nivel máximo de perturbaciones electromagnéticas generadas por los aparatos debe ser tal que no dificulte la utilización, en particular y entre otros, de los aparatos médicos y científicos.	Los aparatos deben estar contruidos de manera que tengan un nivel adecuado de inmunidad electromagnética para el lugar de trabajo sin disminuir su utilidad.
Orden Ministerial de 26/03/1996	Establece los procedimientos y requisitos para la obtención del certificado CE. También regula la designación de laboratorios (acreditados por lo dispuesto en el RD 1787/1996 para la realización de ensayos que permitan evaluar la conformidad de las normas de compatibilidad electromagnética) que intervienen en el procedimiento para la emisión del certificado.	
RD138/1989	Reglamento sobre perturbaciones radioeléctricas e interferencias. Garantiza el funcionamiento eficiente de los servicios y redes de telecomunicación, la adecuada utilización del espectro radioeléctrico contra toda clase de interferencias.	Aplicable a todo equipo, aparato, sistema o instalación que sea susceptible de producir en su funcionamiento energía electromagnética, aunque no ocasionen radiación exterior. Sobre todos los aparatos ICM.
UNE-EN 55011-1999	Establece los límites tolerables de las características perturbadoras en alta frecuencia, así como sus métodos de medida en los aparatos ICM que producen energía de radiofrecuencia.	

<p>Directiva 89/336/CEE</p>	<p>Aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas a la compatibilidad electromagnética.</p>	<p>Modificada por la directiva 91/263/CEE, en cuanto a aplicación a equipos terminales de telecomunicación y procedimientos de evaluación de conformidad.</p>
<p>Directiva 1999/5/CE y Consejo de 09/03/1999</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Velar porque los equipos radioeléctricos y terminales de telecomunicación conectados no presenten un riesgo evitable para la salud - Introducirse determinadas características en los equipos para proteger los datos personales de los abonados y evitar fraude - Evitar degradación del servicio para personas distintas del usuario de los equipos de radio y terminales de telecomunicación - Garantizarse el uso eficaz del espectro de radiofrecuencias a fin de evitar interferencias perjudiciales. 	<p>Establece un marco reglamentario para la puesta en el mercado, la libre circulación y la puesta en servicio de equipos radioeléctricos y equipos terminales de telecomunicación. Norma armonizada conforme a la directiva: ESTI TBR 23 sobre "Compatibilidad electromagnética y asuntos de espectro radioeléctrico)</p>
<p>RD 414/1996</p>	<p>Se regulan los productos sanitarios que deben ofrecer a pacientes, usuarios y otras personas un nivel elevado de protección y satisfacer las prestaciones que les haya asignado el fabricante, lo cual se consigue mediante cumplimiento de determinados requisitos esenciales. Indica también la necesidad de incluir información relativa a los riesgos de interferencia recíproca relacionados con la presencia del producto o equipo en investigaciones o tratamientos específicos.</p>	<p>Se establecen propiedades relativas a la fabricación y al medio ambiente, tales como que los productos deberán diseñarse y fabricarse de forma que se eliminen o se reduzcan lo más posible los riesgos de lesiones vinculados a las condiciones del medio ambiente como los campos magnéticos.</p>

Tabla 6. Normativa no técnica relativa a los equipos de comunicaciones y productos sanitarios

Dentro de esta normativa se puede hacer también una distinción entre la aplicable a equipos genéricos para cualquier banda de frecuencia que es la mostrada en la siguiente tabla:

Norma	Explicación
<p>EN 300 220-1</p>	<p>“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Dispositivos de Corto Alcance (SRD); Equipos Radio que se utilizarán en la Banda de Frecuencias de 25 MHz a 1000 MHz con Niveles de Potencia de hasta 500 mW; Parte 1: Características Técnicas y Métodos de Evaluación.”</p>
<p>EN 300 330-1</p>	<p>“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Dispositivos de Corto Alcance (SRD); Equipos Radio en la Banda de Frecuencias de 9 KHz a 25 MHz y Sistemas de Lazo Inductivo en la Banda de Frecuencias de 9 KHz a 30 MHz; Parte</p>

1: Características Técnicas y Métodos de Evaluación.”	
EN 300 440-1	“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Dispositivos de Corto Alcance (SRD); Equipos Radio que se utilizarán en la Banda de Frecuencias de 1 GHz a 40 GHz ; Parte 1: Características Técnicas y Métodos de Evaluación.”
ES 200 674-1	“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Telemática de Tráfico y Transporte en Carretera (RTTT); Parte 1: Características Técnicas y Métodos de Evaluación para Equipos de Transmisión de Datos a Altas Tasas de Datos (HDR) funcionando en la Banda Industrial, Científica y Médica (ICM) de 5,8 GHz.”
ES 200 674-2	“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Telemática de Tráfico y Transporte en Carretera (RTTT); Parte 2: Características Técnicas y Métodos de Evaluación para Equipos de Transmisión de Datos a Bajas Tasas de Datos (LDR) funcionando en la Banda Industrial, Científica y Médica (ICM) de 5,8 GHz.”
ETS 300 328	“Equipos y Sistemas Radio (RES); Sistemas de Transmisión de Banda Ancha; Características Técnicas y Condiciones de Evaluación para Equipos de Transmisión de Datos que funcionan en la banda ICM de 2,4 GHz y que usan Técnicas de Modulación de Espectro Ensanchado.”
ETS 300 440	“Sistemas y Equipos Radio (RES); Dispositivos de Corto Alcance; Características técnicas y Métodos de Evaluación para Equipos Radio que se usarán en la Banda de Frecuencias de 1 GHz a 25 GHz.”
UNE – EN 55022	“Equipos de Tecnología de la Información (ETI). Características de las perturbaciones radioeléctricas. Límites y métodos de medida.”

Tabla 7. Normativa aplicable a equipos genéricos para cualquier banda de frecuencia

Finalmente queda por resumir la normativa aplicable directamente a los dispositivos de tipo médico, que queda resumida en la siguiente tabla:

Norma	Explicación
EN 301 839-1	“Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Equipos Radio en la Banda de Frecuencias de 402 MHz a 405 MHz para Implantes Médicos Activos de Potencia Ultra Baja y Accesorios; Parte 1: Características Técnicas, incluyendo Requerimientos de Compatibilidad Electromagnética, y Métodos de Evaluación.”
EN 302 195-1	EN 302 195-1 “Compatibilidad Electromagnética y Cuestiones del Espectro Radioeléctrico (ERM); Equipos Radio en la Banda de Frecuencias de 9 KHz a 315 KHz para Implantes Médicos Activos de Potencia Ultra Baja (ULP-AMI) y Accesorios; Parte 1: Características Técnicas y Métodos de Evolución.”
UNE-EN 55011	“Límites y métodos de medida de las características relativas a las perturbaciones radioeléctricas de los aparatos industriales, científicos y médicos (ICM) que producen energía de radiofrecuencia.”
UNE-EN 60601-1-2	“Equipos electromédicos. Parte 1-2: Requisitos generales para la seguridad. Norma colateral: Compatibilidad electromagnética.

Requisitos y ensayos."

Tabla 8. Normativa aplicable directamente a los dispositivos de tipo médico

Cabe hacer especial mención a esta última cuyo objetivo es el de especificar requisitos generales y de ensayos para Compatibilidad Electromagnética de equipos Electromédicos y sistemas Electromédicos.

3.4. La interferencia electromagnética en entornos hospitalarios

En el punto 3.1.1. Principios de propagación, hemos visto distintos fenómenos de propagación, alguno de los cuales puede degradar bastante la calidad de la comunicación. Un ejemplo de ellos es la interferencia producida por la propagación multitrayecto, que puede ser constructiva si las señales están en fase, y puede degradarse e incluso anularse si se da el caso de que las señales estén en contrafase y se anule la señal, interferencia destructiva. Precisamente éste fenómeno es el que se va a analizar en este punto, pero particularizado para el caso de los hospitales, ya que son espacios cerrados donde se pueden producir muchas comunicaciones simultáneas y de las cuales algunas son cruciales y no puede fallar. Sería el caso de equipos de monitorización, de imágenes de resonancia magnética o similar, cuyo fallo podría suponer consecuencias graves e incluso letales en los pacientes. Otra problemática a resolver, es que al existir tantas fuentes diferentes de emisiones electromagnéticas en recintos cerrados con muchas personas, hay que considerar no sobrepasar cierto límite de radiación para que no sean nocivas para dichas personas.

Por todo ello, el tema de la compatibilidad electromagnética es muy cuidado y estudiado para éste tipo de entornos. Para hablar de ello resulta útil ver ciertas definiciones previamente:

Compatibilidad electromagnética (EMC): Capacidad de los sistemas eléctricos y electrónicos para operar en un ambiente electromagnético sin efectos adversos, sin introducir perturbaciones intolerables en ese ambiente y soportar las producidas por otros equipos. Es el título genérico bajo el que se agrupa el estudio de la problemática de generación, propagación, influencia sobre otros circuitos y medidas de corrección de interferencias electromagnéticas.

Interferencia electromagnética (EMI): Se trata de la perturbación que ocurre en cualquier circuito, componente o sistema electrónico, causada por una fuente de radiación electromagnética externa al mismo, o por fenómenos naturales. Las interferencias electromagnéticas pueden ser tanto radiadas como conducidas. Éstas primeras se producen cuando se da el acoplamiento por radiación, causado por la radiación electromagnética, mientras que las segundas se producen a través de los conductores o componentes y se denomina acoplamiento conducido. Se considera que son radiadas cuando la distancia entre la fuente y la víctima es superior a media de longitud de onda ($\lambda/2$). Cuando es menor que dicha distancia se da un caso especial de propagación radiada, acoplamiento reactivo que puede ser capacitivo o reactivo, siendo el producido por el campo eléctrico el primero y el producido por el campo magnético el segundo.

Susceptibilidad electromagnética (EMS): Junto con su opuesto, inmunidad, representan la mayor o menor propensión de un dispositivo o equipo a ser afectado por las interferencias radioeléctricas, o lo que es lo mismo, la capacidad de un equipo que tiene para funcionar correctamente en un ambiente electromagnéticamente complejo.

Gracias al estudio y consideración de la compatibilidad electromagnética, los equipos pueden obtener inmunidad mediante la aplicación de medidas preventivas o correctivas. La preocupación que causa la EMC, viene provocada principalmente por las consecuencias que pudiera tener para las personas y obviamente existen ciertas normas que la regulan, algunas de las cuales ya hemos citado anteriormente. Estas normas suelen dividirse en función de los receptores que se ven afectados y en función de las consecuencias o efectos que producen.

A continuación se muestra el esquema básico de los elementos que intervienen en un problema de EMI. Para que se considere EMI, tiene que provocar un mal funcionamiento en el receptor.

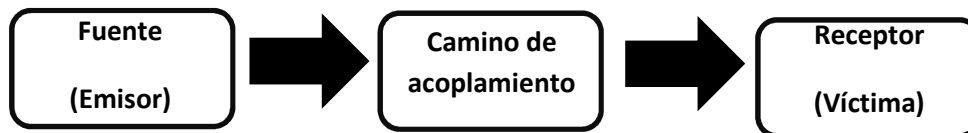


Figura 27. Diagrama de bloques de los elementos que intervienen en un problema EMI

3.4.1. Causas

Se podría pensar que la interferencia electromagnética es ruido, siendo ese ruido tanto una señal aleatoria, como otra señal que interfiere con la señal deseada por estar dentro de la misma banda de frecuencias. Pero de hecho, es cuando el ruido viene producido por una señal indeseada que perturba la señal deseada, cuando se denomina interferencia o señal interferente y no ruido.

En el caso de este proyecto se estudia más la interferencia producida por otras señales. No obstante el estudio del ruido es general, ya que en realidad, el ruido es cualquier emisión no deseada que perturba la señal deseada y que no está directamente relacionada con ella. En definitiva podemos definir el ruido como señales anómalas o perturbaciones en un sistema de transmisión que hacen que la información no llegue con claridad o se distorsione. Antes de centrarnos en las interferencias, se comentarán ciertos aspectos relevantes del ruido.

El ruido se puede dividir en dos categorías principalmente: correlacionado o no correlacionado. El primero implica una relación entre el ruido y la señal y es causado por amplificadores no lineales e incluye armónicos y distorsión de intermodulación. La distorsión armónica es la producción de armónicos de una señal, originados por una mezcla no lineal. La distorsión de intermodulación se refiere a la generación de productos cruzados indeseados

que son la suma o resta de frecuencias. Por su parte, el ruido no correlacionado, es independiente de la señal y existe en su ausencia o en su presencia.

En cuanto a las propiedades del ruido eléctrico hay que destacar, que una característica típica de casi todos los tipos de ruido es que son de naturaleza no determinística lo cual hace imposible predecir su forma y por tanto lo que se suele medir es el valor de pico, valor medio y valor eficaz. A continuación se resumen sus propiedades:

- El ruido es aditivo, es decir afecta a la señal transmitida de forma que se va sumando en cada uno de los componentes por los que pasa.
- Suele ser de amplitud muy pequeña, del orden de micro voltios, pero se suele ver amplificado por las ganancias de los dispositivos por los que pasa.
- Algunos voltajes y/o corrientes no deseados en el receptor en muchos casos son considerados ruido.
- Generalmente el proceso de ruido se considera “aditivo blanco gaussiano” (Aditive White Gaussian Noise, AWGN), donde el blanco implica que tenga un espectro de frecuencia plano y el gaussiano se refiere al tipo de distribución.

Atendiendo a lo dicho en el último punto, si se clasifica el ruido en función de su densidad espectral éste puede ser: blanco (nivel constante en las bandas de frecuencia consideradas), rosa (nivel decreciente con la frecuencia) o azul (nivel creciente con la frecuencia). Cabe destacar que dicho ruido puede ser de un tipo en unas bandas de frecuencia y de otro en otras.

En resumen la clasificación sería la siguiente:

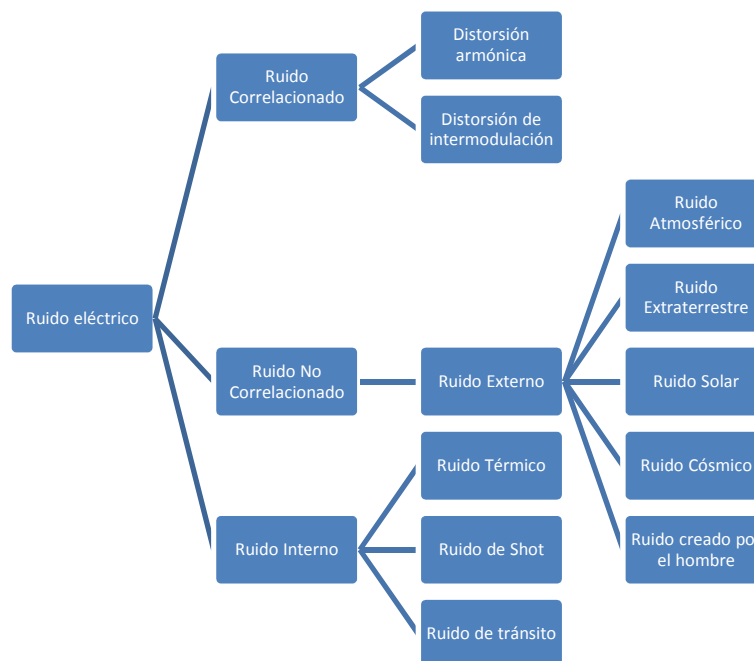


Figura 28. Clasificación de los tipos de ruido

Centrándonos un poco más en el tema del proyecto, las causas principales de la interferencia electromagnética en los entornos hospitalarios pueden ser:

- Equipos radiotransmisores incorrectamente instalados.
- Una señal radioeléctrica intensa desde un transmisor cercano.
- Emisiones o señales no deseadas (radiaciones espurias) generadas por el transmisor.
- Blindaje o filtrado insuficiente en el equipo electrónico para evitar que capte señales indeseadas.

Esto sucede principalmente por el uso de numerosos dispositivos que produzcan emisiones electromagnéticas simultáneamente. Dichos dispositivos son tanto de aplicación médica como de telecomunicaciones, como por ejemplo: teléfonos móviles, comunicaciones inalámbricas (WiFi, Bluetooth, ZigBee), equipos de monitoreo a distancia, escáner de resonancia magnética, etc.

El acoplamiento es producido por la interacción y perturbación de un dispositivo en el funcionamiento de otro. El acoplamiento se produce en el camino del transmisor al receptor, y puede darse de cuatro maneras diferentes:

- Conducción (corriente eléctrica)
- Acoplo inductivo (campo magnético)
- Acoplo capacitivo (campo eléctrico)
- Radiación (campo electromagnético)

Se puede clasificar en dos grupos las causas de la interferencia electromagnética, en transitorias o señales constantes. Se consideran señales constantes a aquellas que están presentes todo el tiempo, son más periódicas, de menor energía y menor contenido frecuencial que las transitorias. Estas últimas son fenómenos puntuales y únicos que se dan aislados o en conjunto y que se caracterizan por ser pulsos de gran energía y de corta duración.

Las fuentes típicas de interferencia son:

- La red eléctrica
- Variaciones de temperatura, los gradientes de temperatura en los sistemas electrónicos tienen gran influencia sobre los dispositivos semiconductores.
- Golpes y vibraciones
- Motores de explosión
- Conmutadores de potencia que generan impulsos de gran amplitud y son fuentes de intensas interferencias
- Descargas de arco producidas en sistema de muy alta tensión
- Etc.

3.4.2. Efectos

Los equipos receptores que se ven afectados por la interferencia electromagnética son entre otros, los monitores multi-parámetros, bombas de infusión, electro ventiladores, marcapasos y

ordenadores. Los efectos que producen las interferencias electromagnéticas sobre dichos equipos están divididos en clases según el nivel de daño que producen en los mismos:

- **Clase O:** No se produce mal funcionamiento de equipo o dispositivo. La perturbación no influye.
- **Clase A:** La perturbación produce efectos aceptables, pero no altera el funcionamiento del equipo o dispositivo.
- **Clase B:** La perturbación altera temporalmente el funcionamiento del equipo o dispositivo, pero éste no sufre efectos irreversibles, pudiendo funcionar de nuevo sin intervención técnica.
- **Clase C:** La perturbación altera el funcionamiento del equipo o dispositivo haciendo necesaria la intervención técnica para volver a funcionar.
- **Clase D:** La perturbación produce daños irreversibles en el equipo o dispositivo, quedando irrecuperable.

Las consecuencias de las interferencias electromagnéticas pueden llegar a ser fatales como ya se ha dicho, por ello a lo largo de los años se han ido recogiendo informes para poder deducir cuáles son los fallos más comunes en los dispositivos médicos, y cuáles son sus causas. De todas formas cabe destacar que el número de fallos por EMI registrados, es menor que el resto de fallos que pueden surgir en general. Esto es así en gran parte gracias a la protección que ofrece la compatibilidad electromagnética. En la siguiente tabla se muestran una serie de dispositivos que pueden fallar y la fuente de origen de su fallo:

Dispositivo Médico	Fuente de origen
Monitores de apnea	Radiodifusión en FM
Monitores de gas de anestesia	Electro bisturíes
Electrocardiograma	Telefonía móvil celular analógica y digital
Bombas de infusión y de jeringa	Telefonía móvil celular analógica y digital y equipos de rayos-X portátiles
Sillas de ruedas electrónicas	Equipos de comunicaciones de policía, bomberos y radioaficionados
Análisis hematológicos	Buscapersonas
Indicación de temperatura y presión sanguínea	Electro bisturíes
Monitores de incubadoras	Radioaficionados, telefonía móvil celular
Marcapasos	Comunicaciones de ambulancias, Walkie-talkies, detector de metales
Monitor de telemetría cardíaco	Comunicaciones en 160 - 174 MHz
Respirador	Equipos de rayos-X portátiles, Walkie-talkies y radiodifusión en FM
Equipos de diálisis	Telefonía móvil celular
Desfibriladores	Telefonía móvil celular
Monitor de telemetría	Paging
Ayudas a la audición	Walkie-talkies, telefonía móvil celular
Equipos de laparoscopia	Electro bisturíes

Tabla 9. Dispositivos que pueden fallar y la fuente de origen de su fallo

3.4.3. Seguridad

Con todo lo visto hasta el momento, resulta obvio pensar que es imprescindible poder contar con cierta seguridad que asegure que no se vaya a producir un mal funcionamiento de los dispositivos o que no haya una exposición de las personas a campos electromagnéticos de gran intensidad que pudieran afectarles. Para ello lo mejor que se puede hacer es prevenir, haciendo que se cumplan los criterios de compatibilidad electromagnética en base a lo que establecen las normas que hablan de ella. Esto se puede conseguir realizando un diseño que contemple características como distancias más cortas para las conexiones y de menor impedancia o un mejor diseño del circuito. En la medida que esto no se pueda evitar, siempre está la opción de añadir componentes que resuelvan el problema. También se puede optar por blindar los dispositivos, pero obviamente eso resulta más costoso. Otra medida que se puede tomar es la basada en técnicas de espectro ensanchado, como hacen la tecnología UMTS y WiFi.

4. Estudio de la interferencia electromagnética

En el siguiente apartado se explicará el proceso llevado a cabo para el estudio de la interferencia electromagnética en el entorno a considerar, es decir, el recinto de urgencias en el Hospital Virgen del Camino del Complejo Hospitalario de Navarra. El proceso se ha desarrollado en los pasos que se citan a continuación.

4.1. Plan de trabajo

En una primera etapa y tras el estudio de la casuística concreta, el primer paso llevado a cabo fue el de familiarizarse tanto con el software de trabajo, como con el propio escenario. El software utilizado ha sido implementado íntegramente en la Universidad Pública de Navarra y se basa en el trazado de rayos. Más adelante se explicará cómo funciona el programa. El plano del escenario de trabajo, el recinto de urgencias, estaba ya introducido en el programa gracias a que se había dibujado para estudios anteriores. Fue introducido con gran precisión, teniendo en cuenta los detalles y por ello deja perfectamente caracterizado el entorno.

Una vez hecha la familiarización se procedió al lanzamiento de las simulaciones. El planteamiento seguido fue el siguiente:

- 1) Diseñar la red de comunicación instalando 5 transmisores a lo largo del escenario de estudio.
- 2) Simular el comportamiento de dichos transmisores en las tres frecuencias de estudio, es decir, 868 MHz, 1,8GHz y 2,4 GHz. Haciendo así un total de 15 simulaciones que llevaron algo más de una semana.
- 3) Diseñar la red de potencias interferentes. Esta red está constituida por 16 fuentes de interferencias situadas en una cuadrícula de 4x4.
- 4) Simular el comportamiento de las interferencias a las tres frecuencias de estudio, lo cual suponía un total de 48 simulaciones que se llevaron a cabo en unas dos o tres semanas.
- 5) Estudiar y analizar los resultados. Con todos los resultados de las simulaciones obtenidos había que proceder a analizarlos para obtener conclusiones y buscar resultados de interés.
- 6) Procesar datos. Representar los datos de manera gráfica y ordenada y explicar los resultados.

4.2. Entorno de estudio

En este apartado se explicará por una parte cuál es el software utilizado, cómo funciona y en qué se basa por un lado, y por el otro cuál y cómo es el entorno de estudio.

4.2.1. Código de lanzamiento de Rayos

El código de lanzamiento de rayos diseñado en la UPNA, que permite evaluar el entorno mediante el modelo de trazado de rayos basándose en una de las técnicas deterministas más utilizadas en entornos interiores, la Óptica Geométrica, que ya se ha explicado con anterioridad en el punto 3.1.1.3. Ha sido programado en Matlab y su fin es el de ser utilizado como herramienta para el cálculo de radiopropagación en espacios interiores.

La técnica consiste básicamente en lanzar rayos y seguir su comportamiento a lo largo del escenario teniendo en cuenta los fenómenos de propagación. El programa simula el comportamiento de la energía radiada por la antena transmisora, modelada por los rayos que van sufriendo rebotes con los objetos que se encuentra a su alrededor y los que van directos a la antena receptora. El lanzamiento de rayos debe de cumplir ciertas propiedades como que la distribución sea uniforme para cubrir así el ángulo sólido completo. Se trata de un algoritmo de alta precisión pero a su vez de gran carga computacional ya que para cada rayo se consideran las múltiples reflexiones y refracciones que pueda sufrir hasta alcanzar el receptor, dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto y del recinto. El número de estas reflexiones y refracciones a considerar depende del nivel de señal a partir del cual su contribución no es muy significativa, que puede suceder tras un periodo de tiempo determinado o a partir de un número limitado de interacciones con los objetos.

Este algoritmo calcula todos los posibles caminos desde el transmisor al receptor, teniendo en cuenta los fenómenos de propagación. El nivel de señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor. El campo eléctrico asociado a ese rayo se calcula cuando llega a la antena receptora.

Como ya se ha comentado, el modelo de trazado de rayos es uno de los modelos de predicción de potencia de campo más precisos, esto conlleva una elevada carga computacional y tiempo elevado a la hora de realizar las simulaciones. Otro aspecto muy importante a tener en cuenta para la correcta respuesta del algoritmo, es la representación del espacio a analizar, es decir, es necesario que la caracterización del espacio represente fielmente la realidad, no solo en dimensiones sino también en materiales o coeficientes. De forma que se consideren todos los parámetros que influyen en la realidad.

Introduciéndonos un poco más de lleno en el programa, explicaremos también algunos de los parámetros a considerar a la hora de caracterizar la simulación. Para ello, resulta útil explicar cómo funciona el software desde el principio hasta el momento de la propia simulación, y así ir apuntando los parámetros que se manipulan para cada caso. A la hora de llevar a cabo la simulación de un escenario, se siguen los pasos que se explican a continuación.

Crear el escenario

En primer lugar hay que diseñar el escenario sobre el cual se quiere lanzar la simulación. Es muy importante definirlo bien, no solo en lo que a dimensiones (x,y,z) se refiere sino también en cuanto a distribución, materiales, objetos, etc. Otro de los parámetros que hay que introducir es la resolución. Las habitaciones están divididas en múltiples hexaedros, ya que resulta necesario discretizar el espacio para limitar la adquisición de datos. De esta forma se puede conseguir tanta precisión como se desee y cada habitación quedará dividida en múltiples hexaedros.

Parámetros

En este proyecto, no ha sido necesaria la creación del escenario dado que este ya estaba introducido en la base de datos. Se trata de una tarea muy importante, sobre todo en el lanzamiento de rayos, ya que de ello dependerá la precisión de la predicción. Este trabajo fue realizado por Iris Sesma, antigua alumna, que llevó a cabo una representación muy exacta a la realidad en la que el edificio de Urgencias de Virgen del Camino quedó fielmente representado.

Comentar que las **dimensiones** (x,y,z) del escenario son de **66x52x3 m³** y la **resolución** seleccionada para las simulaciones fue de **cubos de 1,5 m**. La habitación es un hexaedro subdividido en hexaedros, así se almacenan los parámetros de cada rayo que llega en cada uno de ellos. Esto es así porque guardar la información correspondiente a todo el espacio sería imposible para un ordenador y de esta manera se reduce la cantidad de datos a procesar. La resolución define el número de hexaedros que hay en cada eje. Cuanto más pequeño sea el tamaño de los cubos mayor será la precisión de la simulación y a su vez, mayor será la carga computacional. Otro aspecto que influye en dicha carga, es el número de iteraciones, ya que el algoritmo es recursivo con cada rayo y por tanto el tiempo depende tanto del incremento del ángulo de salida, como de las reflexiones y refracciones permitidas. En este caso se han utilizado un **máximo de 6 reflexiones y refracciones por rayo** para que sea más preciso, aunque en la mayoría de los casos 2 o 3 rayos proporcionan el 95% de la energía. Otro de los parámetros con los que se ha jugado es la frecuencia. Se han realizado las simulaciones a **tres frecuencias que son 868 MHz, 1,8 GHz y 2,4 GHz** con el fin de analizar el comportamiento que tendrían distintas tecnologías previamente citadas.

Una vez definido el escenario, el siguiente paso es el de donde colocar las antenas y definir su comportamiento.

La estructura de la antena es:

antenatx[numerohabitacion,x,y,z,phii,Aphi,phif,tethai,Atheta,thetaf,nrebotes,taumaxima,nu merodeantena,esficticiaporrefraccion,thetao,phio,tau0,reflexion0, frecuencia ,distancia]

- ✓ **numerohabitacion** = 1 sólo hay una habitación
- ✓ **x,y,z**= posiciones de los distintos transmisores
- ✓ **Aphi,phif,tethai** = 0 rad, $\pi/180$ rad, 2π rad
- ✓ **tethai,Atheta,thetaf** = 0 rad, $\pi/180$ rad, π rad
- ✓ **nrebotes** = 6

- ✓ **taumaxima** = infinito
- ✓ **numeroantena** = 1, solo se simula una antena cada ve
- ✓ **thetao,phio,tau0,reflexion0** = 0,0,0,0, valores iniciales
- ✓ **frecuencia** = 868 MHz, 1,8 GHz o 2,4 GHz en función del caso
- ✓ **distancia** = 0

Extraer parámetros

A continuación se ejecuta la función de extraer parámetros donde hay que introducir ciertos datos que se especifican a continuación.

Parámetros

- ✓ **Pr:** 20 dBm, 100 mW, Potencia de transmisión
- ✓ **Tc:** 1e-8, Tiempo de coherencia (inversa del Rb (tasa de bit))
- ✓ **Directividad:** Omnidireccional, 1, encuentra definida en la función directividad.m
- ✓ **Atheta y Rebmax:** Deben ser iguales que en la función de creascenario.m

Guardar parámetros

Finalmente se definen ciertos aspectos para el guardado de datos y se ejecuta el fichero bancopruebasV6.m.

Gracias a este programa se pueden extraer resultados que son de gran interés en la caracterización radio de un espacio. Se obtiene la potencia recibida en cada punto del espacio, pudiendo así crear mapas de cobertura tanto horizontales, es decir de altura fija, como verticales, de distancia longitudinal fija. También se pueden crear mapas de interferencia cuando varias antenas emiten a la vez, y gracias a que se calcula el tiempo de propagación de cada rayo se pueden obtener perfiles de retardo de potencia para cada punto así como mapas de dispersión.

4.2.2. Planos edificio de urgencias

Como ya se ha comentado, uno de los aspectos que aseguran el éxito de los resultados obtenidos es el hecho de introducir el escenario de forma que represente fielmente la realidad. En este caso de estudio, la planta de urgencias de Virgen del Camino quedaría así representada en el entorno de Matlab. Un aspecto a mencionar es que en dicho escenario no se han introducido todos los objetos que se pueden encontrar en la realidad, sino que lo que se han modelado únicamente es el espacio.

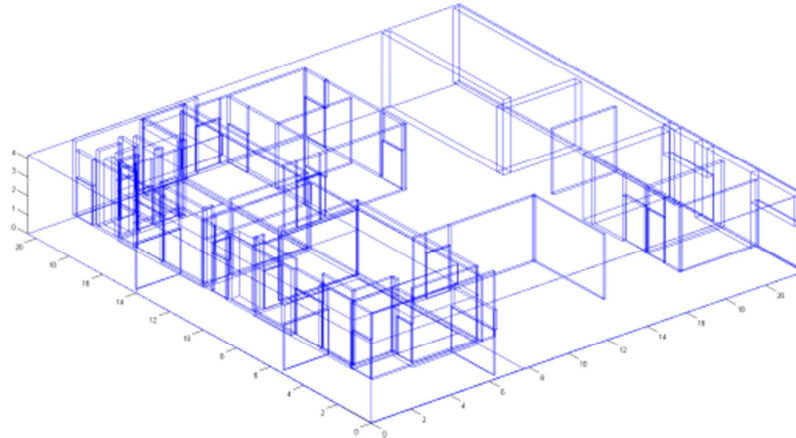


Figura 29. Plano de urgencias en Matlab

Este plano se ha obtenido a partir de original, que se muestra a continuación, junto con una leyenda explicativa sobre la distribución

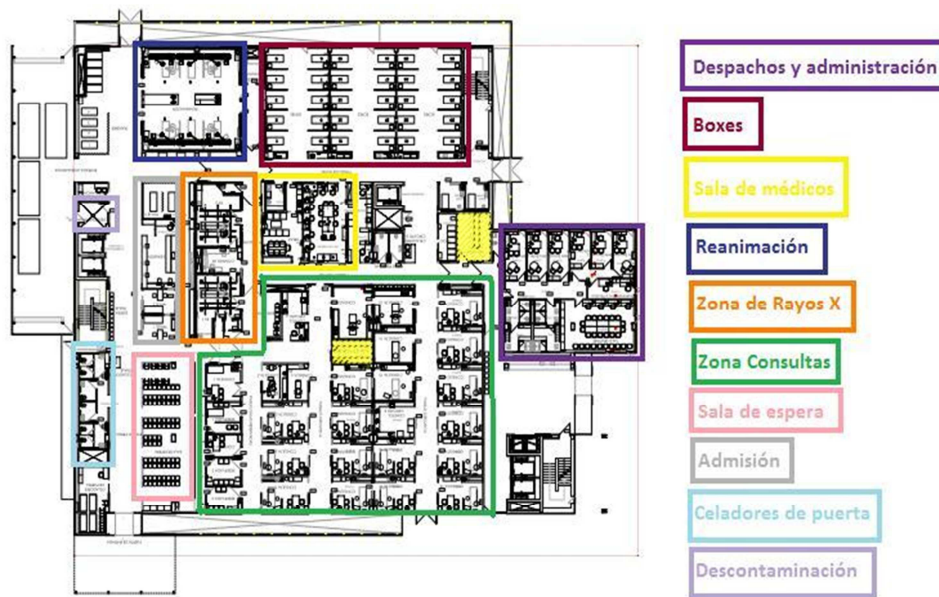


Figura 30. Plano original de urgencias con leyenda

Tal y como queda representado en la leyenda, se puede ver a qué uso está dedicada zona. A la hora de hacer evaluaciones sobre la energía recibida en los distintos puntos y también a la hora de colocar las antenas transmisoras, se ha tenido en cuenta el ámbito de aplicación de cada zona para dar un cierto sentido a las simulaciones.

4.2.3. Zonas de estudio

Los resultados se presentan para tres frecuencias de trabajo distintas. Un factor importante a tener en cuenta es la zona exacta del escenario donde se efectúan las medidas de los resultados. Dichos puntos son los mismos donde están colocadas las antenas transmisoras, ya que lo que se pretende es medir la interferencia que se produce en receptor que está en el mismo punto que el transmisor. Es decir, los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 serían los nodos de comunicación que están colocados en las siguientes posiciones:

- $P1(x,y,z) = 30, 38.5, 1.1$
- $P2(x,y,z) = 8, 15, 1.1$
- $P3(x,y,z) = 30, 27, 1.1$
- $P4(x,y,z) = 41.5, 15, 1.1$
- $P5(x,y,z) = 55, 12, 1.1$

Las zonas y los puntos donde se encuentran las antenas se muestran en la figura que sigue:

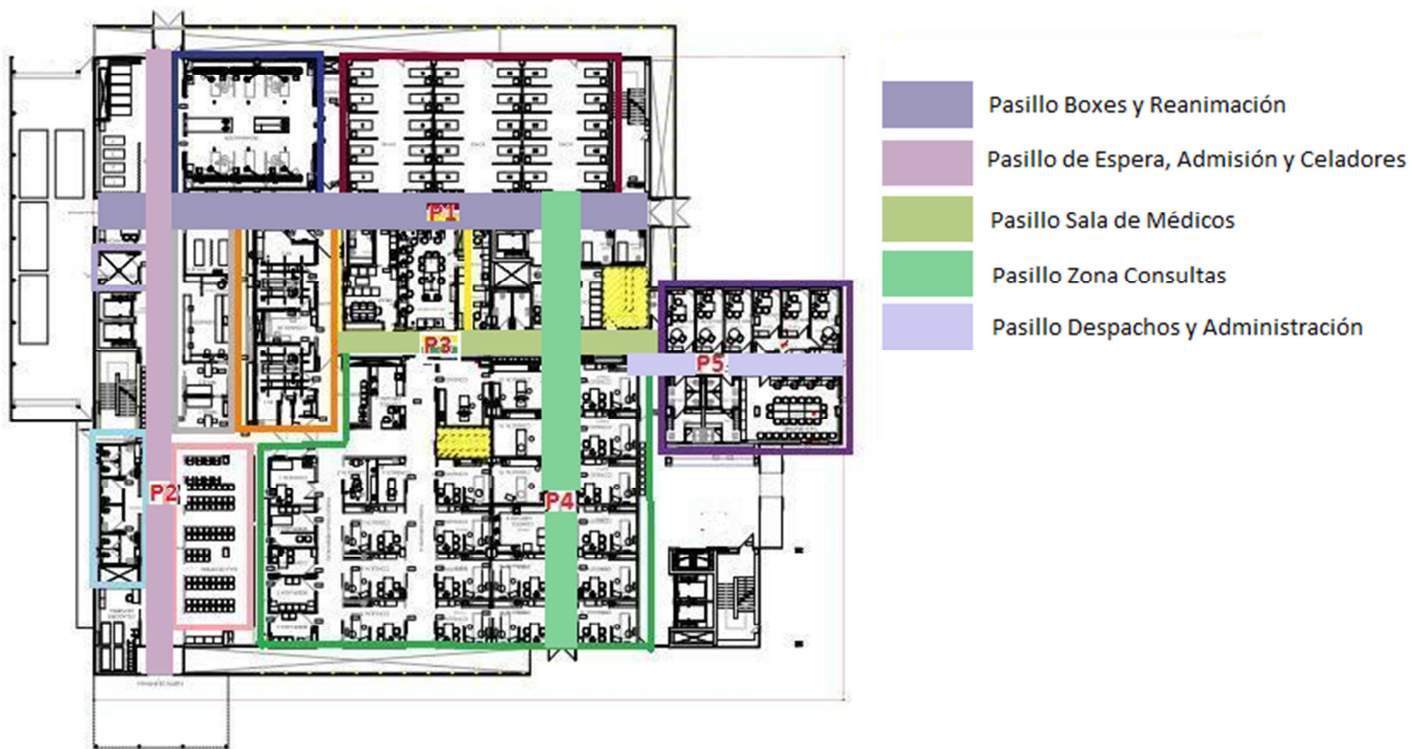


Figura 31. Pasillos de estudio

Los resultados de las radiales se presentan en los distintos pasillos marcados y los de relación señal a ruido en los puntos, P1, P2, P3, P4, P5, donde se encuentran las antenas transmisoras.

4.3. Simulaciones

Una vez presentado el entorno de trabajo y el escenario, pasamos directamente al trabajo de campo y a presentar los resultados.

4.3.1. Simulaciones de las potencias útiles

En una primera etapa se simuló el comportamiento de lo que serán consideradas las potencias útiles, es decir, la red de fuentes transmisoras que constituyen el sistema de comunicación. La disposición de las mismas a lo largo del escenario es la siguiente:

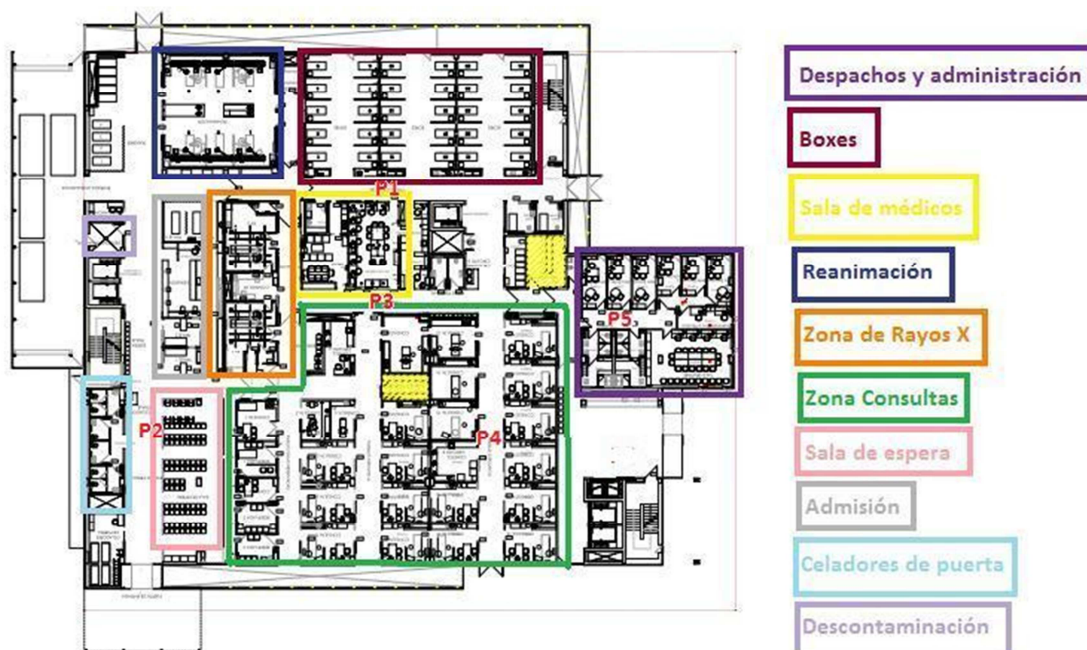


Figura 32. Posición de las antenas transmisoras

Antena 1 (P1): cubre la zona del pasillo de boxes y reanimación

Antena 2 (P2): cubre la zona de la sala de espera, celadores, admisión y descontaminación

Antena 3 (P3): cubre la zona de rayos X, sala de médicos, la zona de consultas

Antena 4 (P4): cubre la zona de consultas

Antena 5 (P5): cubre la zona de despachos y administración

La colocación de las antenas se ha elegido con el fin de dar una buena cobertura en todo el espacio. Obviamente la cobertura de cada una de ellas es mayor que para lo que se ha definido, pero de esta forma se asegura que sea de mayor calidad. También es cierto que se podría usar menos haciendo el sistema más económico, pero como las simulaciones no suponen coste se ha probado así para probar los resultados.

A la hora de lanzar las simulaciones había que escoger ciertos parámetros para definir el comportamiento de la antena, ya se han introducido anteriormente y son:

Pr: Potencia de transmisión de la antena= 20 dBm= 100 mW a pesar de ser una potencia de emisión un tanto elevadas, se trata simplemente de un parámetro que hay que introducir en la simulación, pero que ofrece unos resultados que se pueden modificar a posteriori haciendo los pertinentes cálculos matemáticos.

Tc: tiempo de coherencia, inversa del Rb, para cada tecnología se usó uno diferente:

- 868 MHz: 1/250 Kbps $\rightarrow T_c=4 \cdot 10^{-6}$
- 1,8 GHz: 1/14,4 kbps $\rightarrow T_c=6,95^{-5}$
- 2,4 GHz: 1/20 Mbps $\rightarrow T_c=5 \cdot 10^{-8}$

Directividad: las antenas elegidas son omnidireccionales.

Ángulos de emisión $\theta, \phi \rightarrow$ El incremento del ángulo θ era de un grado y estaban definidos entre 0 y π en el caso de θ y 0 y 2π en el caso de ϕ .

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las distintas frecuencias, se exponen los mapas de cobertura del comportamiento de la suma de todas las antenas en contribución y cada una de las ellas individualmente.

Mapas de cobertura de las potencias a 868 MHz

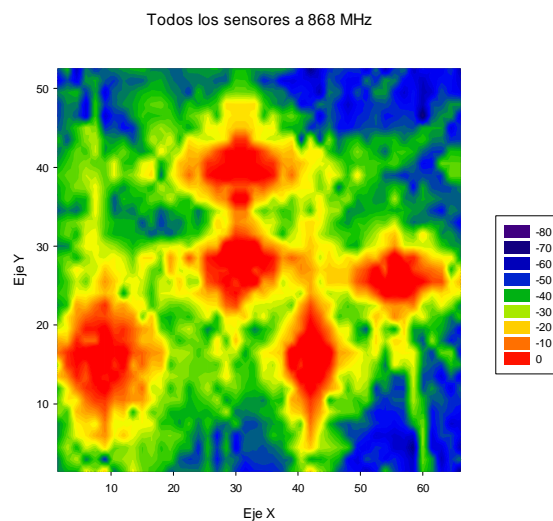


Figura 33. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 8668 MHz

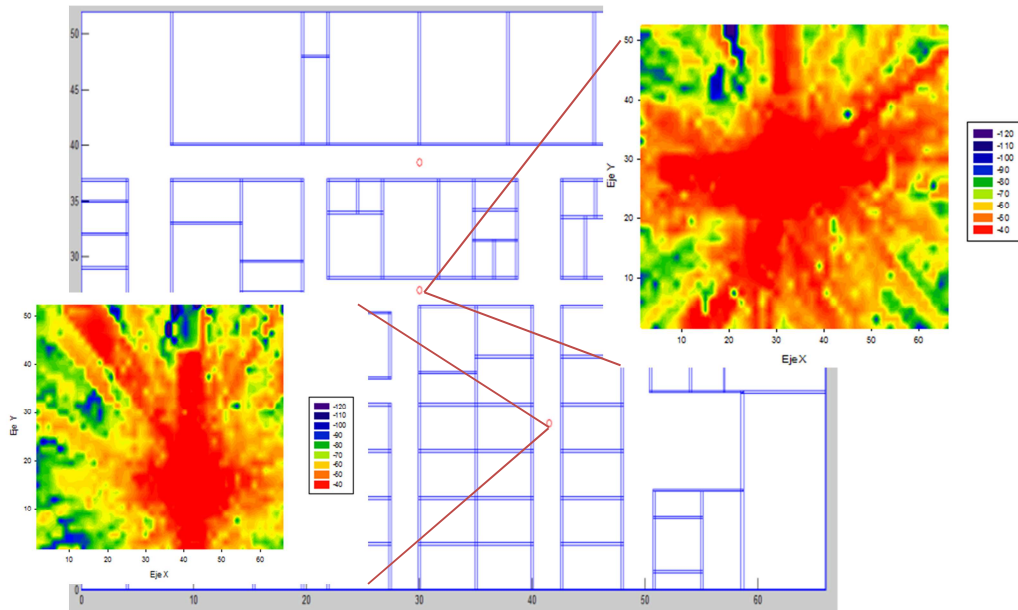


Figura 34. Localización de y mapas de cobertura de las antenas P3 y P4.

A simple vista podemos comprobar que la antena situada en el punto P3 cubre mayor área, o mejor dicho, de manera más uniforme, todo el recinto. Sin embargo la situada en el punto P4 se limita más a la zona en la que está y concentra la mayor parte de la potencia en su pasillo.

Visto esto, si se compara con el caso de todas las potencias emitiendo a la vez, se comprueba la influencia de unas sobre otras, que por una parte hace que llegue mayor potencia, pero por la otra impide que cubra tanto como cuando se colocan individualmente.

Mapas de cobertura de las potencias a 1,8 GHz

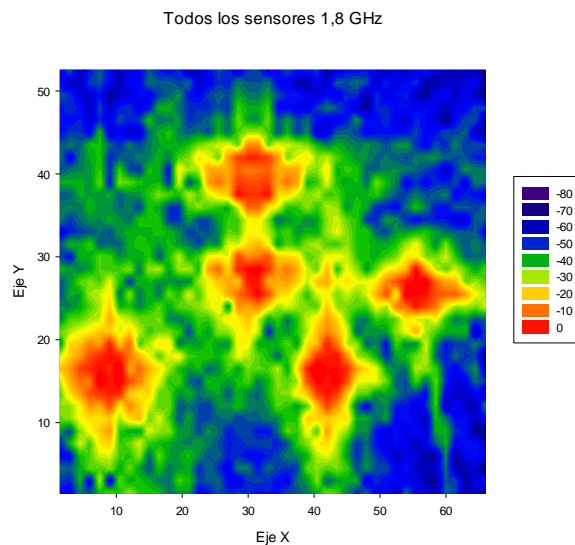


Figura 35. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 1,8 GHz

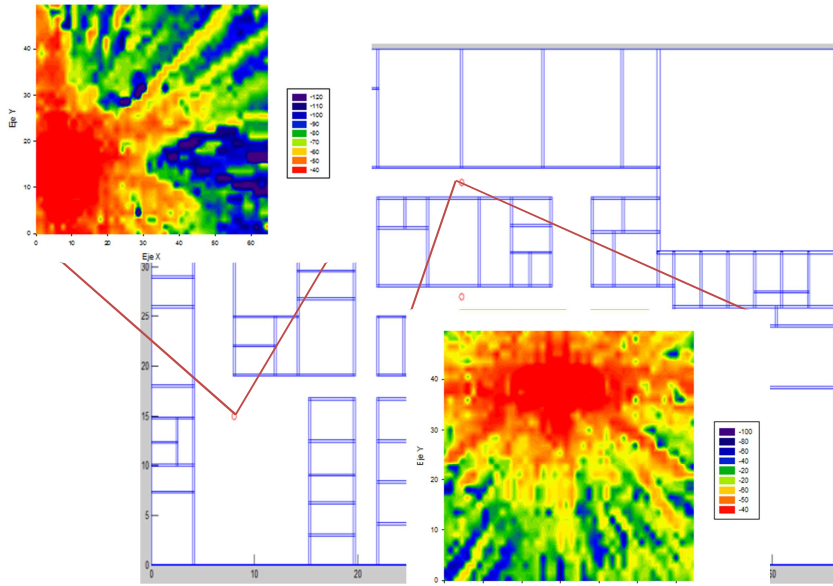


Figura 36. Localización y mapas de cobertura de las antenas P1 y P2.

En este caso, como se puede comprobar la cobertura que ofrece la antena situada en el punto P2 no cubre tanto espacio del recinto como las situadas en los puntos P3 y P4. Por su parte, la situada en el punto P1 ofrece algo más de cobertura pero sin llegar a cubrir todo el recinto. En el caso de todas las antenas emitiendo a la vez, se obtiene menor intensidad de potencia en las zonas de estudio y también se aprecia menor cobertura en contribución en el recinto.

Mapas de cobertura 2,4 GHz

Todos los sensores a 2,4 GHz

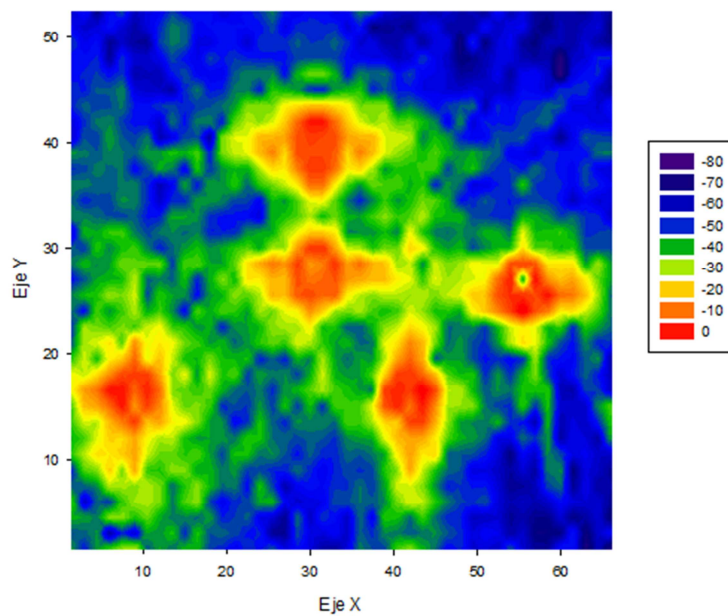


Figura 37. Mapa de cobertura de las antenas P1, P2, P3, P4 Y P5 a 2,4 GHz

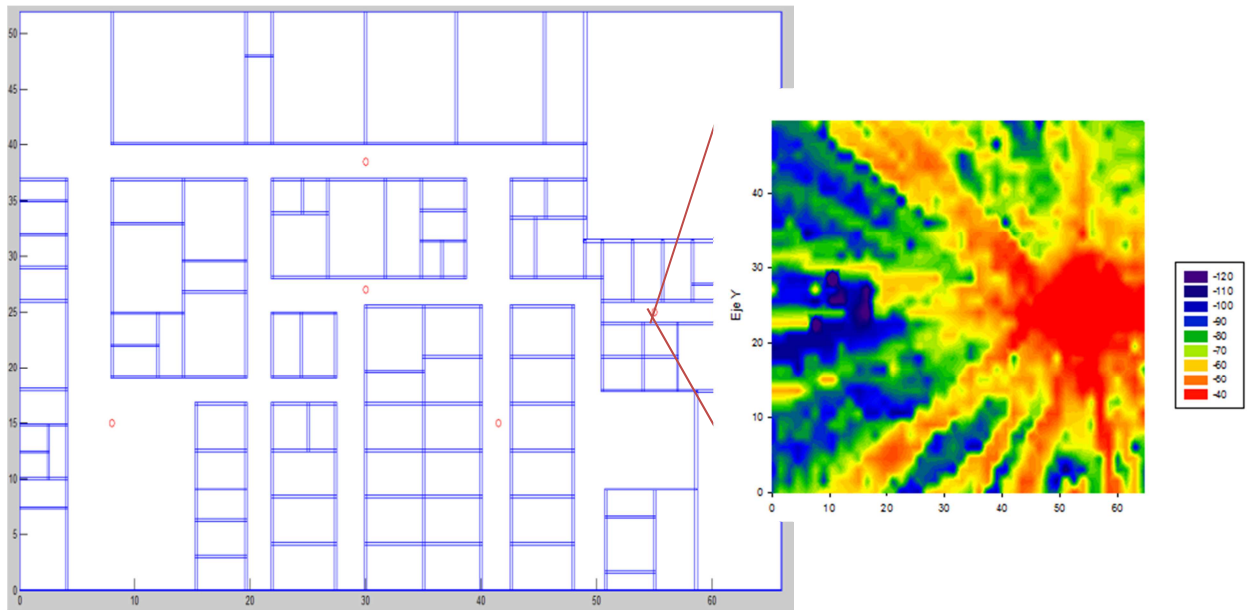


Figura 38. Localización de y mapas de cobertura de la antena P5

Para la frecuencia de 2,4 GHz, en la figura 37, vemos que la intensidad de potencia es todavía menor y también se observa que la antena situada en el punto P5 sufre algún tipo de fenómeno que hace que la potencia recibida sea notablemente menor en punto cercano a la antena. Dicho fenómeno no ocurre cuando se evalúa la antena en solitario como se puede ver en la figura 38. La antena situada en este punto también ofrece una cobertura bastante amplia.

Todos estos resultados junto con los que se ofrecen más adelante serán discutidos en el punto 5. En el anexo se muestran todos los resultados correspondientes a las simulaciones mostradas, ya que solo se han presentado algunos casos pero puede resultar muy útil observarlos todos en conjunto. Concretamente el resto de resultados correspondientes a este apartado se puede ver en el punto 2.1. del Anexo.

En el siguiente punto pasaremos a estudiar las potencias que se han utilizado como potencias interferentes.

4.3.2. Simulaciones de las potencias interferentes

Dado que el objetivo de este proyecto es el de estudiar y caracterizar la interferencia electromagnética, el segundo paso fue el de introducir una red posibles potencias interferentes de forma que formaran una cuadrícula de 4x4, decir, un total de 16 potencias interferentes. De esta forma quedaba abierta la posibilidad de estudiar la interferencia con diferentes configuraciones. La red de interferencias quedaría de la siguiente manera:

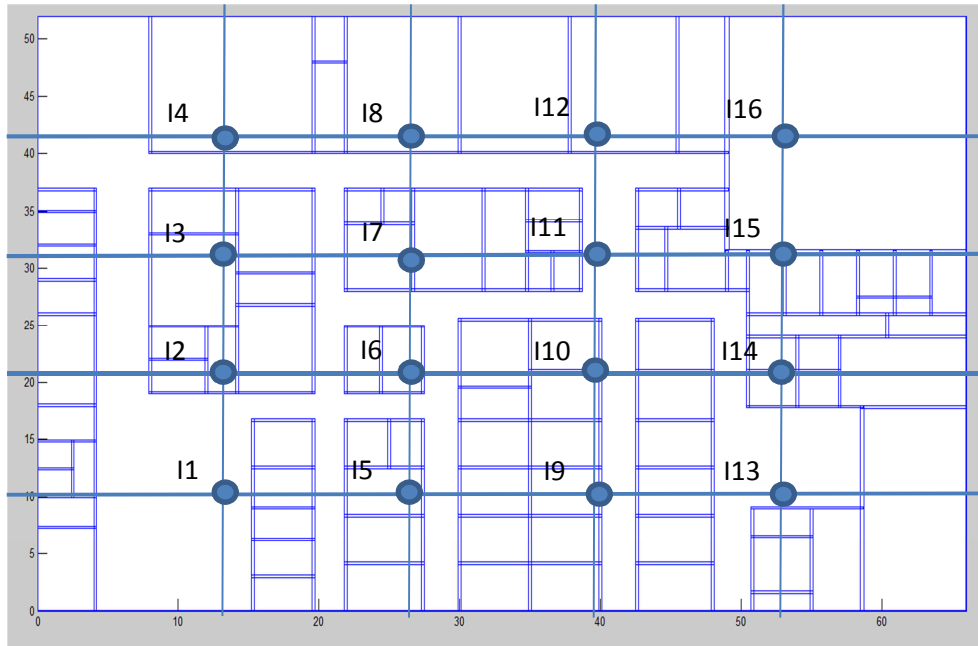


Figura 39. Posiciones de las antenas que emiten las potencias interferencias

Los parámetros elegidos para las simulaciones de las interferencias, fueron los mismos que para las potencias útiles, ya que como se ha comentado previamente, éstos pueden ser modificados a posteriori una vez obtenidos los resultados.

Al igual que en el apartado anterior, se muestran los primero los mapas de cobertura e toda la red de potencias interferentes emitiendo a la vez y a continuación se muestran los mapas considerando la emisión individual.

Mapas de cobertura de las interferencias a 868 MHz

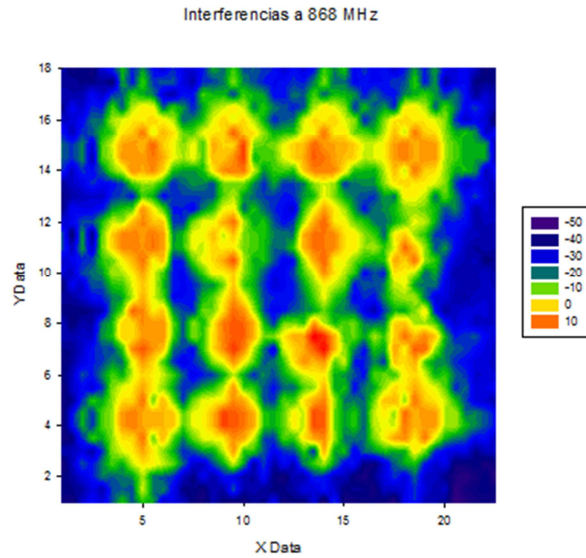


Figura 40. Mapa de cobertura de las potencias interferentes radiando a la vez

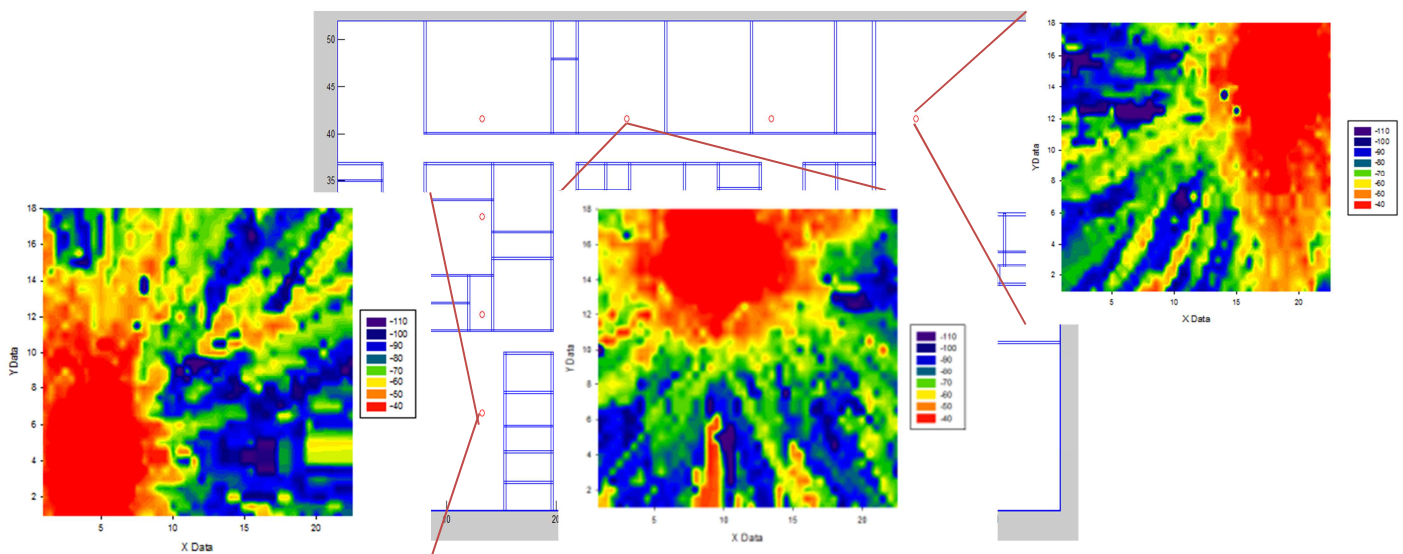


Figura 41. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I1, I8 e I16

En este caso se observa que el conjunto de potencias emitiendo simultáneamente proporciona mayor potencia. Sin embargo también se aprecia que cuando emiten todas a la vez, en los pasillos que se forman entre antenas emisoras, no hay ninguna cobertura. Se deduce por tanto que el hecho de aumentar el número de antenas no implica que haya mayor cobertura. Esto puede ser producido por las interferencias que producen unas sobre otras. Por otro lado, cuando se consideran individualmente ofrecen menor cobertura

Mapas de cobertura de las interferencias a 1,8 GHz

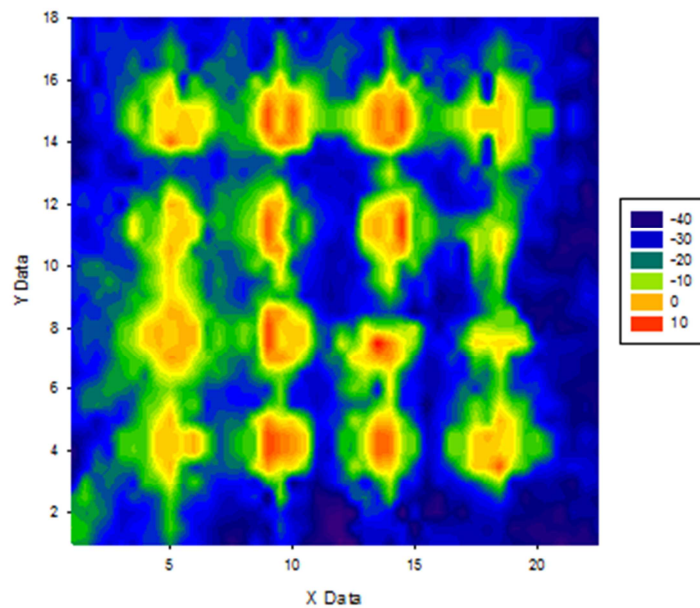


Figura 42. Mapa de cobertura de las potencias interferentes

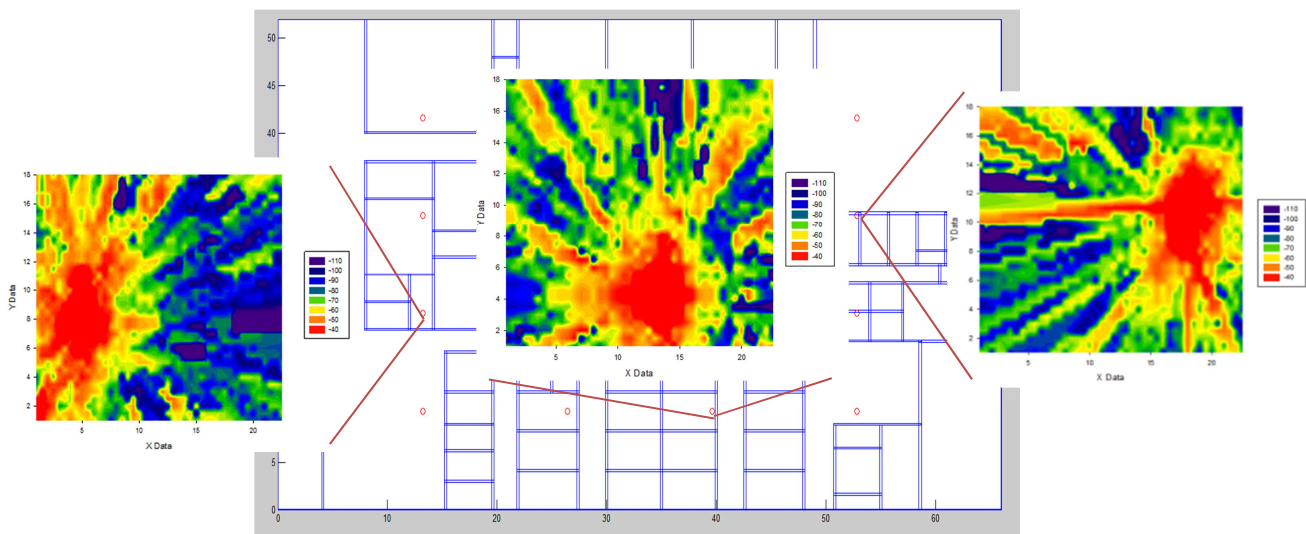


Figura 43. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I2, I9 e I15

Como sucedía en el apartado anterior, se observa que la potencia recibida disminuye sustancialmente respecto a la frecuencia anterior. Así mismo en el caso de las potencias interferentes trabajando simultáneamente se ve como la cobertura es mucho menor que en el caso de 868 MHz ya que las zonas donde la potencia era menor ahora son mayores.

Mapas de cobertura de las interferencias a 2,4 GHz

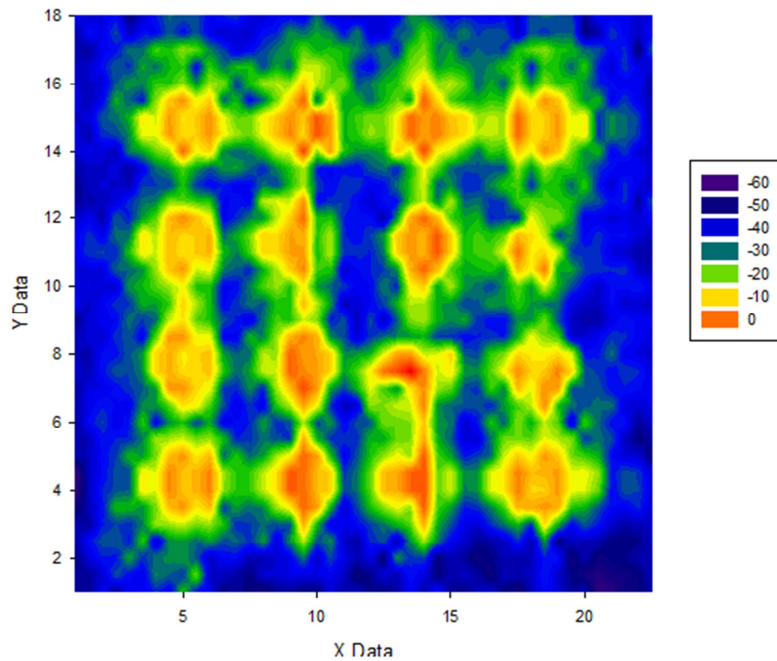


Figura 44. Mapa de cobertura de las potencias interferentes

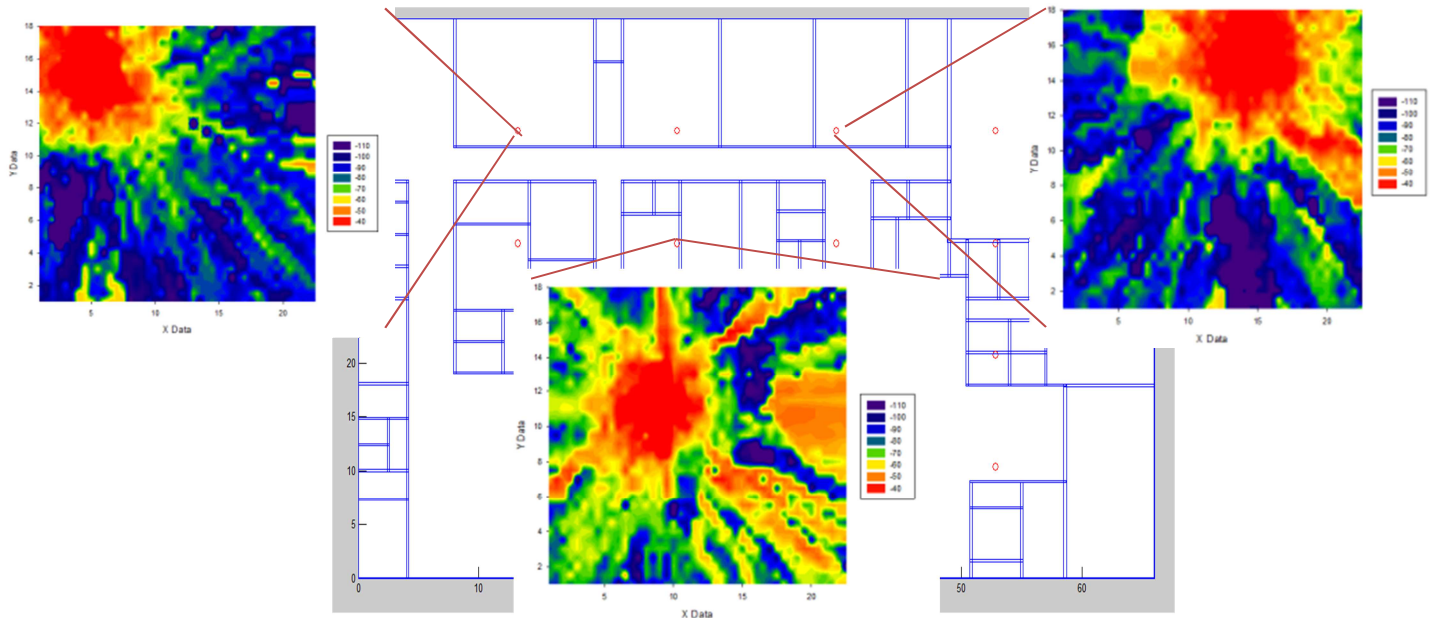


Figura 45. Mapas de cobertura de las potencias interferentes I4, I7 e I12

En el caso de estas últimas potencias mostradas, seguimos viendo que la cobertura se localiza en gran parte en la zona en la que se sitúa la antena. No obstante en el caso del punto I7, se ve que ocurren fenómenos interesantes como el hecho de que llegue la cobertura a puntos alejados pero no haya puntos intermedios de cobertura nula. Cuando se evalúan todas las

potencias interferentes emitiendo simultáneamente, se observa que al contrario que en el caso de 1,8 GHz los pasillos en los que no había cobertura vuelven a hacerse más pequeños, es decir, se dispone de más cobertura, pero en este caso con menor potencia.

Uno de los aspectos que más llama la atención, es cómo se comportan las potencias de las denominadas interferentes cuando se evalúan individualmente. En el anexo 2.2. se muestran todas las potencias interferentes individualmente y se pueden apreciar fenómenos destacables como lo que sucede con la I7. Todo ello será discutido en el punto 5.

5. Análisis de los resultados

Una vez realizadas las simulaciones necesarias se pasó a trabajar con ellas sacando mapas de ruido y estudiando diferentes casuísticas.

Se calculó la relación señal ruido para diferentes casos en todas las frecuencias de estudio. Este estudio consiste en el cálculo de relación señal ruido entre el sistema de comunicación y los distintos puntos interferentes.

Los resultados se presentan por frecuencias y de la siguiente manera, inicialmente **mapas 2D de la relación señal a ruido** de todo el sistema en conjunto cuando se consideran todas las interferencias en el escenario. A continuación las **radiales** que son la emisión de potencia a lo largo de distintos puntos. Los puntos sobre los que se ha calculado son los pasillos que cubren las zonas de emisión de las antenas. Posteriormente se muestra la **relación señal ruido intersystem e intrasystem**, es decir, la evaluación de cómo afectan los agentes externos al sistema (las consideradas potencias interferentes), y cómo afectan los agentes internos (el resto de potencias útiles del sistema de comunicación) respectivamente. Después se presentan los **mapas de ruido** que corresponden con la relación señal a ruido considerando un ruido blanco aditivo Gaussiano, **AWGN**, cuando se considera un ruido de fondo de -110 dB y -70 dB. Finalmente se presenta la **probabilidad de error del sistema** y los **perfiles de retardo de potencia**.

Una vez estudiada la relación señal ruido entre todo el sistema y todas las interferencias, se ha calculado la SNR para todo el recinto atendiendo a distintas configuraciones, es decir, teniendo en cuenta distintas variables. A continuación se explicará cada configuración elegida y los resultados obtenidos para cada una de ellas. Dependiendo del tipo de gráfica, los resultados se presentan para un punto, donde los puntos elegidos para el análisis son aquellos donde se sitúan las antenas transmisoras (las consideradas potencias útiles), o para un pasillo a considerar, que serán los pasillos donde están colocadas cada una de las antenas transmisoras.

Un aspecto a destacar, es que en cada gráfica se define el punto SNR min que se calcula a partir de la fórmula de Shannon:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde se ha considerado la capacidad del canal y el ancho de banda en función de la tecnología. Por ejemplo en la frecuencia de 2,4 GHz se ha supuesto $C=250$ Kbps y $B=22$ MHz.

Así mismo, para calcular la probabilidad de error, se ha calculado el BER (Bit Error Rate) ya que es un parámetro muy útil a la hora de diseñar sistemas de comunicación digitales. La expresión para una modulación QPSK es:

$$BER_{QPSK} = Q \left(\sqrt{2E_b/N_0} \right)$$

Donde $E_b = P_{rx}/R_b$, siendo P_{rx} la potencia recibida en el punto considerado y R_b la tasa binaria. Se calculará el BER para distintas velocidades de transmisión y para distintos valores de N_0 , el ruido de fondo a considerar.

Para ilustrar la característica de propagación multitrayecto, se presentan los perfiles de retardo de potencia que muestran la potencia de las distintas componentes multitrayecto que llegan a un mismo punto del espacio.

Pasamos por tanto a mostrar y comentar brevemente los resultados obtenidos para después hacer el análisis.

Resultados a 868 MHz

La imagen a continuación mostrada se corresponde con la relación señal ruido que hay en el recinto cuando el sistema se ve afectado por toda la red de potencias interferentes.

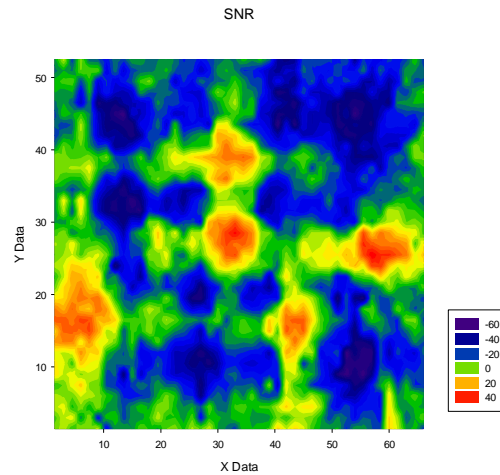


Figura 46. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes

En este caso los valores máximo y mínimo son: $SNR_{min} = -60,1841\text{dB}$; $SNR_{max} = 43,1557\text{dB}$. La SNR_{max} es buena sin embargo la SNR_{min} es bastante mala. En general se ve reducida la cobertura.

A continuación se pasa a mostrar los resultados de las radiales, es decir la potencia que llega a distintos puntos en un mismo eje. En este caso los ejes seleccionados son los que pasan por los puntos donde están colocadas las antenas transmisoras que coinciden con los distintos pasillos del recinto. Dado que el análisis se hace para las tres frecuencias de estudio, no se muestran todos los resultados en cada frecuencia. En este caso nos encontramos con las radiales del pasillo de boxes donde está la antena transmisora 1 y el de la zona de consultas donde se coloca la antena transmisora 4.

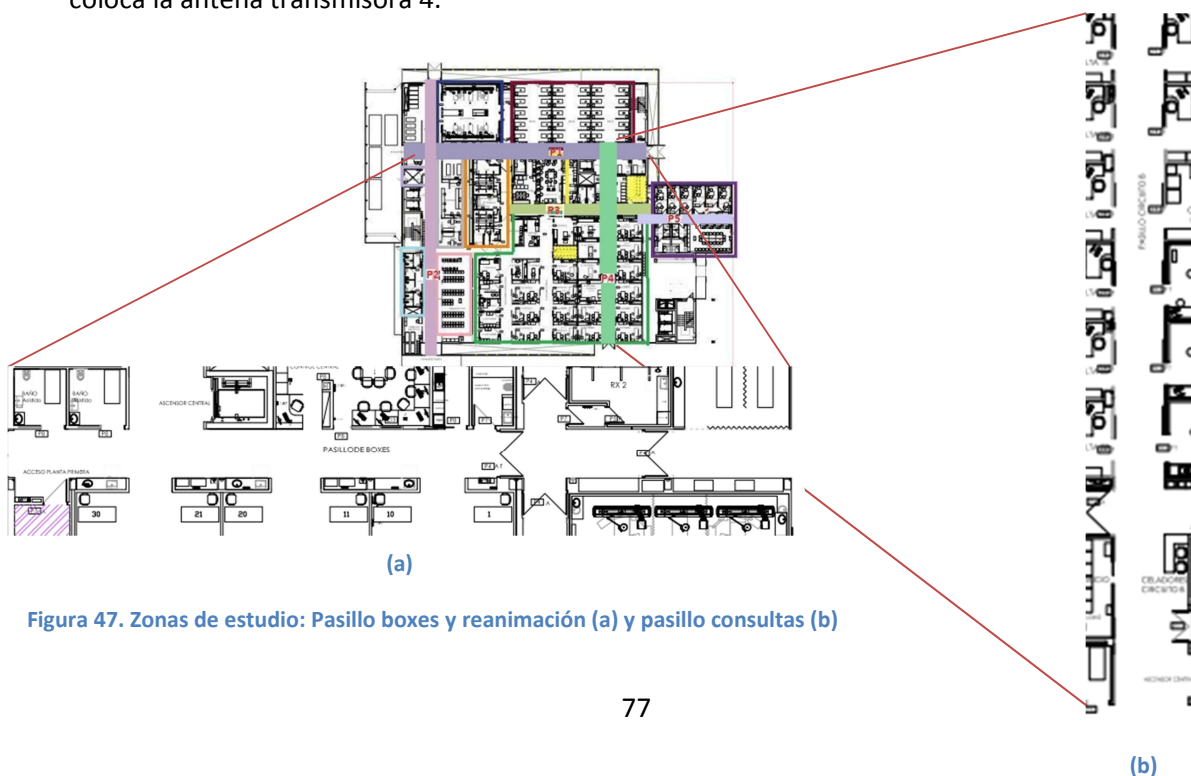


Figura 47. Zonas de estudio: Pasillo boxes y reanimación (a) y pasillo consultas (b)

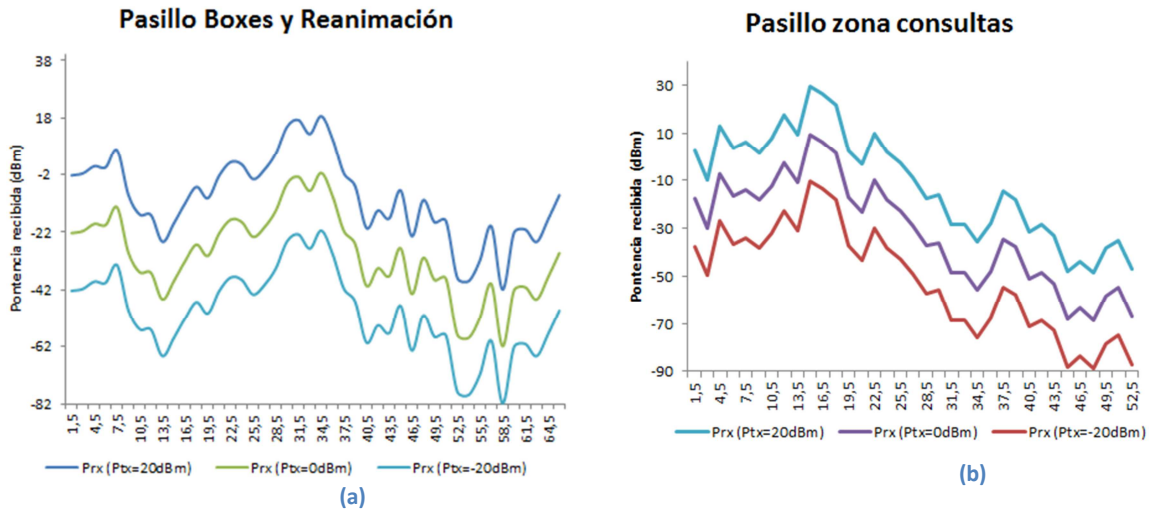


Figura 48. Radiales de P1(30, 38.5, 1.1) y P4(41.5,15,1.1) en el pasillo boxes (a) y pasillo zona consultas (b)

Se comprueba que la SNR a lo largo del pasillo de la zona de consultas, obtiene valores de más elevados, pero también más bajos que en el pasillo de boxes y reanimación. Los puntos de mayor valor de SNR son los cercanos a las antenas y los de menor valor los más alejados de la antena. No obstante se comprueba que no sigue una tendencia puramente descendente ya que a partir de cierto punto vuelve a aumentar, lo cual puede ser causado por los rebotes que sufran con las paredes.

Pasemos al estudio de cómo el sistema de comunicaciones se ve afectado por el ruido que generan tanto los agentes externos, que en este caso es la red de interferencias de 4x4, como el ruido generado por el propio sistema de comunicaciones, es decir el resto de antenas transmisoras. Los resultados que se presentan corresponden con las antenas situadas en los pasillos anteriormente mencionados, es decir la antena P1 y la antena P4.

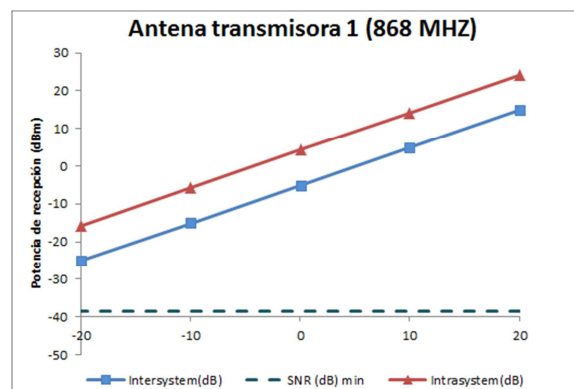


Figura 49. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P1

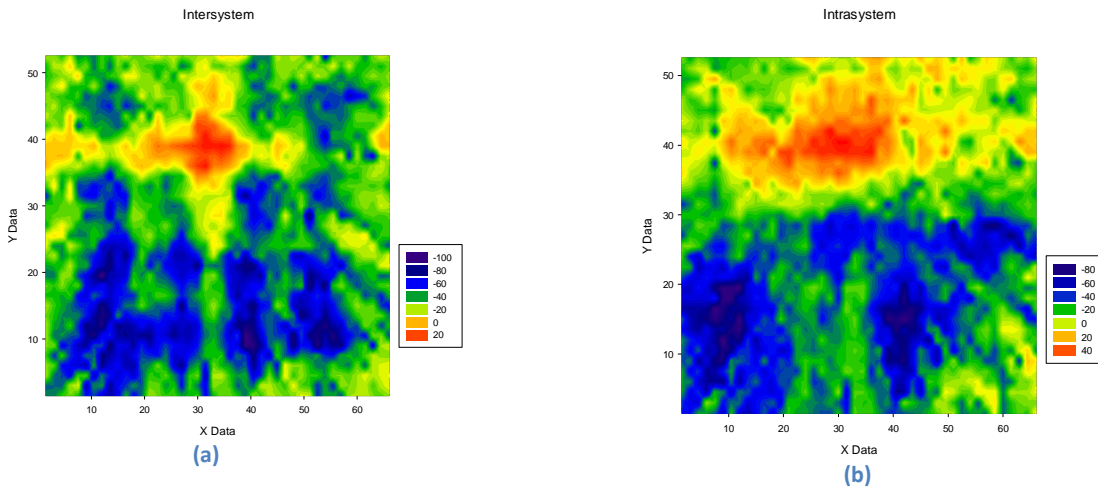


Figura 50. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antenna P1

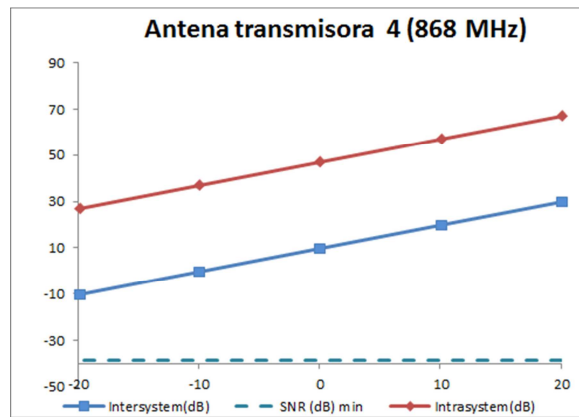


Figura 51. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P4

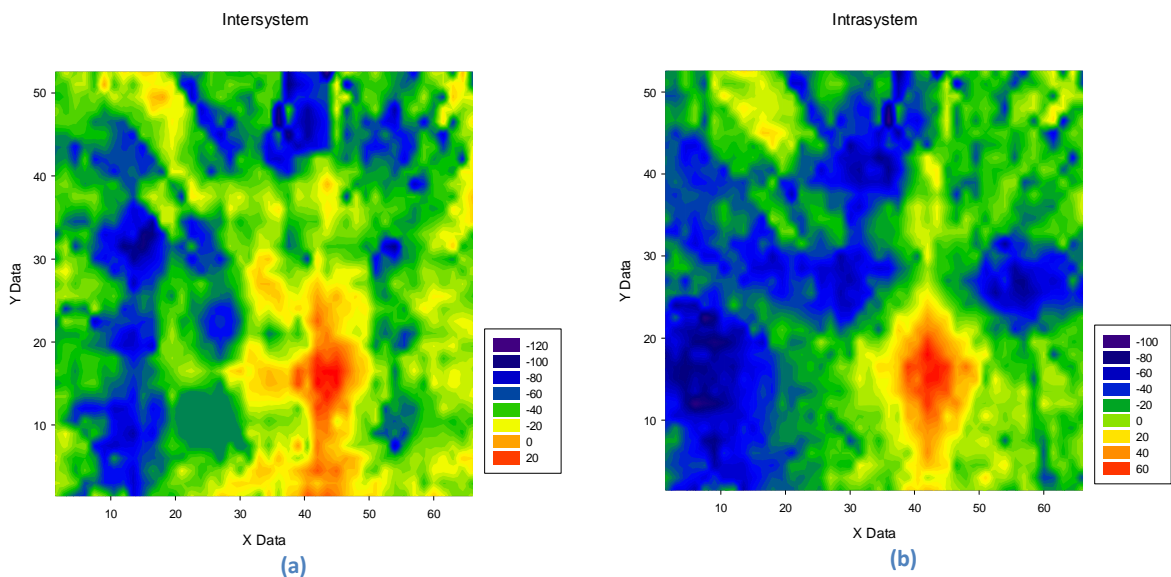


Figura 52. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antenna P4

En ambos casos se muestra inicialmente una representación gráfica de cómo evoluciona la relación señal ruido en función de la potencia con la que transmite la antenna. A continuación se muestran los mapas 2D de ruido de la situación a considerar. En las figuras 49 y 51 se ve que

aparte de aumentar la SNR conforme aumenta la potencia transmitida, como es obvio, en ambos casos se supera la SNR_{min} que establece el teorema de Shannon para una correcta transmisión a una velocidad de 250 Kbps en un ancho de banda de 22 MHz. También se aprecia que hay mayor diferencia entre el ruido intersystem y el intrasystem para la antena P4 que para la P1. En ambos casos es mejor la SNR intrasystem que la intersystem.

En este punto, como adelanto para el siguiente, se muestran los mapas de ruido considerando un ruido blanco aditivo Gaussiano, AWGN, con potencias de ruido de -70 dB y -110 dB. Es decir se evalúa el comportamiento del sistema frente al ruido de fondo del entorno.

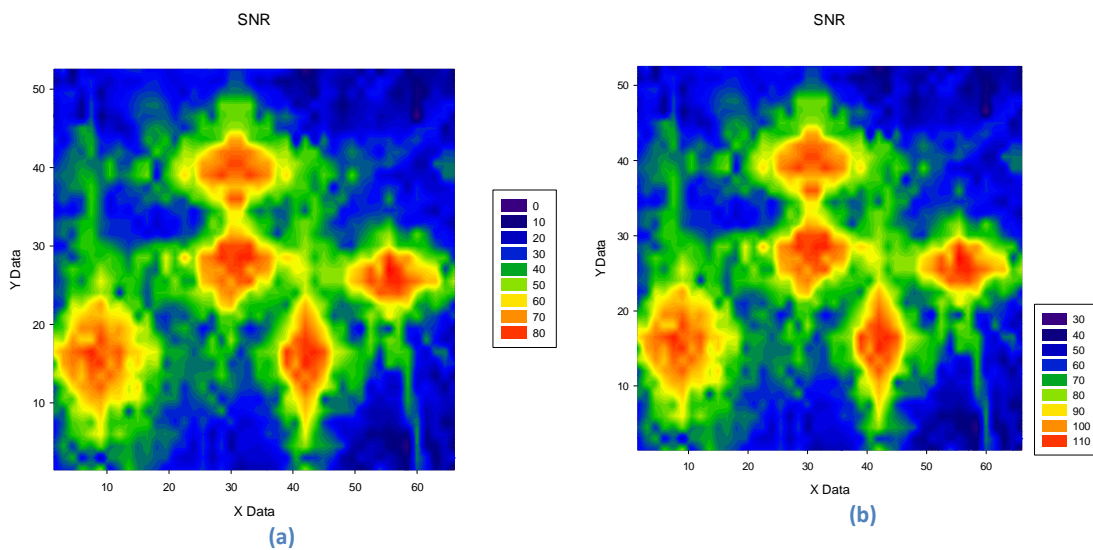


Figura 53. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b)

Se aprecian valores muy altos de SNR, y es que de hecho el mapa de cobertura tiene un gran parecido con el mapa de cobertura de las antenas emitiendo a la vez. En definitiva considerando un ruido de esta intensidad se obtiene una buena relación señal ruido.

A continuación se muestra la probabilidad de error para la modulación QPSK para distintos valores de N_0 y de velocidad de transmisión.

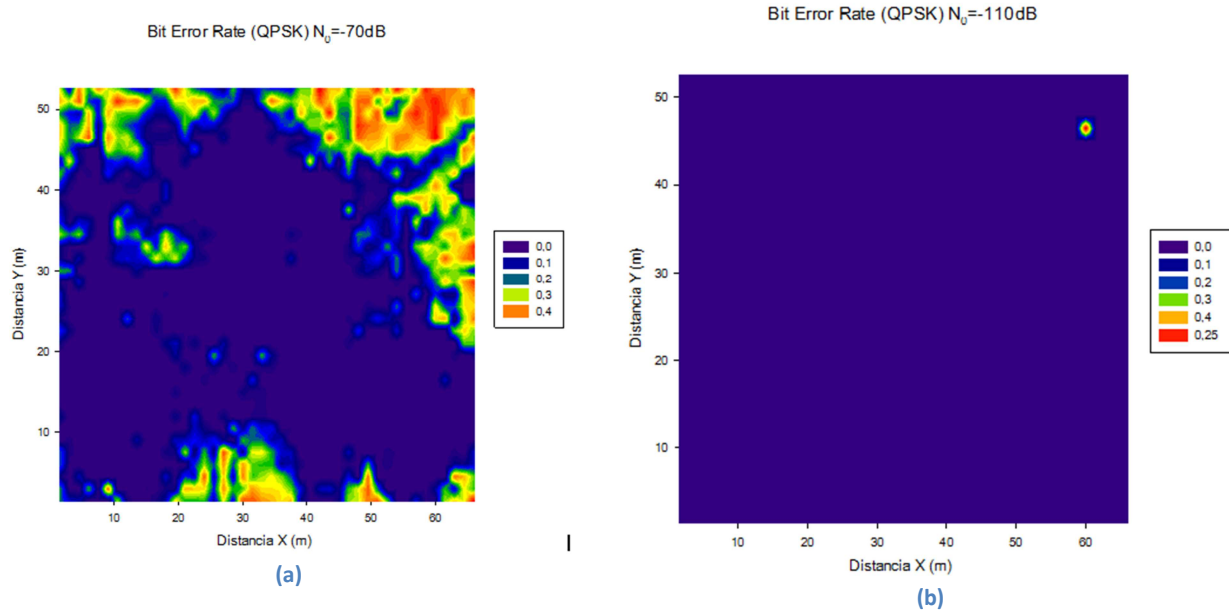


Figura 54. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 1 Kbps

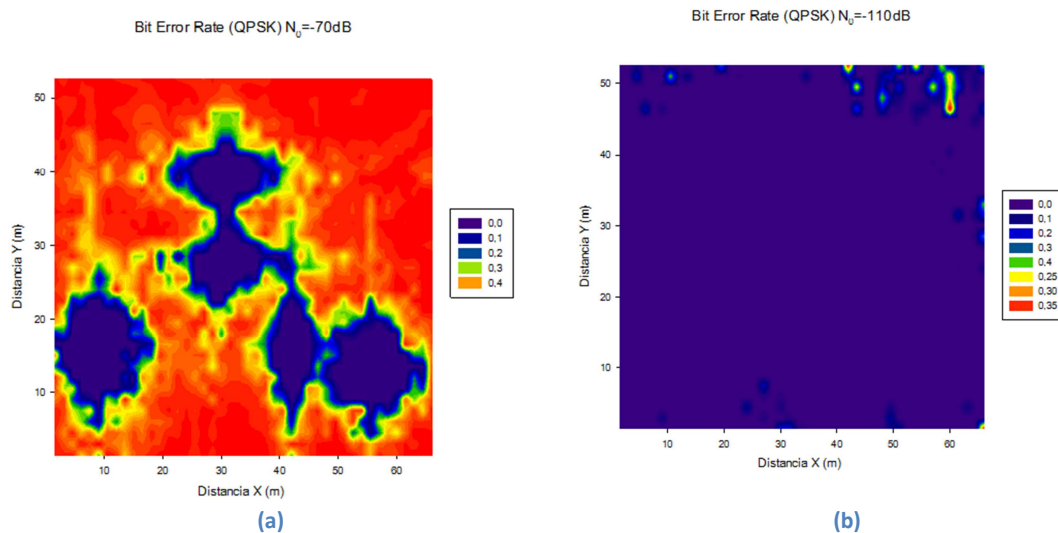


Figura 55. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 250 Kbps

Se aprecia que la probabilidad de error es casi nula en ambos casos cuando la potencia de ruido es de -110 dB. Sin embargo en el caso de -70 dB, se puede comprobar que para una velocidad de transmisión de 250 Kbps la probabilidad de error aumenta considerablemente, aunque se mantiene siempre por debajo del 50%.

A continuación se muestran los perfiles de retardo de potencia para dos puntos de los pasillos de estudio en su intersección con otros pasillos. Concretamente hablamos de la intersección entre el pasillo correspondiente a antena P1 y el correspondiente a la antena P2, y la del pasillo donde se encuentra la antena P4 con el pasillo donde está la P3. Dichos puntos se muestran marcados con en el plano.



Figura 56. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia

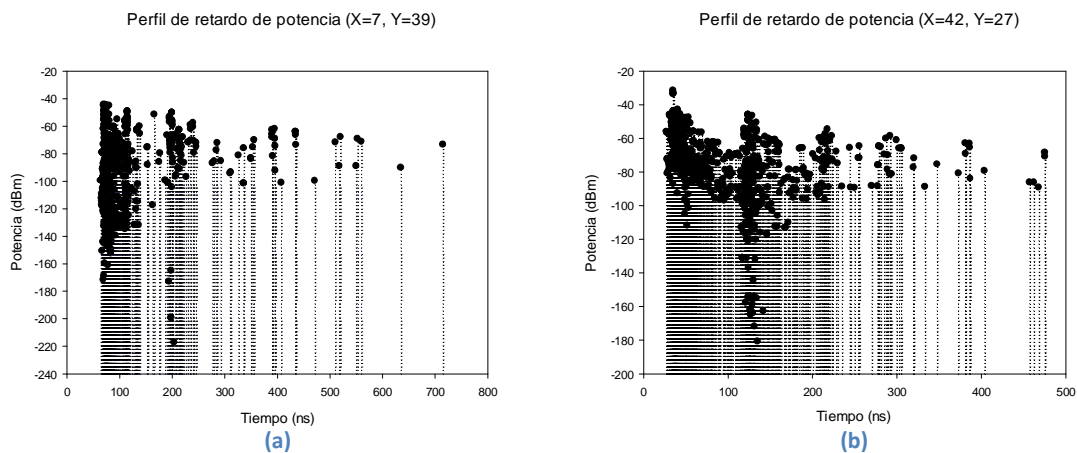


Figura 57. Perfiles de retardo de potencia medidos en distintos puntos

Las antenas que se consideran en cada caso son P1(30, 38.5, 1.1) y P4(41.5,15,1.1). En estas gráficas se aprecia la componente multitrayecto, que depende en gran parte de donde se mida. En el caso de la (b), se mide más cerca de la antena transmisora y por tanto se ve que el tiempo de llegada es menor y la densidad mayor.

Una vez observados los resultados del sistema global, pasamos a analizar casos particulares de las distintas interferencias que se podrían dar en el recinto, probando diversas configuraciones de las potencias interferentes. Se han estudiado cuatro casos, en cada uno de ellos se han escogido unas potencias interferentes determinadas, y se ha evaluado la interferencia que pueden causar en el sistema. En cada caso se presentan el mapa de ruido correspondiente al sistema con las interferencias seleccionadas y la o las radiales de los pasillos donde están situadas dichas interferencias. Se procederá de igual manera en las tres frecuencias. Los resultados se comentarán en el apartado 5.4.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes y reanimación, es decir, I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

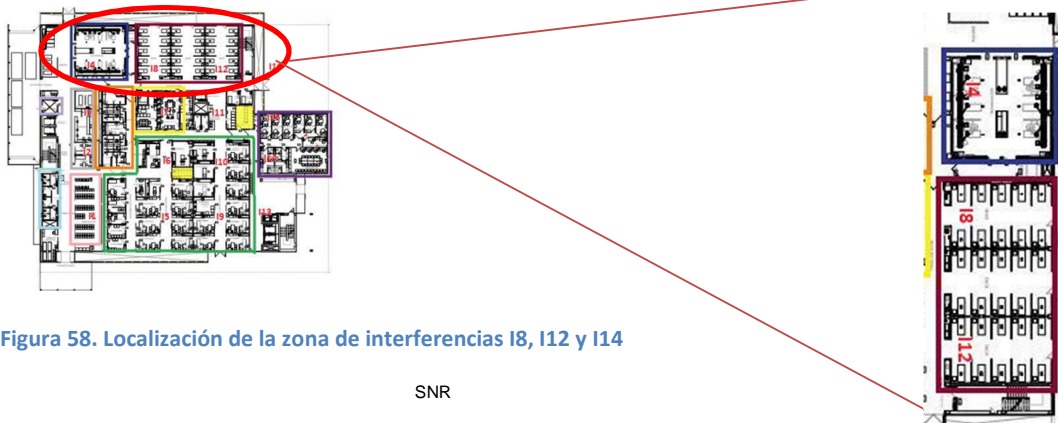


Figura 58. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14

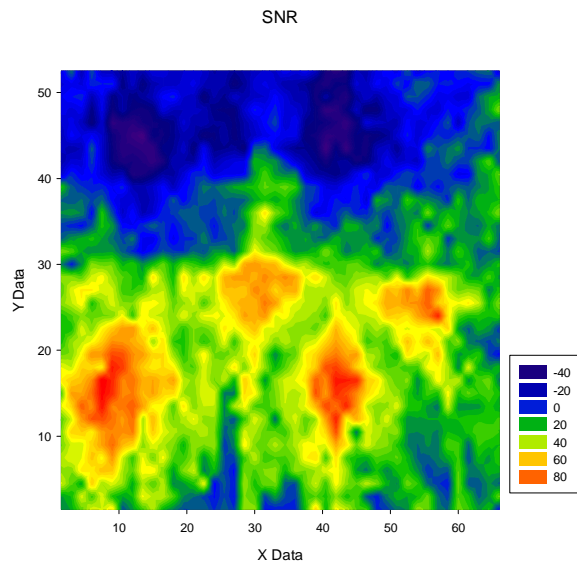


Figura 59. SNR entre las potencias útiles y las potencias I8, I12 e I14

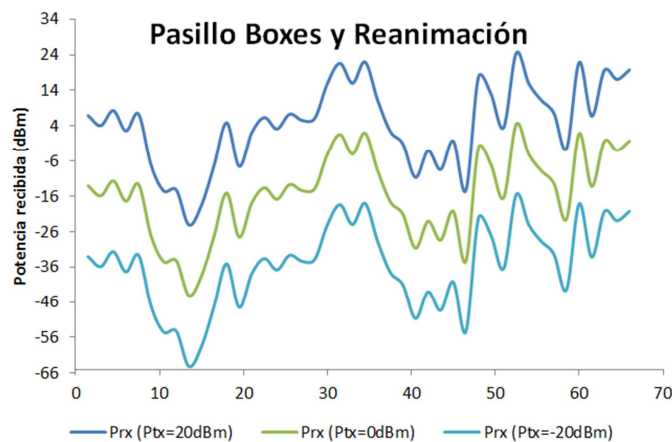


Figura 60. Radiales de P1(30,38.5,1.1) del pasillo donde se encuentran las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes, reanimación y rayos X, es decir, I2(13.2,20.8,1.1), I3(13.2,31.2,1.1), I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

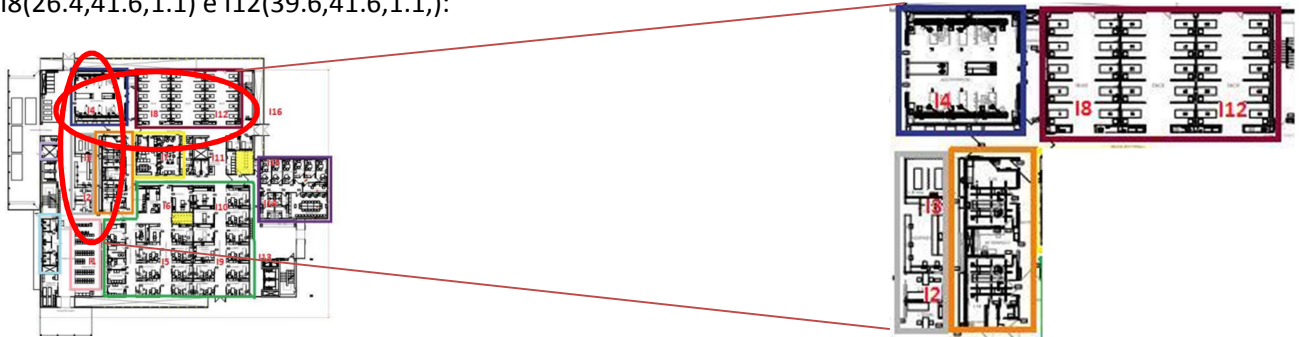


Figura 61. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I4, I8 y I12

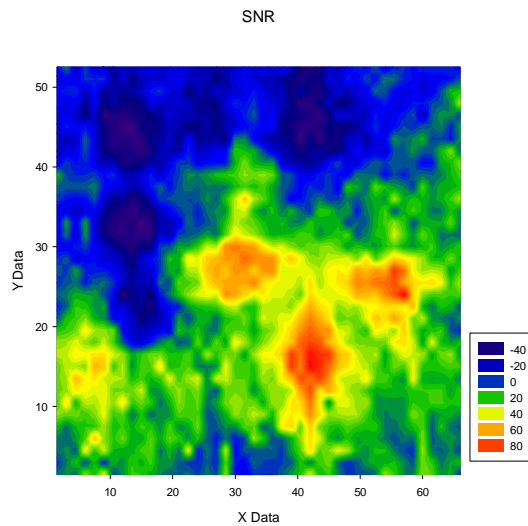


Figura 62. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14

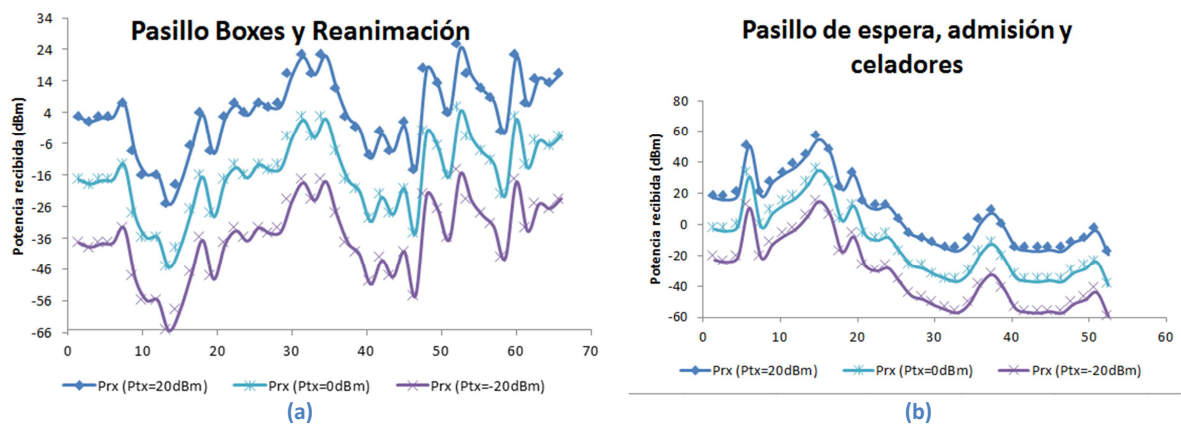


Figura 63. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas rayos X, admisión y espera, es decir, I1(13.2,10.4,1.1), I2(13.2,20.8,1.1), I3(13.2,31.2,1.1):

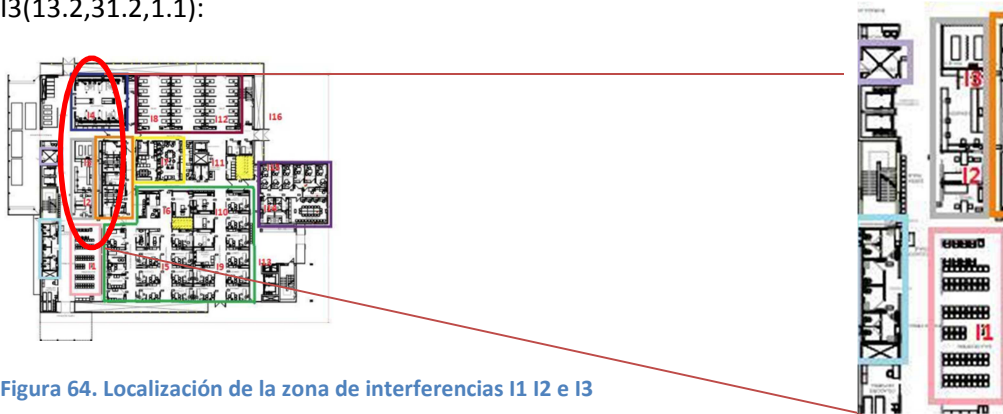


Figura 64. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3

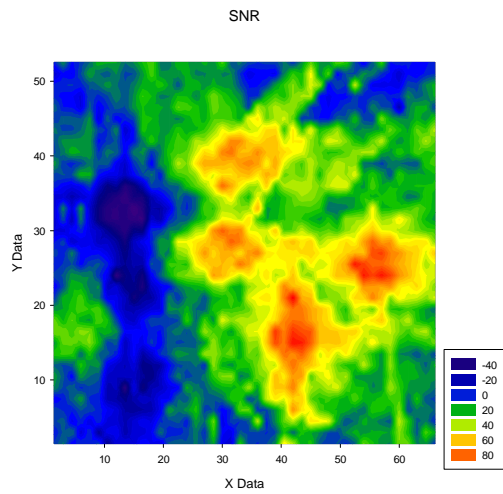


Figura 65. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3

Pasillo de espera, admisión y celadores

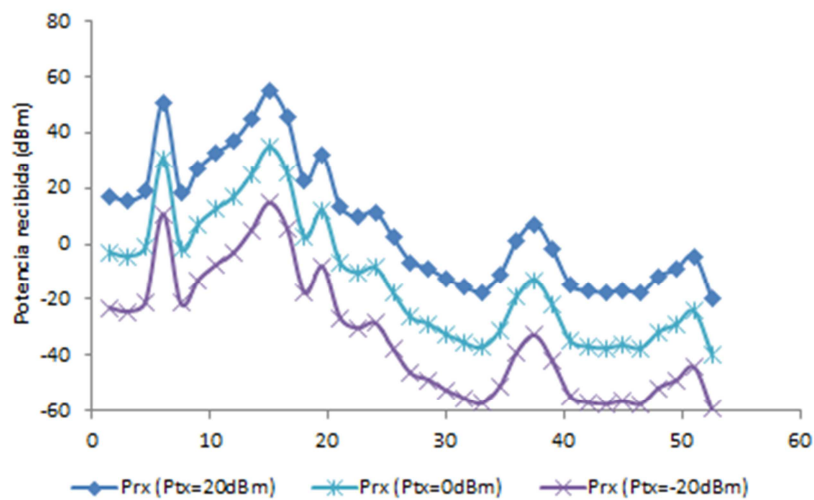


Figura 66. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de consultas y despachos, es decir, I5(26.4,10.4,1.1), I6(26.4,20.8,1.1), I9(39.6,10.4,1.1), I10(39.6,20.8,1.1), I14(52.8,20.8,1.1) e I15(52.8,31.2,1.1):

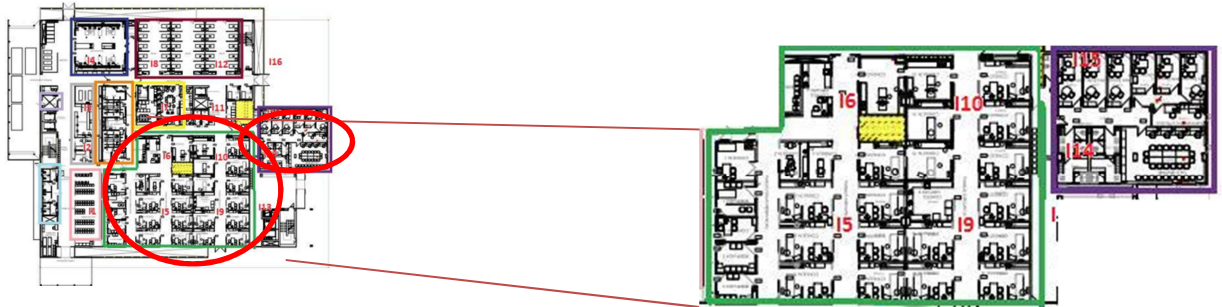


Figura 67. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

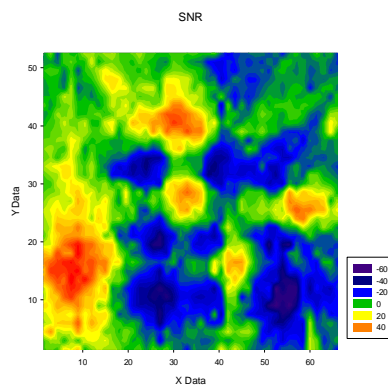


Figura 68. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

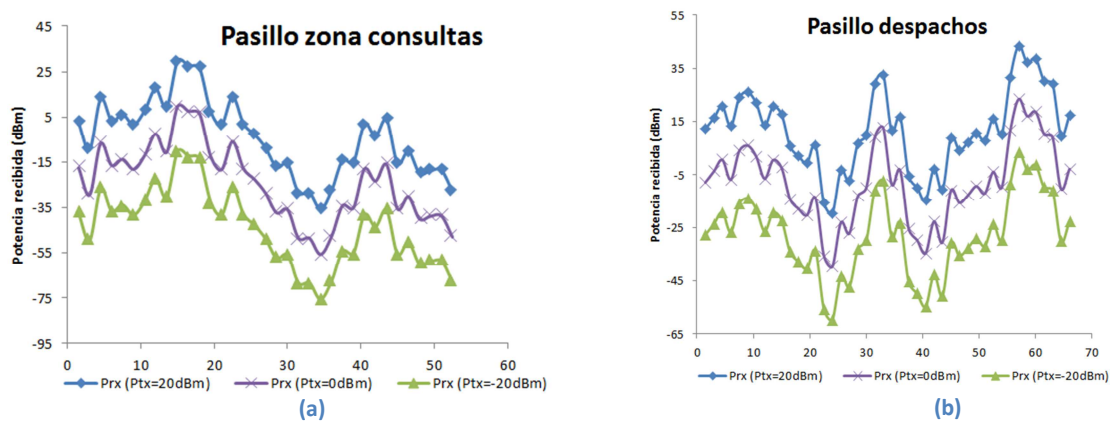


Figura 69. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) de los pasillos donde se encuentran las interferencias

La dinámica de presentación de los resultados es la misma que la seguida en el caso anterior, por ello se pasará directamente a mostrarlos.

5.1. Resultados a 1,8 GHz

Se muestra la relación señal ruido que hay en el recinto cuando el sistema se ve interferido por toda la red de interferencias.

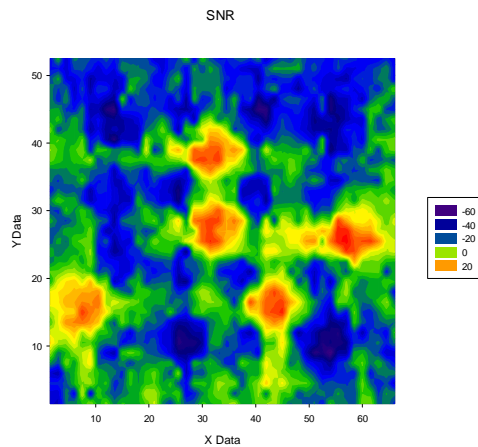


Figura 70. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes

En este caso los valores máximo y mínimo son: $SNR_{min} = -62,5292\text{dB}$; $SNR_{max} = 37,5306\text{dB}$. Sucede lo mismo que en el caso anterior solo que la SNR_{max} es menor. En general se ve todavía más reducida la cobertura respecto al caso anterior.

A continuación se muestran los resultados de las radiales del pasillo de boxes donde está la antena transmisora 2 y el de la zona de consultas donde se coloca la antena transmisora 3.

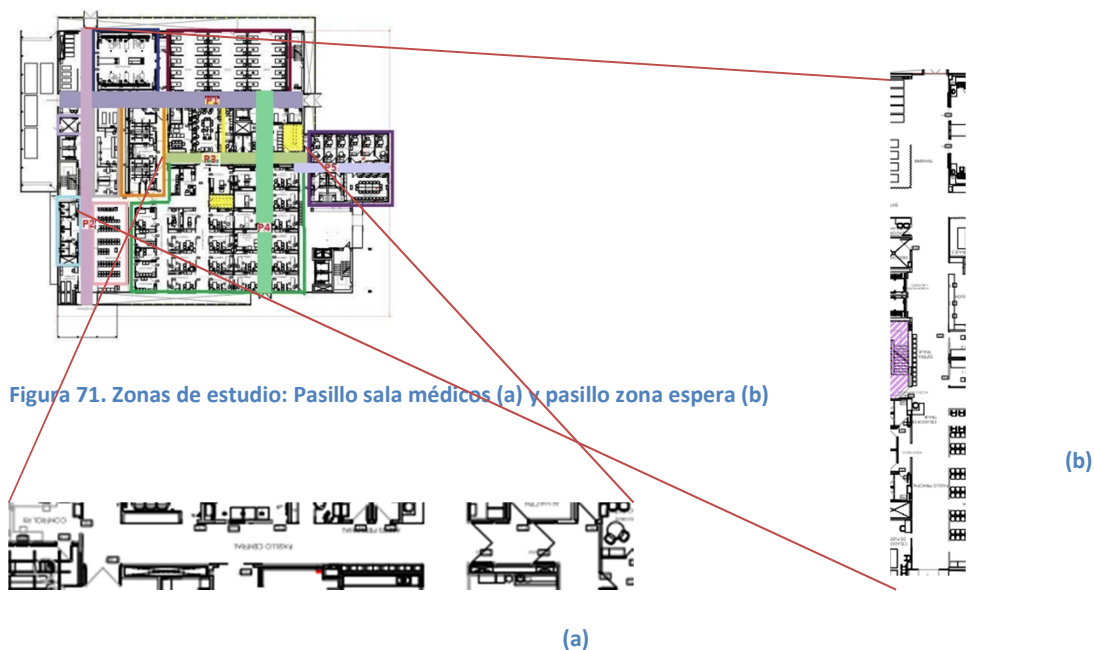


Figura 71. Zonas de estudio: Pasillo sala médicos (a) y pasillo zona espera (b)

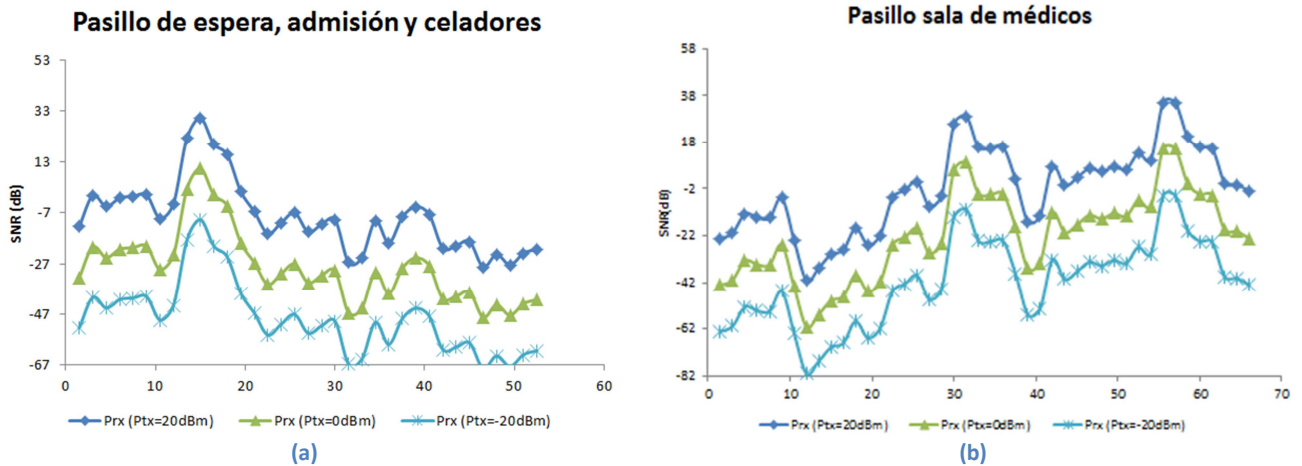


Figura 72. Radiales de P2(8,15,1.1) y P3(30,27,1.1) en Pasillo espera (a) y Pasillo sala de médicos (b)

Los resultados que ofrecen las radiales son similares a los del caso de 868 MHz, sucede que para la antena P2 la SNR disminuye con la distancia conforme se aleja de la fuente. Sin embargo para P3 se aprecia que en cierto punto no necesariamente cercano a la antena la SNR vuelve a subir.

Los resultados que se presentan corresponden con las antenas situadas en los pasillos anteriormente mencionados, es decir la antena P2 y la antena P3.

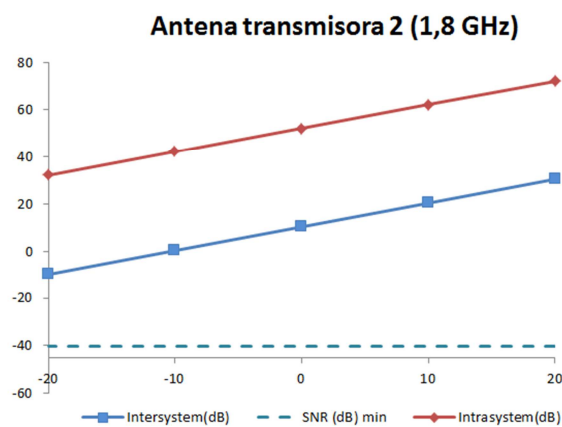


Figura 73. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P2

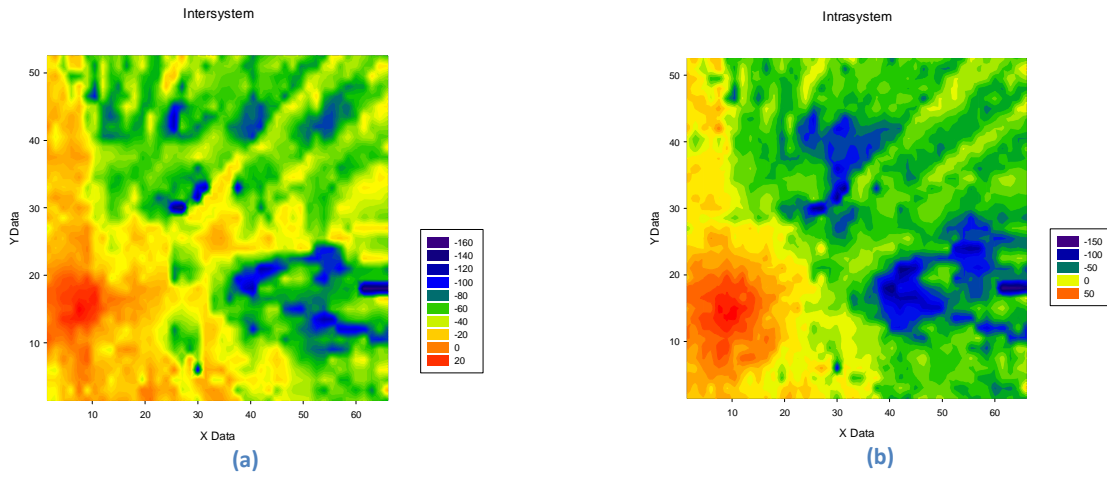


Figura 74. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antenna P2

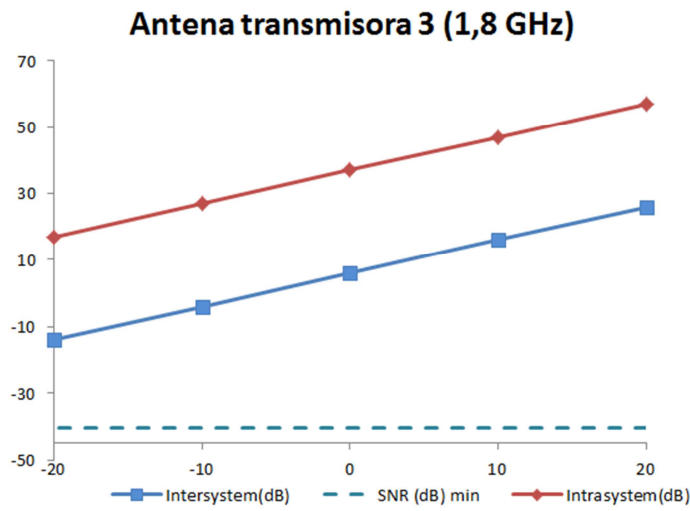


Figura 75. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P3

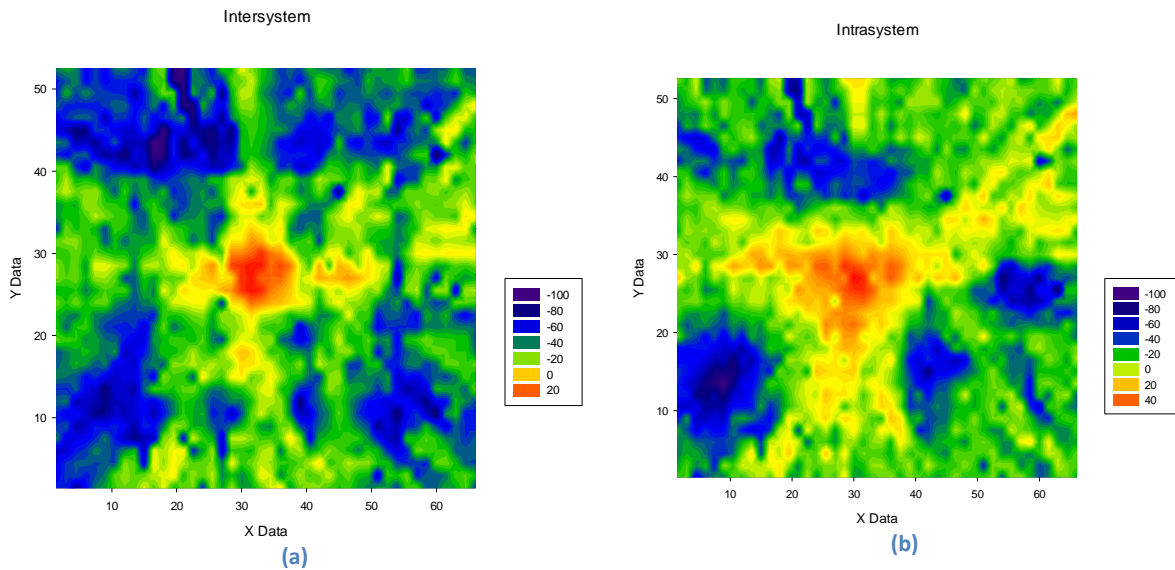


Figura 76. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P3

En ambos casos se observa que el ruido intrasystem es menor. También en ambos superan el SNR mínimo establecido por el teorema de Shannon. En general es mejor la SNR de la entorno a P1 que a P3.

Se muestra a continuación la relación señal ruido considerando el ruido AWGN con potencias de ruido de -70 dB y -110 dB.

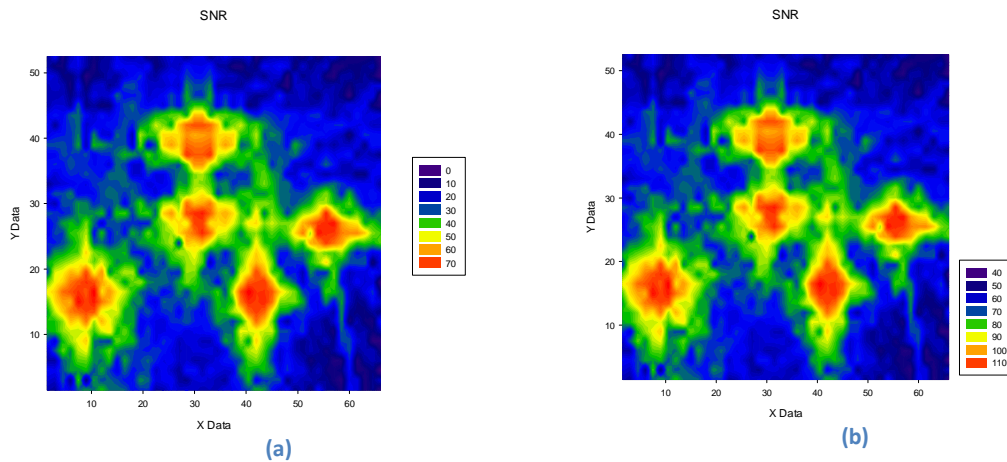


Figura 77. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b)

Al igual que para 868 MHz la relación señal ruido para las potencias de ruido consideradas es muy buena. Los mapas de ruido son muy similares a los mapas de cobertura.

A continuación se muestra la probabilidad de error para la modulación QPSK para distintos valores de N_0 y de velocidad de transmisión.

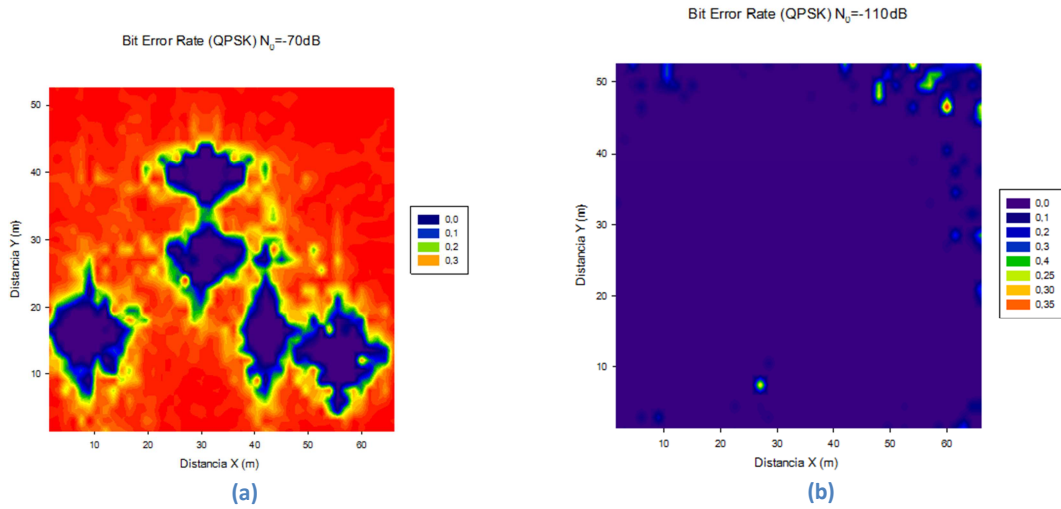


Figura 78. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 9,6 Kbps

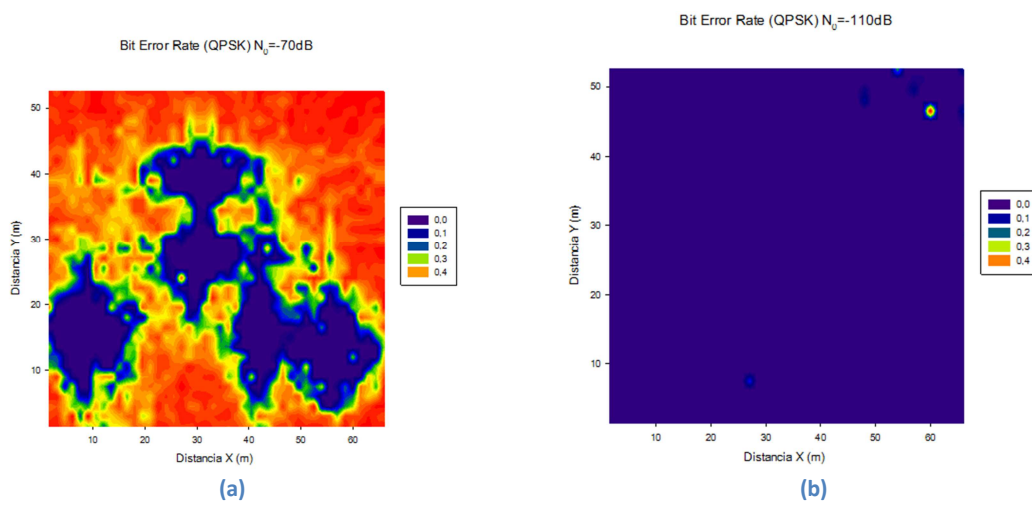


Figura 79. Bit Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 14,4 Kbps

Los valores de BER obtenidos en este caso son algo mayores que en el caso anterior sobre todo para la potencia de ruido de -70dBs. No obstante en ningún caso superan una probabilidad de error del 50%. Para el caso de la potencia de ruido de -110 dB, la probabilidad de error es prácticamente nula en todo el recinto.

A continuación se muestran los perfiles de retardo de correspondientes al punto más alejado posible de la antena situada en P2 en su propio pasillo y al punto más alejado de la antena P3 en su propio pasillo. Dichos puntos se muestran marcados con en el plano.



Figura 80. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia

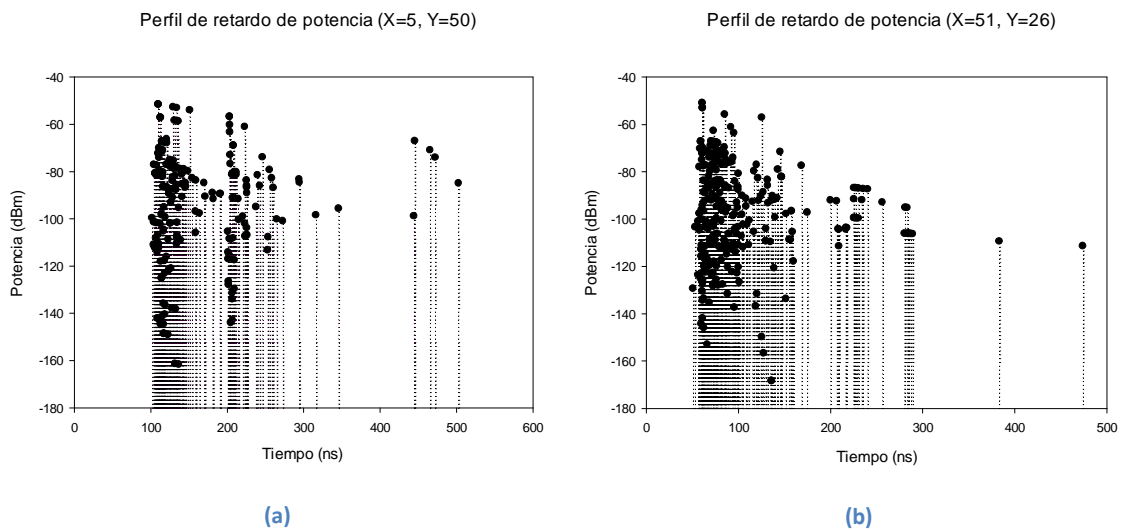


Figura 81. Perfiles de retardo de potencia medidos en distintos puntos

Las antenas que se consideran en cada caso son P2(8,15,1.1) y P3(30,27,1.1). Como los puntos escogidos no son cercanos a la fuente, ocurre que como cabe esperar, el retardo de potencia es mayor y la densidad menor.

En general, los resultados obtenidos en este apartado siguen la línea que para la frecuencia de 868 MHz. Se aprecian valores de potencia menores y mayor error de probabilidad.

A continuación pasamos a ver los resultados de los casos particulares.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes y reanimación, es decir, I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

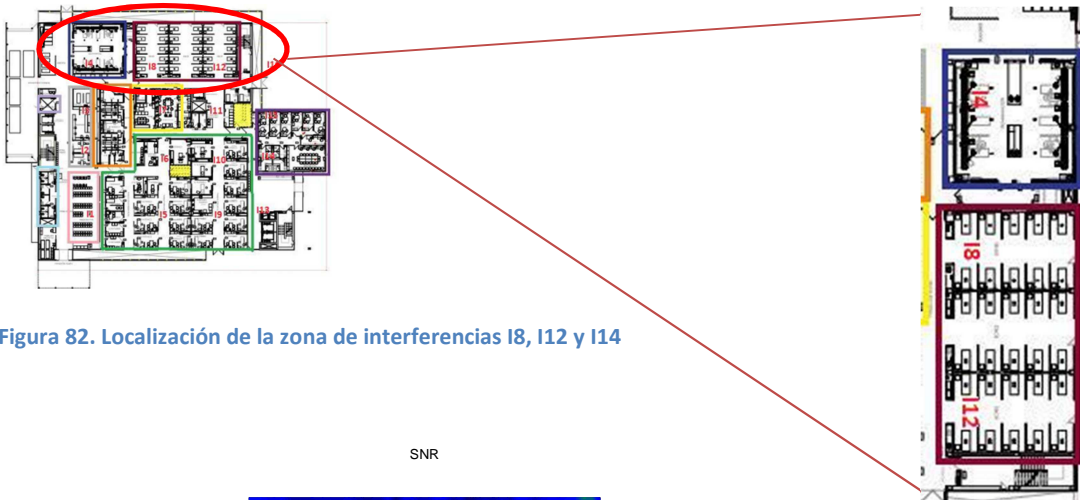


Figura 82. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14

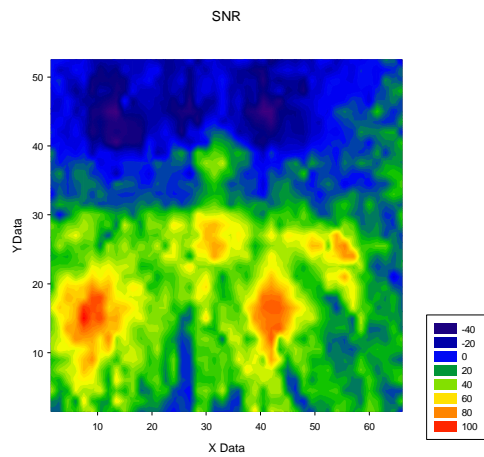


Figura 83. SNR entre las potencias útiles y las potencias I8, I12 e I14

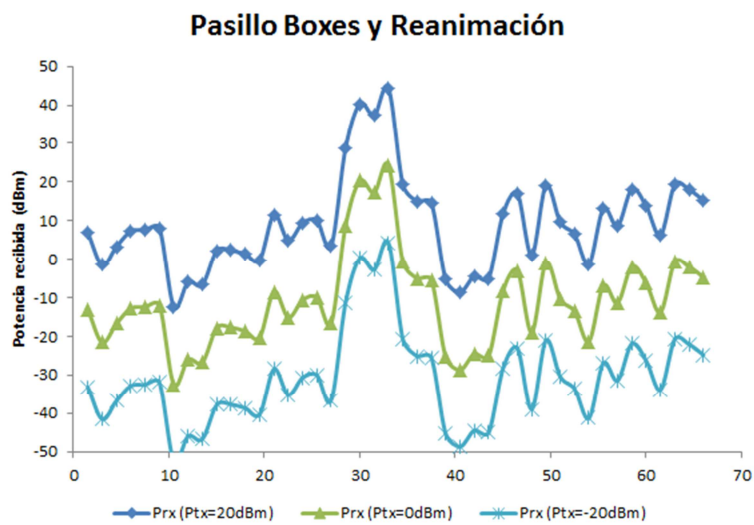


Figura 84. Radiales de P1(30,38.5,1.1) del pasillo donde se encuentran las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxe

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes, reanimación y rayos X, es decir, I2(13.2,20.8,1.1), I3(13.2,31.2,1.1), I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

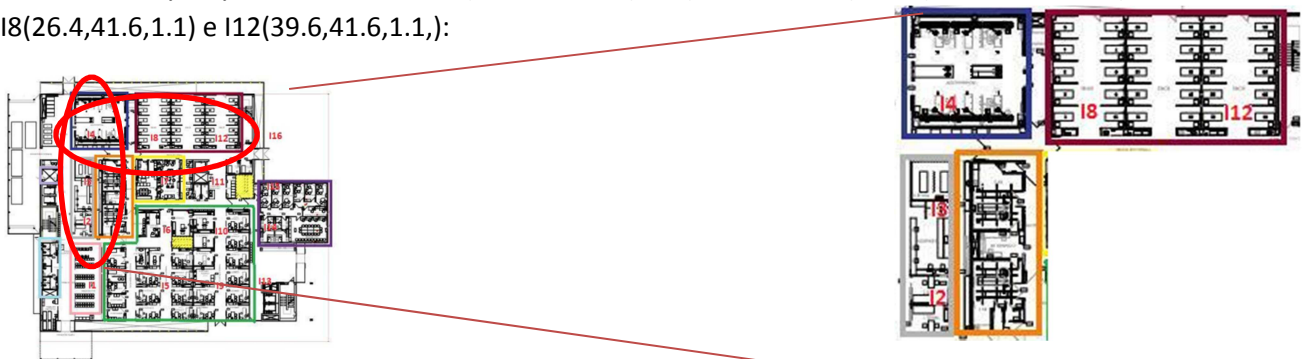


Figura 85. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I8, I12 y I14

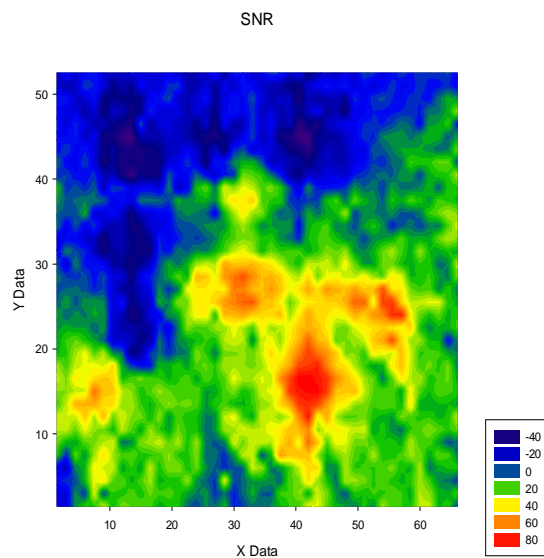


Figura 86. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14

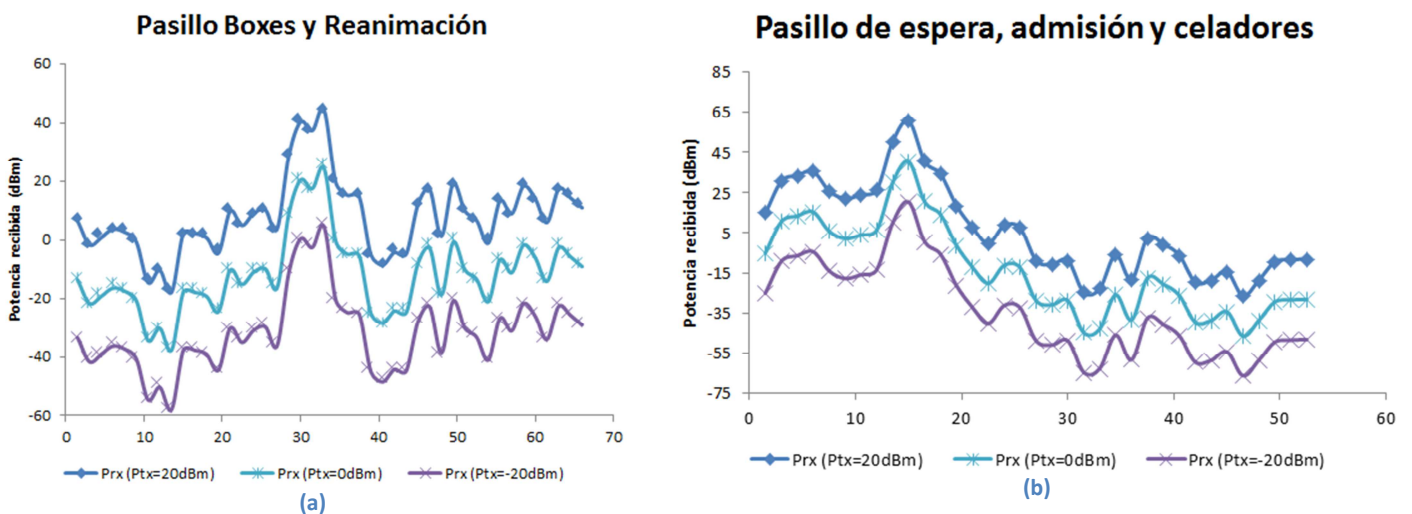


Figura 87. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas rayos X, admisión y espera, es decir, I1(13.2,10.4,1.1), I2(13.2,20.8,1.1), I3(13.2,31.2,1.1):

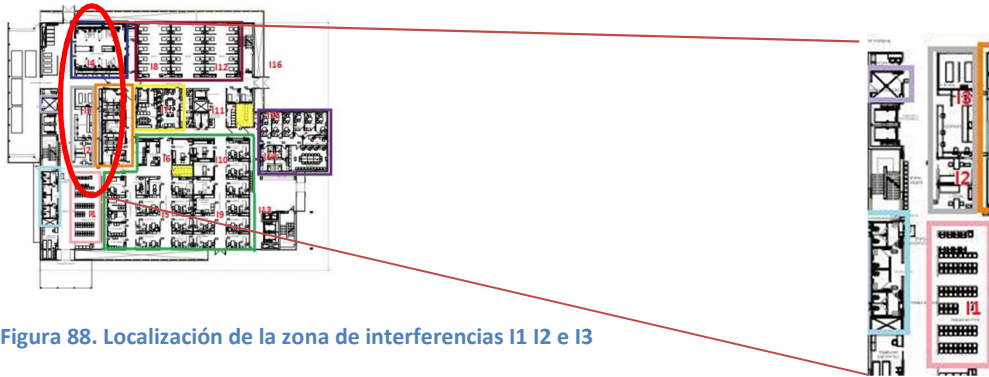


Figura 88. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3

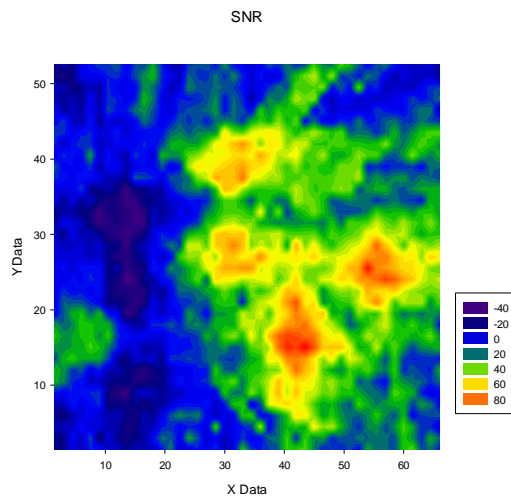


Figura 89. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3

Pasillo de espera, admisión y celadores

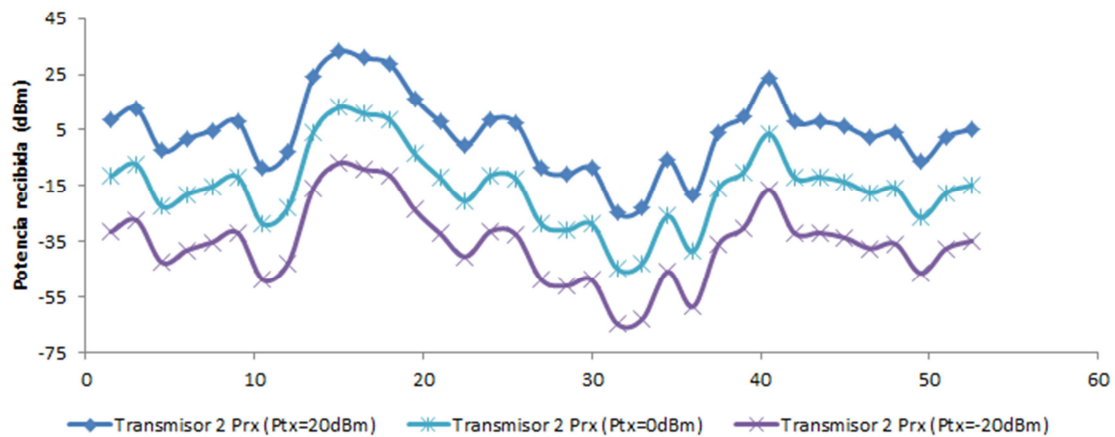


Figura 90. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de consultas y despachos, es decir, I5(26.4,10.4,1.1), I6(26.4,20.8,1.1), I9(39.6,10.4,1.1), I10(39.6,20.8,1.1), I14(52.8,20.8,1.1) e I15(52.8,31.2,1.1):

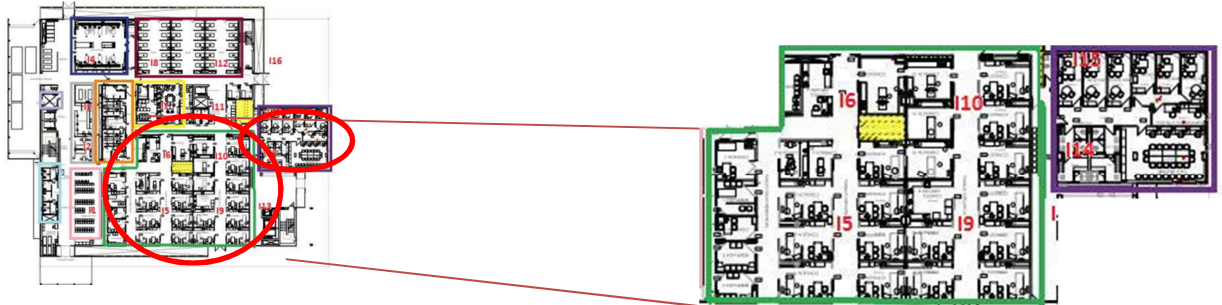


Figura 91. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

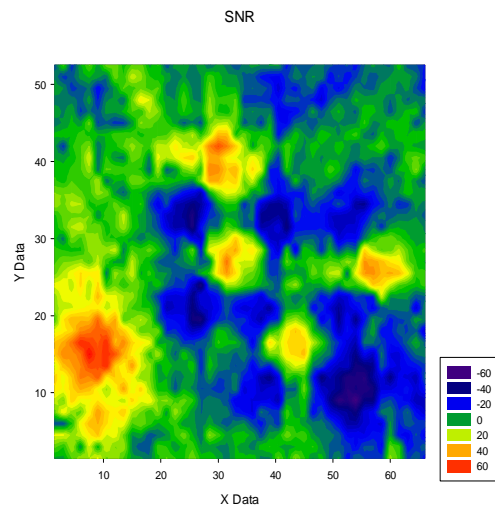


Figura 92. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

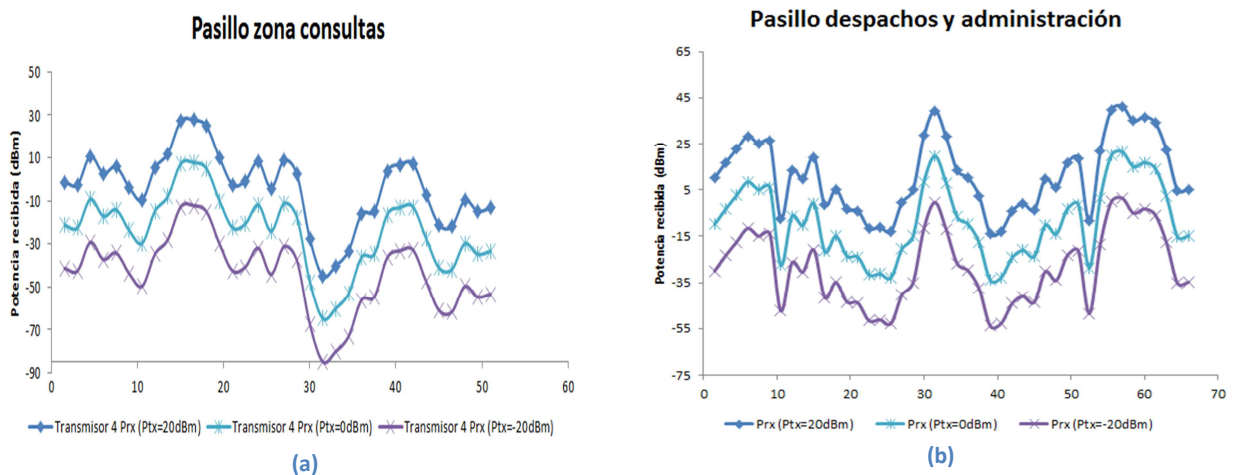


Figura 93. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

5.2. Resultados a 2,4 GHz

Se muestra a continuación la relación señal ruido que hay en el recinto cuando el sistema se ve interferido por toda la red de interferencias.

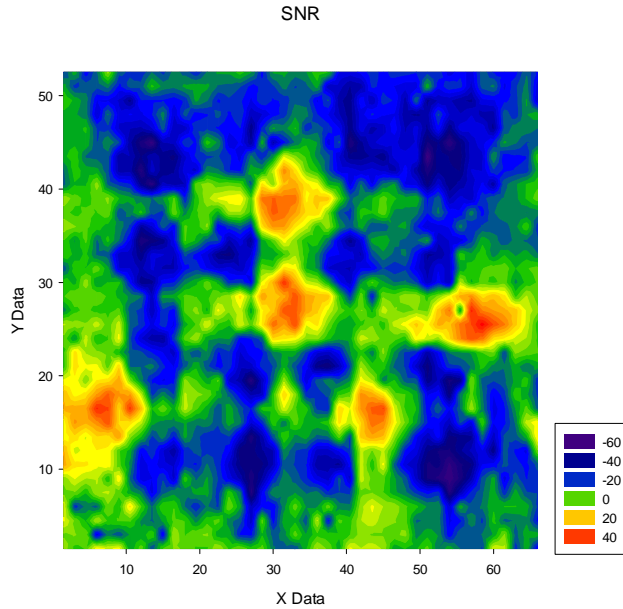


Figura 94. SNR entre las potencias útiles y las potencias interferentes

En este caso los valores máximo y mínimo son: $SNR_{min} = -2.1913\text{dB}$; $SNR_{max} = 105.4867\text{dB}$. En este caso los valores de SNR son mayores tanto para el mínimo como para el máximo.

En este caso nos encontramos con las radiales del pasillo de despachos y administración, es decir, donde está situada la antena transmisora P5.

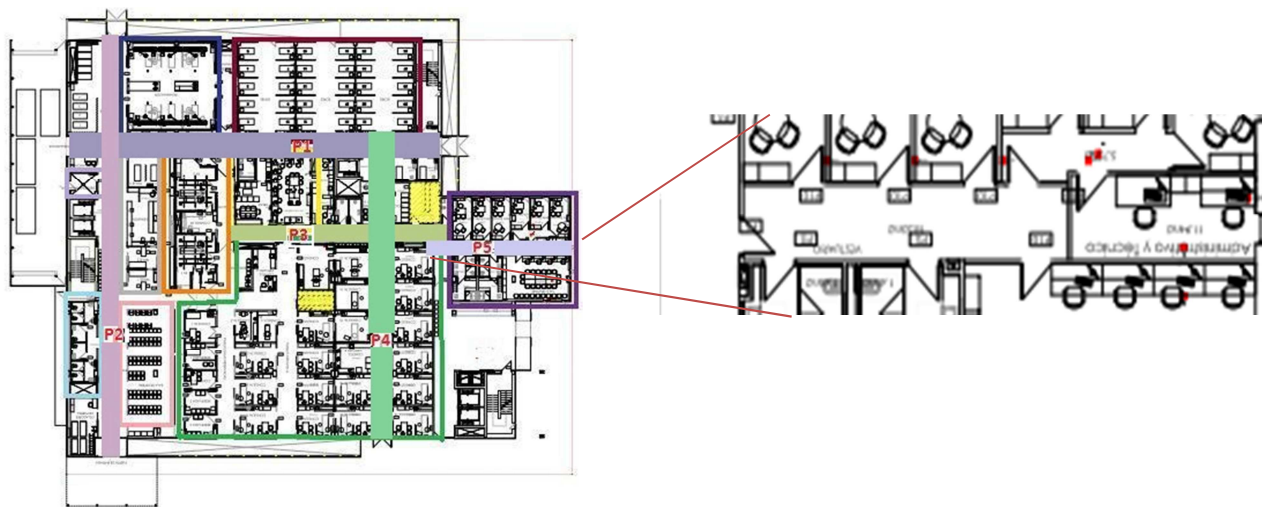


Figura 95. Zonas de estudio: Pasillo despachos y admisión

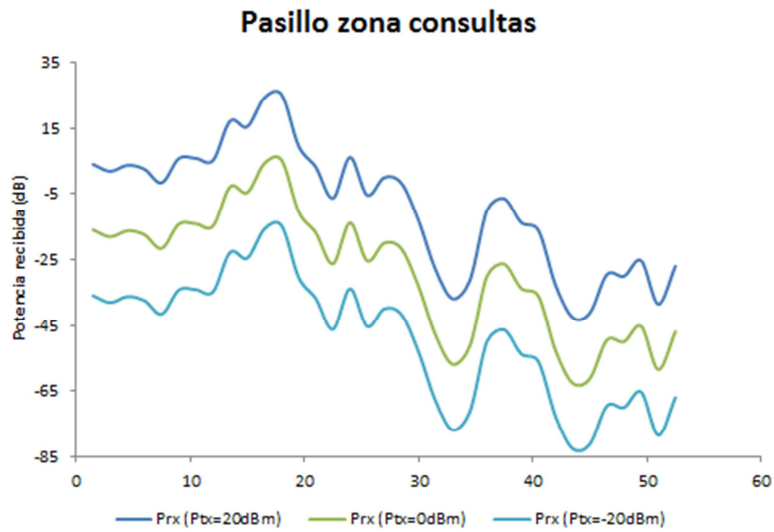


Figura 96. Radiales de P5(55,25,1.1) en el pasillo despachos y admisión

Como ocurría en casos anteriores el valor más alto no es el cercano a la antena y va fluctuando en torno a la fuente.

Los resultados que se presentan corresponden con la antena situada en el pasillo mencionado, despachos y administración, es decir, la antena P5.

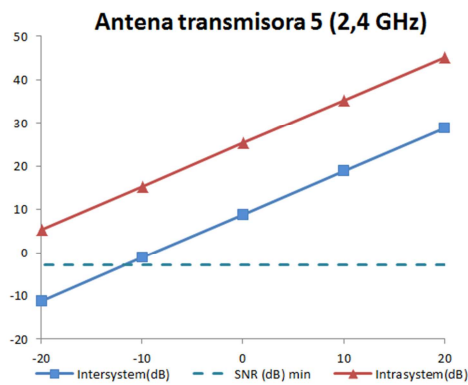


Figura 97. Relación señal ruido intersystem e intrasystem en función de la potencia en el punto P5

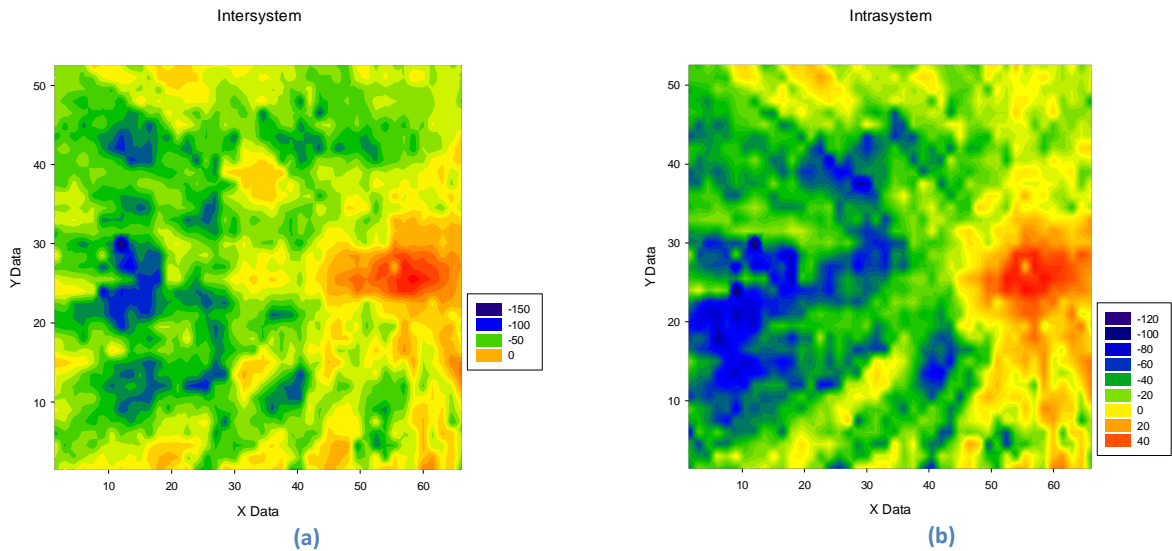


Figura 98. Mapas de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P5

Como en también se ha visto antes, el mejor caso es el del ruido intrasystem donde se tiene una SNR mayor. Lo más destacable es que para el ruido intersystem, para potencias de transmisión menores de -10 dBm, no se cumple el teorema de Shannon y por tanto no se puede asegurar una buena calidad de servicio.

Se muestra a continuación la relación señal ruido considerando el ruido AWGN con potencias de -70 dB y -110 dB.

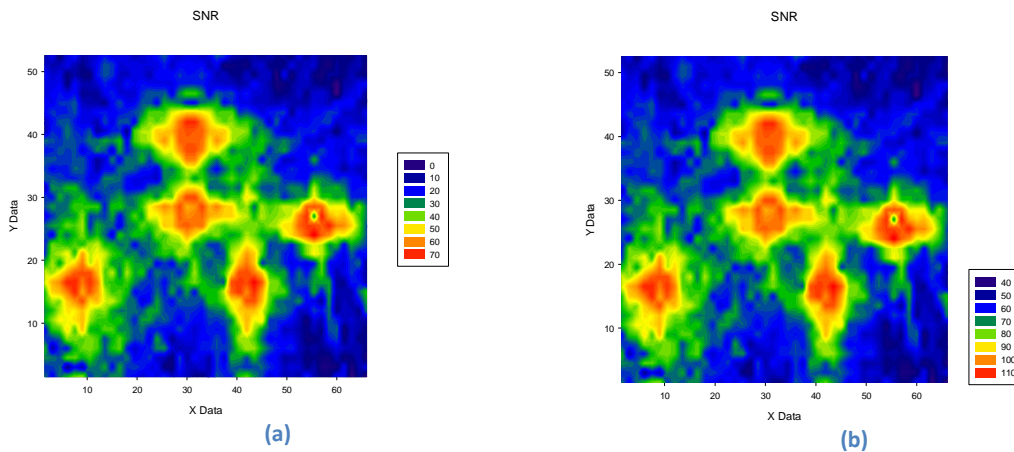


Figura 99. Mapas de ruido considerando ruido AWGN a -70 dB (a) y -110 dB (b)

A continuación se muestra la probabilidad de error para la modulación QPSK para distintos valores de N_0 y de velocidad de transmisión.

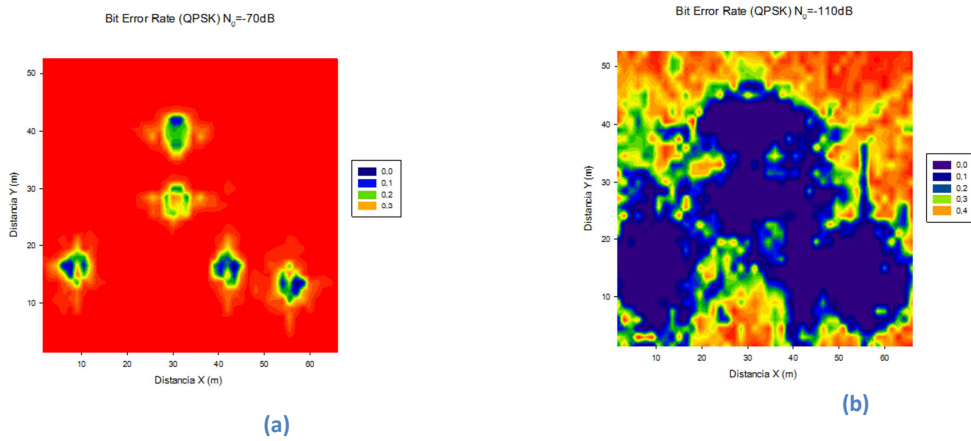


Figura 100. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 12 Mbps

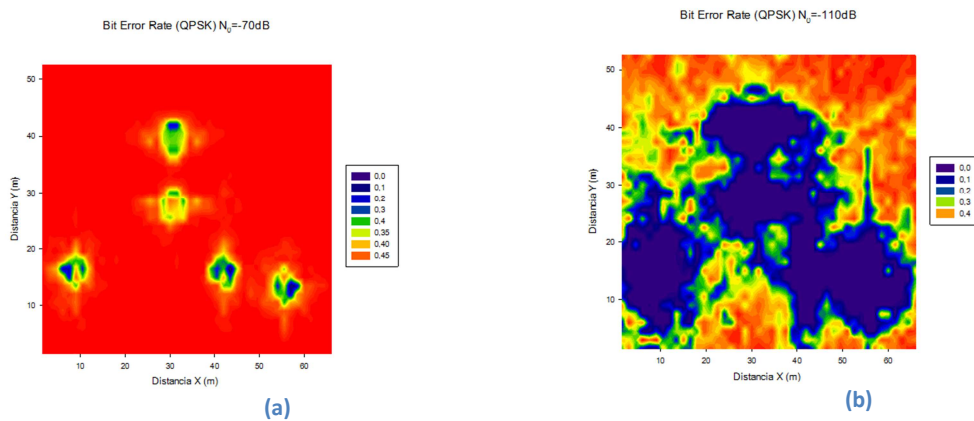


Figura 101. Error Rate para modulación QPSK para distintos valores de N_0 para velocidad de transmisión 20 Mbps

Para esta frecuencia se ve que la probabilidad de error aumenta en ambos casos, siendo mucho más elevada en casi todo el recinto para la potencia de ruido de -70 dB. Para la potencia de ruido de -110 dB, la probabilidad de error alta no abarca todo el recinto pero si una gran zona.

Se muestran los perfiles de retardo de la antena situada en P5, correspondientes a dos puntos arbitrarios del escenario, no muy cercanos a dicha antena.



Figura 102. Localización de los puntos de medida del retardo de potencia

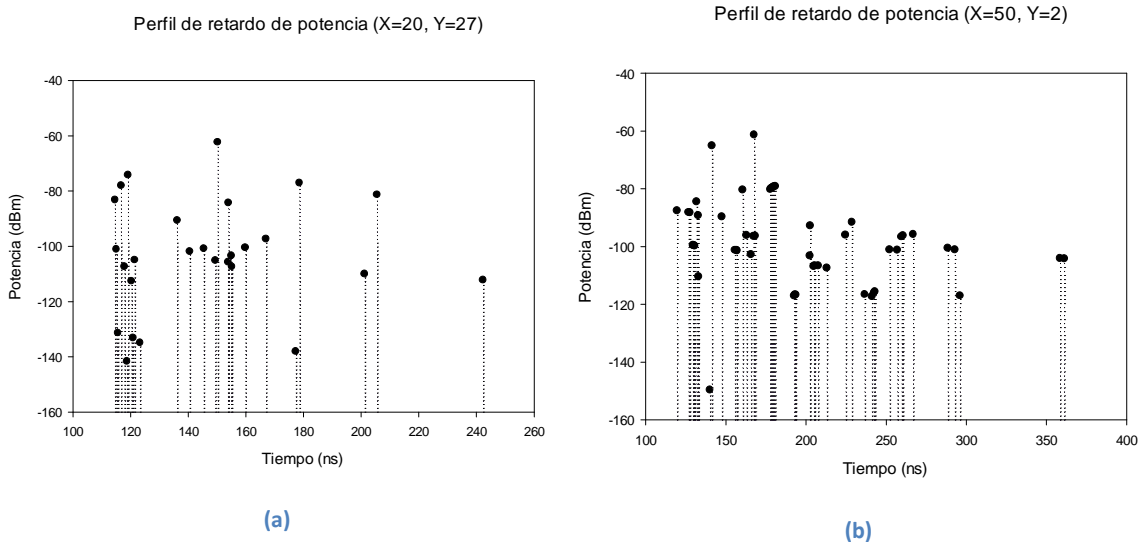


Figura 103. Perfiles de retardo de potencia de P5(55,25,1.1) medidos en distintos puntos

En este caso, como los puntos escogidos son muy lejanos a la fuente la densidad de potencia es menor y el retardo de potencia mayor.

En general se aprecian valores de potencia menores y mayor error de probabilidad.

Una vez observados los resultados del sistema global, pasamos a analizar casos particulares de las distintas interferencias que se podrían dar en el recinto, probando diversas configuraciones de las potencias interferentes.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes y reanimación, es decir, I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

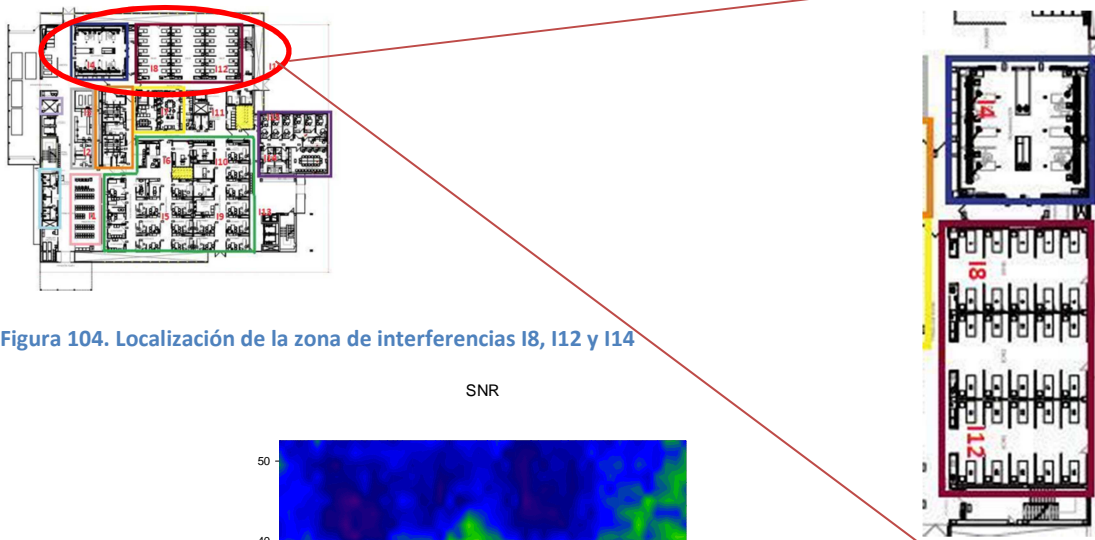


Figura 104. Localización de la zona de interferencias I8, I12 y I14

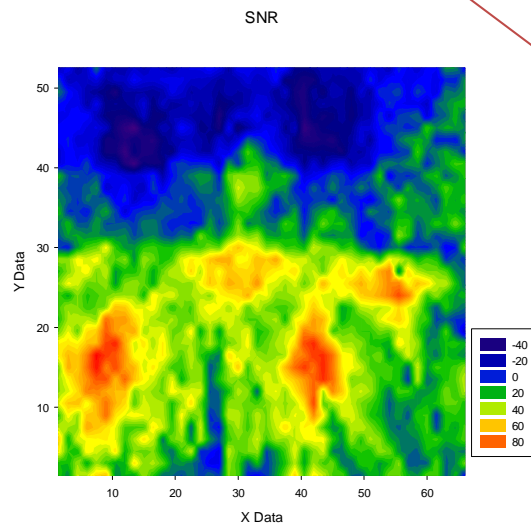


Figura 105. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14

Pasillo Boxes y Reanimación

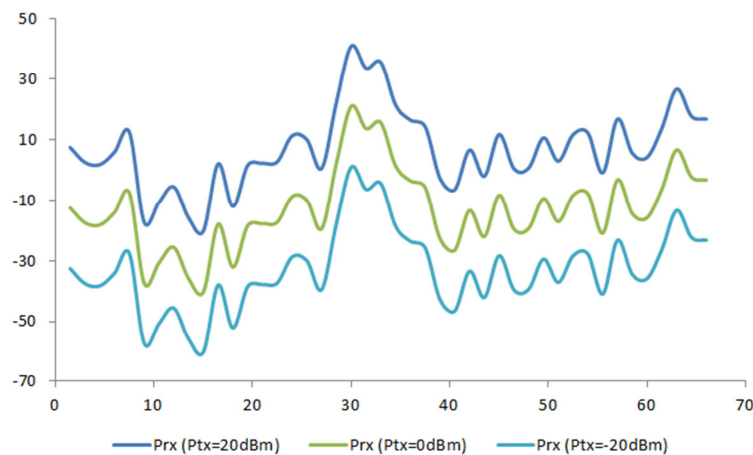


Figura 106. Radiales de P1(30,38.5,1.1) en el pasillo donde se encuentran las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de boxes, reanimación y rayos X, es decir, I2(13.2,20.8,1.1), I3(13.2,31.2,1.1), I4(13.2, 41.6, 1.1), I8(26.4,41.6,1.1) e I12(39.6,41.6,1.1):

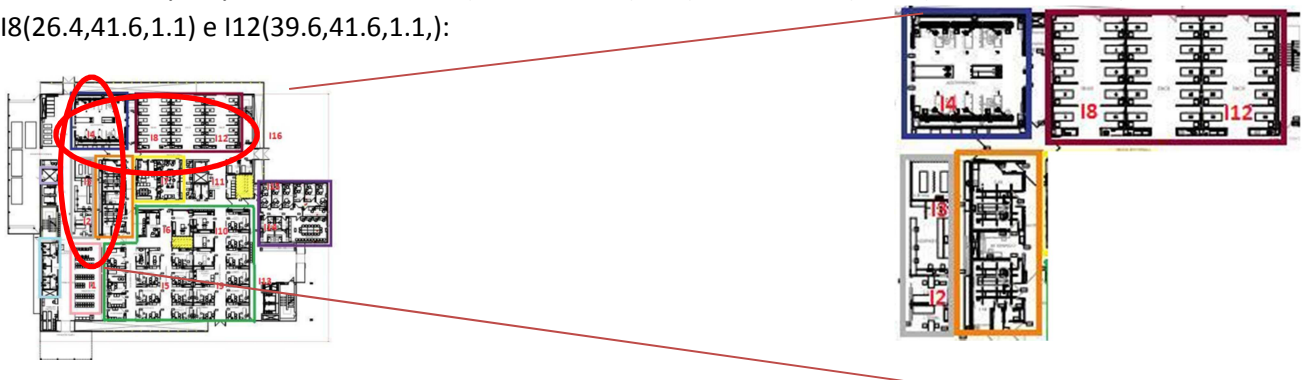


Figura 107. Localización de la zona de interferencias I2, I3, I8, I12 y I14

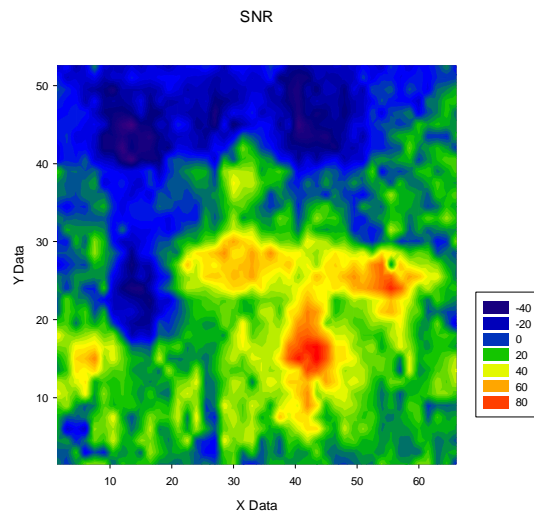


Figura 108. SNR entre las potencias útiles y las potencias I2, I3, I8, I12 e I14

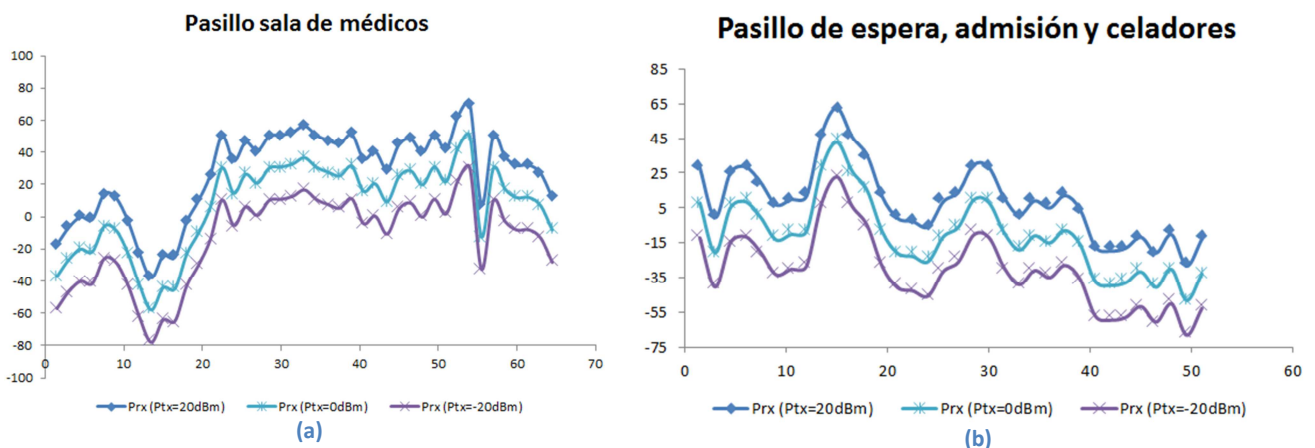


Figura 109. Radiales de P1(30,38.5,1.1) y P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas rayos X, admisión y espera, es decir, I1, I2 e I3:

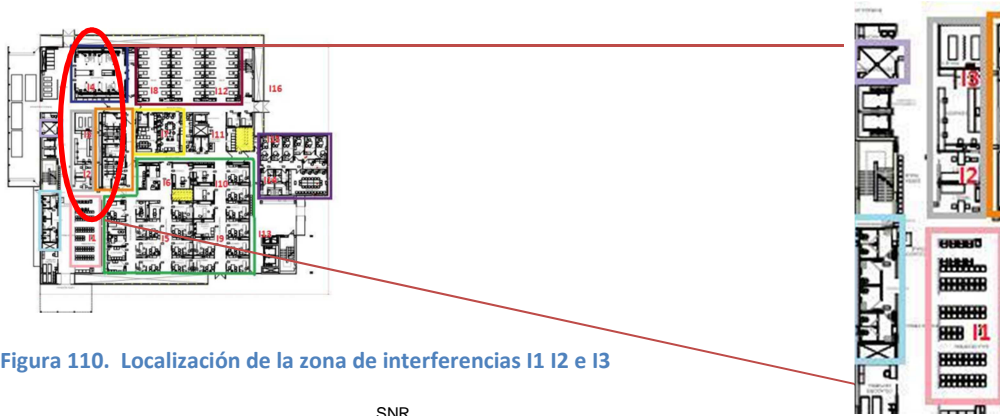


Figura 110. Localización de la zona de interferencias I1 I2 e I3

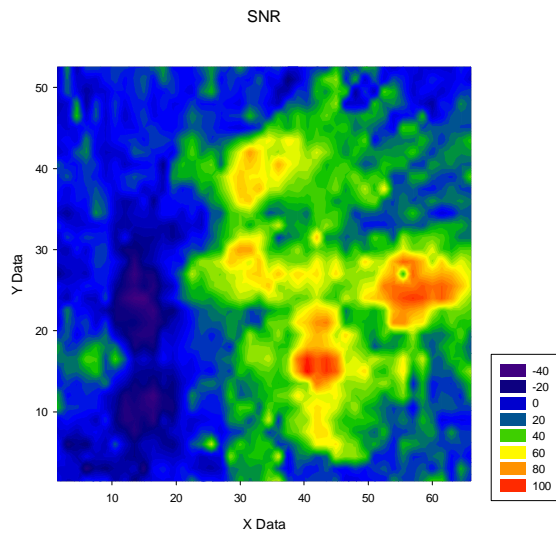


Figura 111. SNR entre las potencias útiles y las potencias I1, I2 e I3

Pasillo de espera, admisión y celadores

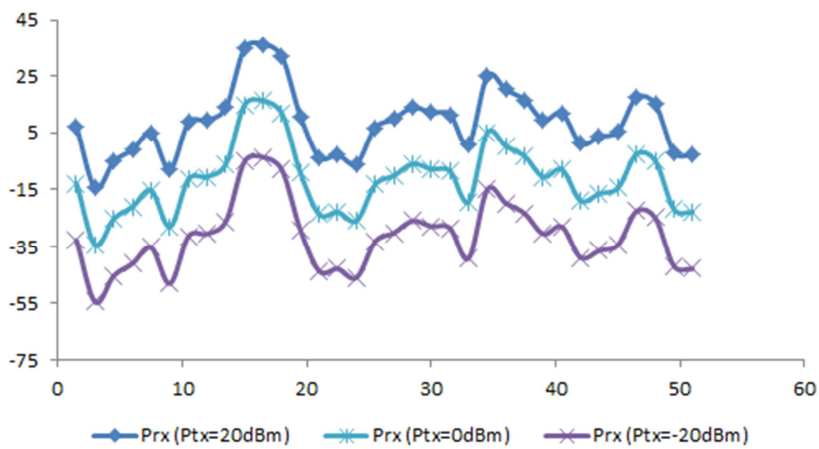


Figura 112. Radiales de P2(8,15,1.1) en los pasillos donde se encuentran las interferencias

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

Las interferencias activadas para este caso son las correspondientes a las zonas de consultas y despachos, es decir, I5(26.4,10.4,1.1), I6(26.4,20.8,1.1), I9(39.6,10.4,1.1), I10(39.6,20.8,1.1), I14(52.8,20.8,1.1) e I15(52.8,31.2,1.1):

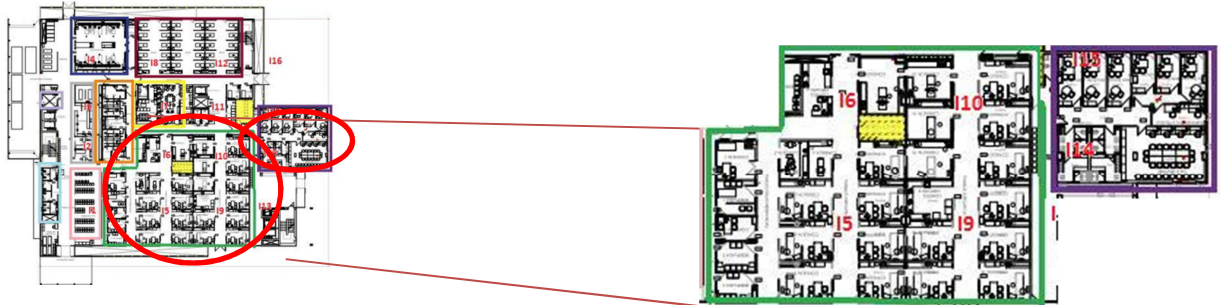


Figura 113. Localización de la zona de interferencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

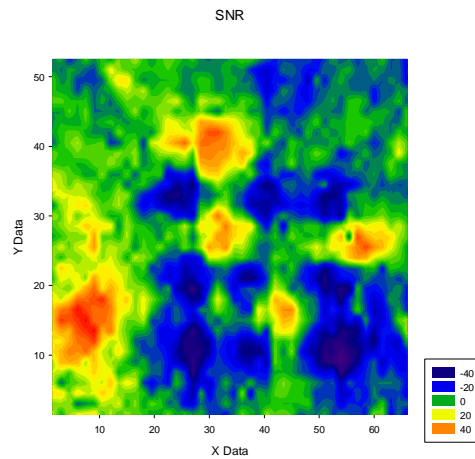


Figura 114. SNR entre las potencias útiles y las potencias I5, I6, I9, I10, I13 e 14

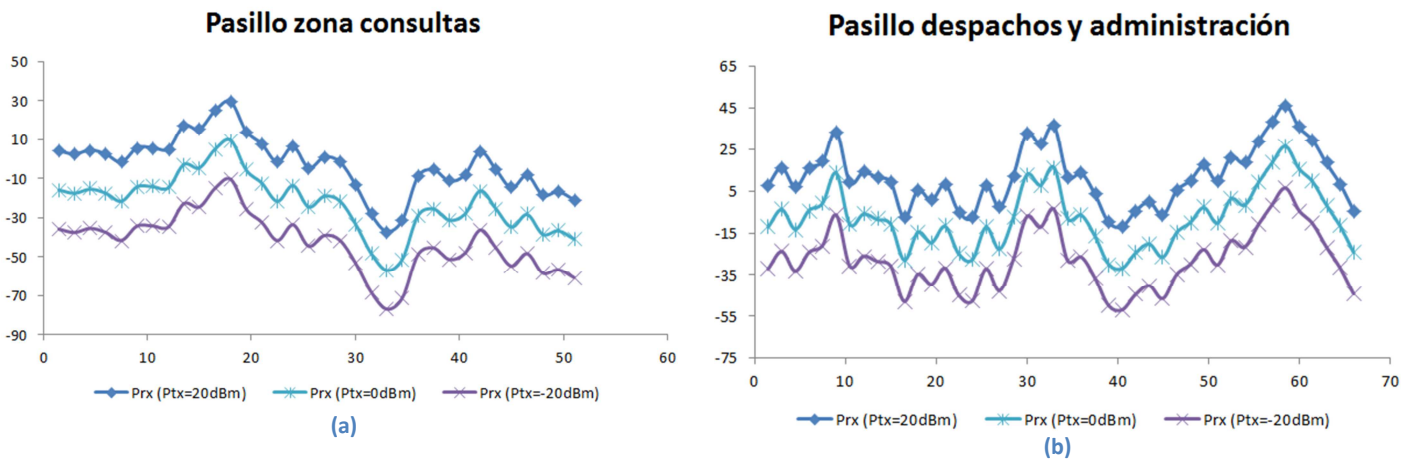


Figura 115. Radiales de P4(41.5,15,1.1) y P5(55,25,1.1) de los pasillos donde se encuentran las interferencias

5.3. Discusión de los resultados

Siguiendo el orden llevado en la exposición comentaremos previamente ciertos aspectos destacables que se han observado en las simulaciones tanto de las potencias útiles como las interferentes. Posteriormente pasaremos a analizar los resultados obtenidos.

5.3.1. Potencias útiles

En las simulaciones realizadas para evaluar el comportamiento de las denominadas potencias útiles se ha observado que:

- ✓ La cobertura que ofrece el sistema cuando emiten todas las antenas a la vez disminuye conforme aumenta la frecuencia. Por tanto el caso que más cobertura ofrece es el de 868 MHz y el que menos el de 2,4 GHz. Esto es sucede ya que conforme aumenta la frecuencia el comportamiento es más directivo.
- ✓ Evaluando individualmente, la antena correspondiente al punto P3 es la que mayor cobertura ofrece, esto es así entre otras cosas por su localización.
- ✓ Cuando emiten todas las antenas a la vez se observan más zonas en la que no alcanza la cobertura. Esto sucede porque así como se crean interferencias constructivas, también ocurren interferencias destructivas provocando que no llegue la cobertura a todas las zonas.
- ✓ Como curiosidad, destacar que cuando se evalúan individualmente, cerca del punto P5 se aprecia un pequeña zona sin cobertura para la frecuencia de 2,4 GHz

5.3.2. Potencias interferentes

- ✓ En el caso de la evaluación de todas las potencias interferentes actuando simultáneamente, se observa que no ocurre que la cobertura vaya disminuyendo conforme aumenta la frecuencia ya que para la frecuencia de 1,8 GHz se aprecia menor cobertura que para 2,4 GHz. Sí que es cierto que se recibe mayor potencia, pero ocurre que las zonas de potencia nula son mayores en 1,8 GHz que en 2,4 GHz.
- ✓ Cuando se evalúan individualmente las potencias interferentes se aprecian muchos fenómenos derivados de propagación multitrayecto. Al haber tantas potencias utilizadas como interferentes a lo largo de todo el recinto se cubren más posibilidades y se aprecian distintos efectos causados por el comportamiento de la interacción de los rayos con el entorno.

5.3.3. Resultados

Finalmente pasamos a comentar todo lo que se ha podido observar a la hora de obtener los resultados del estudio realizado con las simulaciones hechas.

868 MHz

- ✓ En la evaluación de la relación señal ruido en entre todo el sistema de comunicación y todo el sistema interferente, tenemos que $SNR_{min}=-60,1841dB$; $SNR_{max}=43,1557dB$. Es decir, hay zonas con buena SNR y otras con una SNR no válida para un buen sistema de comunicación. Estos mapas de ruido son muy similares a los de cobertura.
- ✓ En el estudio de las radiales, se observa que la potencia recibida no necesariamente disminuye conforme se aleja de la fuente sino que oscila. Esto es debido a la complejidad del entorno de estudio.
- ✓ En la evaluación de cómo se comporta el sistema ante el ruido introducido por agentes externos al sistema frente al resto de componentes del propio sistema, se ve que afecta menos el ruido causado por el propio sistema que el de fuera. También se comprueba que para ambos casos se cumple la condición que del teorema de Shannon para que haya una correcta comunicación.
- ✓ Para el ruido AWGN considerado, la SNR obtenida es muy buena.
- ✓ La probabilidad de error es casi nula cuando se considera una potencia de ruido de -110 dB. Para el caso de la potencia de ruido de -70 dB se ve que es sistema es más frágil en el caso de la velocidad de transmisión de 250 Kbps.
- ✓ Los perfiles de retardo de potencia dependen en gran medida de dónde sean estudiados. En este caso para la figura 57 (b) se ha escogido un punto más cercano, por ello el retardo es menor y la densidad de potencia mayor que en el caso de la figura 57 (a).
- ✓ Caso 1: En los mapas de ruido se aprecia que donde se sitúan las interferencias la relación señal ruido muy baja. El mismo hecho se comprueba en la gráfica de las radiales, de todas ellas la que menor interferencia genera es la I8.
- ✓ Caso 2: Al igual que en el caso anterior, el mapa de ruido muestra que donde están las interferencias la SNR empeora. En las gráficas de las radiales se aprecia para la antena P1 se ve que la potencia aumenta y disminuye en torno a la fuente, mientras que para la antena P4 disminuye conforme se aleja de la misma.
- ✓ Caso 3: En este caso, aunque el mapa de ruido cumple los criterios de los casos anteriores, se ve como la SNR no es tan baja en las zonas donde se

- sitúan las interferencias. La gráfica de la radial, por su parte, sí que muestra que conforme se aleja de la antena la potencia recibida es menor.
- ✓ Caso 4: A diferencia del resto, en el mapa de ruido se ve que estas interferencias son las que menos afectan. Las radiales muestran dos fenómenos destacables, por un lado para P4 existen puntos no cercanos a la antena donde hay mayor SNR que en las cercanías. Por otro para P5, hacia un lado se ve una clara disminución de la potencia y hacia el otro un aumento.

1,8 GHz

- ✓ El estudio de la relación señal ruido de todo el sistema de comunicación afectado por todo el sistema interferente simultáneamente, tiene como resultados una $SNR_{min}=-62,5292dB$ y $SNR_{max}=37,5306dB$. Estos valores son peores que los obtenidos en la frecuencia anterior.
- ✓ Las gráficas de las radiales P2 muestran una tendencia descendente conforme se alejan de la fuente, mientras que para P3 tiene un comportamiento más variable y con cambios más drásticos.
- ✓ Como en la frecuencia anterior, el ruido intersystem afecta más que el intrasystem. También se aprecia que la SNR es mejor para P2 que para P3. En ambos casos la SNR está por encima del mínimo requerido.
- ✓ Al igual que en el caso de 868 MHz, la SNR para un ruido AWGN muy buena relación señal ruido, considerando los niveles supuestos.
- ✓ También sucede que la probabilidad de error es casi nula para una potencia de ruido de -110 dB. Sin embargo, para la potencia de -70 dB aumenta considerablemente para ambas velocidades de transmisión, siendo siempre inferior al 50%
- ✓ Los puntos escogidos para evaluar los perfiles de retardo de potencia, son más cercanos a la antena transmisora, por ello el retardo es menor y la densidad de potencia mayor.
- ✓ Caso 1: El mapa de ruido muestra resultados similares a los de 868 MHz pero menor SNR. Por su parte en las gráficas de las radiales se nota la bajada de potencia en torno a la posición de las interferencias, siendo en la I8 es donde menos baja y en I12 donde más baja.
- ✓ Caso 2: Volvemos a ver en el mapa de ruido como afectan las interferencias produciendo una SNR muy baja. Por su parte, en las gráficas de las radiales se aprecia la antena P1 se ve más afectada por I2, I3 e I4 que entran dentro de su área de influencia.
- ✓ Caso 3: El mapa de ruido muestra que sucede lo mismo que para la frecuencia de 868 MHz. En este caso, las radiales dejan ver que el mayor valor de potencia no se da en torno a la antena.
- ✓ Caso 4: Al igual que la frecuencia anteriormente estudiada, en el mapa de ruido se ve que estas interferencias son las que menos afectan. De las radiales podemos deducir que las interferencias que más afectan a ambas antenas son I14 e I15.

2,4 GHz

- ✓ Al contrario que en la frecuencia de 1,8 GHz, en este caso la evaluación de la relación señal ruido entre el sistema de comunicaciones y el sistema interferente ofrece valores de $SNR_{min}=-2.1913dB$; $SNR_{max}=105.4867dB$ que son sustancialmente mayores que en los otros dos casos.
- ✓ Por su parte la gráfica de las radiales muestra que la intensidad potencia varía en torno a la antena, es decir, no solo disminuye conforme se aleja, sino que fluctúa.
- ✓ En la evaluación del ruido intersystem e intrasystem, sigue sucediendo que ofrece mejores valores el ruido intrasystem. De hecho en este caso se observa que para el ruido intersystem, para potencias de transmisión menores de -10 dBm no se cumple el teorema de Shannon.
- ✓ El estudio de la SNR considerando un ruido AWGN ofrece muy buena relación señal ruido, como en casos anteriores.
- ✓ La probabilidad de error sí que varía en este caso, ya que se eleva bastante para la potencia de ruido de -110 dB. Así mismo, para -70 dB, se ve que aunque no supere el 50%, es muy elevada en todo el recinto menos en las zonas donde se sitúan las antenas transmisoras.
- ✓ La evaluación de los perfiles de retardo de potencia se ha realizado en puntos más lejanos a la antena, por ello el retardo es mayor y la densidad de potencia menor.
- ✓ Caso 1: En el mapa de ruido volvemos a ver que donde más baja es la SNR es en la zona de las interferencias. En las gráficas de las radiales se observan comportamientos similares a los casos de las frecuencias anteriores.
- ✓ Caso 2: Tanto en el mapa de ruido como en las radiales se observan comportamientos similares a los de la frecuencia de 1,8 GHz anteriormente estudiada, solo que los valores son mayores para este caso.
- ✓ Caso 3: Los resultados que muestran el mapa de ruido son también similares a los de 1,8 GHz, pero con mayor valor de la SNR. A su vez las radiales también muestran un comportamiento similar a la frecuencia anterior.
- ✓ Caso 4: Volvemos a apreciar mejoría en la SNR respecto a otras configuraciones de interferencias, pudiendo decir que son las que menos afectan. Al igual que en el caso de 1,8 GHz, para P4 existen puntos no cercanos a la antena donde hay mayor SNR por el contrario para P5 en la zona cercana a la antena se ve un disminución drástica de la SNR hacia un lado y un aumento hacia el otro.

En general se ve que se cumplen las pautas similares para las distintas frecuencias solo que algunos fenómenos de propagación se ven más marcados en unas frecuencias que en otras.

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

Gracias al estudio realizado se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- ✓ Se observa que para ofrecer una buena cobertura no resulta necesario disponer de cinco antenas transmisoras. Es más eficiente estudiar cuáles son las que mejores localizaciones en base al tamaño y características constructivas.
- ✓ El diseño dispuesto de cinco antenas logra que se obtenga mayor potencia en algunos puntos, sin embargo hace que la cobertura total del recinto sea menor.
- ✓ La relación señal ruido cuando se consideran las potencias interferentes como ruido, es muy buena, por lo que se puede decir que una red de sensores (como podría ser la red de interferencias simulada) no produciría la degradación de la calidad del recinto.
- ✓ El recinto estudiado es efectivamente muy complejo y se observan consecuencias de la propagación multitrayecto muy curiosas como pueda ser el hecho de que cerca de zonas donde hay buena cobertura haya otra donde haya cobertura casi nula.
- ✓ Al aumentar la frecuencia, no necesariamente tiene que disminuir la cobertura y empeorar la relación señal ruido, ya que como se ha comprobado la mejor relación señal ruido la hemos obtenido para el caso de la frecuencia 2,4GHz.
- ✓ De las casuísticas estudiadas, se ha comprobado que las interferencias que menor problema originan son las relativas al caso 4, es decir, cuando se consideran las interferencias relativas a la zona de consultas y despacho.
- ✓ Las normas de compatibilidad electromagnética establecen ciertos criterios que se deben cumplir en los entornos sanitarios, pero están más enfocadas hacia los dispositivos, tanto de comunicación como médicos y los rangos de niveles de emisión pueden que no pueden rebasar. Con el estudio se podría anticipar si se cumplirían considerando las características de emisión de los equipos médicos.
- ✓ A lo largo del estudio se indican cuáles han de ser los niveles mínimos de SNR para que se establezca una buena comunicación, ello, junto con todo el resto del estudio ayuda a elegir los dispositivos, médicos y de comunicaciones, adecuados que hagan que se cumplan todos los requerimientos.

6.2. Líneas futuras

El presente proyecto muestra un estudio completo de un entorno muy complejo como es el recinto de urgencias de un hospital. No obstante se puede mejorar con más información que permita un análisis más exhaustivo y ofrezca unos resultados más exactos. Las posibles líneas futuras del proyecto podrían ser:

- ✓ Realización del mismo estudio introduciendo cambios:
 - Incluyendo personas. Gracias a ello se conseguiría un estudio más realista y se podrían contemplar variables como la absorción de la energía radiada en función del número de personas del recinto, o incluso los efectos que dichas radiaciones tienen en las personas.
 - Incluyendo todos los objetos que componen el escenario. De esta forma el entorno se volvería todavía más complejo y se contemplarían más factores que permitieran un diseño más preciso.
 - Considerando las distintas tecnologías de comunicación, distintas frecuencias.
 - Realización del estudio cambiando la configuración propuesta.
- ✓ Extrapolación del estudio a otros entornos similares.
- ✓ Creación de un modelo de propagación específico para éste tipo de entornos que considere las particularidades que tiene como pueden ser los dispositivos médicos que radian energía en forma de ondas electromagnéticas.
- ✓ Implantación de sistemas de comunicación con la tecnología Li-Fi actualmente en desarrollo.

Bibliografía

- 99, C. (s.f.). *Propagación Básica de las Ondas Electromagnéticas*. Obtenido de www.cartagena99.com/recursos/fisica/.../ondas_electromagneticas.pd
- COMMSCOPE. (s.f.). Obtenido de Infraestructura de redes del área de la Salud: Soluciones para hoy y para el futuro: www.commscope.com
- Dishongh, T., & McGrath, M. (2010). *Wireless Sensor Networks for Healthcare Applications*. Norwood: Artech House.
- Erasmus, L., Hurter, D., Naudé, M., Kritzing, H., & Acho, S. (August 2004). A short overview of MRI artefacts. *SA JOURNAL OF RADIOLOGY*.
- Esparza Alfaro, F. (2009). *Algoritmo de trazado de rayos en tres dimensiones para la caracterización de entornos interiores*. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Grupo NAP Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. (2006). *Elementos Técnicos para la Gestión de Frecuencias en Espacios Complejos: Entornos Sanitarios*. MADRID: COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN.
- Hämäläinen, J. (18.1.2008). *Cellular Network Planning and Optimization Part V: GSM*. Helsinki: Helsinki University of technology.
- Lamey, M., Burke, B., Blosser, E., Rathee, S., De Zanche, N., & Fallone, B. (2010). Radio frequency shielding for a linac-MRI system. *IOP PUBLISHING*.
- Lopez Iturri, P., Nazábal, J., Azpilicueta, L., Rodriguez, P., Beruete, M., Fernandez-Valdivielso, C., y otros. (2012). Impact of High Power Interference Sources in Planning and Deployment of Wireless Sensor Networks and Devices in the 2.4 GHz Frequency Band in Heterogeneous Environments. *Sensors 2012, 12, 15689-15708*.
- Lopez Iturri, P., Nazábal, J., Azpilicueta, L., Rodriguez, P., Beruete, M., Fernandez-Valdivielso, C., y otros. (2014). Analysis of Radio Wave Propagation for ISM 2.4 GHz Wireless Sensor Networks in Inhomogeneous Vegetation Environments. *Sensors 2014, 14, 23650-23672*.
- Lopez Iturri, P., Nazábal, J., Azpilicueta, L., Rodriguez, P., Beruete, M., Fernandez-Valdivielso, C., y otros. (2015). Analysis of Wireless Sensor Network Topology and Estimation of Optimal Network Deployment by Deterministic Radio Channel Characterization. *Sensors 2014, 14, 23650-23672*.
- (s.f.). *Modelos de Propagación en Interiores (Cap.6) Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores*.
- (s.f.). *Propagación de Ondas Electromagnéticas (Cap.1)*.

(s.f.). *Propagación de Señales*. Puebla: Universidad de las Americas.

REAL DECRETO 1580/2006, de 22 de diciembre, por el que se regula la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos. (17 de Enero de 2007).
B.O.E.

(s.f.). *Técnica del Trazado de Rayos (Cap. 7) Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores*).

Tremola, C., Azpurúa, M., & Páez, E. (Enero-Abril 2011). *Evaluación de la Compatibilidad Electromagnética en Ambientes Hospitalarios*. Baruta (Estado de Miranda) VENEZUELA.

Wagemakers, A., & Ibarz, B. (2007). *Modelos de Propagación electromagnética. Propagación en entorno urbano*.

ANEXOS

En este apartado se mostrarán partes que no se han incluido en la memoria con el fin de no hacer la lectura tan tediosa.

1. Normativa

Se ha mencionado diversas normas en el apartado 3.3.5., por hacer referencia a ellas se mostrarán los links a páginas donde se pueden encontrar dichas normas o resúmenes sobre ellas. Se muestran enlaces a normas sobre la compatibilidad electromagnética en Europa y España.

1.1. Relativa a la compatibilidad electromagnética

UNE-EN 60601-1-2

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0045581#.VTjlhSHtmkp>

UNE-EN 55011

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0046988#.VTjlqiHtmko>

EN 302 195-1

http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302100_302199/30219501/01.01.01_60/en_30219501v010101p.pdf

EN 301 839-1

http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/30183901/01.03.01_60/en_30183901v010301p.pdf

1.2. Relativa a los equipos de comunicaciones y productos sanitarios

RD1950/1995

<http://www.boe.es/boe/dias/1995/12/28/pdfs/A37334-37335.pdf>

RD138/1989

<http://www.boe.es/boe/dias/1989/02/09/pdfs/A03946-03947.pdf>

UNE-EN 55011-1999

<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0011486#.VTjJQCHtmko>

RD 414/1996

<http://www.boe.es/boe/dias/1996/04/24/pdfs/A14670-14702.pdf>

2. Más resultados y planos

2.1. Resultados de simulaciones de potencias útiles

868 MHz

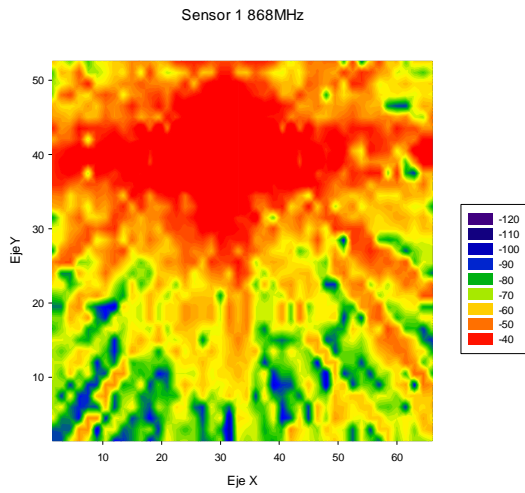


Figura 116. Antena P1
Sensor 2 868MHz

Figura 116. Mapa de cobertura de la antena transmisora P1

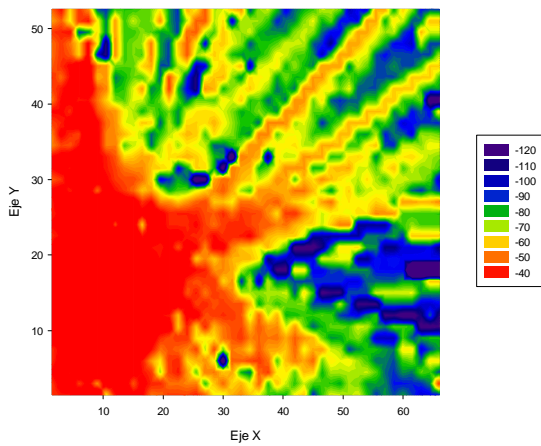


Figura 117. Antena P2
Sensor 3 868 MHz

Figura 117. Mapa de cobertura de la antena transmisora P2

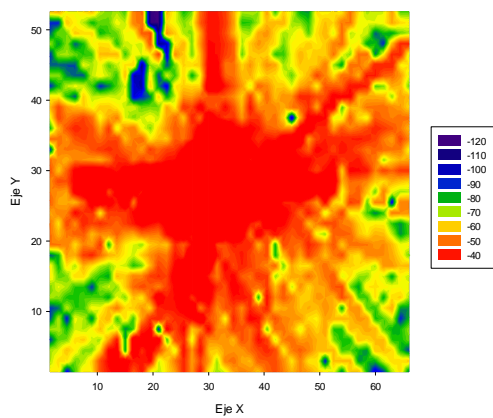


Figura 118. Antena P3

Figura 118. Mapa de cobertura de la antena transmisora P3

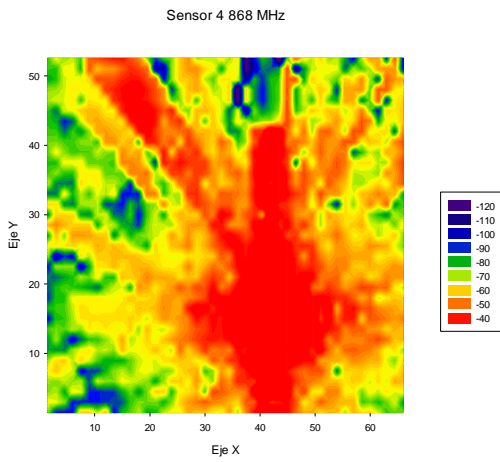


Figura 119. Antena P4
Sensor 5 868 MHz

Figura 119. Mapa de cobertura de la antena transmisora P4

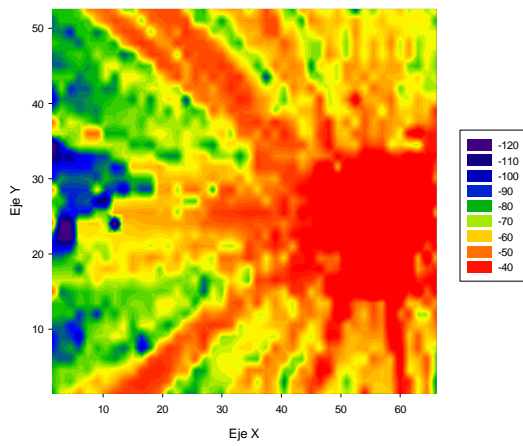


Figura 120. Antena P5

Figura 120. Mapa de cobertura de la antena transmisora P5

1,8 GHz

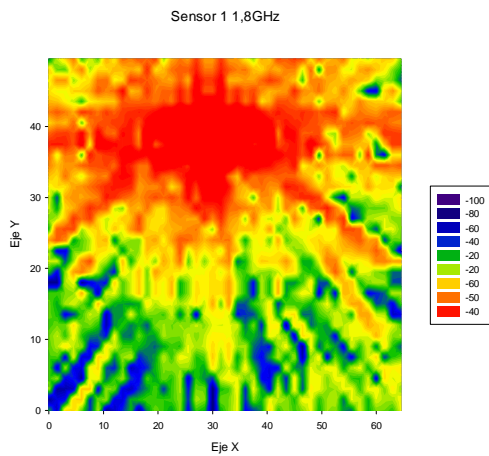


Figura 121. Antena P1

Figura 121. Mapa de cobertura de la antena transmisora P1

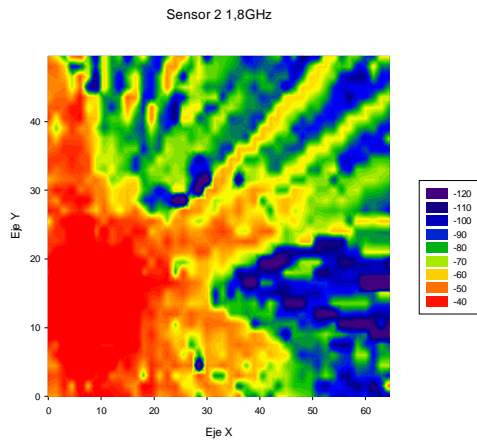


Figura 122. Antena P2
Sensor 3 1,8GHz

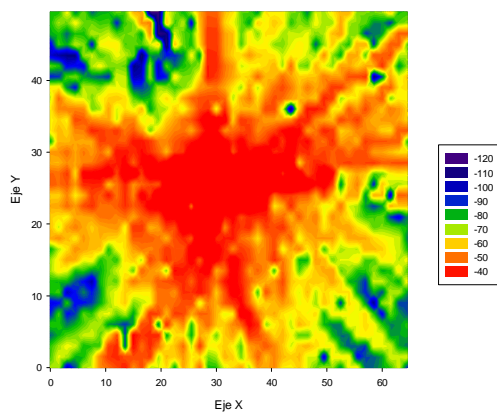


Figura 123. Antena P3

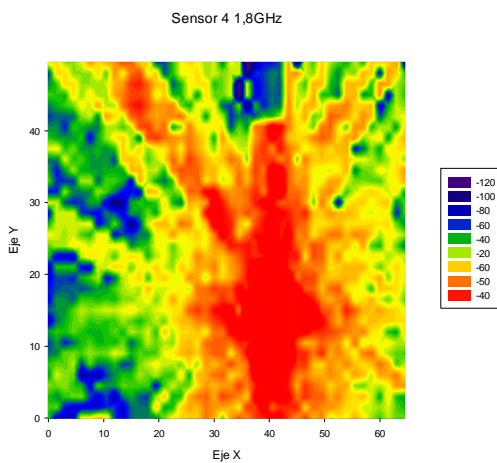


Figura 124. Antena P4

Figura 122. Mapa de cobertura de la antena transmisora P2

Figura 123. Mapa de cobertura de la antena transmisora P3

Figura 124. Mapa de cobertura de la antena transmisora P4

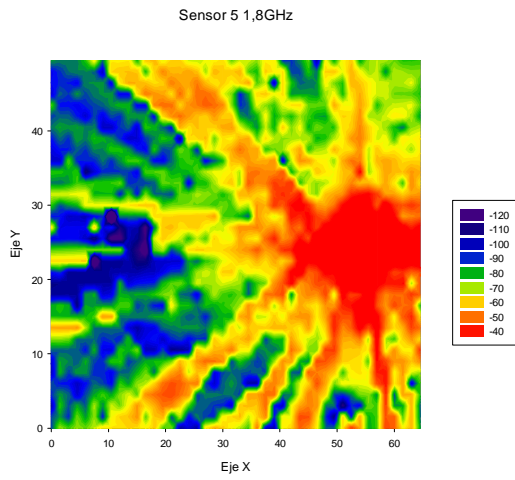


Figura 125. Antena P5

Figura 125. Mapa de cobertura de la antena transmisora P5

2,4 GHz

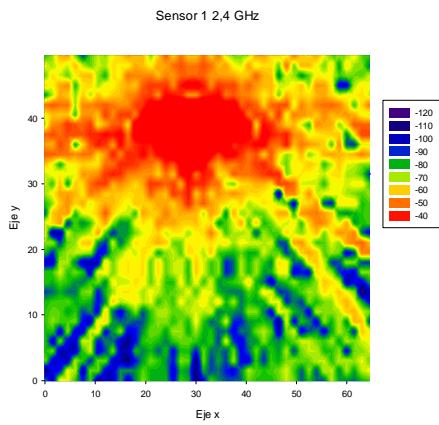


Figura 126. Antena P1

Figura 126. Mapa de cobertura de la antena transmisora P1

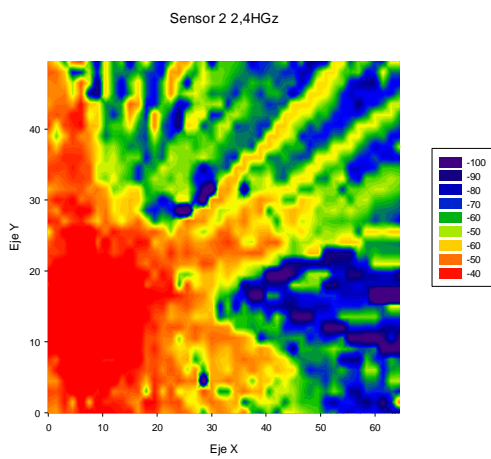


Figura 127. Antena P2

Figura 127. Mapa de cobertura de la antena transmisora P2

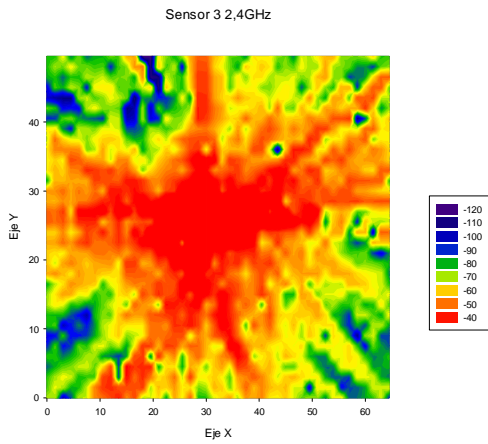


Figura 128. Mapa de cobertura de la antena transmisora P3

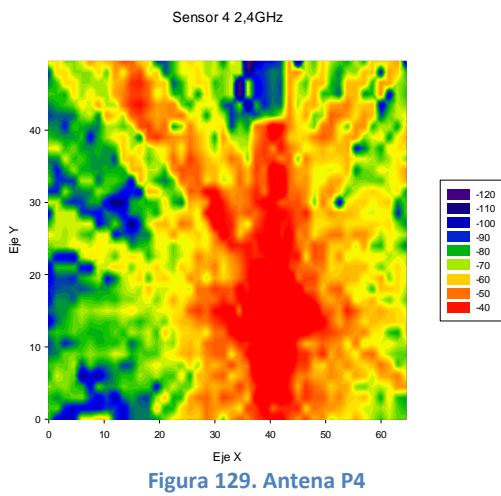


Figura 129. Mapa de cobertura de la antena transmisora P4

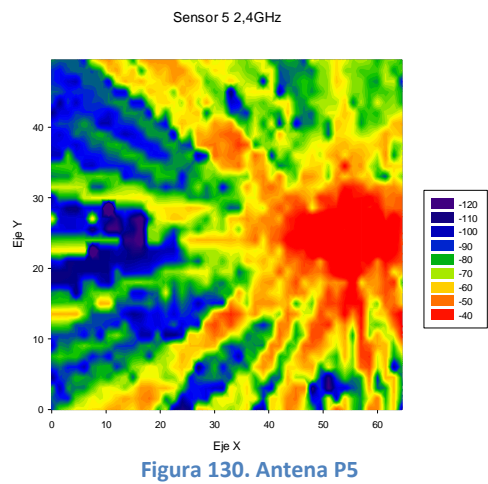


Figura 130. Mapa de cobertura de la antena transmisora P5

2.2. Resultados de simulaciones de potencias interferentes

868 MHz

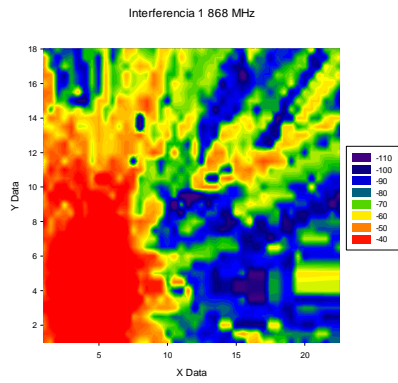


Figura 131. Interferencia I1

Figura 131. Mapa de cobertura de la interferencia I1

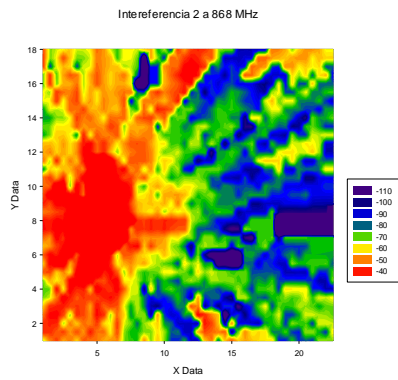


Figura 132. Interferencia I2

Figura 132. Mapa de cobertura de la interferencia I2

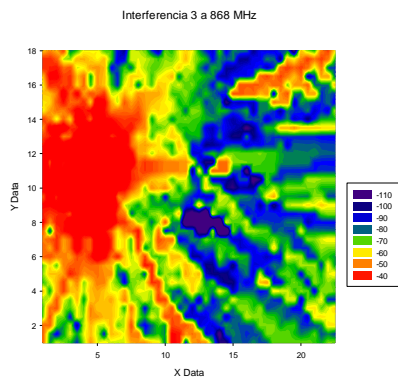


Figura 133. Interferencia I3

Figura 133. Mapa de cobertura de la interferencia I3

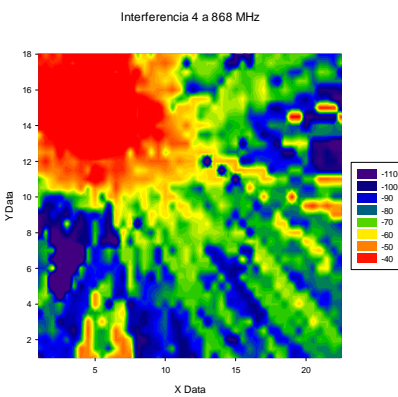


Figura 134. Interferencia I4

Figura 134. Mapa de cobertura de la interferencia I4

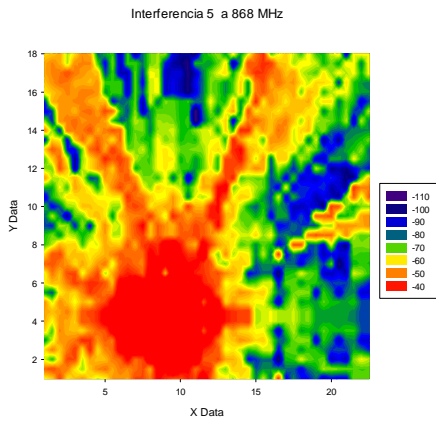


Figura 135. Interferencia I5

Figura 135. Mapa de cobertura de la interferencia I5

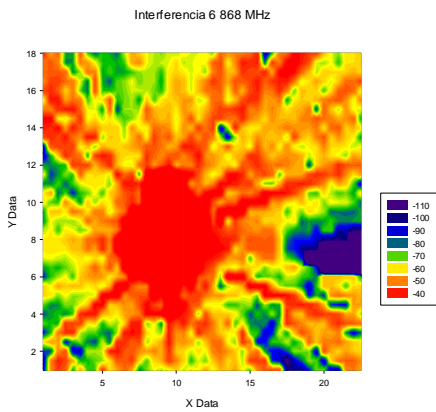


Figura 136. Interferencia I6

Figura 136. Mapa de cobertura de la interferencia I6

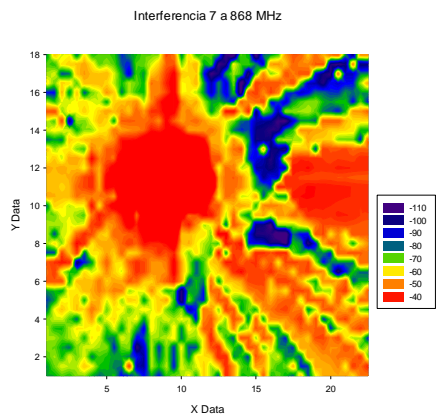


Figura 137. Interferencia I7

Figura 137. Mapa de cobertura de la interferencia I7

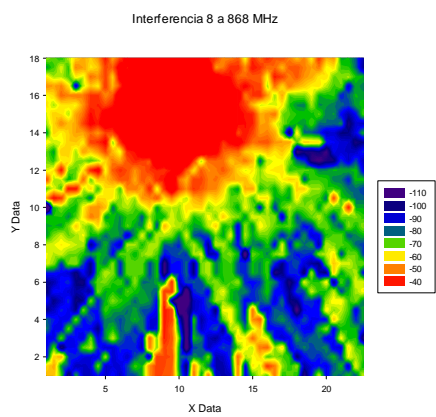


Figura 138. Interferencia I8

Figura 138. Mapa de cobertura de la interferencia I8

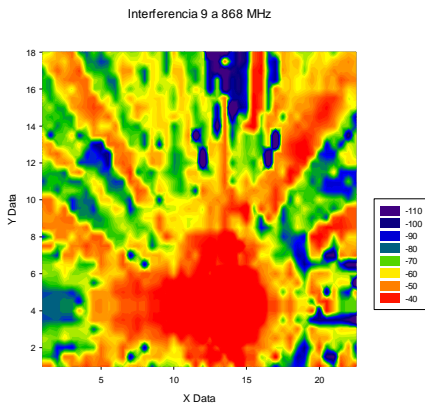


Figura 139. Interferencia I9

Figura 139. Mapa de cobertura de la interferencia I9

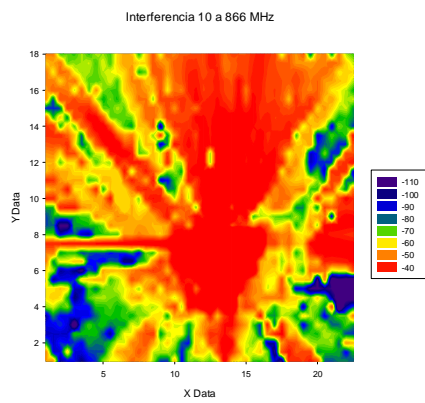


Figura 140. Interferencia I10

Figura 140. Mapa de cobertura de la interferencia I10

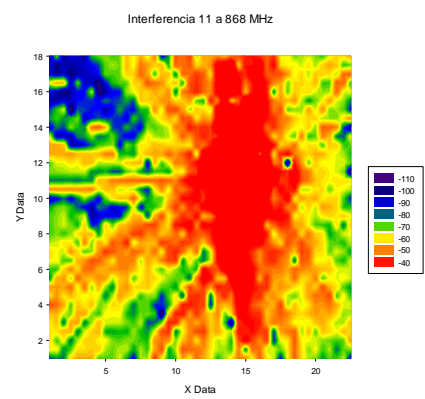


Figura 141. Interferencia I11

Figura 141. Mapa de cobertura de la interferencia I11

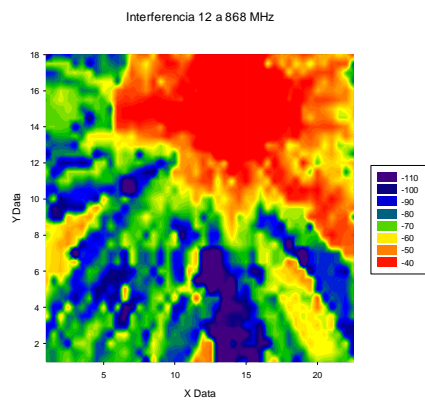


Figura 142. Interferencia I12

Figura 142. Mapa de cobertura de la interferencia I12

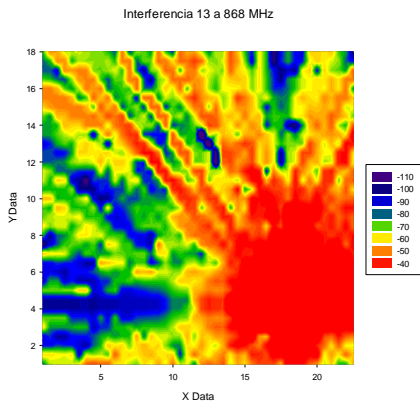


Figura 143. Interferencia I13

Figura 143. Mapa de cobertura de la interferencia I13

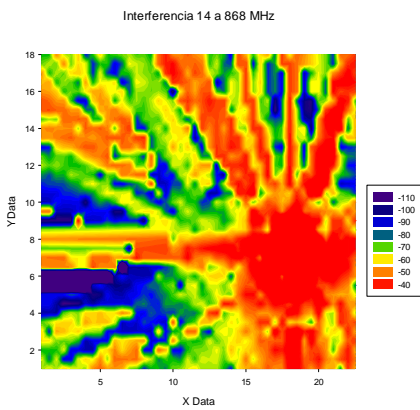


Figura 144. Interferencia I14

Figura 144. Mapa de cobertura de la interferencia I14

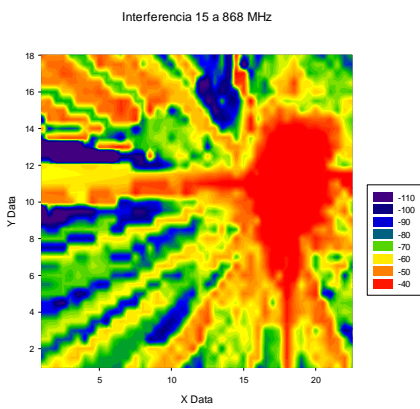


Figura 145. Interferencia I15

Figura 145. Mapa de cobertura de la interferencia I15

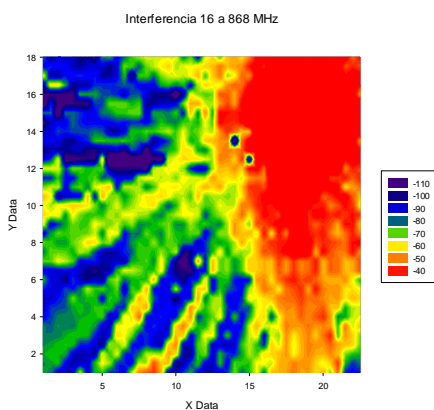


Figura 146. Interferencia I16

Figura 146. Mapa de cobertura de la interferencia I16

1,8 GHZ

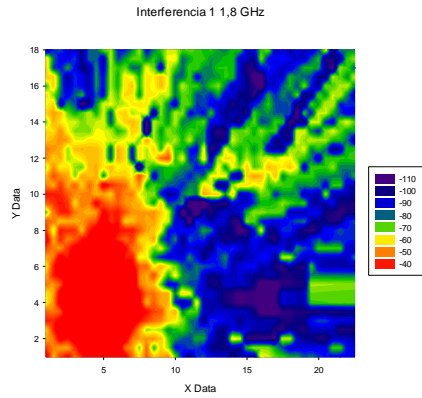


Figura 147. Interferencia I1

Figura 147. Mapa de cobertura de la interferencia I1

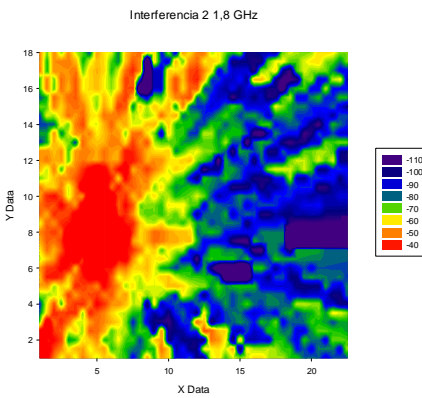


Figura 148. Interferencia I2

Figura 148. Mapa de cobertura de la interferencia I2

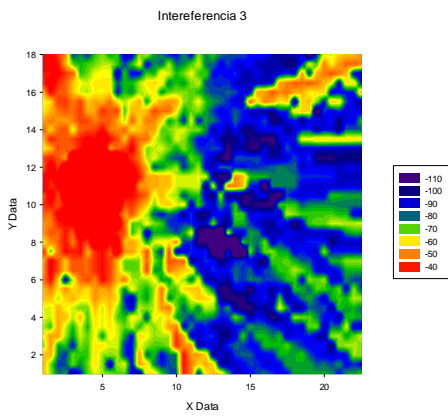


Figura 149. Interferencia I3

Figura 149. Mapa de cobertura de la interferencia I3

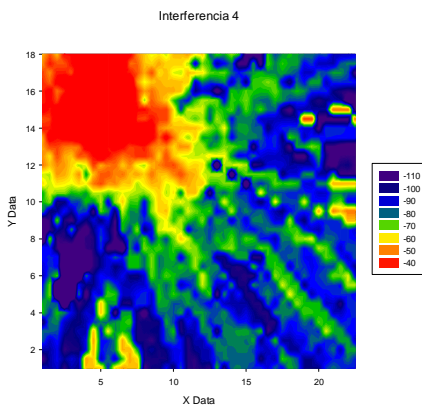


Figura 150. Interferencia I4

Figura 150. Mapa de cobertura de la interferencia I4

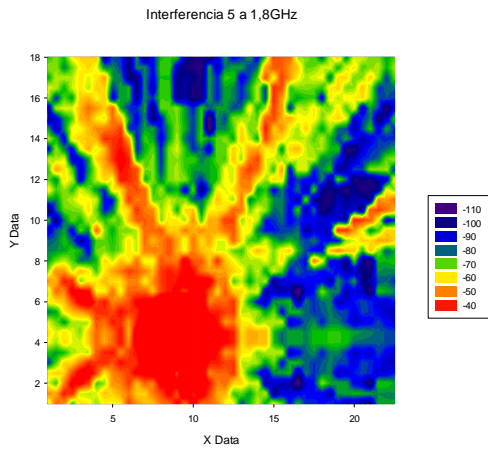


Figura 151. Mapa de cobertura de la interferencia I5

Figura 151. Interferencia I5

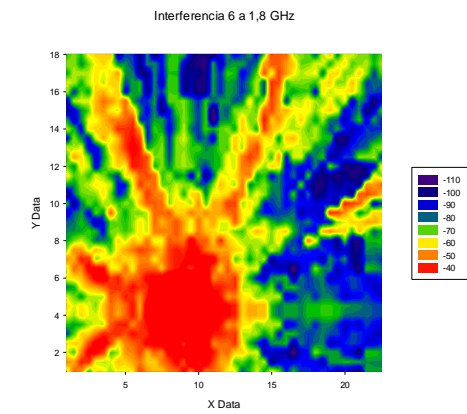


Figura 152. Mapa de cobertura de la interferencia I6

Figura 152. Interferencia I6

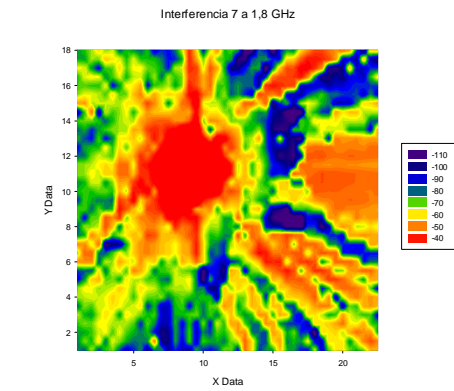


Figura 153. Mapa de cobertura de la interferencia I7

Figura 153. Interferencia I7

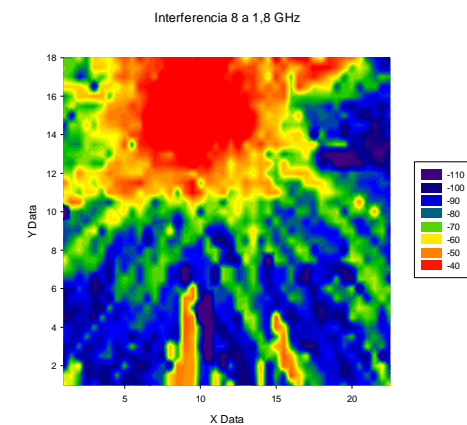


Figura 154. Mapa de cobertura de la interferencia I8

Figura 154. Interferencia I8

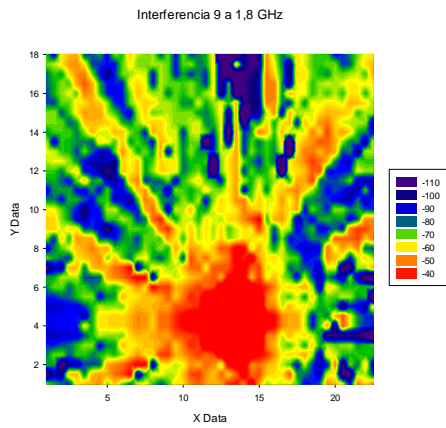


Figura 155. Interferencia I9

Figura 155. Mapa de cobertura de la interferencia I9

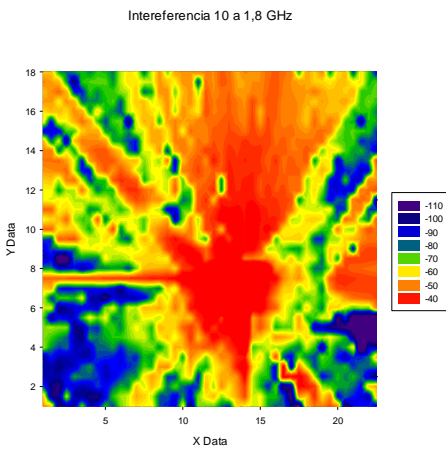


Figura 156. Interferencia I10

Figura 156. Mapa de cobertura de la interferencia I10

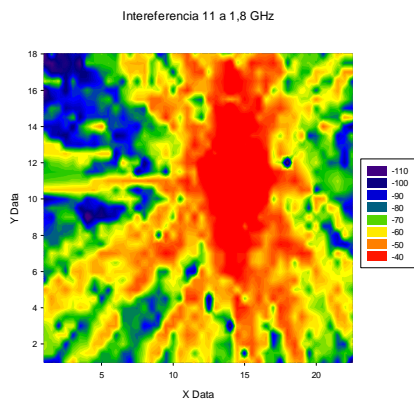


Figura 157. Interferencia I11

Figura 157. Mapa de cobertura de la interferencia I11

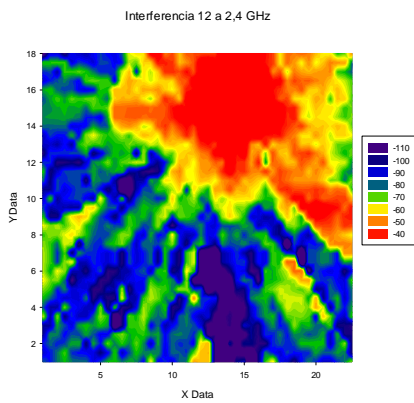


Figura 158. Interferencia I12

Figura 158. Mapa de cobertura de la interferencia I12

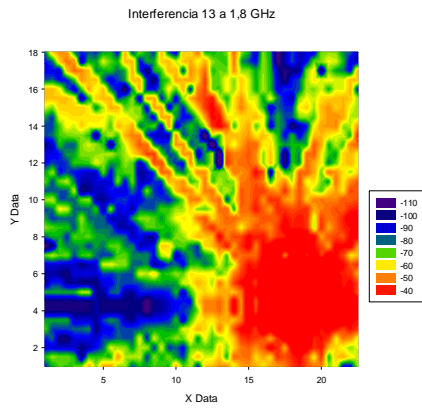


Figura 159. Interferencia I13

Figura 159. Mapa de cobertura de la interferencia I13

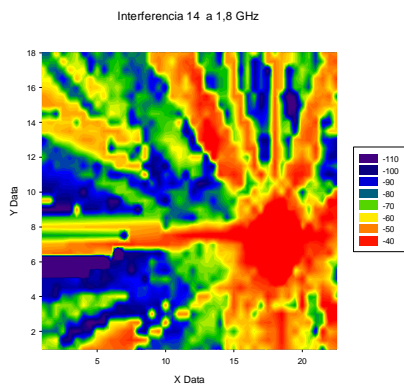


Figura 160. Interferencia I14

Figura 160. Mapa de cobertura de la interferencia I14

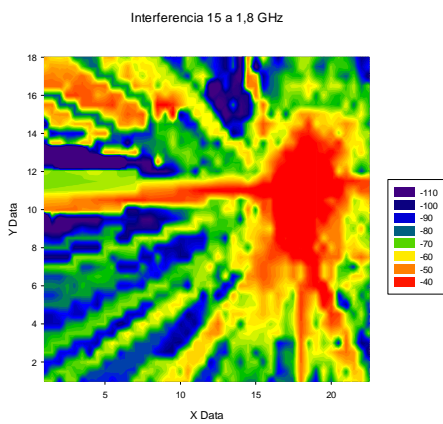


Figura 161. Interferencia I15

Figura 161. Mapa de cobertura de la interferencia I15

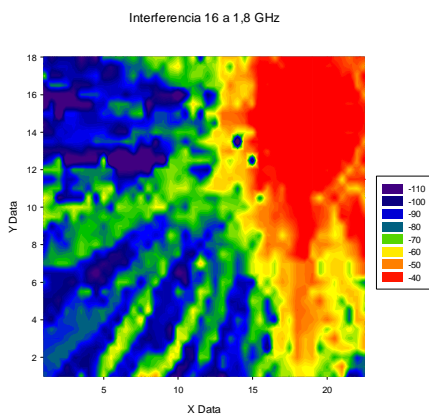


Figura 162. Interferencia I16

Figura 162. Mapa de cobertura de la interferencia I16

2,4 GHz

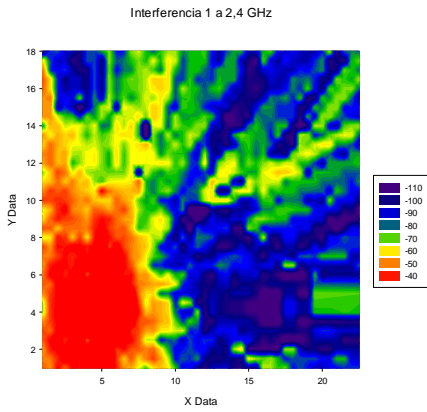


Figura 163. Interferencia I1

Figura 163. Mapa de cobertura de la interferencia I1

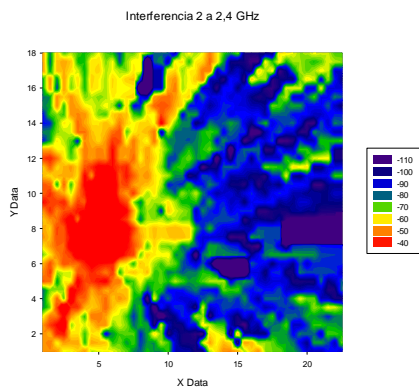


Figura 164. Interferencia I2

Figura 164. Mapa de cobertura de la interferencia I2

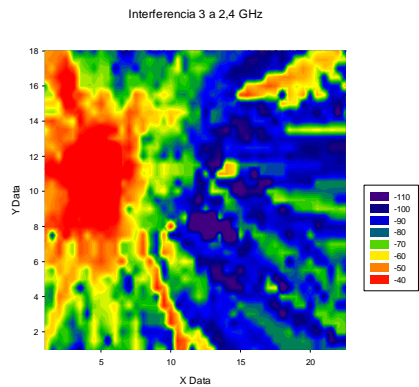


Figura 165. Interferencia I3

Figura 165. Mapa de cobertura de la interferencia I3

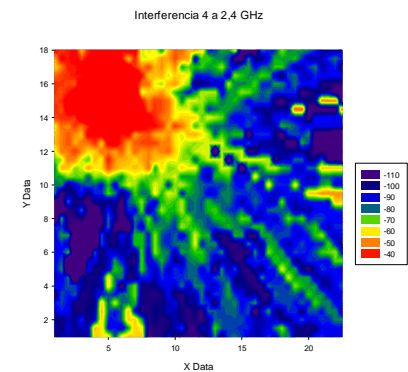


Figura 166. Interferencia I4

Figura 166. Mapa de cobertura de la interferencia I4

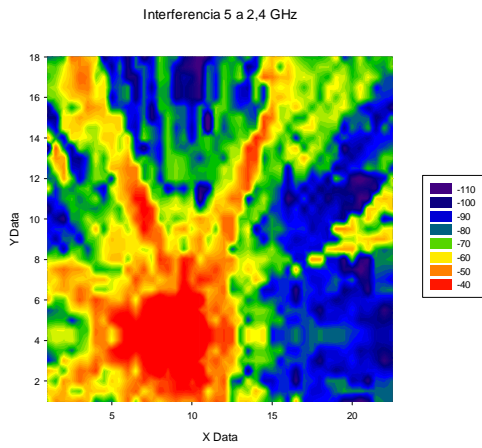


Figura 167. Mapa de cobertura de la interferencia I5

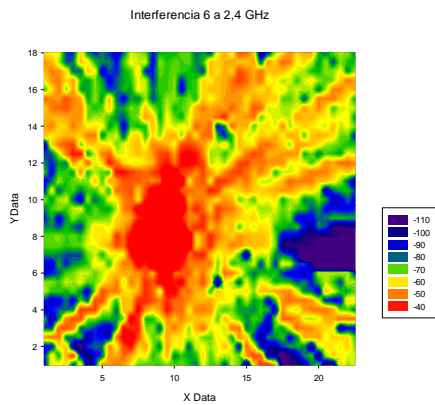


Figura 168. Mapa de cobertura de la interferencia I6

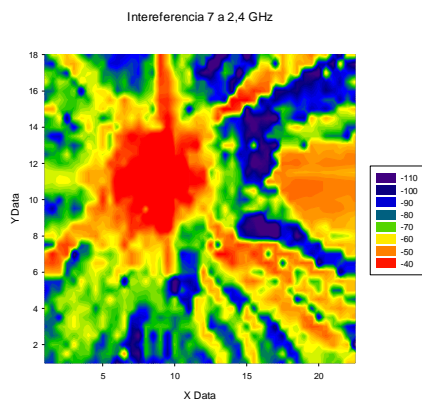


Figura 169. Mapa de cobertura de la interferencia I7

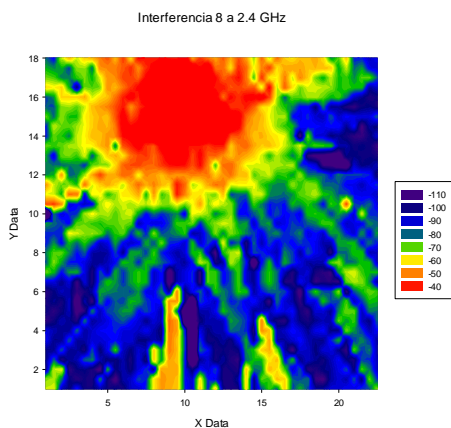


Figura 170. Mapa de cobertura de la interferencia I8

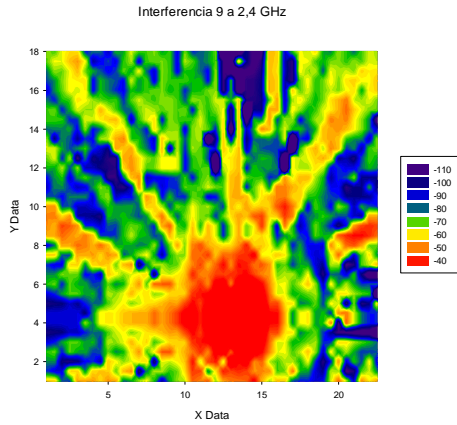


Figura 171. Interferencia I9

Figura 171. Mapa de cobertura de la interferencia I9

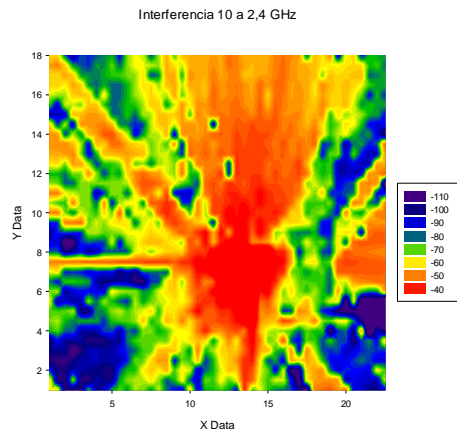


Figura 172. Interferencia I10

Figura 172. Mapa de cobertura de la interferencia I10

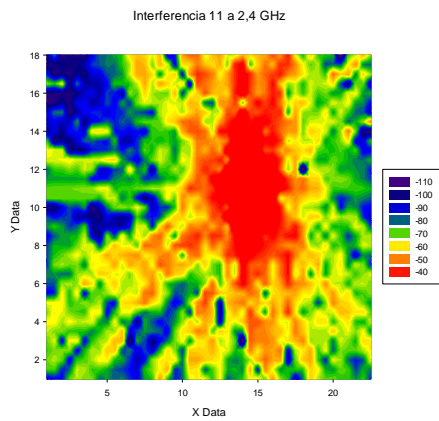


Figura 173. Interferencia I11

Figura 173. Mapa de cobertura de la interferencia I11

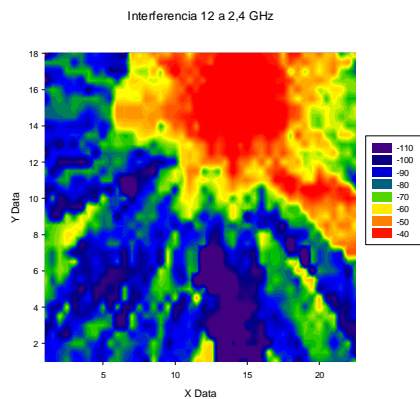


Figura 174. Interferencia I12

Figura 174. Mapa de cobertura de la interferencia I12

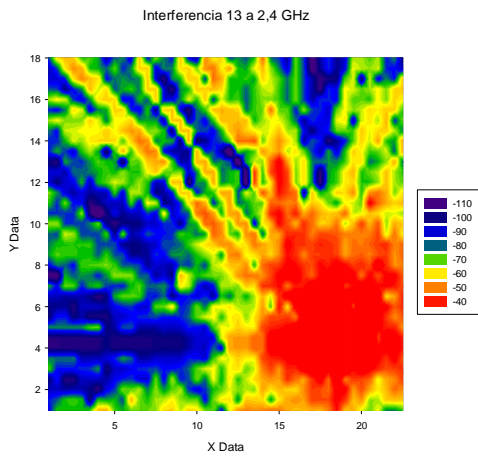


Figura 175. Interferencia I13

Figura 175. Mapa de cobertura de la interferencia I13

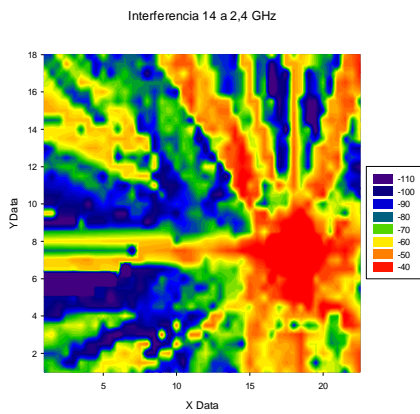


Figura 176. Interferencia I14

Figura 176. Mapa de cobertura de la interferencia I14

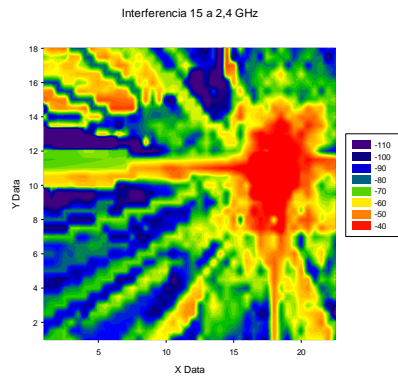


Figura 177. Interferencia I15

Figura 177. Mapa de cobertura de la interferencia I15

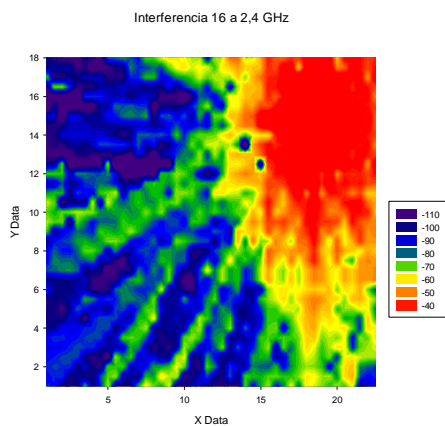


Figura 178. Interferencia I16

Figura 178. Mapa de cobertura de la interferencia I16

2.3. Resultados a 868 MHz

Radiales

Se complementa con las radiales que falta. Se dan las potencias recibidas en el pasillo donde se sitúa la antena correspondiente.

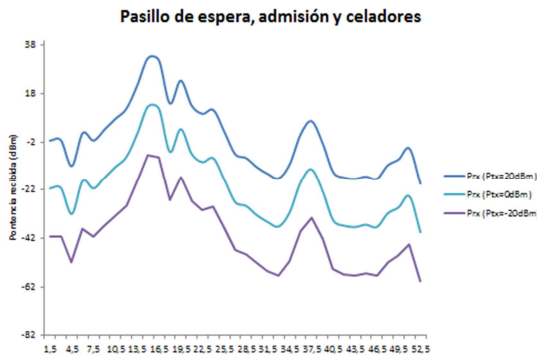


Figura 179. Radial antena P2

Figura 179. Radial correspondiente al pasillo de espera, admisión y celadores cuando emite la antena situada en P2.

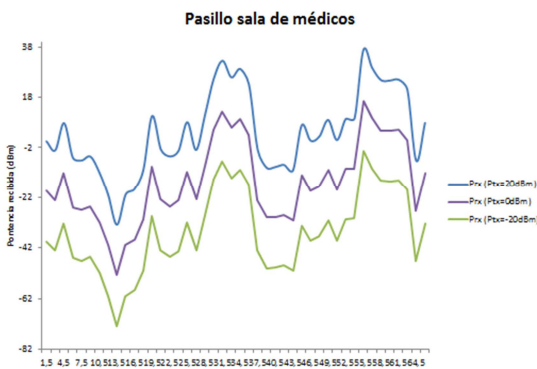


Figura 180. Radial antena P3

Figura 180. Radial correspondiente al pasillo de la sala de médicos cuando emite la antena situada en P3.

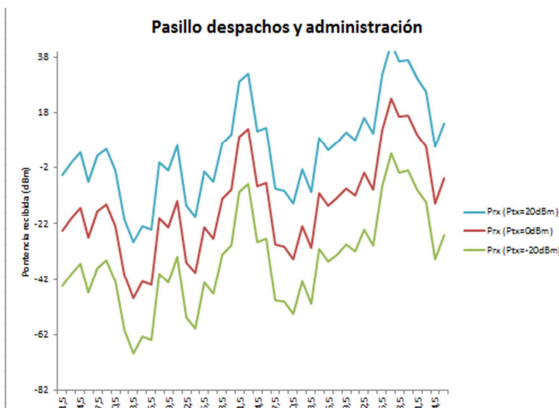


Figura 181. Radial antena P5

Figura 181. Radial correspondiente al pasillo de despachos y administración cuando emite la antena situada en P5.

Mapas de ruido intersystem e intrasystem

Se pasa a mostrar los mapas de ruido correspondientes al ruido intersystem e intrasystem de las antenas que faltan.

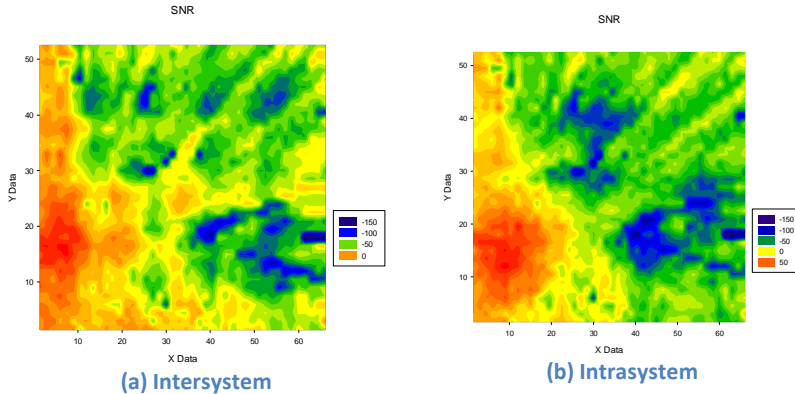


Figura 182. Casos de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P2.

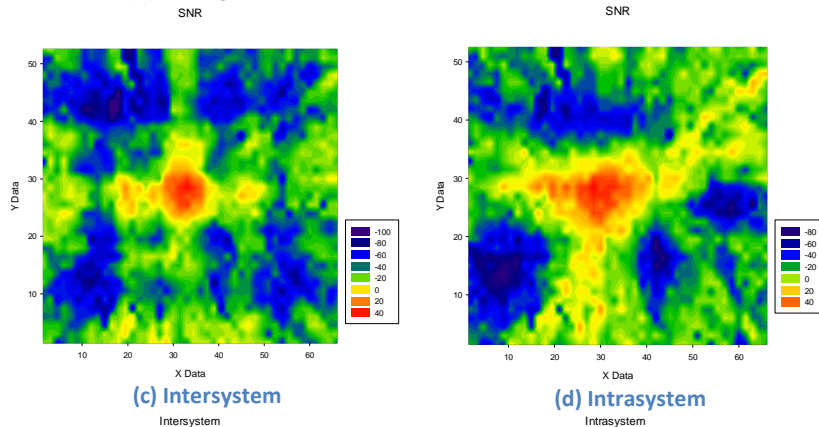


Figura 182. Casos de ruido intersystem (c) e intrasystem (d) de la antena P3.

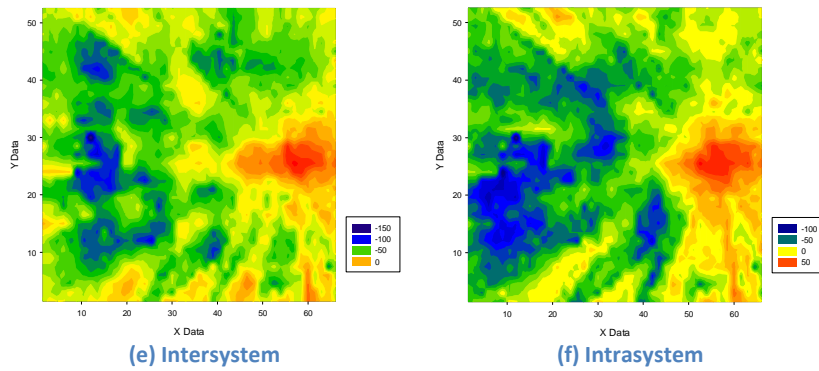


Figura 184. Casos de ruido intersystem (e) e intrasystem (f) de la antena P5.

Figura 182. Ruido intersystem e intrasystem

Finalmente se muestra para cada caso de estudio los mapas de ruido de cómo se ve afectada cada antena individualmente cuando se activan las interferencias correspondientes en cada caso.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

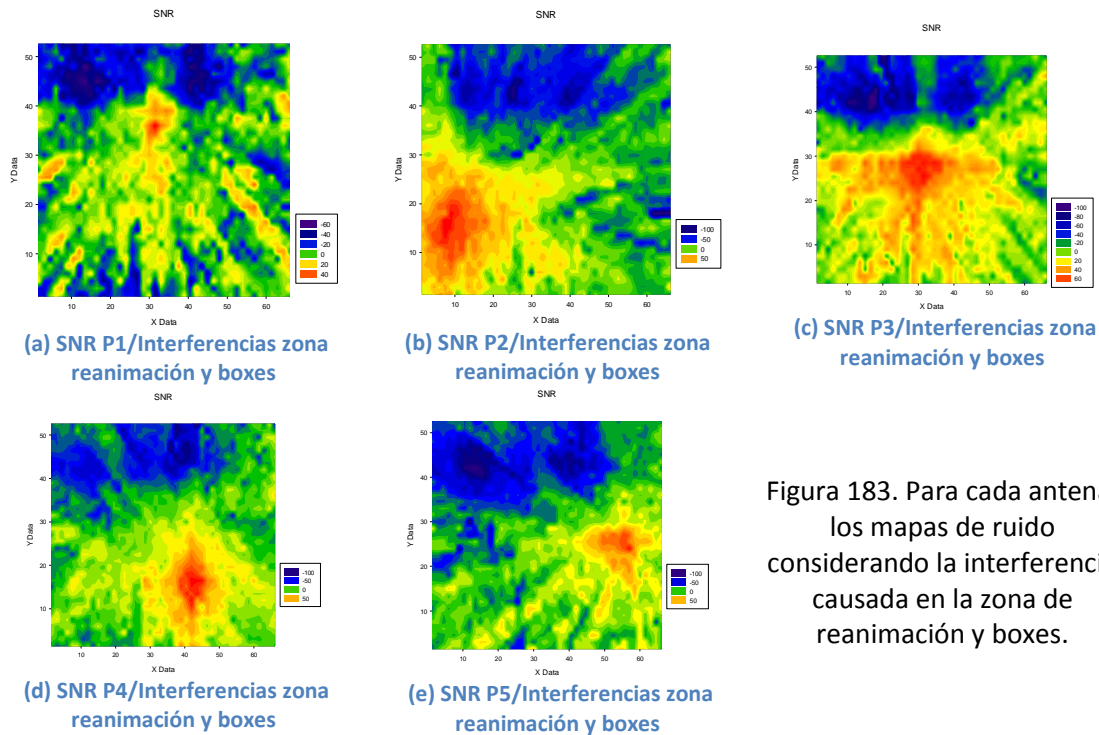


Figura 183. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación y boxes.

Figura 183. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes

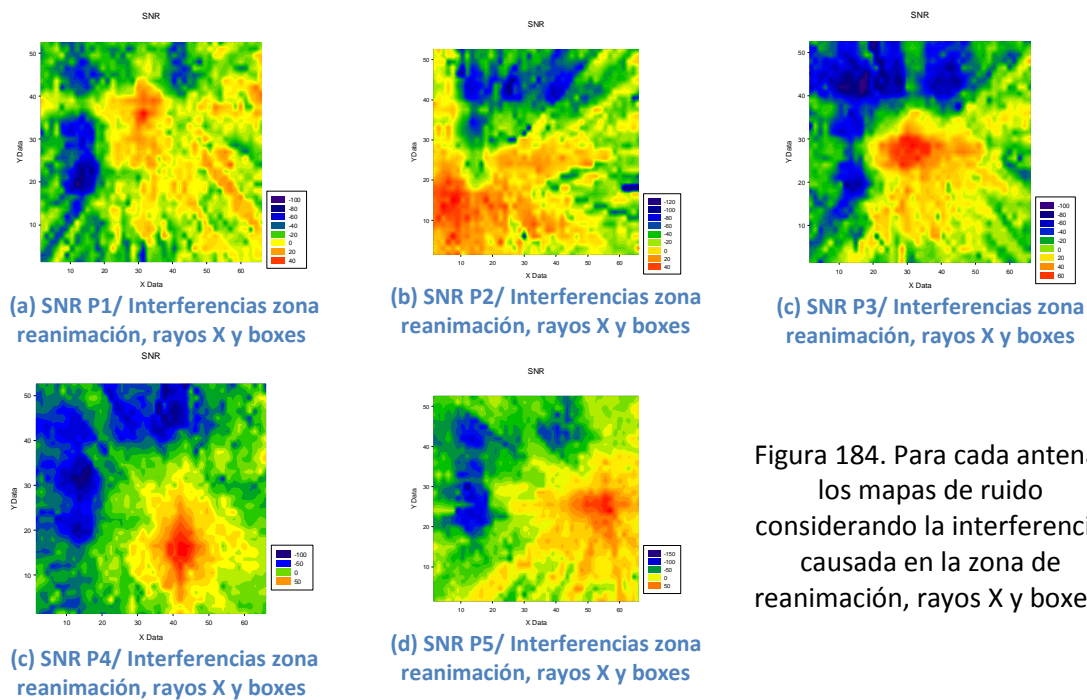


Figura 184. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación, rayos X y boxes.

Figura 184. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

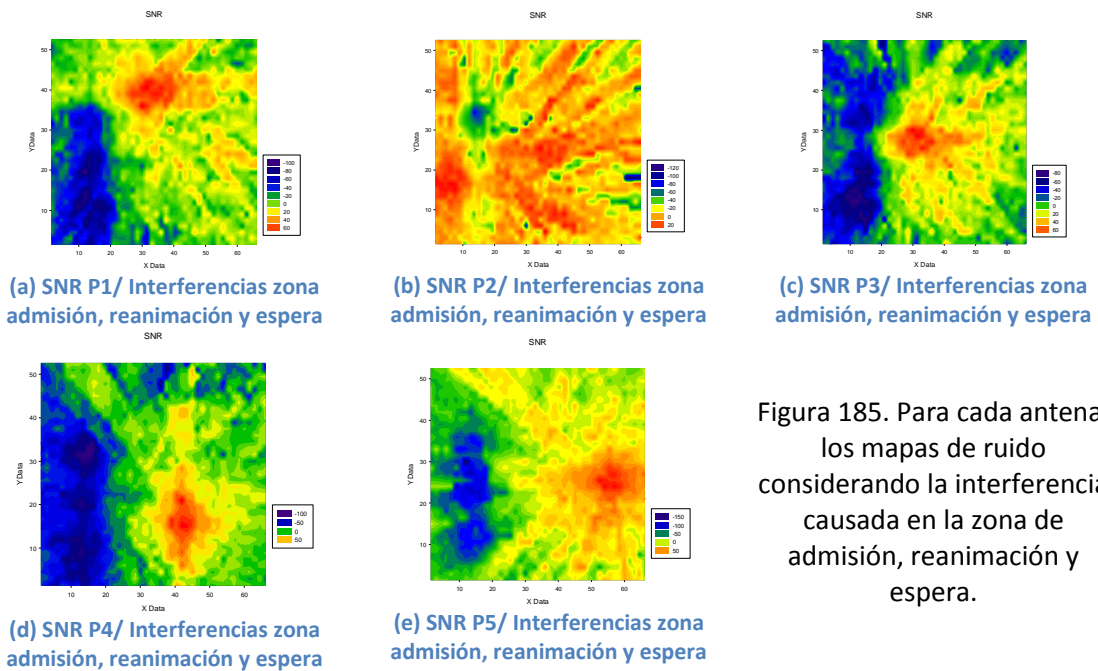


Figura 185. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de admisión, reanimación y espera.

Figura 185.SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

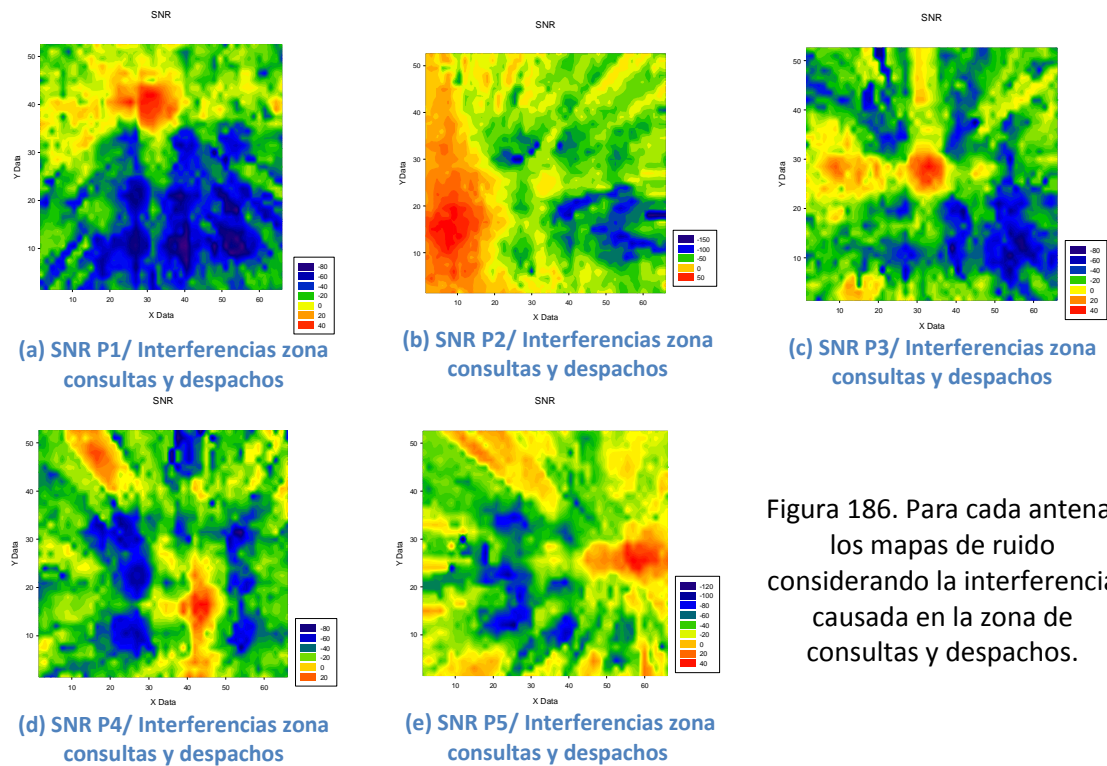


Figura 186. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de consultas y despachos.

Figura 186. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

2.4. Resultados a 1,8 GHz

Radiales

Se complementa con las radiales que falta. Se dan las potencias recibidas en el pasillo donde se sitúa la antenna correspondiente.

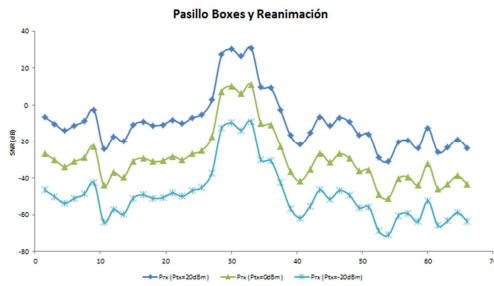


Figura 187. Radial de la antenna P1

Figura 187. Radial correspondiente al pasillo de boxes y reanimación cuando emite la antenna situada en P1.

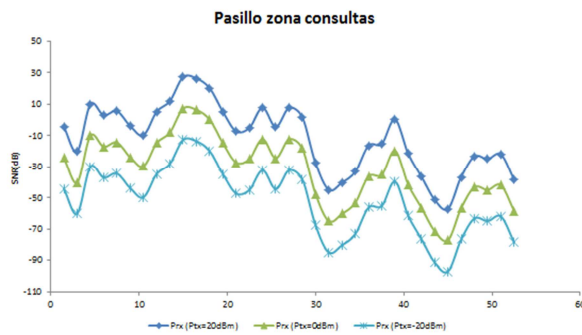


Figura 188. Radial de la antenna P4

Figura 188. Radial correspondiente al pasillo de la zona de consultas cuando emite la antenna situada en P4.

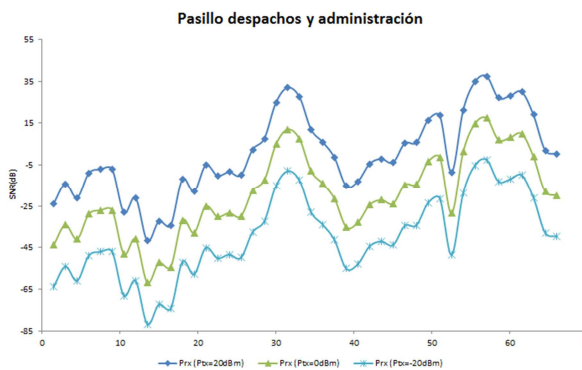


Figura 189. Radial de la antenna P5

Figura 189. Radial correspondiente al pasillo de despachos y administración cuando emite la antenna situada en P5.

Mapas de ruido intersystem e intrasystem

Se pasa a mostrar los mapas de ruido correspondientes al ruido intersystem e intrasystem de las antenas que faltan.

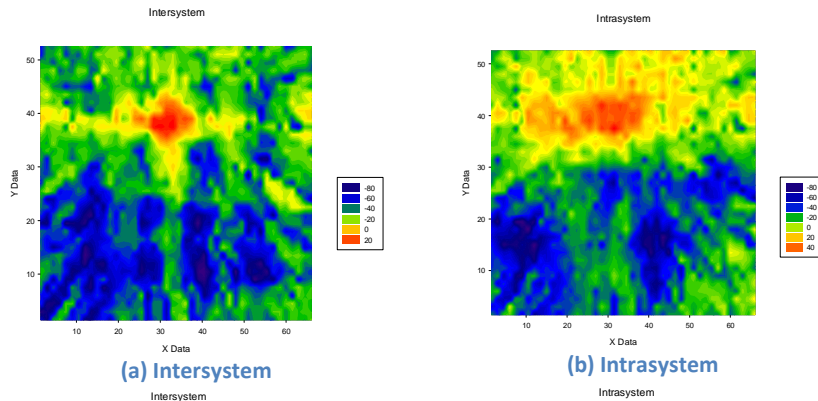


Figura 190. Casos de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P1.

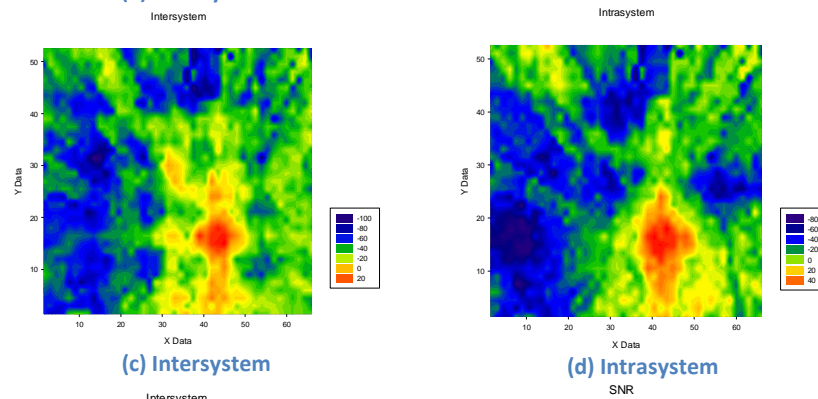


Figura 190. Casos de ruido intersystem (c) e intrasystem (d) de la antena P4.

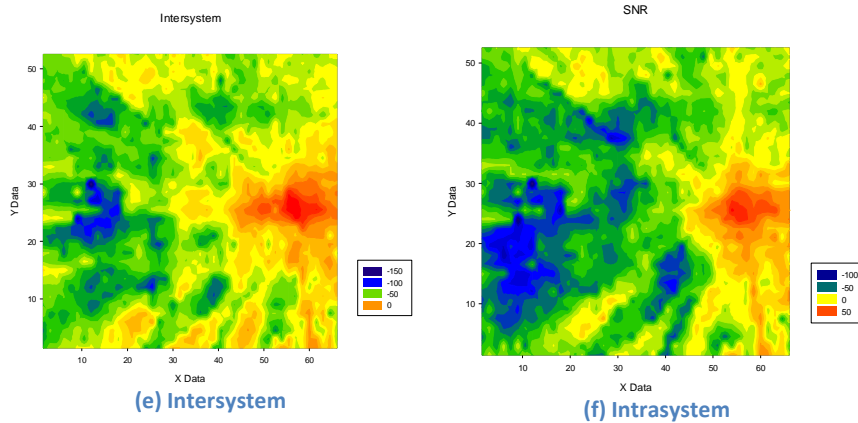


Figura 190. Casos de ruido intersystem (e) e intrasystem (f) de la antena P5.

Figura 190. Ruido intersystem e intrasystem

Finalmente se muestra para cada caso de estudio los mapas de ruido de cómo se ve afectada cada antena individualmente cuando se activan las interferencias correspondientes en cada caso.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

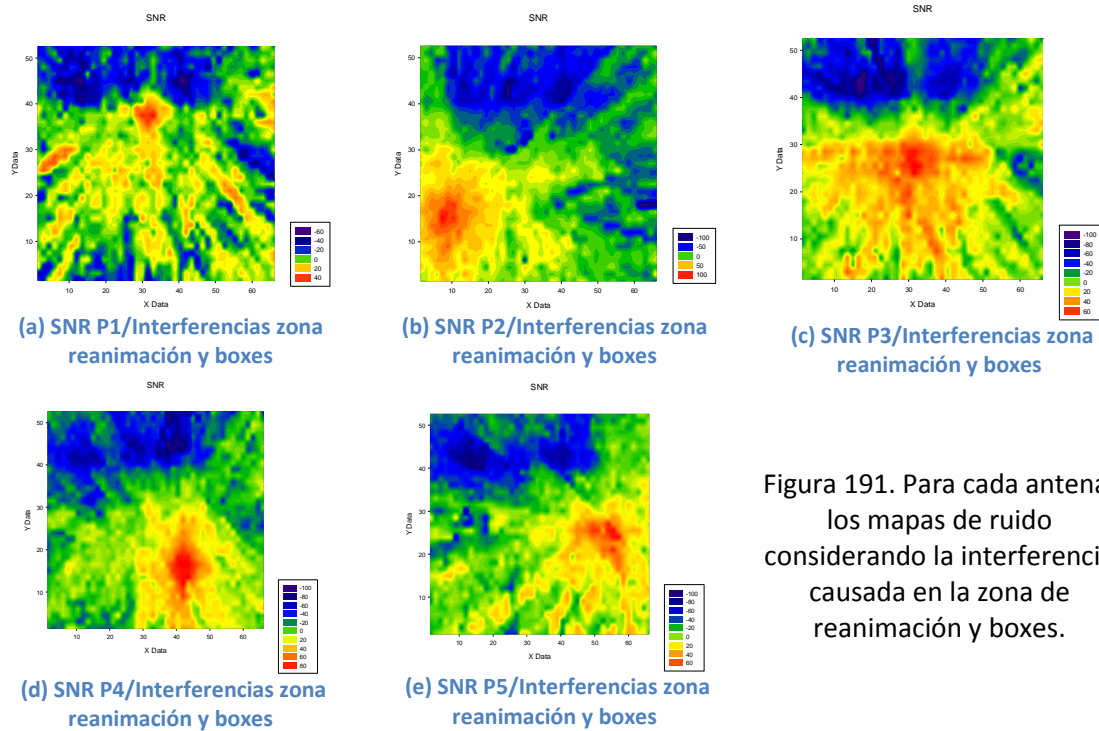


Figura 191. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación y boxes.

Figura 191. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes

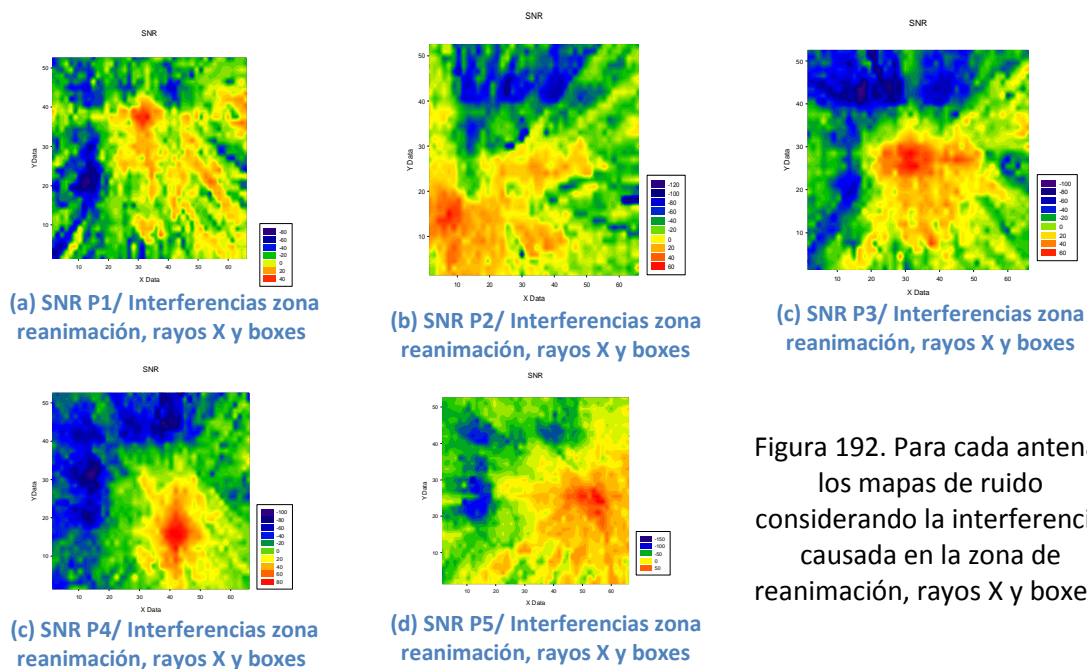


Figura 192. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación, rayos X y boxes.

Figura 192. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

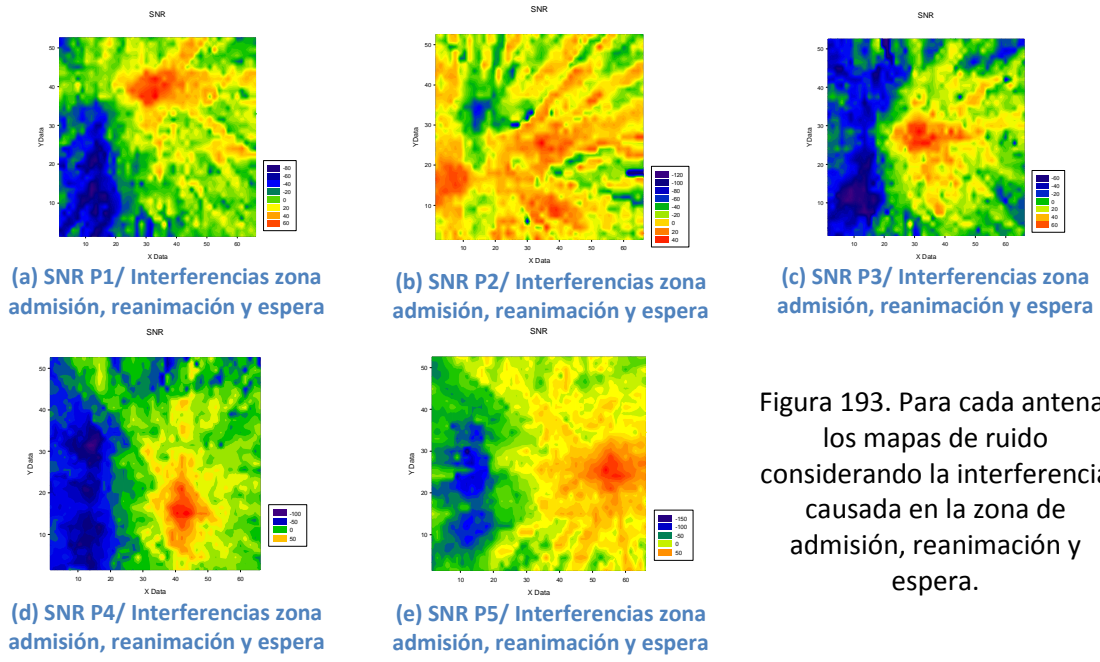


Figura 193. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de admisión, reanimación y espera.

Figura 193. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

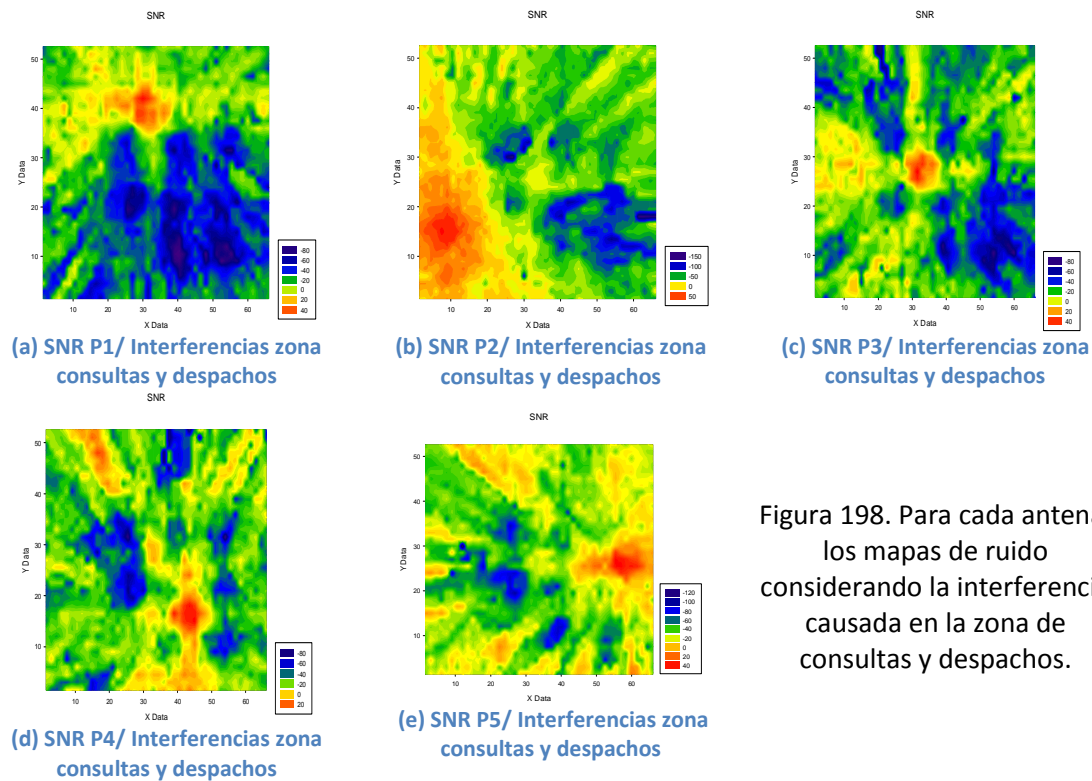


Figura 198. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de consultas y despachos.

Figura 194. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

2.5. Resultados a 2,4 GHz

Radiales

Se complementa con las radiales que falta. Se dan las potencias recibidas en el pasillo donde se sitúa la antenna correspondiente.

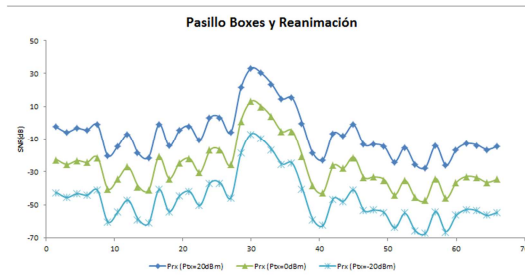


Figura 195. Radial de la antenna P1

Figura 195. Radial correspondiente al pasillo de boxes y reanimación cuando emite la antenna situada en P1.

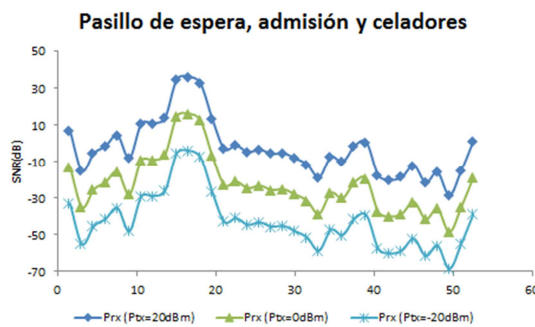


Figura 196. Radial antenna P2

Figura 196. Radial correspondiente al pasillo de espera, admisión y celadores cuando emite la antenna situada en P2.

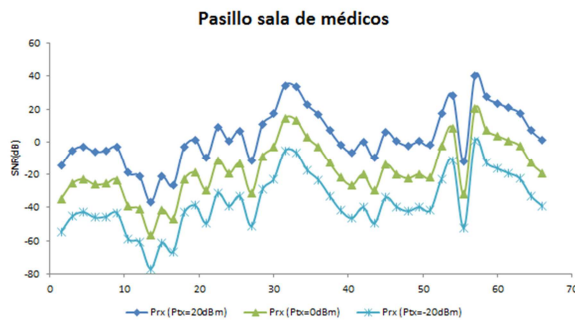


Figura 197. Radial de la antenna P3

Figura 197. Radial correspondiente al pasillo la sala de médicos cuando emite la antenna situada en P3.

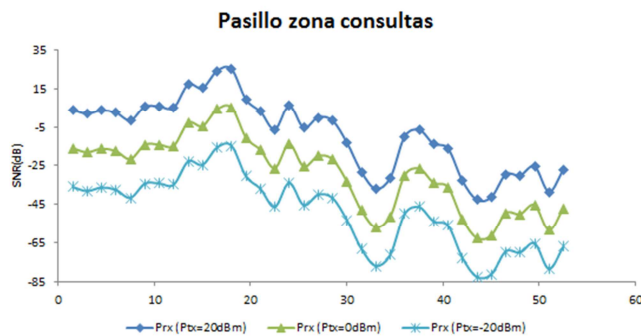


Figura 198. Radial antenna P4

Figura 202. Radial correspondiente al pasillo la sala de médicos cuando emite la antenna situada en P4.

Mapas de ruido intersystem e intrasystem

Se pasa a mostrar los mapas de ruido correspondientes al ruido intersystem e intrasystem de las antenas que faltan.

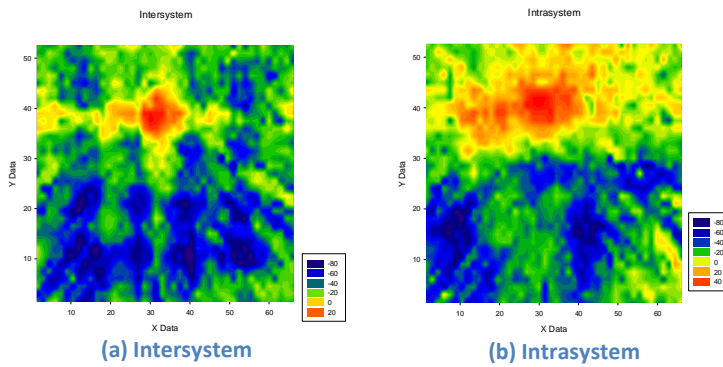


Figura 199. Casos de ruido intersystem (a) e intrasystem (b) de la antena P1.

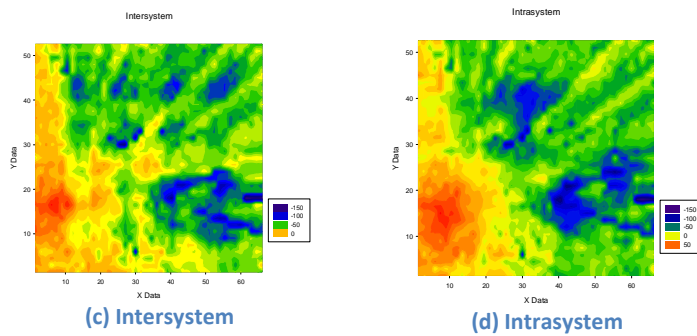


Figura 199. Casos de ruido intersystem (c) e intrasystem (d) de la antena P2.

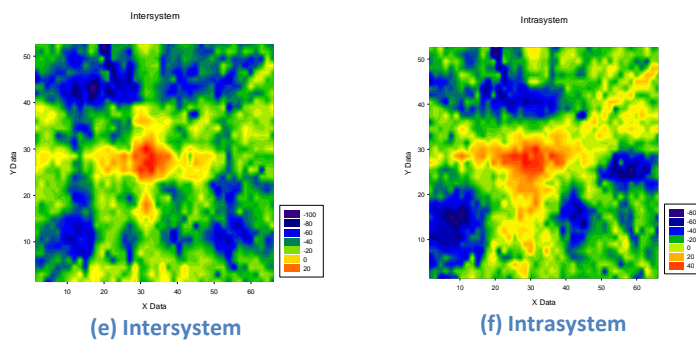


Figura 199. Casos de ruido intersystem (e) e intrasystem (f) de la antena P3.

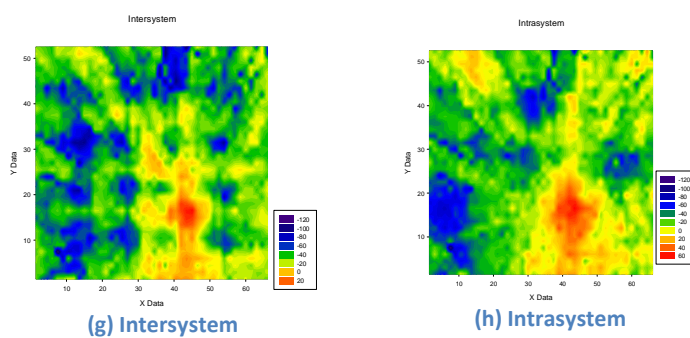


Figura 199. Casos de ruido intersystem (g) e intrasystem (h) de la antena P4.

Figura 199. Ruido intersystem e intrasystem

Finalmente se muestra para cada caso de estudio los mapas de ruido de cómo se ve afectada cada antena individualmente cuando se activan las interferencias correspondientes en cada caso.

Caso 1: Interferencia zona reanimación y boxes

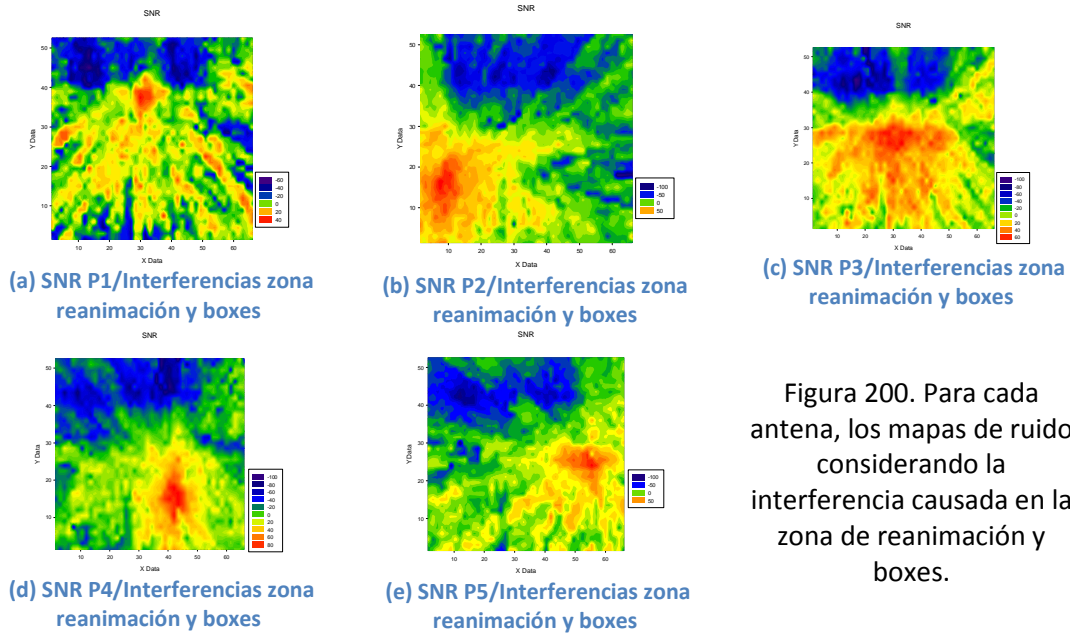


Figura 200. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación y boxes.

Figura 200. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 2: Interferencia zona reanimación, rayos X y boxes

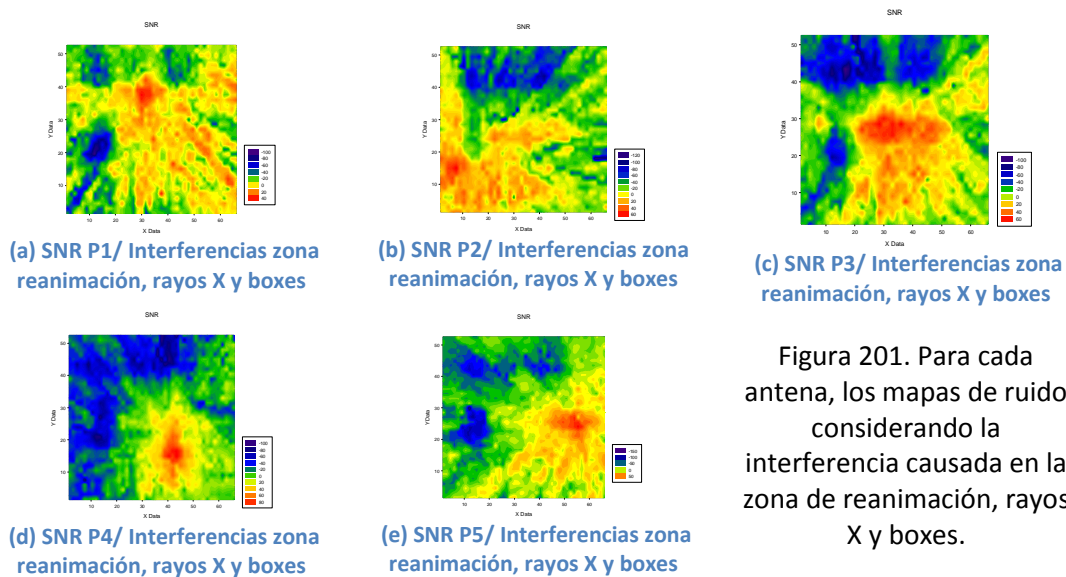


Figura 201. Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de reanimación, rayos X y boxes.

Figura 201. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Caso 3: Interferencia zona admisión, reanimación y espera

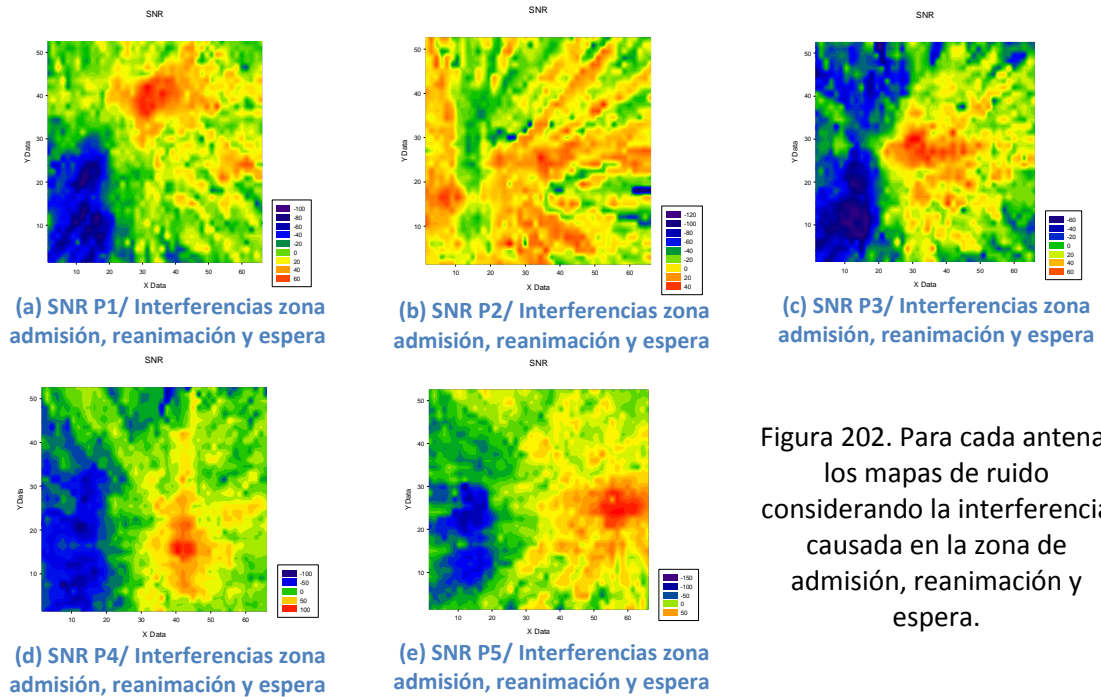


Figura 202. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de admisión, reanimación y espera.

Caso 4: Interferencia zona consultas y despachos

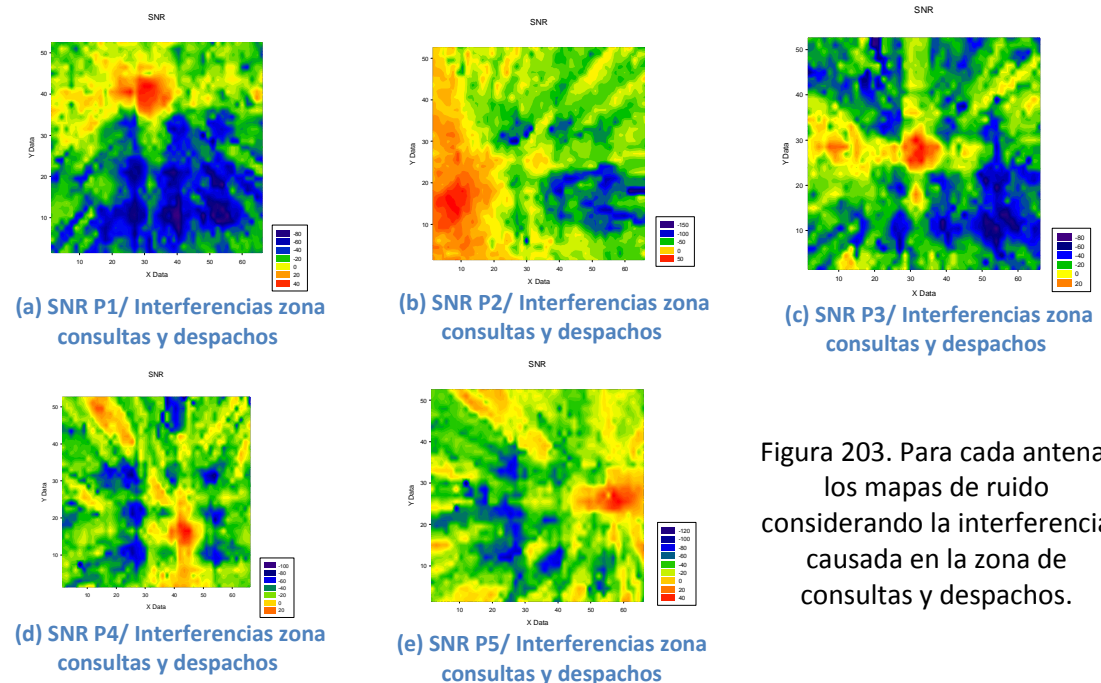


Figura 203. SNR de las distintas potencias/todas las interferencias

Para cada antena, los mapas de ruido considerando la interferencia causada en la zona de consultas y despachos.

Estudio y caracterización de la interferencia electromagnética en entornos hospitalarios



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación
Amaia Ortiz de Lejarazu Montoya

Motivación y Objetivo



Motivación

Motivación y Objetivo

Motivación

Objetivo

Contexto

Desarrollo

Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ Muchos pacientes
 - ▶ Cantidad de datos
 - ▶ Falta de recursos
 - ▶ Necesidad de rapidez
 - ▶ Pacientes crónicos
- E-Salud**
HCE: Historial Clínico electrónico
Localización de pacientes
Dispositivos médicos
Tele-asistencia, Tele-monitorización
- ▶ Evolución tecnológica
 - ▶ Mejora de la comunicación
 - Mayor rapidez
 - Más calidad
 - ▶ Mejora de los dispositivos
 - Menores dimensiones
 - Menor consumo



- ▶ EMI
- ▶ EMC

Objetivo

Motivación y Objetivo
Motivación
Objetivo
Contexto
Desarrollo
Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ Estudiar y caracterizar un entorno hospitalario complejo para poder realizar un diseño óptimo de la red de comunicación.
- ▶ Lugar de estudio:
 - Recinto de Urgencias del Hospital de Navarra Camino del Camino del Virgen del Camino de Navarra.



Contexto



Sistemas inalámbricos de comunicación

Motivación y Objetivo
Contexto
Sistemas de comunicación
Restricciones
Radiopropagación
Desarrollo
Conclusiones y Líneas futuras

▶ Frecuencias de estudio

- 2,4 GHz
- 868 MHz

▶ Tecnologías de estudio

- WiFi
- ZigBee



Sistemas inalámbricos de comunicación

Motivación y Objetivo
Contexto
 Sistemas de comunicación
 Restricciones
 Radiopropagación
 Desarrollo
 Conclusiones y Líneas futuras



▶ Es

▶ Conexión

▶ S

▶ Ir

▶ B

Estándar	Nombres comerciales	Velocidad máxima teórica	Banda frecuencial
IEEE 802.11	-	2 Mbps	2,4 GHz
IEEE 802.11a	802.11A	54 Mbps	2,4 GHz
IEEE 802.11b	802.11B, Wi-Fi B	11 Mbps	2,4 GHz
IEEE 802.11g	802.11G, Wi-Fi G	54 Mbps	2,4 GHz
IEEE 802.11n	802.11N, Wi-Fi N	600 Mbps	2,4 GHz/5 GHz
IEE 802.11ac	802.11AC, Wi-Fi AC	1.3 Gbps (*)	5 GHz



Sistemas inalámbricos de comunicación

Motivación y Objetivo

Contexto

Sistemas de comunicación

Restricciones

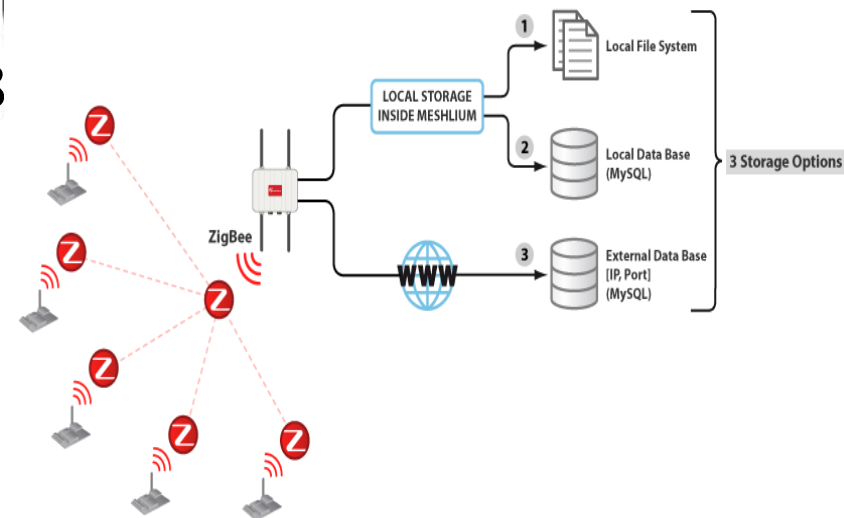
Radiopropagación

Desarrollo

Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ Estándar 802.15
- ▶ Conexión inalámbrica redes PAN
- ▶ Rango 10–100m
- ▶ Frecuencias 868 MHz, 902–928 MHz, 2,4 GHz
- ▶ N° dispositivos de 2 a 650000
- ▶ Consumo
 - Transmisión 30mA
 - Reposo 3μA
- ▶ QPSK

ZinRo®



Restricciones

- ▶ **EMC:** Capacidad de los sistemas eléctricos y electrónicos para **operar en un ambiente electromagnético sin efectos adversos**, sin introducir perturbaciones intolerables en ese ambiente y soportar las producidas por otros equipos
- ▶ **Normas que garantizan la compatibilidad electromagnética:**
 - UNE-EN 60601-1-2
- ▶ **Uso de la banda ICM**
 - ICM 1: 13,553-13,567 MHz
 - ICM 2: 26,957-27,283 MHz
 - ICM 3: 40,660-40,700 MHz
 - ICM 4: 433,050-434,790 MHz
 - ICM 5: 2400-2500 MHz
 - ICM 6: 5725-5875 MHz
 - ICM 7: 24,00-25,25 GHz
 - ICM 8: 61.00-61.50 GHz

Radiopropagación

Motivación y Objetivo

Contexto

Sistemas de comunicación

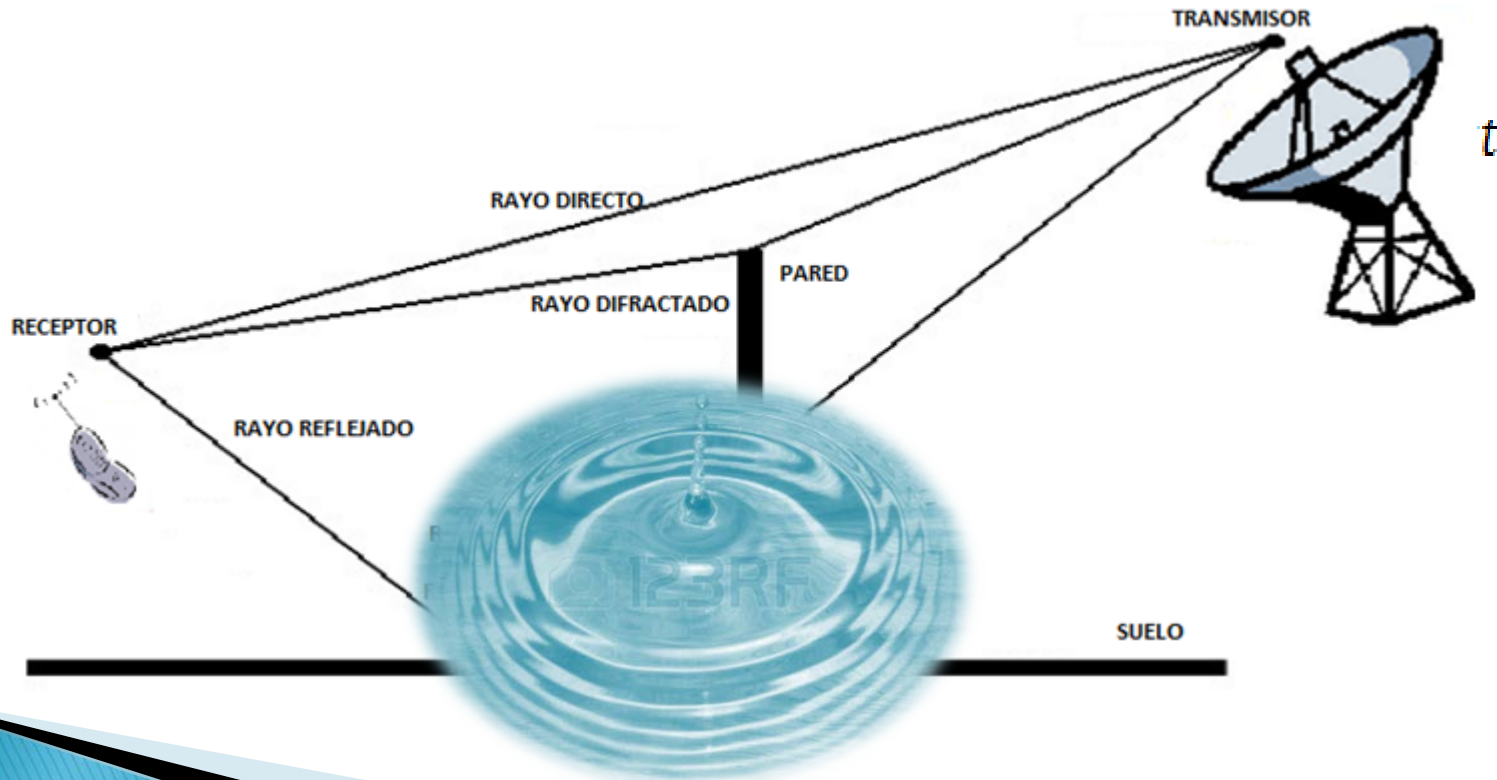
Restricciones

Radiopropagación

Desarrollo

Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ **Fenómenos de radiopropagación:**
 - ◉ **Pérdidas de propagación**



Desarrollo



Metodología

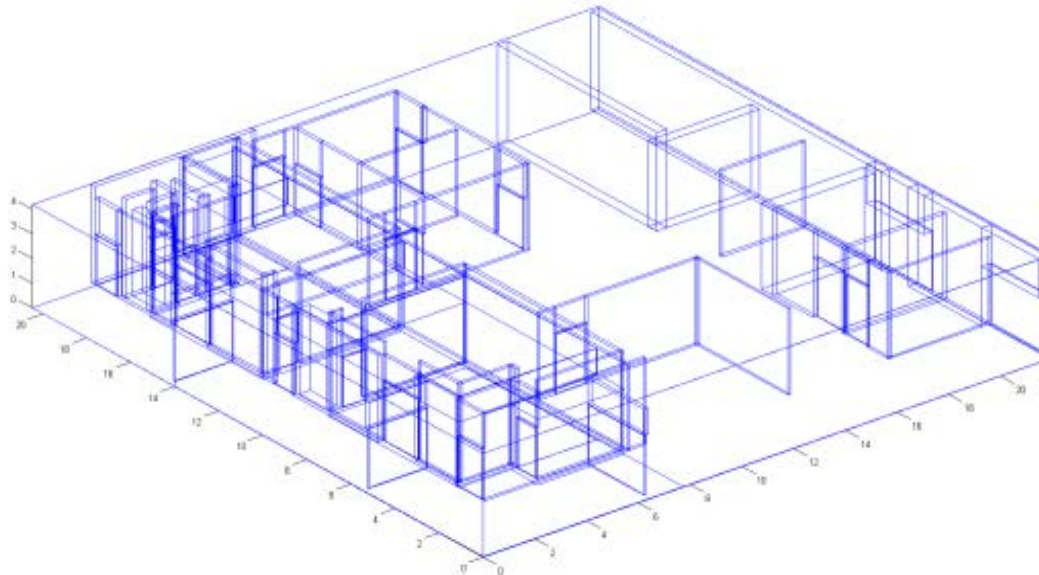
- Motivación y Objetivo
- Contexto
- Desarrollo
 - Metodología
 - Escenario
 - Parámetros
 - Transmisores
 - Resultados
- Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ Código de lanzamiento de rayos
 - Definición del escenario
 - Definición de los parámetros empleados
 - Disposición de los transmisores, tanto del sistema de comunicación como de la red de interferencias.
 - Simulaciones
 - Estudio de los resultados

Escenario

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
 Metodología
 Escenario
 Parámetros
 Transmisores
 Resultados
Conclusiones y Líneas futuras

Plano introducido en Matlab



Parámetros

- Motivación y Objetivo
- Contexto
- Desarrollo
 - Metodología
 - Escenario
 - Parámetros**
 - Transmisores
- Resultados
- Conclusiones y Líneas futuras

- ▶ Dimensiones del escenario: $66 \times 52 \times 3 \text{ m}^3$.
- ▶ Resolución, tamaño de los cubos: 1,5 m.
- ▶ Resolución horizontal y vertical: 1°
- ▶ Número de rebotes : 6
- ▶ Frecuencias de estudio: 868 MHz, 1,8GHz y 2,4 GHz.
- ▶ Potencia de transmisión: 20 dBm.

Transmisores

Motivación y Objetivo

Contexto

Desarrollo

Metodología

Escenario

Parámetros

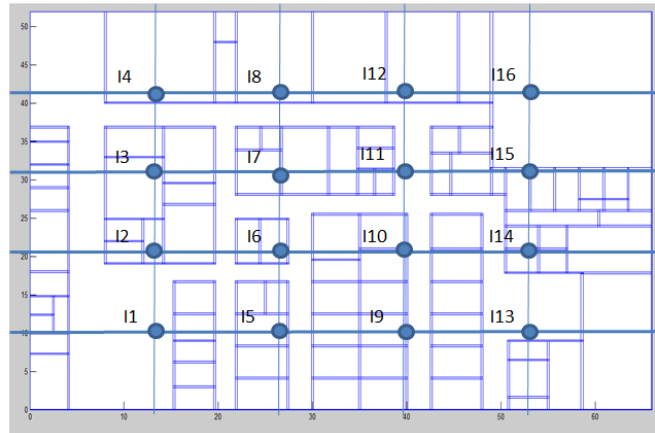
Transmisores

Resultados

Conclusiones y Líneas futuras

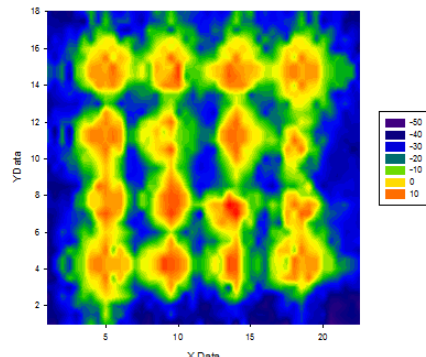
Disposición de las interferencias

Localización

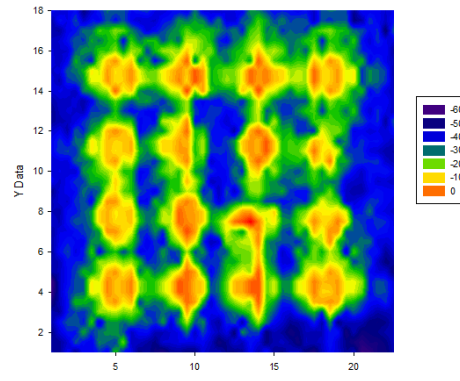


Simulación

Interferencias a 868 MHz



a. 868 MHz



b. 2,4 GHz

Resultados

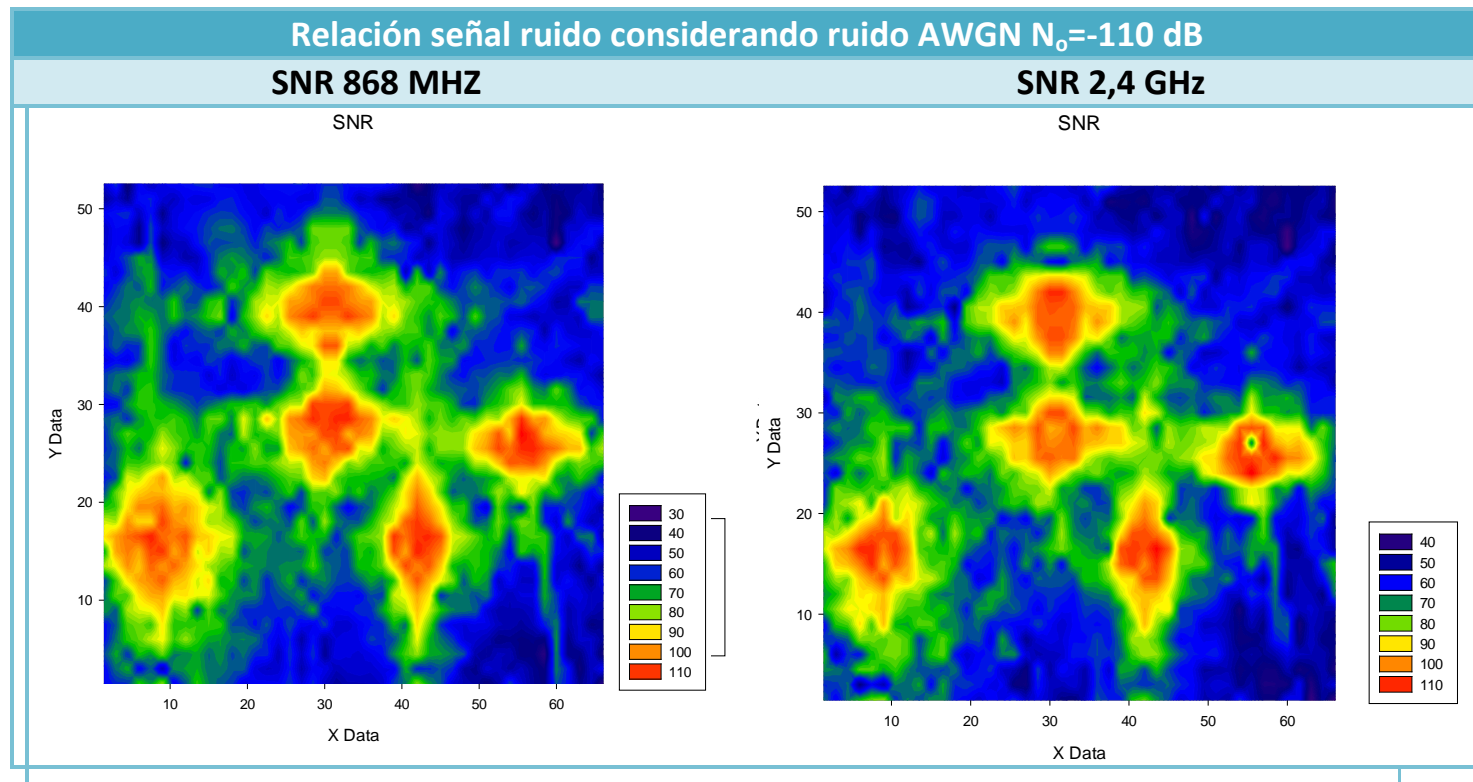
- ▶ Obtención de parámetros
 - Relación señal ruido, SNR
 - Considerando las potencias interferentes
 - Considerando un ruido AWGN
 - Radiales
 - Ruido intersystem e intrasystem
 - Probabilidad de error, BER
 - Perfiles de retado de potencia, PDP

- ▶ Estudio de casos

Parámetros

- Motivación y Objetivo
- Contexto
- Desarrollo
 - Metodología
 - Resultados**
 - Parámetros**
 - Estudio de casos
- Conclusiones y Líneas futuras

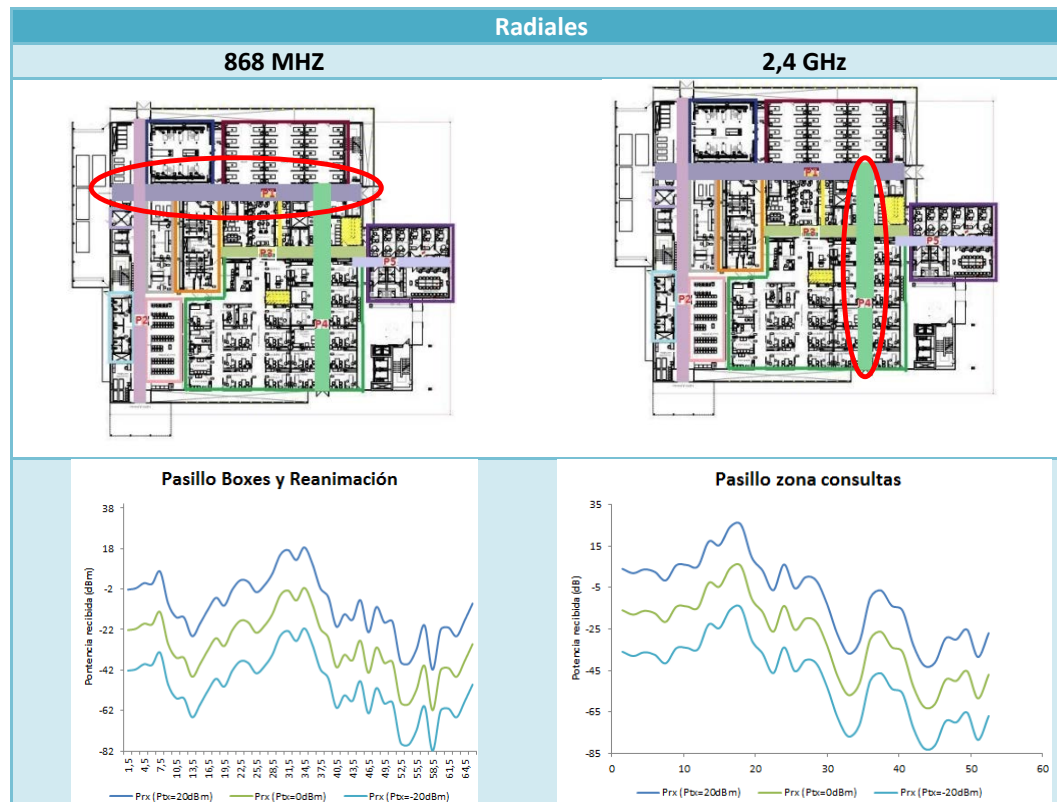
► Relación señal ruido, SNR



Parámetros

▶ Radiales

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
Metodología
Resultados
Parámetros
Estudio de casos
Conclusiones y Líneas futuras

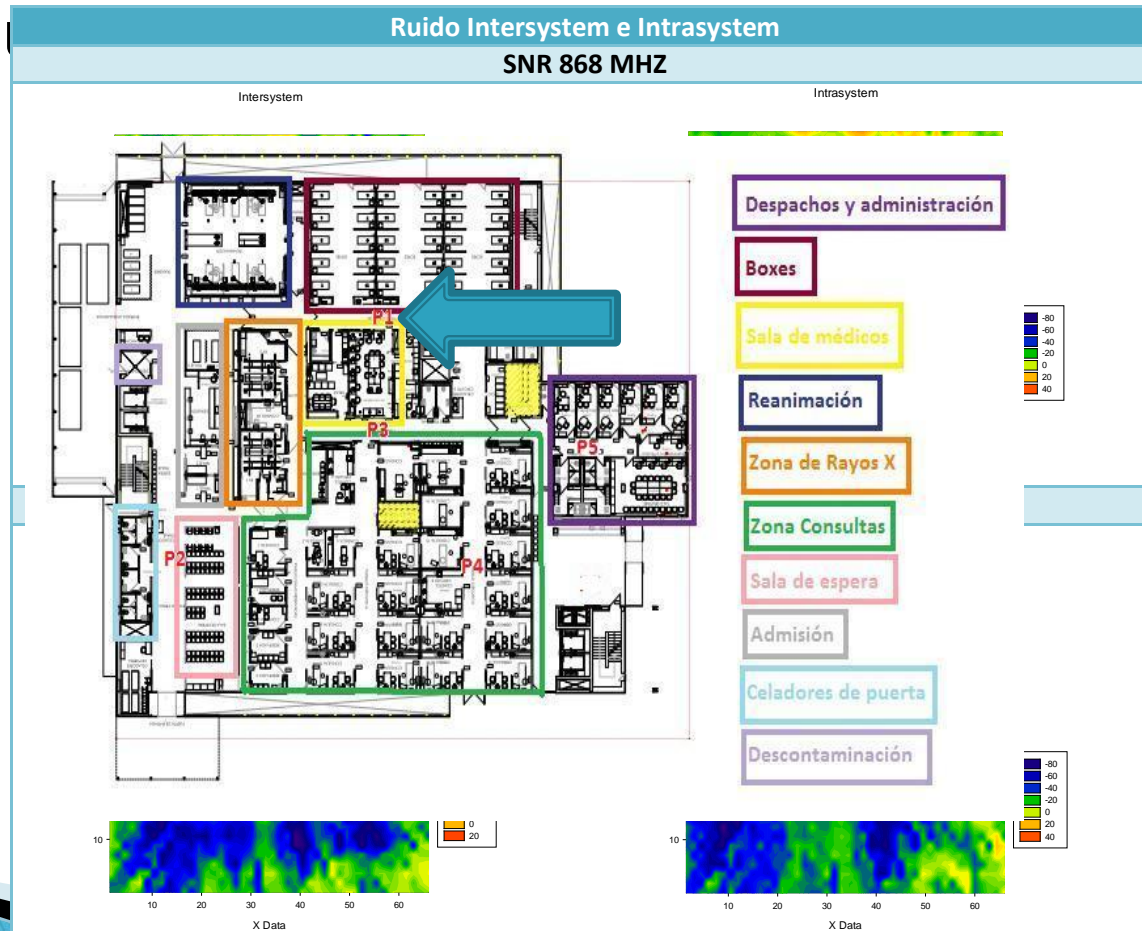


Parámetros

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
Metodología
Resultados
Parámetros
Estudio de casos
Conclusiones y Líneas futuras

▶ Ruido intersystem e intrasystem

◦ Cálculo



Parámetros

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
Metodología
Resultados
Parámetros
Estudio de casos
Conclusiones y Líneas futuras

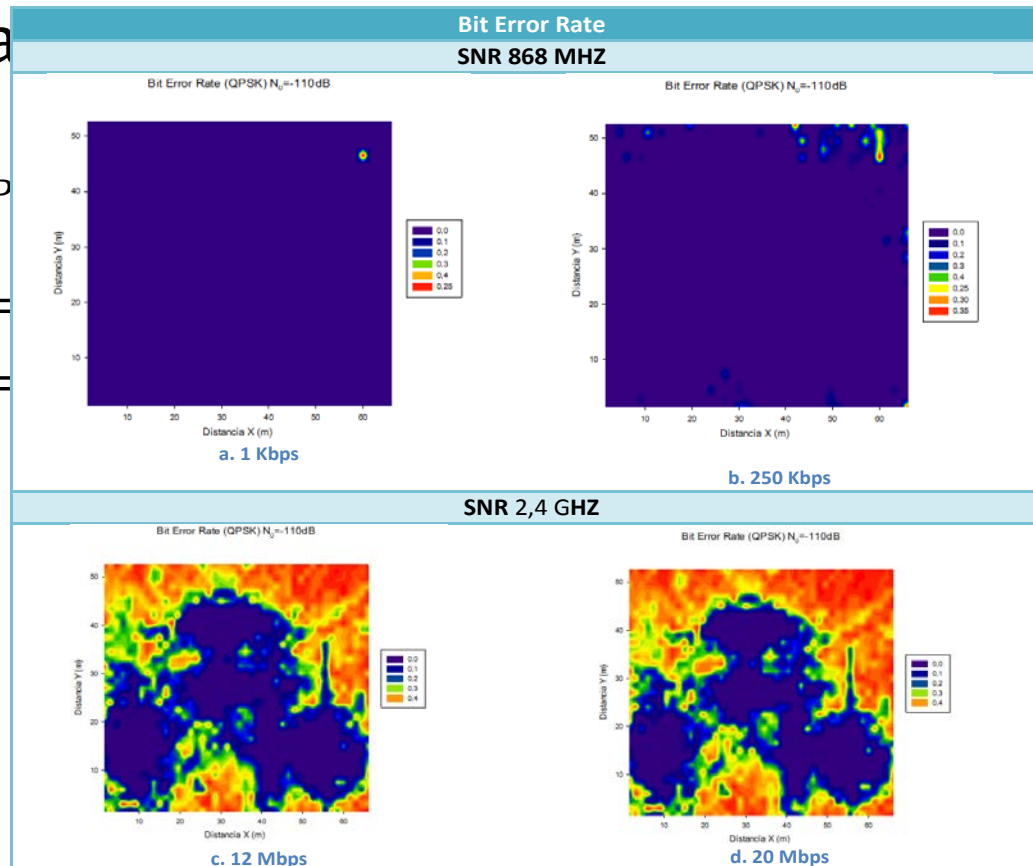
► Probabilidad de error, VER

◦ Cálculo

- BER_{QP}

- $E_b =$

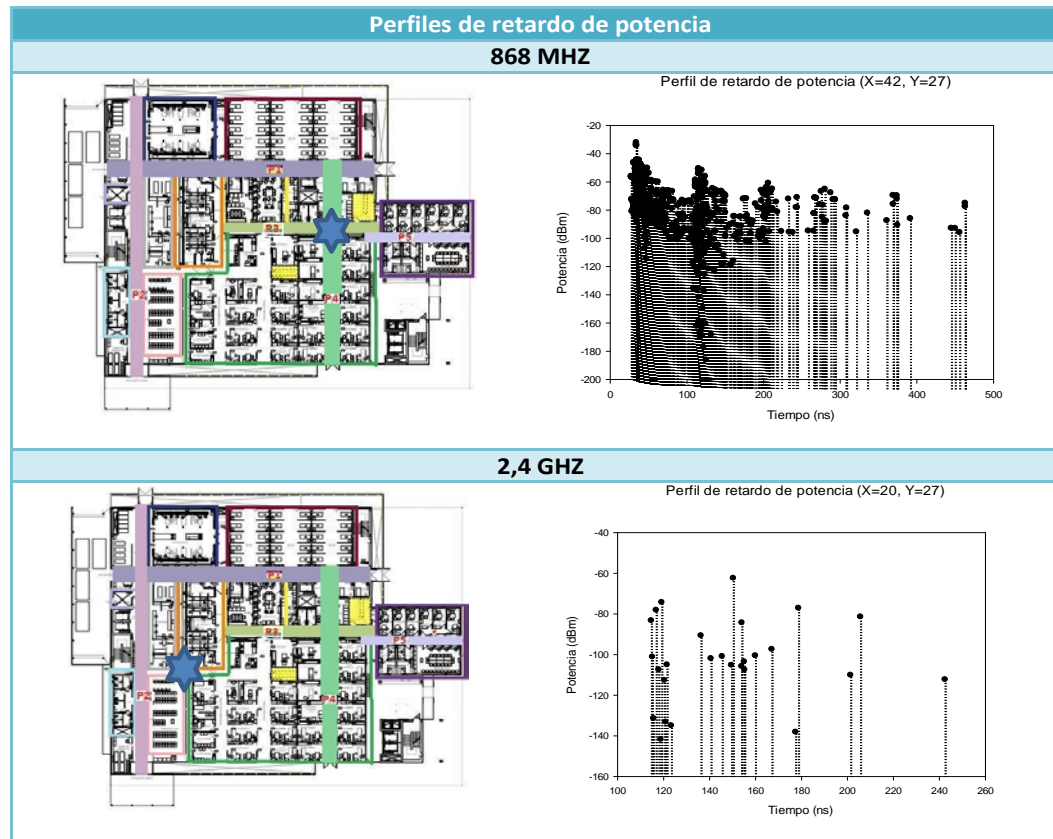
- $N_0 =$



Parámetros

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
Metodología
Resultados
Parámetros
Estudio de casos
Conclusiones y Líneas futuras

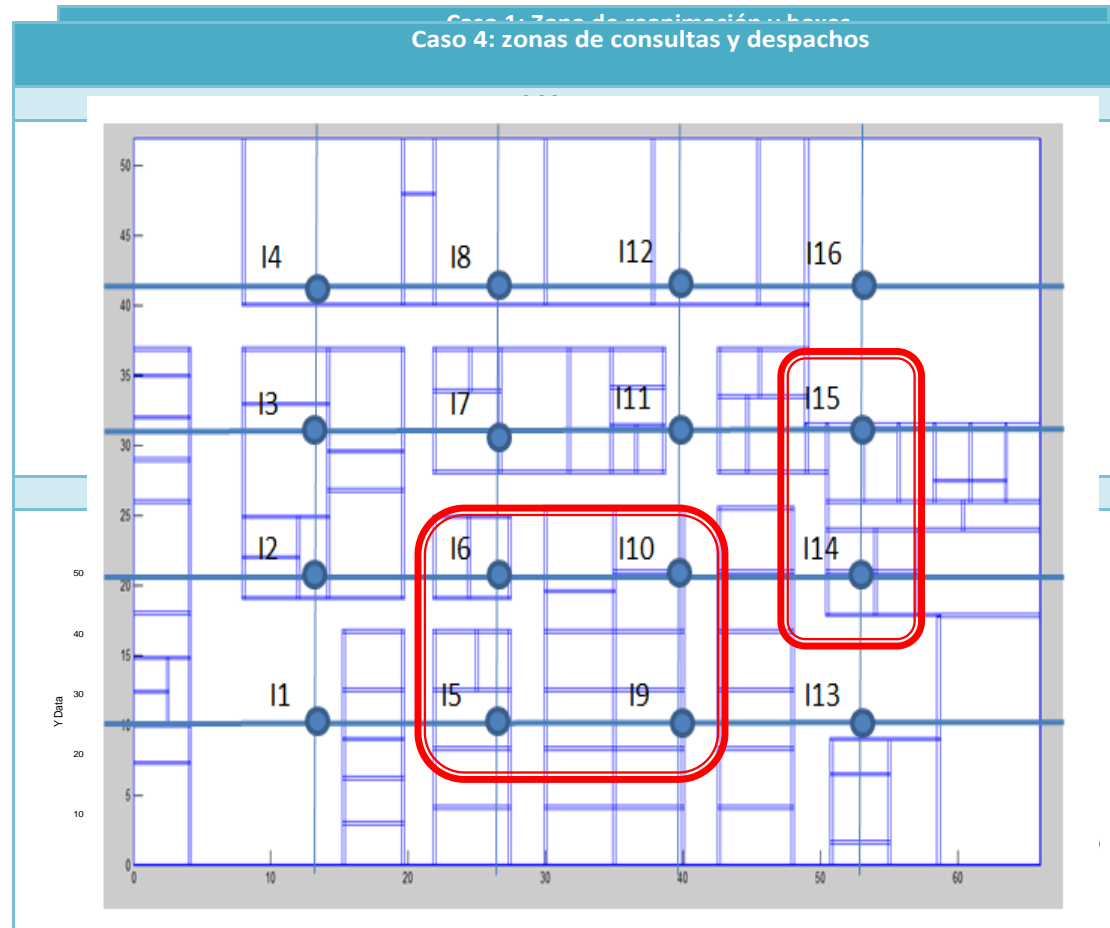
▶ Perfiles de retardo de potencia, PDP



Estudio de casos

Motivación y Objetivo
Contexto
Desarrollo
Metodología
Resultados
Parámetros
Estudio de casos
Conclusiones y Líneas futuras

► Caso 4



Conclusiones y líneas futuras



Conclusiones

- ▶ El diseño dispuesto de cinco antenas logra que se obtenga **mayor potencia**
- ▶ Una **red de sensores no** produciría la **degradación** de la **calidad** del servicio
- ▶ Se observan consecuencias de la **propagación multitrayecto**
- ▶ Al **aumentar la** frecuencia disminuye la cobertura
- ▶ Caso 4: Menor interferencia
- ▶ Anticipar si se **cumplirían las normas de EMC**
- ▶ Ayuda a la **elección** de los dispositivos, médicos y de comunicaciones, adecuados que hagan que se cumplan todos los requerimientos.

Líneas Futuras

- ▶ Realizar el estudio introduciendo ciertos cambios:
 - Incluir **personas**
 - Incluir todos los **objetos** del escenario
 - Considerar las **distintas tecnologías** de comunicación, distintas frecuencias.
 - **Cambiar la configuración** propuesta.
- ▶ Extrapolación del estudio a **otros entornos** similares.
- ▶ Creación de un **modelo de propagación específico** para éste tipo de entornos
- ▶ Implantación de sistemas de comunicación con la **tecnología Li-Fi** actualmente en desarrollo.

Publicación

- ▶ Enviado a la 6ª Conferencia Internacional de Información, Inteligencia, Sistemas y Aplicaciones



¡Gracias por su atención!



Ruegos y preguntas

