



DESARROLLO DE UNA SOLUCIÓN DE CONECTIVIDAD INALÁMBRICA DE ANTENAS INTEGRADAS CON ENVOLVENTES METÁLICAS

Marta García Mota

Tutor: Eva Antonino Daviu

Cotutor: Ernesto Sornosa Alba

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería de Telecomunicación

Curso 2020-21

Valencia, 04 de julio de 2021



Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo el desarrollo de una solución de conectividad 4G que permita efectuar un desvío de llamada, desde las placas de videoportero de la empresa FERMAX, que están recubiertas de carcasas metálicas, hasta un *smartphone*. El trabajo se ha realizado en la empresa FERMAX, en colaboración con el instituto de investigación iTEAM de la UPV.

Para alcanzar este objetivo, se estudia en primer lugar la problemática de conectividad que presentan las antenas integradas en dispositivos electrónicos con envolventes metálicas. Asimismo, tras este estudio teórico se proponen las antenas chip y las antenas flexibles adhesivas como alternativa comercial de antena integrada. Posteriormente, se plantean diferentes pruebas de campo con ambas soluciones de antena en diferentes configuraciones, y se evalúan, desde el punto de vista experimental, sus prestaciones en cuanto a nivel y calidad de señal de la cobertura 4G. Por último, se despliegan tres instalaciones piloto reales de videoportero FERMAX para comprobar el correcto funcionamiento del servicio de desvío de llamada con las soluciones propuestas.



Resum

El present Treball Fi de Màster té com a objectiu el desenvolupament d'una solució de connectivitat 4G que permeta efectuar un desviament de trucada, des de les plaques de videoporter de l'empresa FERMAX, que estan recobertes de carcasses metàl·liques, fins a un *smartphone*. El treball s'ha realitzat en l'empresa FERMAX, en col·laboració amb l'institut d'investigació iTEAM de la UPV.

Per a aconseguir aquest objectiu, s'estudia en primer lloc la problemàtica de connectivitat que presenten les antenes integrades en dispositius electrònics amb envoltants metàl·liques. Així mateix, després d'aquest estudi teòric es proposen les antenes xip i les antenes flexibles adhesives com a alternativa comercial d'antena integrada. Posteriorment, es plantegen diferents proves de camp amb totes dues solucions d'antena en diferents configuracions, i s'avaluen, des del punt de vista experimental, les seues prestacions quant a nivell i qualitat de senyal de la cobertura 4G. Finalment, es despleguen tres instal·lacions pilot reals de videoporter FERMAX per a comprovar el correcte funcionament del servei de desviament de trucada amb les solucions proposades.



Abstract

The aim of this Master's Thesis is to develop a 4G connectivity solution that allows a call forwarding from the video door entry panels of the FERMAX company, which are covered with metal casings, to a smartphone. The work has been carried out in the FERMAX company, in collaboration with the UPV's research institute iTEAM.

To achieve this goal, the connectivity problem of antennas integrated in electronic devices with metallic covering is first studied. Likewise, after this theoretical study, chip antennas and adhesive flexible antennas are proposed as a commercial alternative of integrated antennas. Subsequently, different field tests are conducted with both proposed antennas in different configurations, and their performance in terms of signal level and signal quality in 4G coverage is evaluated from an experimental point of view. Finally, three real pilot installations of FERMAX video door entry are deployed to check the correct operation of the call forwarding service with the proposed solutions.



Índice

Capítulo 1.	Motivación, objetivos y metodología.....	9
1.1	Motivación y contexto.....	9
1.1.1	FERMAX.....	9
1.1.2	Producto Conectado.....	9
1.1.3	4G frente a Wi-Fi.....	10
1.2	Objetivos de este Trabajo Fin de Máster.....	11
1.3	Metodología de trabajo.....	11
1.3.1	Gestión del proyecto y distribución de tareas.....	11
1.3.2	Diagrama temporal.....	12
1.3.3	Procedimiento seguido para pruebas de campo.....	12
Capítulo 2.	Introducción.....	14
2.1	LTE (<i>Long Term Evolution</i>).....	14
2.1.1	Tecnología LTE.....	14
2.1.2	Bandas de frecuencia en España.....	15
2.1.3	Parámetros de calidad de servicio.....	15
2.1.4	Criterios de selección de estaciones base.....	17
2.1.5	Factores determinantes de cobertura.....	17
2.2	Antenas.....	18
2.2.1	Parámetros característicos de las antenas en transmisión.....	18
2.2.2	Parámetros característicos de las antenas en recepción.....	25
2.2.3	Redes de adaptación.....	26
2.2.4	Antenas básicas.....	29
2.2.4.1	Dipolos.....	29
2.2.4.2	Monopolos.....	30
2.2.5	Antenas integradas en dispositivos electrónicos.....	30
2.2.5.1	Antenas chip.....	31
2.2.5.2	Antenas flexibles.....	35
2.2.6	Problemática con envolventes metálicas y otros materiales.....	37
Capítulo 3.	Producto Conectado.....	41
3.1	Módulo 4G.....	41
3.2	Antena chip Antenova Inversa SR4L034-L/R.....	41
3.3	Circuito módem 4G.....	50
3.4	Procedimiento y análisis de pruebas de cobertura.....	51
3.5	Pruebas de cobertura con Producto Conectado.....	51



3.6	Estudio realizado por el iTEAM	52
3.7	Pruebas con aperturas en el metal	61
3.8	Influencia de los materiales.....	63
Capítulo 4.	Rediseño del Producto Conectado con circuito en L.....	67
4.1	Pruebas de cobertura con Producto Conectado con circuito en L.....	68
4.2	Estudio realizado por el iTEAM	72
Capítulo 5.	Solución alternativa: Antena dipolo flexible.....	80
5.1	Pruebas de cobertura con antenas dipolo flexibles.....	81
5.2	Antena flexible Molex 212570-0150	86
5.3	Pruebas de cobertura con antena Molex 212570-0150	94
Capítulo 6.	Comparativa de las alternativas.....	97
Capítulo 7.	Instalaciones piloto.....	99
7.1	Instalación piloto 01	101
7.2	Instalación piloto 02.....	103
7.3	Instalación piloto 03.....	105
Capítulo 8.	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	109
8.1	Conclusiones de este Trabajo Fin de Máster.....	109
8.2	Trabajo futuro.....	109
Capítulo 9.	Pliego de condiciones.....	111
9.1	Materiales y equipos utilizados	111
9.2	Esquemas de conexión	112
Capítulo 10.	Bibliografía.....	115
Anexos.....		118
Anexo I.	Resultados de cobertura con circuito módem 4G rectangular.....	118
Anexo II.	Resultados de cobertura con circuito módem 4G en L	119
Anexo III.	Resultados de cobertura con antenas flexibles	120
Anexo IV.	Resultados de cobertura con antena Molex 212570-0150.....	121
Anexo V.	Resultados de cobertura en instalaciones piloto	122

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt del Trabajo Fin de Máster.....	12
Figura 2. Esquemas de acceso múltiple en LTE [11].....	14
Figura 3. Calidad de servicio según los parámetros RSRP, RSRQ y SINR [13].....	16
Figura 4. Circuito equivalente de una antena [18].....	19
Figura 5. Sistema de coordenadas esférico [17].....	20
Figura 6. Diagrama de radiación tridimensional [17].....	21
Figura 7. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas [17].....	21
Figura 8. Diagrama de radiación en coordenadas polares [17].....	22
Figura 9. Diagrama de radiación de una antena isótropa, omnidireccional y directiva [17].....	22
Figura 10. Directividad [17].....	23
Figura 11. Estimación de la directividad a partir del ángulo sólido equivalente [17].....	23
Figura 12. Polarización lineal, circular y elíptica [21].....	24
Figura 13. Comportamiento espacial de campos E (líneas continuas) y H (discontinuas) [21].....	25
Figura 14. Adaptación en recepción [18].....	25
Figura 15. Red de adaptación de impedancia entre generador y carga [22].....	26
Figura 16. Redes de adaptación en L posibles [23].....	27
Figura 17. Red de adaptación en Pi [22].....	28
Figura 18. Red de adaptación en T [22].....	28
Figura 19. Red de adaptación con un transformador [22].....	29
Figura 20. Modelo de antena dipolo como línea de transmisión abierta [17].....	29
Figura 21. Diagrama de radiación de un dipolo en 3D (izq.) y corte en plano E (dcha.) [17].....	29
Figura 22. Antena monopolo [17].....	30
Figura 23. Estructura de una antena chip [24].....	31
Figura 24. Emplazamientos excelentes para antenas chip [26].....	32
Figura 25. Emplazamientos buenos (izquierda) y aceptables (derecha) para antenas chip [26].....	32
Figura 26. Emplazamientos no recomendables para antenas chip [26].....	32
Figura 27. Parámetros de referencia de la PCB utilizada en el estudio [27].....	33
Figura 28. Distintas ubicaciones de la antena chip [27].....	33
Figura 29. Eficiencia de radiación en función de la posición de la antena chip [27].....	33
Figura 30. Distintos tamaños de la PCB [27].....	34
Figura 31. Eficiencia de radiación de la antena chip en función del tamaño de la PCB [27].....	34
Figura 32. Diagrama de radiación de una antena chip situada verticalmente [25].....	35
Figura 33. Antena flexible con adhesivo [28].....	36
Figura 34. Diseño de antena PIFA con carcasa de ABS [31].....	38

Figura 35. Comparativa S_{11} con carcasa y S_{11} en espacio libre [31]	38
Figura 36. Diseño de antena PIFA con carcasa de ABS y cristal [31]	38
Figura 37. Comparativa S_{11} con carcasa y S_{11} con carcasa y cristal [31]	39
Figura 38. Ejemplo de antena integrada en la PCB de un dispositivo inalámbrico [32]	39
Figura 39. Efecto del entorno en antenas integradas en <i>smartphone</i> [33]	40
Figura 40. Materiales de mayor a menor atenuación	40
Figura 41. Módulo SIM7500E [35]	41
Figura 42. Antenova SR4L034-L (izquierda) y Antenova SR4L034-R (derecha) [36]	42
Figura 43. Pérdidas de retorno Antenova SR4L034-L/R [36]	43
Figura 44. Relación de Onda Estacionaria Antenova SR4L034-L/R [36]	44
Figura 45. PCB de evaluación SR4L034-EVB-1 [36]	44
Figura 46. Circuito de adaptación de la antena Antenova SR4L034-L/R [36]	45
Figura 47. Orientación de referencia de la PCB de evaluación de Antenova [36]	45
Figura 48. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 746 MHz [36]	46
Figura 49. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 880 MHz [36]	46
Figura 50. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 1990 MHz [36]	47
Figura 51. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 2350 MHz [36]	47
Figura 52. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 2600 MHz [36]	48
Figura 53. Eficiencia de Antenova SR4L034-L/R según longitud del plano de masa [36]	48
Figura 54. Longitudes del plano de masa probadas [36]	49
Figura 55. Emplazamiento horizontal (izq.) y vertical (dcha.) de Antenova SR4L034-L/R [36]	49
Figura 56. Regla para emplazar componentes próximos a Antenova SR4L034-L/R [36]	50
Figura 57. Circuito módem 4G del Producto Conectado	50
Figura 58. Dimensiones del circuito módem 4G del Producto Conectado [37]	51
Figura 59. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX	52
Figura 60. Medida de las antenas sin red de adaptación [37]	53
Figura 61. S_{11} medido en las antenas sin red de adaptación [37]	53
Figura 62. S_{11} medido en las antenas con red de adaptación [37]	53
Figura 63. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [37]	54
Figura 64. S_{11} medido en la antena con red de adaptación y circuitería, sin carcasa [37]	54
Figura 65. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [37]	55
Figura 66. S_{11} medido en la antena con red de adaptación y circuitería, con carcasa [37]	55
Figura 67. Comparación S_{11} de las medidas (arriba) [37] y del <i>datasheet</i> (abajo) [36]	56
Figura 68. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [38]	57
Figura 69. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [38]	57
Figura 70. Ejes de referencia para diagrama de radiación 3D [38]	57
Figura 71. Diagrama de radiación 3D en 700 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]	58



Figura 72. Diagrama de radiación 3D en 900 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38].....	58
Figura 73. Diagrama de radiación 3D en 1300 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38].....	59
Figura 74. Diagrama de radiación 3D en 1800 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38].....	59
Figura 75. Diagrama de radiación 3D en 3000 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38].....	60
Figura 76. Placa de calle modelo CITYLINE de FERMAX con ranura.....	61
Figura 77. Placa de calle modelo CITYLINE de FERMAX con módulo de plástico pequeño ..	62
Figura 78. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX con módulo de plástico grande	63
Figura 79. Placa con caja de empotrar metálica en la pared.....	64
Figura 80. Placa con caja de empotrar metálica en la ventana	64
Figura 81. Placa con caja de empotrar de plástico en la pared	65
Figura 82. Placa con caja de empotrar de plástico en la ventana.....	65
Figura 83. Circuito módem 4G del Producto Conectado en L.....	67
Figura 84. Dimensiones del circuito módem 4G del Producto Conectado en L	67
Figura 85. Placas sin ranura, con ranura pequeña, mediana y grande (de izquierda a derecha) .	68
Figura 86. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX con módulo grande de plástico	70
Figura 87. Producto Conectado con circuito en L para pruebas iTEAM [39].....	72
Figura 88. Ranuras pequeña, mediana y grande (de izq. a dcha.) para pruebas iTEAM [39].....	72
Figura 89. S_{11} medido en la antena con carcasa con ranura grande [39].....	73
Figura 90. S_{11} medido en la antena con carcasa con ranura mediana [39]	73
Figura 91. S_{11} medido en la antena con carcasa con ranura pequeña [39]	74
Figura 92. Comparación S_{11} de la ranura mediana (arriba) [39] y del <i>datasheet</i> (abajo) [36]	75
Figura 93. Comparación S_{11} de la ranura mediana (arriba) y sin ranura (abajo) [39]	76
Figura 94. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [38]	77
Figura 95. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [38]	77
Figura 96. Ejes de referencia para diagrama de radiación 3D [38]	78
Figura 97. Diagrama de radiación 3D en 1800 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38].....	78
Figura 98. Diagrama de radiación 3D inicial (izq.) y actual (dcha.) a 1800 MHz [38]	79
Figura 99. Antena Molex 105263-0001	80
Figura 100. Antena Molex 212570-0150	81
Figura 101. Antena Molex 209142-0180	81
Figura 102. Antena Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100	81
Figura 103. Antena Antenova SRFC015-150	81
Figura 104. Antena RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL.....	81
Figura 105. Antena RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL.....	81
Figura 106. Antena flexible pegada en la ranura no metálica grande	82
Figura 107. Antena flexible pegada en el módulo de plástico pequeño.....	82
Figura 108. Capas de la antena Molex 212570-0150 [28]	86



Figura 109. Antena cargada y VNA [28]	87
Figura 110. Antena cargada en cámara OTA [28]	87
Figura 111. Orientación de referencia para la evaluación [28]	87
Figura 112. Pérdidas de retorno Molex 212570-0150 en 824-960 MHz [28].....	88
Figura 113. Pérdidas de retorno Molex 212570-0150 en 1710-2170 MHz [28].....	88
Figura 114. Eficiencia Molex 212570-0150 en 824-960 MHz [28].....	89
Figura 115. Eficiencia Molex 212570-0150 en 1710-2170 MHz [28].....	89
Figura 116. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 824 MHz [28].....	90
Figura 117. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 960 MHz [28].....	90
Figura 118. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 1710 MHz [28].....	91
Figura 119. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 2170 MHz [28].....	91
Figura 120. Pérdidas de retorno a 824-960 MHz con diferentes longitudes de cable [28]	92
Figura 121. Pérdidas de retorno a 1710-2170 MHz con diferentes longitudes de cable [28]	92
Figura 122. Eficiencia a 824-960 MHz con diferentes longitudes de cable [28]	93
Figura 123. Eficiencia a 1710-2170 MHz con diferentes longitudes de cable [28]	93
Figura 124. Separación del cable coaxial [28]	94
Figura 125. Placas con ranura pequeña, mediana y grande (de izquierda a derecha)	94
Figura 126. Molex 212570 en módulo de plástico pequeño (izquierda) y grande (derecha)	95
Figura 127. Estaciones base cercanas a FERMAX [46]	99
Figura 128. Mapa de cobertura de FERMAX [47]	100
Figura 129. Placa original de la instalación piloto 01	101
Figura 130. Placa sustitutiva de la instalación piloto 01	101
Figura 131. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 01 [46].....	102
Figura 132. Mapa de cobertura de la instalación piloto 01 con operador original [47]	103
Figura 133. Mapa de cobertura de la instalación piloto 01 con segundo operador [47]	103
Figura 134. Placa de la instalación piloto 02.....	104
Figura 135. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 02 [46].....	104
Figura 136. Mapa de cobertura de la instalación piloto 02 con operador original [47]	105
Figura 137. Placa original de la instalación piloto 03	105
Figura 138. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 03 [46].....	106
Figura 139. Mapa de cobertura de la instalación piloto 03 con operador original [47]	106
Figura 140. Mapa de cobertura de la instalación piloto 03 con segundo operador [47]	107
Figura 141. Placa provisional de la instalación piloto 03.....	108
Figura 142. Conexionado de antena flexible adhesiva en instalación piloto 03.....	108



Índice de Tablas

Tabla 1. Frecuencias y bandas LTE en España.....	15
Tabla 2. Nivel de señal según valores de RSRP [14].....	17
Tabla 3. Calidad de señal según valores de RSRQ [14].....	17
Tabla 4. Especificaciones módulo SIM7500E.....	41
Tabla 5. Especificaciones Antenova SR4L034-L/R.....	42
Tabla 6. Características de radiofrecuencia de Antenova SR4L034-L/R.....	43
Tabla 7. Componentes del circuito de adaptación de Antenova SR4L034-L/R.....	45
Tabla 8. Resultado pruebas de cobertura con Antenova SR4L034-L.....	52
Tabla 9. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-L con ranura no metálica.....	61
Tabla 10. Resultado pruebas de cobertura con módulo de plástico pequeño.....	62
Tabla 11. Resultado pruebas de cobertura con módulo de plástico grande.....	63
Tabla 12. Resultado pruebas de cobertura con distintos materiales.....	66
Tabla 13. Longitudes de onda de las bandas LTE.....	66
Tabla 14. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-R sin ranura.....	69
Tabla 15. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-R con ranura pequeña.....	69
Tabla 16. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-R con ranura mediana.....	69
Tabla 17. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-R con ranura grande.....	70
Tabla 18. Resultado pruebas de cobertura con módulo grande de plástico.....	71
Tabla 19. Comparativa del parámetro S_{11} máximo.....	76
Tabla 20. Antenas flexibles adhesivas seleccionadas.....	80
Tabla 21. Resultados de cobertura con Molex 105263-0001.....	83
Tabla 22. Resultados de cobertura con Molex 212570-0150.....	83
Tabla 23. Resultados de cobertura con Molex 209142-0180.....	83
Tabla 24. Resultados de cobertura con Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100.....	84
Tabla 25. Resultados de cobertura con Antenova SRFC015-150.....	84
Tabla 26. Resultados de cobertura con RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL.....	84
Tabla 27. Resultados de cobertura con RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL.....	85
Tabla 28. Especificaciones Molex 212570-0150.....	86
Tabla 29. Características de radiofrecuencia Molex 212570-0150.....	86
Tabla 30. Resultado pruebas de cobertura con Molex 212570-0150.....	95
Tabla 31. Tabla comparativa de las alternativas de conectividad 4G.....	97
Tabla 32. Nivel de señal según valores de RSCP para UMTS [14].....	100
Tabla 33. Calidad de señal según valores de EC/IO para UMTS [14].....	100
Tabla 34. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 01.....	102



Tabla 35. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 02	104
Tabla 36. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 03	107
Tabla 37. Equipamiento utilizado en este proyecto	111

Capítulo 1. Motivación, objetivos y metodología

1.1 Motivación y contexto

Los constantes avances tecnológicos son los responsables de la creación de productos y servicios nuevos y mejorados en el mercado. Es por este avance que cada vez hay más dispositivos conectados a Internet. Según el último informe sobre Internet realizado por Cisco [1], se prevé que en el año 2023 habrá 29300 millones de dispositivos conectados en el mundo –la mitad de ellos objetos del Internet de las Cosas (IoT o *Internet Of Things*)– y 350 millones de dispositivos conectados en España.

Este Trabajo Fin de Máster nace de la oportunidad brindada por unas prácticas curriculares dentro de la empresa FERMAX, especializada en sistemas de portero y videoportero. Este sector ha evolucionado considerablemente en los últimos años, y en la actualidad cuenta con una oferta muy variada, con soluciones dirigidas a todo tipo de viviendas y adaptadas a estos nuevos avances tecnológicos.

1.1.1 FERMAX

FERMAX [2] es una empresa de origen español fundada en 1949 por D. Fernando Maestre, con sede en Valencia, España. Está especializada en equipos de portero electrónico, videoportero digital y sistemas de control de acceso, ocupando un lugar de preferencia entre las marcas más importantes del mundo.

Actualmente, FERMAX cuenta con filiales y oficinas de representación en 11 países: Bélgica, China, Francia, Polonia, Reino Unido, Singapur, Colombia, Dubái, Portugal, Turquía y España; y con distribuidores en otros 70 países del mundo.

La misión de FERMAX es ser los líderes en los sistemas de videoportero conectado, aprovechando la conectividad de sus instalaciones para proporcionar nuevos servicios y negocios a los distintos actores que interactúan con los edificios y las viviendas.

Actualmente, la empresa está trabajando en un nuevo Producto Conectado, que será el foco de este Trabajo Fin de Máster, realizado en el departamento de I+D+i de FERMAX.

1.1.2 Producto Conectado

Los equipos de videoportero electrónico más básicos constan de una placa de calle, que es el elemento exterior, y de un monitor, que es el elemento interior situado en la vivienda del usuario. Este sistema es escalable hasta 10 placas y 10000 monitores por cada bloque, y puede haber hasta 100 bloques, por lo que, en total, es posible instalar hasta 1000 placas y un millón de monitores. Todos los monitores y las placas de calle se encuentran cableados con un bus de 2 hilos.

El Producto Conectado que FERMAX está desarrollando consistirá en una placa de calle dotada de conectividad 4G para llevar a cabo un desvío de llamada desde dicha placa hasta un *smartphone* o teléfono inteligente y monetizarlo. En el apartado 9.2 *Esquemas de conexión* están representados los tres esquemas de conexión más comunes dentro de los sistemas de videoportero, particularizados para el Producto Conectado.

Desde el *smartphone* y a través de la aplicación BLUE [3] que la propia empresa ha desarrollado, el usuario será capaz de ver quién llama a su casa en cada momento, escuchar su voz, entablar conversación y abrirle la puerta si así lo desea.

Para proporcionar este servicio, la tasa máxima de transmisión de datos en el bus de dos hilos es de 300 kbps, por lo que no será necesario disponer de la máxima cobertura 4G en la placa para obtener un servicio adecuado.

Esta solución de conectividad se implementará inicialmente en los dos diseños principales de videoportero de FERMAX:

- CITYLINE [4]: una placa única con el frontal de aluminio.
- SKYLINE [5]: una placa modular también con el frontal de aluminio.

Como se puede comprobar, el Producto Conectado se encontrará rodeado completamente por metal; utilizará una caja de empotrar metálica, un frontal de aluminio y un marco también de aluminio. Con esta configuración, la señal tendrá dificultades para salir de la envolvente metálica.

Internamente, este producto contará con un diseño modular formado por hasta tres circuitos, dependiendo del modelo de placa que se utilice:

- Circuito base, donde se encontrarán la alimentación, el procesador principal, las conexiones, el sistema de comunicaciones, el audio y el vídeo. Este circuito está presente en las placas CITYLINE y SKYLINE.
- Circuito de pulsadores y diodos LED, únicamente disponible en la placa CITYLINE.
- Circuito módem 4G, donde se encontrarán dicho módem, la alimentación, la tarjeta SIM y la antena. Este circuito será exclusivo del Producto Conectado.

Con todo esto, FERMAX quiere desarrollar la mejor solución de conectividad 4G, que proporcione la cobertura suficiente para poder realizar el desvío de llamada mencionado, manteniendo en la medida de lo posible la misma estética, dimensiones y materiales de las placas no conectadas.

El principal problema para poder realizar un diseño correcto es la limitación de espacio disponible en el producto y el chasis metálico que lo conforma. Además, se busca la máxima transparencia para el instalador de videoportero, es decir, que no tenga que llevar a cabo la instalación o el conexionado de ningún elemento externo al videoportero o monitor, como pueden ser antenas, tarjetas SIM o circuitos, ya que no es un instalador profesional de telecomunicaciones.

El Producto Conectado, junto con la aplicación BLUE, pretende convertirse en una plataforma que, con el tiempo, vaya integrando nuevos servicios tanto para los usuarios como para los instaladores y administradores.

1.1.3 4G frente a Wi-Fi

Actualmente, FERMAX tiene en el mercado los monitores VEO Wi-Fi [6] y VEO-XS Wi-Fi [7], que son un producto similar que realiza el desvío de llamada, mediante tecnología Wi-Fi, desde el monitor hasta la aplicación BLUE instalada en el *smartphone*.

Sin embargo, con la tecnología Wi-Fi instaurada en los monitores, el control es únicamente a nivel de vivienda, mientras que con la tecnología 4G incorporada en la placa de calle, el control será a nivel de edificio. La principal ventaja que esto supone para FERMAX es que la conexión solo dependerá de la empresa.

Respecto a las ventajas que supone para el usuario, la calidad de la llamada se verá incrementada por numerosos factores. Por un lado, el retardo en la llamada con 4G será menor al no pasar la señal por el bus de 2 hilos. Por otro lado, como las frecuencias empleadas en 4G (800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz y 2600 MHz) son más bajas que las de Wi-Fi (2,4 GHz y 5 GHz), tienen mayor penetración en los edificios (excepto la de 2600 MHz), ya que cuanto más larga sea la longitud de onda, más profunda será la penetración. Por último, la tecnología 4G tiene mayor ancho de banda y sus bandas están menos saturadas que en la tecnología Wi-Fi, al ser las segundas de libre utilización.

1.2 Objetivos de este Trabajo Fin de Máster

El objetivo general de este proyecto es la colaboración en el diseño y desarrollo de una solución de conectividad 4G en productos con envoltentes metálicas dentro de la empresa FERMAX, y que conlleva el análisis de consideraciones teóricas, pruebas físicas e implementación de una solución en el Producto Conectado final, que permita realizar el desvío de llamada a un teléfono móvil inteligente. Este objetivo lleva asociados unos objetivos más concretos:

- Colaborar con una empresa del sector de porteros y videoporteros en el desarrollo de uno de sus productos reales, y aprender por el camino el proceso del desarrollo de proyectos electrónicos desde el interior.
- Llevar a cabo un estudio teórico sobre el funcionamiento de la tecnología LTE, así como sus bandas de trabajo y sus parámetros de calidad de servicio.
- Investigar sobre las antenas integradas en dispositivos electrónicos para conocer sus parámetros característicos en transmisión y recepción, sus requisitos técnicos y los tipos de antena más utilizados.
- Conocer las especificaciones técnicas y el estado actual del Producto Conectado que FERMAX está desarrollando para sacar al mercado en un futuro próximo, y estudiar acerca de la antena utilizada en este producto para conocer sus características y su funcionamiento.
- Buscar información sobre el comportamiento teórico de las antenas situadas dentro de envoltentes metálicas y el efecto que estos materiales producen en su rendimiento.
- Realizar pruebas de campo con distintas configuraciones y casuísticas en cuanto a ubicación de la antena, variaciones físicas en la envoltente y materiales, cuantificando los niveles de cobertura obtenidos para analizar los resultados y compararlos con el estudio teórico realizado previamente.
- Plantear soluciones alternativas a la antena utilizada en el Producto Conectado, y realizar pruebas de campo con ellas, también con distintas configuraciones y casuísticas.
- Realizar una comparativa entre los resultados obtenidos en todas las pruebas y seleccionar la mejor alternativa para garantizar la calidad de servicio en el Producto Conectado.
- Si se obtiene una alternativa factible, efectuar una o varias pruebas piloto con el Producto Conectado en instalaciones reales de videoportero, para comprobar que el desvío de llamada funciona correctamente y extraer conclusiones.

1.3 Metodología de trabajo

1.3.1 Gestión del proyecto y distribución de tareas

Para abordar este Trabajo Fin de Máster, el proyecto se ha estructurado en cuatro fases principales.

En la primera de ellas, se realizó una investigación teórica sobre la situación actual del Producto Conectado de FERMAX. Para ello se buscó información, en primer lugar, acerca de la tecnología LTE, sus parámetros de calidad de servicio y sus factores determinantes de cobertura; en segundo lugar, acerca de las antenas integradas en dispositivos electrónicos, así como de sus parámetros y propiedades; y, en tercer lugar, sobre la problemática que supone situar la antena en una envoltente metálica y con otros materiales.

En una segunda fase, se plantearon y llevaron a cabo una serie de pruebas de campo con el Producto Conectado. En ellas se buscaban soluciones que permitiesen aumentar la calidad de servicio de la cobertura LTE, variando el diseño del frontal de la placa, la ubicación de la antena o incluso los materiales del entorno. Estas pruebas se realizaron tanto con la versión inicial del Producto Conectado como con una versión posterior mejorada y rediseñada por FERMAX.

En la tercera fase, se buscaron alternativas a la antena utilizada en el producto, para tener diferentes opciones en caso de que esta no proporcione suficiente cobertura en alguna instalación. Finalmente, se optó por antenas flexibles adhesivas. Se seleccionaron y se compraron varios modelos de antena flexible para, posteriormente, realizar pruebas de campo con ellas. Gracias a los resultados obtenidos en estas pruebas, se seleccionó la mejor para nuestra aplicación, y se amplió la batería de pruebas realizadas con ella.

Por último, en la cuarta fase, se realizó una comparativa de todas las pruebas y alternativas estudiadas para seleccionar la o las soluciones más factibles en cuanto a calidad de servicio de la cobertura LTE. Con esta selección, FERMAX llevó a cabo un pequeño despliegue de instalaciones piloto en edificios reales, que sirvieron para extraer conclusiones y proponer mejoras futuras.

1.3.2 Diagrama temporal

El diagrama de Gantt mostrado en la Figura 1 recoge, a grandes rasgos, la distribución de tareas realizadas en este proyecto, así como su duración.

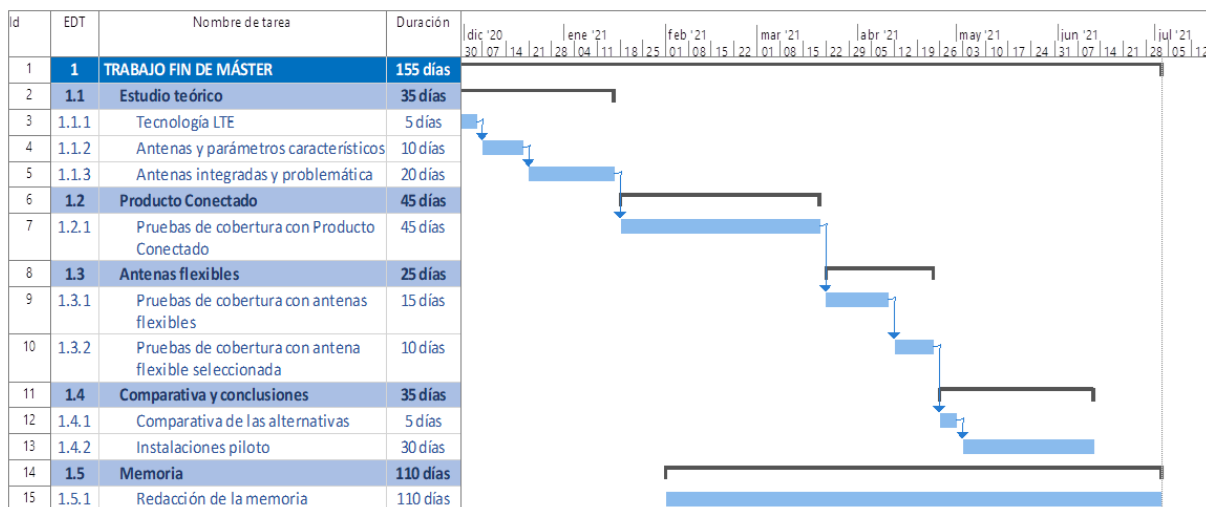


Figura 1. Diagrama de Gantt del Trabajo Fin de Máster

1.3.3 Procedimiento seguido para pruebas de campo

Durante este proyecto se han elaborado numerosas pruebas de campo para medir la cobertura de las antenas en sus distintas configuraciones y, en todas ellas, el procedimiento ha sido el mismo, descrito a continuación.

En primer lugar, es necesario realizar el conexionado del circuito módem 4G al circuito base de una placa de calle, con la antena y configuración deseadas. Una vez conectado todo, se procede a la instalación de la placa en una pared en el exterior, durante un periodo de tiempo determinado.

El módulo 4G del circuito módem se encarga de tomar muestras cada 30 segundos con los datos de cobertura más relevantes, tales como la fecha, la hora, la estación base a la que se conecta la antena, la banda de frecuencia y los principales parámetros de calidad de servicio LTE.



Cuando ha transcurrido el tiempo deseado, se desinstala la placa de la pared y se extraen los datos recopilados por el módulo en un archivo de texto plano en formato TXT. Para ello, se utiliza FileZilla, un *software* que realiza la transferencia de archivos mediante el protocolo FTP (*File Transfer Protocol*).

Tras la obtención del archivo TXT, se ejecuta un programa propio de la empresa que se encarga de agrupar los datos por estaciones base y bandas de frecuencia, y de calcular los valores promedio, máximo y mínimo de los distintos parámetros de calidad de servicio LTE.

Con todos estos datos, se sintetiza la información más relevante en un archivo de Microsoft Excel con todas las pruebas realizadas, agrupadas por antenas y configuraciones utilizadas. Esta hoja de datos facilita la comparación entre pruebas y permite la extracción de conclusiones. En *Anexos* se adjuntan las tablas de Excel creadas para recopilar los datos de todas las pruebas de cobertura llevadas a cabo durante este proyecto.

Por último, si se considera necesario, se plantean nuevas pruebas en base a los resultados y conclusiones obtenidos.

Capítulo 2. Introducción

2.1 LTE (*Long Term Evolution*)

LTE es un estándar de comunicaciones móviles para transmisiones de datos de alta velocidad desarrollado por la 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) que está englobado dentro de la cuarta generación o 4G, y nace de la evolución del estándar UMTS (3G o tercera generación) y, a su vez, de GSM (2G o segunda generación).

2.1.1 Tecnología LTE

La tecnología LTE está orientada a datos, y se basa en una arquitectura de conmutación de paquetes “todo IP”. Los principales objetivos planteados para el desarrollo de esta tecnología fueron los siguientes [8] [9]:

- Aumentar la tasa pico de datos, garantizando como mínimo 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente.
- Alcanzar eficiencias espectrales elevadas, del orden de 5 bps/Hz en el enlace descendente y de 2,5 bps/Hz en el enlace ascendente.
- Flexibilidad en la asignación de frecuencias del espectro, con asignaciones desde 1,4 MHz hasta 20 MHz dependiendo del espectro disponible.
- Mejorar la capacidad del sistema y la cobertura.
- Reducir la latencia.

El esquema de acceso múltiple utilizado en el enlace descendente es OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), mientras que el enlace ascendente utiliza SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) [10]. Estas soluciones de acceso múltiple proporcionan ortogonalidad entre los usuarios, reduciendo las interferencias y mejorando la capacidad de la red.

La asignación de recursos en el dominio de la frecuencia ocurre con una resolución de bloques de recursos o *resource blocks* de 180 kHz para ambos enlaces [11]. La asignación específica del usuario en el enlace ascendente es continua para permitir la transmisión de portadora única, mientras que en el enlace descendente se pueden utilizar *resource blocks* libremente desde diferentes partes del espectro. Ambos esquemas de acceso múltiple comentados se ilustran en la Figura 2.

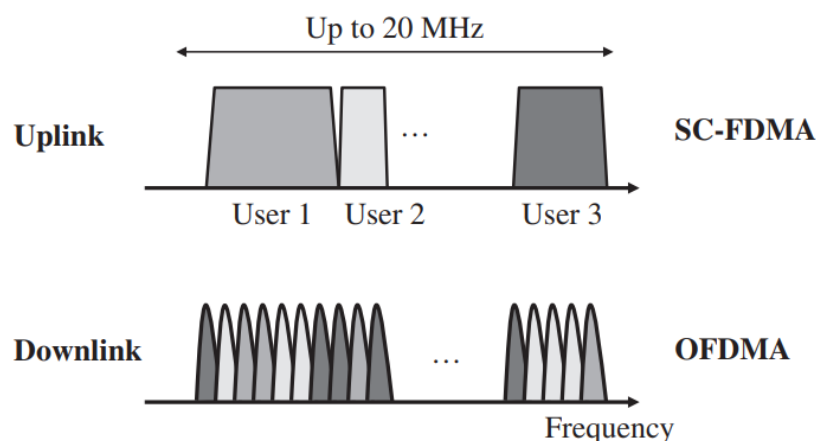


Figura 2. Esquemas de acceso múltiple en LTE [11]

Para lograr una capacidad de red alta es necesaria una arquitectura eficiente, donde se reduzca el número de elementos de la red para, además, mejorar la escalabilidad y minimizar la latencia de un extremo a otro de la red con un tráfico mayor. Es por ello por lo que en las estaciones base, denominadas *eNodeB*, se encuentran todos los protocolos de radio, de gestión de movilidad, de compresión de encabezados y de retransmisión de paquetes.

El siguiente paso en el desarrollo de LTE fue el estándar LTE-Advanced (LTE-A), ofreciendo una tasa pico de datos de 1 Gbps tanto en enlace ascendente como descendente para requerimientos de baja movilidad, y 100 Mbps para requerimientos de alta movilidad.

2.1.2 Bandas de frecuencia en España

Las bandas y frecuencias utilizadas en la tecnología LTE en España se recogen en la Tabla 1 [12]. La mayoría de estas bandas son compartidas con otros estándares de comunicación.

Banda LTE	Frecuencia (MHz)	Frecuencias de subida (MHz)	Frecuencias de bajada (MHz)	Uso actual	Operadores
20	800	832 – 862	791 – 821	4G/LTE	Movistar, Orange, Vodafone
8	900	880 – 915	925 – 960	2G/GMS, 3G/UMTS, 4G/LTE, 5G	Movistar, Orange, Vodafone
3	1800	1710 – 1785	1805 – 1880	2G/GMS, 4G/LTE	Movistar, Orange, Vodafone, MásMóvil
1	2100	1920 – 1980	2110 – 2170	3G/UMTS, 4G/LTE, 5G	Movistar, Orange, Vodafone, MásMóvil
7	2600	2500 – 2570	2620 – 2690	4G/LTE, 5G	Movistar, Orange, Vodafone, varios

Tabla 1. Frecuencias y bandas LTE en España

2.1.3 Parámetros de calidad de servicio

Para analizar la calidad de servicio y las condiciones radio dentro de la tecnología LTE, y que el UE (*User Equipment*) o terminal de usuario seleccione una estación base u otra, se utilizan los siguientes parámetros [13]:

a) *RSSI (Received Signal Strength Indicator) (dBm)*.

Representa la potencia completa recibida en una frecuencia determinada, incluyendo la potencia deseada de la celda, la potencia del ruido de interferencia de otras celdas y la potencia de otras fuentes de ruido. Es decir, el RSSI es la suma de la potencia de la celda en la banda más el ruido y las interferencias.

b) *RSRP (Reference Signal Received Power) (dBm).*

Es un tipo de medida RSSI, y mide el nivel de potencia de las señales de referencia LTE repartidas por todo el ancho de banda y banda estrecha. Es decir, es la potencia media recibida por portadora LTE calculada sobre todas las señales de referencia. El valor típico de RSRP en el borde de una celda es -120 dBm.

c) *RSRQ (Reference Signal Received Quality) (dB).*

Es el promedio de la potencia recibida sobre todo el ancho de medición, y mide la calidad de la señal de referencia recibida. Se calcula según la expresión (2.1), a partir del RSRP y considerando el RSSI y el número de *resource blocks* (N_{RB}) medidos sobre el mismo ancho de banda.

$$RSRQ = \frac{N_{RB} \cdot RSRP}{RSSI} \quad (2.1)$$

El RSRQ proporciona información adicional cuando el RSRP no es suficiente para tomar una decisión a la hora de hacer un *handover* (transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones) o una re-selección de celda fiable.

d) *SINR (Signal to Interference + Noise Ratio) (dB).*

Este parámetro indica la capacidad o tasa de transferencia del canal. Es la fuerza de la señal dividida entre la fuerza de cualquier interferencia más el ruido. Se necesita un mínimo de -20 dB de SINR para detectar el RSRP o RSRQ.

e) *CQI (Channel Quality Indicator).*

Es la información que el UE envía a la red y, por tanto, un indicador de calidad del canal. Este parámetro puede tomar valores de 0 a 15 y, cuanto mayor sea el CQI enviado por el terminal de usuario, la transmisión de datos se hará con tamaños de bloque de transporte mayores, lo que se traduce en una mejor calidad.

De entre todos estos parámetros, los más importantes y utilizados son el RSRP (nivel de señal) y el RSRQ (calidad de señal), recogidos en la Figura 3 junto con la clasificación de calidad según sus valores. Además, en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se detalla el significado de cada uno de los rangos de la clasificación.

		RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
RF Conditions	Excellent	≥ -80	≥ -10	≥ 20
	Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
	Mid Cell	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
	Cell Edge	≤ -100	< -20	≤ 0

Figura 3. Calidad de servicio según los parámetros RSRP, RSRQ y SINR [13]

RSRP (dB)	Señal	Descripción
≥ -80	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-80 a -90	Bueno	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-90 a -100	Pobre	Pueden alcanzarse velocidades de datos fiables, pero es posible que haya datos marginales con pérdidas. Cuando este valor se acerca a -100, el rendimiento caerá drásticamente
≤ -100	Sin señal	Desconexión

Tabla 2. Nivel de señal según valores de RSRP [14]

RSRQ (dB)	Señal	Descripción
≥ -10	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-10 a -15	Bueno	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-15 a -20	Pobre	Pueden alcanzarse velocidades de datos fiables, pero es posible que haya datos marginales con pérdidas. Cuando este valor se acerca a -20, el rendimiento caerá drásticamente
≤ -20	Sin señal	Desconexión

Tabla 3. Calidad de señal según valores de RSRQ [14]

2.1.4 Criterios de selección de estaciones base

En el sistema LTE, el terminal de usuario debe detectar y monitorear la presencia de múltiples estaciones base y realizar una re-selección de celdas para asegurarse de que está conectada a la celda más adecuada. Un terminal de usuario conectado a una determinada estación base continuará monitoreando la calidad y fuerza de otras estaciones base para determinar si se requiere una re-selección de celdas [15].

A la hora de seleccionar una estación base u otra, se considera en primer lugar la fuerza de la señal (RSRP), y en segundo lugar la calidad de la señal (RSRQ) [9]. No hay una respuesta de blanco o negro para constituir una conexión con éxito. Es posible que el dispositivo se desconecte con valores muy buenos o que se conecte con valores malos.

Con valores de RSRP de todas las estaciones base cercanas, el modem escoge la estación con el mejor RSRP y, si los valores de dos estaciones se parecen, el modem utiliza el RSRQ para decidir. Si el RSRP es malo (señal débil) y el RSRQ es bueno, el módem es capaz de extraer la información, ya que esto significa que hay poco ruido.

Los valores RSSI y SINR también se analizan, pero no están definidos formalmente en la especificación LTE y no se comparan entre módems de distintos fabricantes.

2.1.5 Factores determinantes de cobertura

Hay diferentes factores que pueden influenciar el nivel y la calidad de señal; entre estos factores se incluyen la proximidad a la estación base, la carga de la estación base, barreras físicas (montañas, edificios, trenes...), competencia entre señales o factores meteorológicos.

Hay que tener en cuenta que los valores de RSRP y RSRQ medidos en un momento concreto no garantizan la estabilidad de la conexión, ya que estos valores variarán si cambian las condiciones. Estas condiciones pueden ser que el módem cambie de una estación base a otra, o que afecten a la señal fenómenos transitorios como condiciones climáticas o barreras físicas entre el terminal

de usuario y la estación base. Los valores de nivel de señal que indican que una conexión es *Excelente* no pueden evitar una pérdida de conectividad repentina pero breve.

2.2 Antenas

El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [16]. Tal y como se explica en [17], la misión de una antena es, por un lado, radiar la potencia que le es suministrada según la direccionalidad que requiere cada aplicación y, por otro lado, recibir las ondas radiadas. Algunos ejemplos de direccionalidad son las comunicaciones móviles, donde se busca radiar de manera omnidireccional sobre la zona de cobertura de interés, o las radiocomunicaciones fijas, en las que se busca radiar de forma direccional hacia el receptor.

A la hora de definir los parámetros característicos de una antena, es conveniente separarlos en parámetros relacionados con la transmisión y con la recepción.

2.2.1 Parámetros característicos de las antenas en transmisión

En relación con la transmisión de las antenas, se tienen en cuenta los parámetros listados a continuación [17].

a) Impedancia de entrada.

La antena y el transmisor al que está conectada deben de estar adaptados para conseguir que la potencia radiada sea máxima. A la entrada de la antena puede definirse la impedancia de entrada Z_a como la relación entre la tensión y la corriente presentes en ese punto. La impedancia de una antena tiene una parte real $R_a(\omega)$ y una parte imaginaria $X_a(\omega)$ que dependen de la frecuencia. Se dice que una antena es resonante a una frecuencia f_0 si la parte imaginaria de la impedancia de entrada de dicha antena es cero.

Toda antena tiene asociada una resistencia de radiación R_r , que representa la pérdida de potencia hacia el espacio debida a la radiación de la antena, y se define como el valor de la resistencia que disiparía la misma potencia que la radiada por la antena. Esta potencia radiada por la antena ($P_{radiada}$) se calcula según la ecuación (2.2).

$$P_{radiada} = I^2 R_r \quad (2.2)$$

Además de la potencia radiada, en la antena pueden producirse pérdidas óhmicas en forma de calor, que pueden englobarse en una resistencia de pérdidas R_Ω . La potencia de pérdidas ($P_{pérdidas}$) se calcula según la expresión (2.3).

$$P_{pérdidas} = I^2 R_\Omega \quad (2.3)$$

La resistencia de entrada R_a es la suma de las resistencias de radiación y de pérdidas y, por consiguiente, la impedancia de entrada se obtiene mediante la expresión de la ecuación (2.4).

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a} = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \quad (2.4)$$

Por lo tanto, la potencia entregada a la antena ($P_{entregada}$) se obtiene con la suma de la potencia radiada y la potencia de pérdidas en la antena, tal y como se muestra en la expresión (2.5).

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{pérdidas} = I^2 R_r + I^2 R_\Omega \quad (2.5)$$

La impedancia de entrada es un parámetro trascendental, que condiciona el valor de tensión que debe suministrar un generador para obtener en la antena un valor de corriente determinado y, en consecuencia, una potencia radiada concreta.

b) *Eficiencia.*

Al existir pérdidas en la antena, esta no radiará toda la potencia entregada por parte del transmisor. Se define eficiencia de radiación η_l como la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena o, de forma equivalente, la relación entre la resistencia de entrada de la antena sin pérdidas y la resistencia que realmente presenta, es decir, con pérdidas, según la ecuación (2.6).

$$\eta_l = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (2.6)$$

c) *Adaptación de la antena transmisora.*

Comúnmente, se busca que la antena esté adaptada al generador. De este modo, la potencia de dicho generador es transmitida a la antena y posteriormente radiada al espacio. Si la antena no se encuentra adaptada, parte de la potencia incidente procedente del generador se reflejaría hacia el mismo. Para que la antena radie la máxima potencia con las mínimas pérdidas posibles, el transmisor y la antena deben estar adaptados.

Normalmente, el transmisor se puede encontrar alejado de la antena, por lo que la conexión se realiza mediante una línea de transmisión o guía de ondas que también participará en esa adaptación, considerando su impedancia característica Z_0 , su longitud y su atenuación (Figura 4).

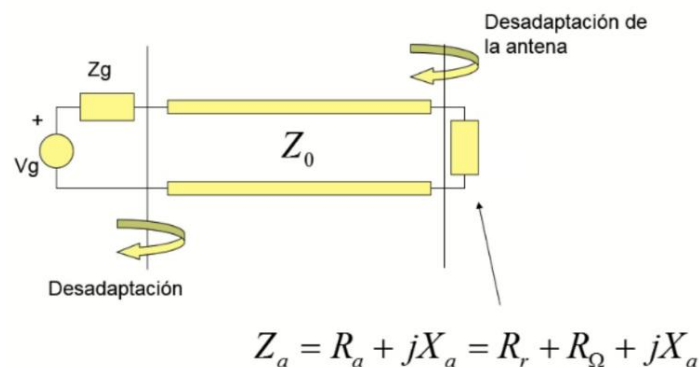


Figura 4. Circuito equivalente de una antena [18]

Dos parámetros para saber si la antena está o no adaptada son [19]:

- El coeficiente de reflexión de la antena con respecto a la línea de transmisión o generador, ρ , también conocido como parámetro S_{11} . Es calculado según la expresión (2.7), donde Z_a es la impedancia de la antena y Z_0 la impedancia de referencia. Puede tomar valores entre -1 y 1.

$$\rho = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (2.7)$$

A partir del coeficiente de reflexión y mediante la expresión (2.8), se pueden calcular las pérdidas de retorno RL , que es la diferencia en decibelios entre las amplitudes de la señal incidente y la reflejada.

$$RL \text{ (dB)} = -20 \log|\rho| \quad (2.8)$$

- La relación de onda estacionaria *ROE* (en inglés *VSWR*). Es una relación entre las tensiones máximas y mínimas, que se calcula a partir del coeficiente de reflexión mediante la fórmula (2.9), y que puede tomar valores entre 1 e ∞ .

$$ROE = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (2.9)$$

Una adaptación perfecta se consigue si $\rho = 0$ y $ROE = 1$. Por el contrario, se produce una desadaptación total cuando $|\rho| = 1$ y $ROE = \infty$.

d) *Intensidad de radiación.*

La capacidad que tienen las antenas para radiar en determinadas direcciones del espacio se cuantifica mediante la intensidad de radiación. Mediante este parámetro, se puede comparar esta característica de concentración de la energía radiada entre diferentes antenas.

Para definir la intensidad de radiación, se emplea el sistema de coordenadas esféricas, que define los ángulos θ y Φ , y utiliza los vectores unitarios \hat{r} , $\hat{\theta}$ y $\hat{\Phi}$, tal y como se ilustra en la Figura 5.

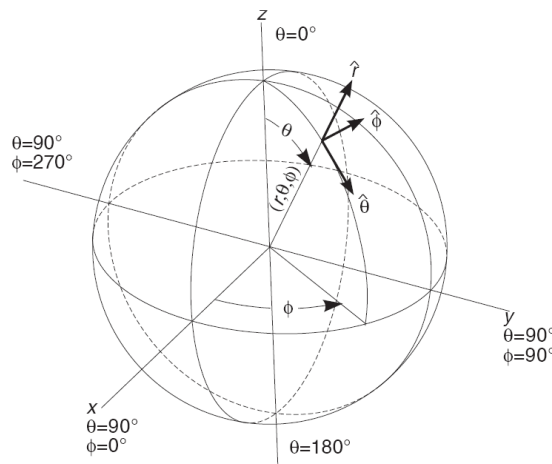


Figura 5. Sistema de coordenadas esférico [17]

La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico \vec{E} y de un campo magnético \vec{H} , ambos relacionados por las ecuaciones de Maxwell. En campo lejano, los módulos de estos dos campos se relacionan mediante la impedancia característica del medio η , cuyo valor es de $120\pi \Omega$ en el vacío.

La densidad de potencia $P(\theta, \Phi)$ se obtiene a partir de las componentes transversales del campo eléctrico con la ecuación (2.10), y la potencia radiada total $P_{radiada}$ puede obtenerse a partir de la integral de esta densidad de potencia en una superficie esférica que envuelva a la antena.

$$P(\theta, \Phi) = \frac{|E_{\theta}|^2 + |E_{\Phi}|^2}{\eta} \quad (2.10)$$

Por último, la intensidad de radiación $K(\theta, \Phi)$ es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. Tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena a grandes distancias, y sus unidades son vatios por estereorradián. Se relaciona con la densidad de potencia radiada según la ecuación (2.11).

$$K(\theta, \Phi) = P(\theta, \Phi)r^2 \quad (2.11)$$

e) *Diagrama de radiación.*

El diagrama de radiación de una antena es una representación gráfica de sus propiedades de radiación, a una distancia fija y en función de las distintas direcciones del espacio, utilizando normalmente el sistema de coordenadas esféricas. Como norma general, los diagramas de radiación se refieren al campo eléctrico, ya que el magnético se deriva directamente de este.

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional. Los niveles se expresan en decibelios respecto al máximo de radiación. El máximo es cero decibelios, y en las restantes direcciones del espacio los valores en dB son negativos.

En la Figura 6 está representado un diagrama de radiación de una antena en tres dimensiones, así como los planos E y H.

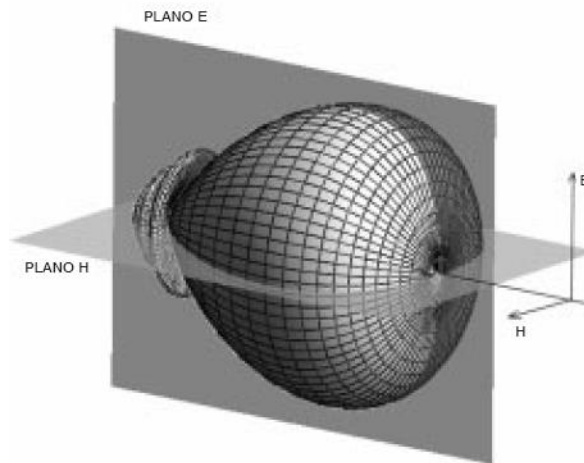


Figura 6. Diagrama de radiación tridimensional [17]

Para antenas linealmente polarizadas, se define el plano E como el plano formado por la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. Del mismo modo, la dirección de máxima radiación y el campo magnético en esa dirección forman el plano H. Los planos E y H son perpendiculares, y su intersección define la dirección de máxima radiación de la antena.

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares, donde el ángulo representa la dirección del espacio y el radio la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada, y en coordenadas cartesianas, donde se representa en abscisas el ángulo y en ordenadas el campo o la densidad de potencia.

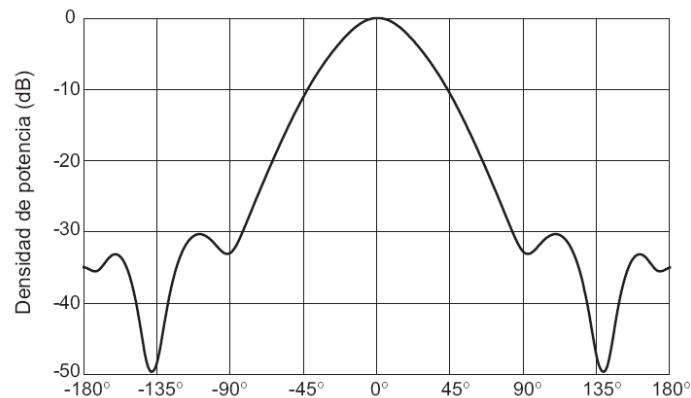


Figura 7. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas [17]

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de representación en coordenadas cartesianas del diagrama de radiación, la cual permite observar los detalles en antenas muy directivas.

Por otro lado, en la Figura 8 se ilustra un ejemplo de representación en coordenadas polares, donde se muestra de forma más clara la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio.

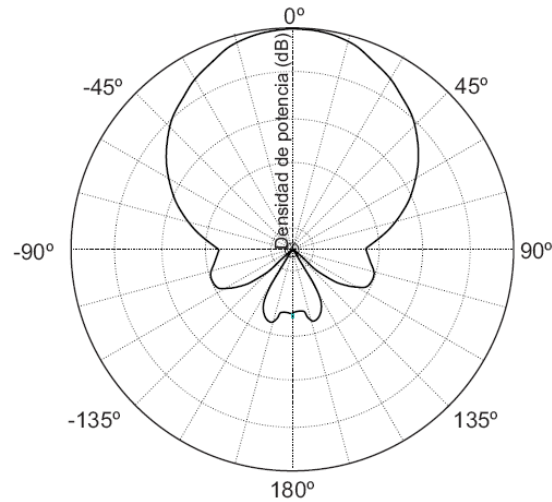


Figura 8. Diagrama de radiación en coordenadas polares [17]

Según su diagrama de radiación, las antenas se pueden clasificar en isótropas, omnidireccionales y directivas, según la Figura 9. En primer lugar, una antena es isótropa o ideal si esta radia la misma intensidad en todas las direcciones del espacio; aunque no existe ninguna antena de estas características, se utiliza para definir algunos parámetros. En segundo lugar, una antena es omnidireccional si su diagrama de radiación presenta simetría de revolución en torno a un eje. En tercer y último lugar, una antena es directiva si concentra la mayor parte de intensidad de radiación en una dirección.

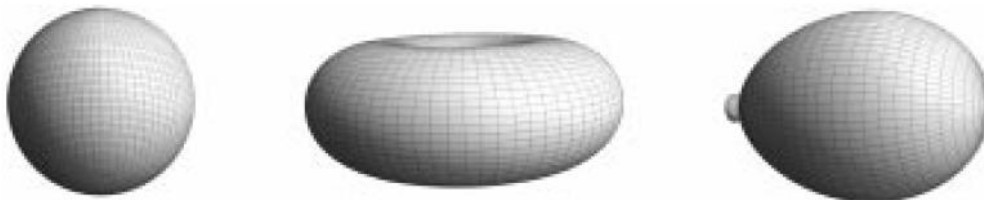


Figura 9. Diagrama de radiación de una antena isótropa, omnidireccional y directiva [17]

f) *Directividad.*

Se define la directividad D de una antena como “la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena” [17]. Esta definición se engloba en la ecuación (2.12), y está representada en la Figura 10.

$$D(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P_{\text{radiada}}/4\pi r^2} \quad (2.12)$$

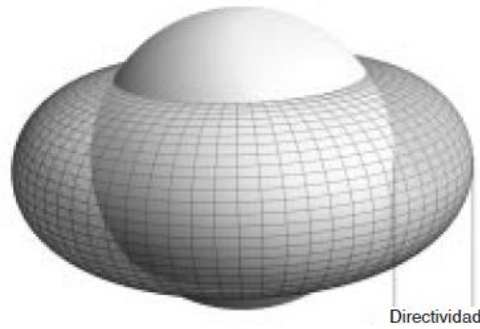


Figura 10. Directividad [17]

La directividad también puede obtenerse a partir del diagrama de radiación de la antena, tal y como se muestra en la Figura 11, y dando como resultado la expresión (2.13), donde Ω_e es el ángulo sólido equivalente a dicho diagrama.

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_e} \quad (2.13)$$

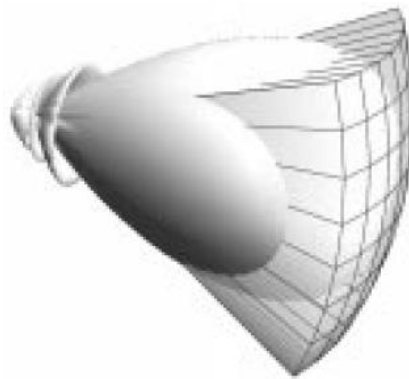


Figura 11. Estimación de la directividad a partir del ángulo sólido equivalente [17]

g) *Ganancia.*

La ganancia G de una antena se define como “la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena” [20]. En (2.14) se muestra la expresión para calcularla.

$$G(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P_{entregada}/4\pi r^2} \quad (2.14)$$

En el apartado anterior, se define la directividad en base a la potencia radiada por la antena, mientras que en la definición de ganancia se hace en base a la potencia entregada a la antena. La diferencia entre ellas es la potencia que disipa la antena debido a pérdidas óhmicas.

Por tanto, la ganancia está directamente relacionada con la directividad, mediante la eficiencia de la antena, según la ecuación (2.15). Si una antena no tiene pérdidas óhmicas, la ganancia es igual a la directividad.

$$G(\theta, \Phi) = \eta_l D(\theta, \Phi) \quad (2.15)$$

h) Polarización.

La polarización es un indicador de la orientación del vector de campo eléctrico $\vec{E}(\vec{r}, t)$ en un punto fijo del espacio con el paso del tiempo, es decir, existe en cada punto del espacio un vector de campo eléctrico en función de la posición y del tiempo.

La polarización de una antena en una dirección dada es la polarización de la onda radiada por ella cuando está excitada. A su vez, la polarización de una onda es la figura geométrica que esta describe por el extremo del vector de campo eléctrico en un punto fijo del espacio, con el transcurso del tiempo, y en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

Esta figura geométrica es, generalmente, una elipse, donde se dice que el campo está elípticamente polarizado. Otros casos son las ondas linealmente polarizadas, donde la figura trazada es un segmento, y las circularmente polarizadas, cuya figura es un círculo.

Tal y como se muestra en la Figura 12, se dice que el sentido de giro del campo eléctrico tanto en polarización circular como elíptica es a derechas si la onda se aleja del observador y el campo rota en el sentido de las agujas del reloj, mientras que el sentido es a izquierdas en el caso contrario. En cuanto a la polarización lineal, esta puede ser horizontal o vertical.

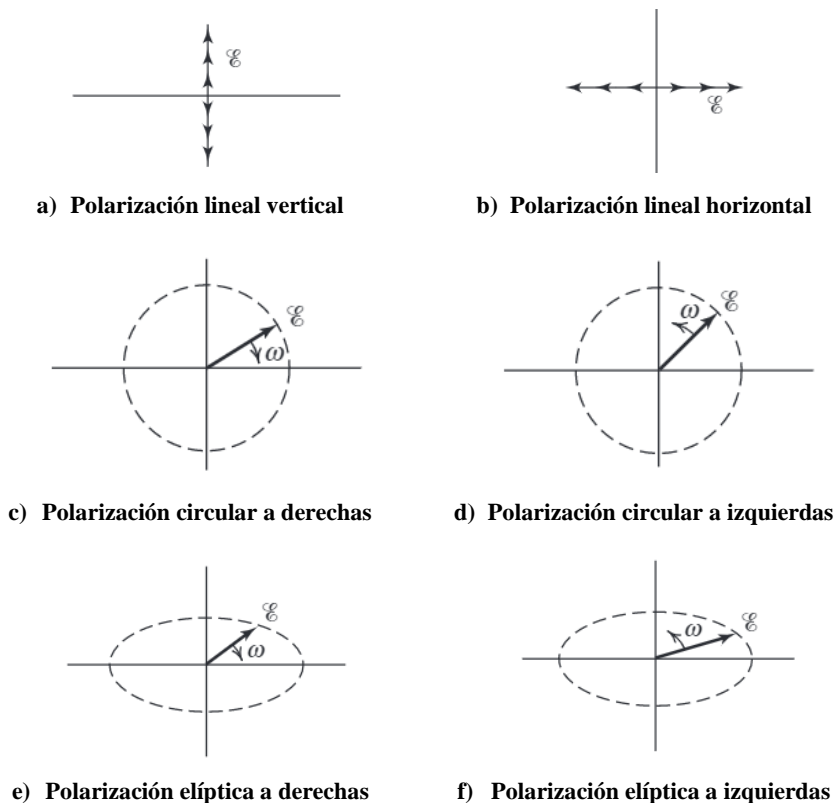


Figura 12. Polarización lineal, circular y elíptica [21]

En la Figura 13 está representada una onda linealmente polarizada de forma vertical en un instante de tiempo fijo, formada por un campo eléctrico E (líneas continuas) y un campo electromagnético H (líneas discontinuas), ambos perpendiculares a la dirección de propagación z . A medida que el tiempo progresa, el campo eléctrico en un punto fijo oscila hacia arriba y hacia abajo a lo largo de una línea vertical, como se puede ver también en la Figura 12-a.

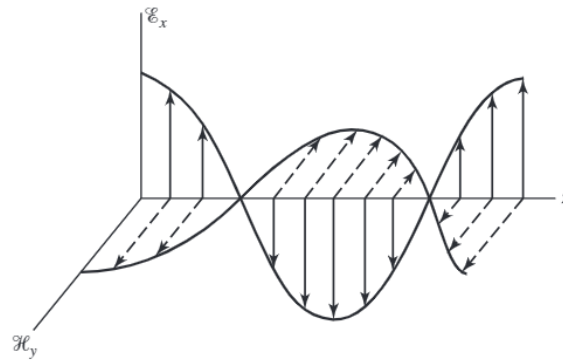


Figura 13. Comportamiento espacial de campos E (líneas continuas) y H (discontinuas) [21]

i) *Ancho de banda.*

El ancho de banda (BW) se puede definir como la relación entre el margen de frecuencias en el que se cumplen las especificaciones de una antena y la frecuencia central de dicho margen, según la ecuación (2.16). Este ancho de banda lo impondrá el sistema del que la antena forme parte, y afectará al parámetro crítico o más sensible de la aplicación [17].

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (2.16)$$

2.2.2 Parámetros característicos de las antenas en recepción

En relación con la recepción en las antenas, se tienen en cuenta los parámetros listados a continuación [17].

a) *Adaptación en recepción.*

La impedancia de una antena en recepción es la misma que la impedancia de dicha antena en transmisión. Una antena receptora se conecta directamente a un receptor, o bien a una línea de transmisión.

Para que se produzca la máxima transferencia de potencia en recepción, la impedancia de la antena $Z_a = R_a + jX_a$ y la impedancia de carga del receptor $Z_L = R_L + jX_L$ deben ser complejas conjugadas; es decir, $Z_L = Z_a^*$, como ocurre en la Figura 14.

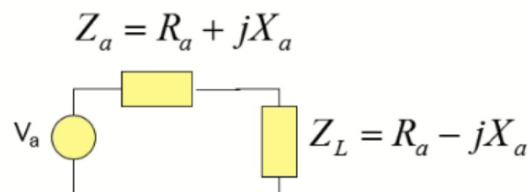


Figura 14. Adaptación en recepción [18]

Si no hay adaptación, se puede calcular el coeficiente de desadaptación C_a a partir de (2.17).

$$C_a = 1 - |\rho|^2 = \frac{4R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2} \quad (2.17)$$

b) Área y longitud efectiva.

El área efectiva A_{ef} es el área de captación de una antena, y se define como la relación entre la potencia que entrega la antena a su carga, adaptada y sin pérdidas, y la densidad de potencia de la onda que incide en ella, conforme a la expresión (2.18). La onda recibida tiene que estar adaptada en polarización a la antena. De forma similar a como ocurría con la directividad, el área efectiva dependerá de la dirección angular en la que incidan las ondas.

$$A_{ef} = \frac{P_L}{P} \quad (2.18)$$

La longitud efectiva l_{ef} de una antena linealmente polarizada es la relación existente entre la tensión inducida en bornes de la antena en circuito abierto y la intensidad del campo incidente en la misma, y se obtiene mediante la ecuación (2.19).

$$l_{ef} = \frac{|V_{ca}|}{|E|} \quad (2.19)$$

El área y la longitud efectivas se definen para la dirección de máxima señal captada por la antena receptora. Además, no necesariamente coinciden con las dimensiones reales de la antena, pero en algunos casos hay una relación directa entre ellas.

2.2.3 Redes de adaptación

Como ya se ha comentado en los apartados 2.2.1. *Parámetros característicos de las antenas en transmisión* y 2.2.2. *Parámetros característicos de las antenas en recepción*, normalmente existe una línea de transmisión entre la antena y el generador o entre la antena y el receptor, con impedancia característica Z_0 . Usualmente, esta impedancia es 50Ω o 75Ω .

Para transmitir con el rendimiento más alto posible y que la antena esté sintonizada en las frecuencias de interés, es necesario que estos elementos estén adaptados entre sí.

A la hora de diseñar una antena que esté adaptada, se presentan dos opciones: diseñar la antena para que su impedancia se adapte a la de la línea de transmisión en la banda de frecuencia de interés, lo que se conoce como antena resonante, o emplear antenas no resonantes con impedancia distinta a la de la línea y utilizar redes de adaptación.

Las redes de adaptación están formadas por dispositivos adicionales, y se suelen introducir entre la antena y la línea de transmisión o entre esta y el transmisor o el receptor para lograr esa adaptación. Un ejemplo se muestra en la Figura 15, donde Z_L corresponde a la impedancia de la antena.

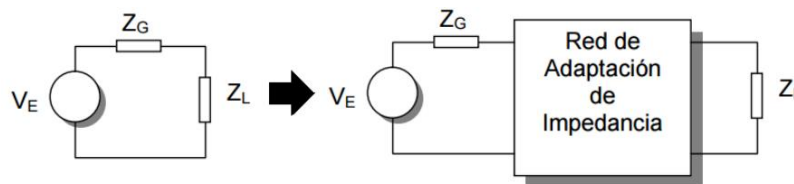


Figura 15. Red de adaptación de impedancia entre generador y carga [22]

Las redes se pueden construir con elementos concentrados en baja frecuencia y con limitaciones de espacio, o con tramos de línea de transmisión en alta frecuencia. Para que no introduzcan pérdidas en el sistema, deben ser reactivas, es decir, deben estar formadas por bobinas y condensadores. Es necesario tener en cuenta que los componentes reales tienen ciertas pérdidas que disminuyen la eficiencia, por lo que es importante maximizar la transferencia de energía.

Existen varios tipos de redes de adaptación, detallados a continuación [22].

a) Red en L.

Las redes de adaptación más sencillas son redes en L, formadas por una reactancia en serie y otra en paralelo. Estas reactancias pueden ser cualquier combinación de bobina y condensador, en cualquier orden. Las diferentes configuraciones de esta red permiten cubrir diferentes márgenes de impedancias para adaptar. En la Figura 16 están dibujadas las 8 posibles configuraciones de red de adaptación en L para una única frecuencia.

Dependiendo de la distribución de los elementos, la resistencia de la carga Z_L parecerá más grande o más pequeña de lo realmente es a la frecuencia de resonancia, donde la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva son iguales.

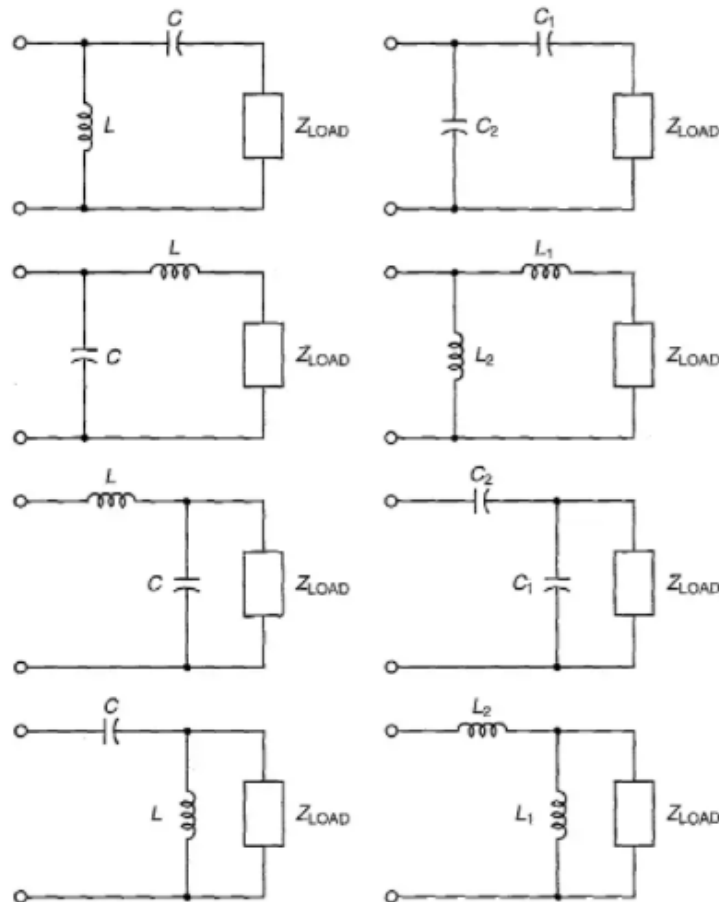


Figura 16. Redes de adaptación en L posibles [23]

El principal inconveniente de las redes en L es que no son flexibles en cuanto a su selectividad, es decir, solo se adaptan a una única frecuencia y no se puede jugar con el ancho de banda. Sin embargo, normalmente es necesario operar en un determinado ancho de banda, por lo que la adaptación no se puede realizar a una única frecuencia.

Para solucionar este problema, se utilizan redes de adaptación con tres elementos reactivos: redes en Pi y redes en T, e incluso con hasta 5 componentes, aunque su diseño es más complejo. Estas redes pueden ser diseñadas tanto para aumentar las impedancias como para disminuirlas, en función de los requisitos del circuito. Por lo general, los condensadores se hacen variables para poder resintonizar el circuito a otra frecuencia si fuese necesario.

b) *Red en Pi.*

Las redes en Pi son una de las redes de adaptación de tres elementos más comunes. Su nombre se debe a que las reactancias están conectadas en forma de la letra griega π . Hay 8 configuraciones básicas, cuatro para cuando la resistencia del generador Z_i es mayor que la resistencia de carga Z_L , y cuatro para cuando Z_L es mayor que Z_i . En la Figura 17 se muestra una de ellas como ejemplo.

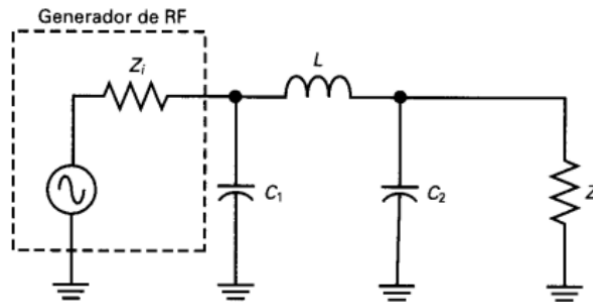


Figura 17. Red de adaptación en Pi [22]

c) *Red en T.*

Son otra de las redes de adaptación de tres elementos más comunes y, de igual modo que ocurría con las redes en Pi, su nombre se debe a la forma de conexión de los componentes reactivos que las componen. También hay 8 formas básicas de configurarlas; en la Figura 18 está representada una de ellas.

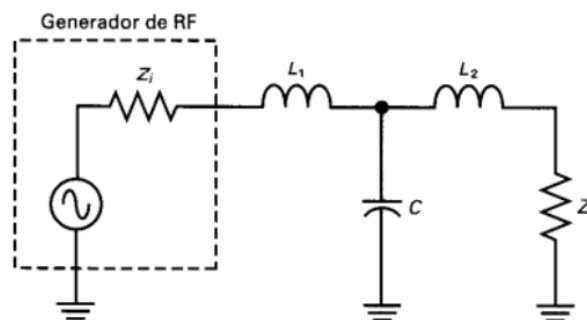


Figura 18. Red de adaptación en T [22]

d) *Red con transformadores.*

Por último, existe la posibilidad de utilizar un transformador como elemento de acoplamiento, donde el cociente entre la impedancia del transformador Z_t y la impedancia de la carga Z_L es igual al cuadrado del cociente del número de vueltas en el derivando primario, N_p , y en el derivando secundario, N_s , tal y como se indica en la expresión (2.20).

$$\frac{Z_t}{Z_L} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 \quad (2.20)$$

Un esquema básico de una red de adaptación que emplea un transformador se puede ver en la Figura 19.

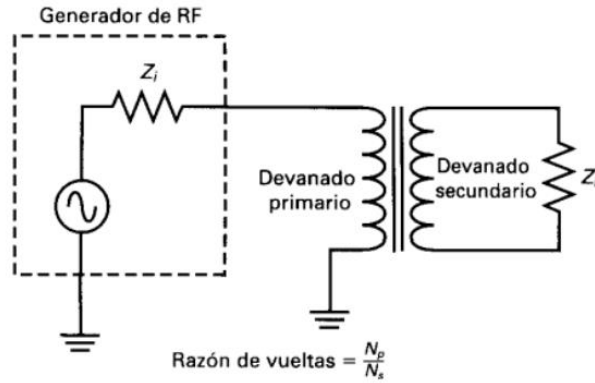


Figura 19. Red de adaptación con un transformador [22]

2.2.4 Antenas básicas

Una antena es, en cierta forma, un conductor eléctrico, por lo que un trozo de alambre, una varilla o un tubo metálicos pueden ser una antena. La longitud de este conductor va a depender de la frecuencia de transmisión, y si dicha longitud tiene una relación directa con la longitud de onda de la señal transmitida, la radiación será más efectiva. Las antenas más sencillas de implementar y de calcular son los monopolos y los dipolos.

2.2.4.1 Dipolos

Un dipolo es una antena con dos brazos conductores de la misma longitud, alimentados en el centro, y que apuntan hacia sentidos contrarios. Puede interpretarse como una línea de transmisión de hilos paralelos de longitud H acabada en circuito abierto, que se va abriendo hasta que los hilos quedan en fila, como ocurre en la Figura 20.

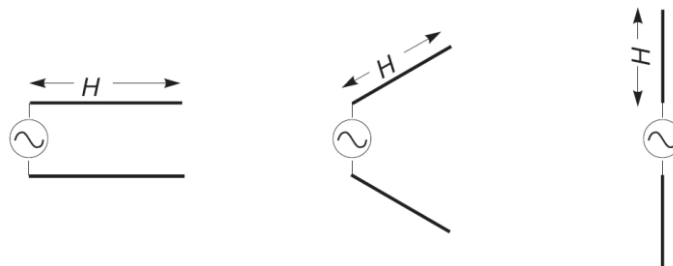


Figura 20. Modelo de antena dipolo como línea de transmisión abierta [17]

Su diagrama de radiación es omnidireccional, con forma de toroide y con simetría de revolución en el eje z , tal y como se muestra en la Figura 21.

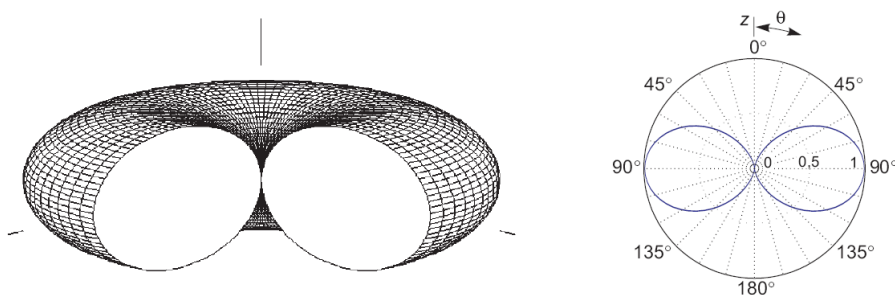


Figura 21. Diagrama de radiación de un dipolo en 3D (izq.) y corte en plano E (dcha.) [17]

La antena dipolo más común es el dipolo en $\frac{\lambda}{2}$, que funciona como una antena resonante. En este caso, la longitud H de cada brazo del dipolo es de $\frac{\lambda}{4}$.

2.2.4.2 Monopolos

Un monopolo es una antena constituida por un brazo rectilíneo radiante de longitud H , situado verticalmente sobre un plano de tierra y conectado a un generador en su base, que a su vez está conectado a tierra.

Según la Teoría de Imágenes, los monopolos están contruidos sobre un plano imagen que produce un diagrama de radiación que se aproxima al de un dipolo, pero utilizando la mitad del espacio. Es por ello por lo que los monopolos son utilizados sobre todo en frecuencias más bajas, donde construir dipolos ocuparía mucho espacio. Esta equivalencia entre el monopolo y el dipolo puede observarse en la Figura 22.

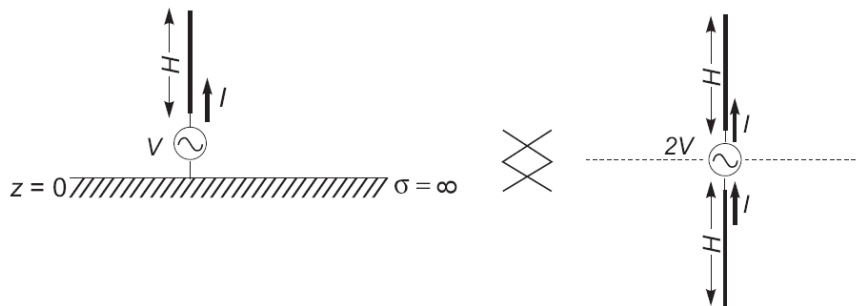


Figura 22. Antena monopolo [17]

Para ambos, los campos del semiespacio superior son los mismos, pero la directividad del monopolo será el doble, puesto que solo radia en un semiespacio. Por este mismo motivo, también cabe destacar que la potencia radiada por el monopolo es la mitad que la del dipolo.

2.2.5 Antenas integradas en dispositivos electrónicos

Hoy en día es raro encontrar una antena externa en un dispositivo electrónico, especialmente en dispositivos de IoT. El diseño de antenas para ser integradas en dispositivos electrónicos se ha convertido en todo un desafío, ya que cada vez es necesario dar soporte a más bandas de frecuencia y cada vez se exigen antenas más compactas, para poder ser implementadas en dispositivos cada vez más pequeños. También se ha de tener en cuenta que estas antenas estarán sometidas a entornos donde la eficiencia y la adaptación pueden verse afectadas.

Debido a su tamaño compacto, las antenas lineales planas como el monopolo y el dipolo son adecuadas para su implementación en equipos inalámbricos. Sin embargo, también existen multitud de antenas y tecnologías compactas para integrar en dispositivos electrónicos, como pueden ser antenas en L invertida (ILA o *Inverted L Antenna*), antenas en F invertida (IFA o *Inverted F Antenna*), antenas planas en F invertida (*Planar Inverted F Antenna*), antenas impresas, antenas parche en tecnología *microstrip*, antenas flexibles adhesivas, antenas chip o antenas *booster*.

En este documento se habla de las antenas utilizadas para la elaboración de este proyecto: las antenas chip y las antenas flexibles.

2.2.5.1 Antenas chip

Las antenas chip, también llamadas *on-chip*, son un tipo particular de antena con un tamaño notablemente reducido, de bajo coste, y frecuentemente integradas en PCBs (*Printed Circuit Board* o placa de circuito impreso) para irradiar ondas electromagnéticas a altas frecuencias. Comúnmente, se fabrican antenas chip para frecuencias entre 300 MHz y 2500 MHz. Por todo ello, son óptimas para ser integradas en dispositivos electrónicos pequeños, y se emplean para distintas aplicaciones como telefonía móvil, Wi-Fi, Bluetooth y otros usos de las bandas ICM (Industrial, Científica y Médica).

Estas antenas consisten principalmente en bobinas muy pequeñas situadas sobre o alrededor de un material cerámico de alta permitividad ϵ_r , lo que hace que su tamaño pueda ser tan compacto, y su montaje es SMD (*Surface Mounted Device*). A menudo, estas bobinas van acompañadas de otro tipo de antenas como las PIFA. Para fabricarlas, se utiliza la tecnología LTCC (*Low Temperature Co-Fired Ceramics*), que permite la combinación de capas individuales con diferentes funcionalidades, como alta permitividad y baja pérdida dieléctrica, en un solo paquete laminado multicapa. Un ejemplo de antena chip se puede ver en la Figura 23, con tres capas diferentes.

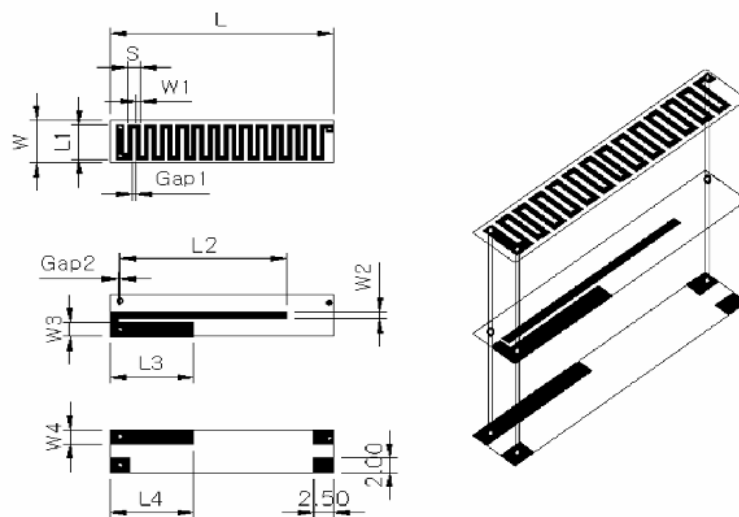


Figura 23. Estructura de una antena chip [24]

La mayoría de los fabricantes proporcionan en su *datasheet* la ganancia máxima, el ancho de banda, las pérdidas de retorno y el diagrama de radiación de su antena, pero todos estos valores se establecen para un plano de masa concreto y para una aplicación predeterminada. Por este motivo, las antenas chip pueden desintonizarse debido a factores como la geometría y tamaño del plano, el grosor y el dieléctrico de la PCB, el emplazamiento de la antena en el plano y la distancia a otros componentes electrónicos.

La eficiencia radiación de estas antenas por sí solas es bastante baja, pero aprovechan el plano de masa en el que están situadas para hacerlo resonar, es decir, las antenas chip son resonantes y acoplan corrientes en el plano de masa, que es el que verdaderamente radia. La eficiencia de la antena con el plano de masa se verá muy afectada por varios factores [25]:

a) Ubicación de la antena.

La ubicación de la antena y el espaciado con el resto de los componentes de la PCB es muy importante. La antena debe colocarse generalmente en el borde de la PCB, sobre una sección aislada libre de vías y de componentes electrónicos y metálicos que distorsionarían su radiación, lo que se conoce como zona de *clearance*. Además, la línea de alimentación debe tener la longitud

mínima posible para que no se convierta en una parte parásita del sistema resonante. Se muestran en la Figura 24 las mejores ubicaciones en la PCB para antenas chip, en la Figura 25 las ubicaciones que son buenas y aceptables, y en la Figura 26 las posiciones menos recomendadas. En todas ellas, la antena chip está representada en rojo, mientras que la zona de *clearance* está representada en color blanco.

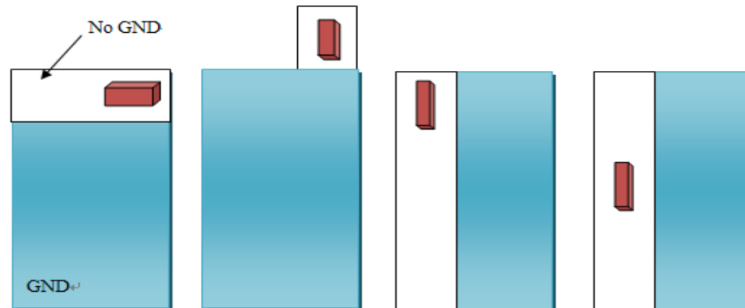


Figura 24. Emplazamientos excelentes para antenas chip [26]

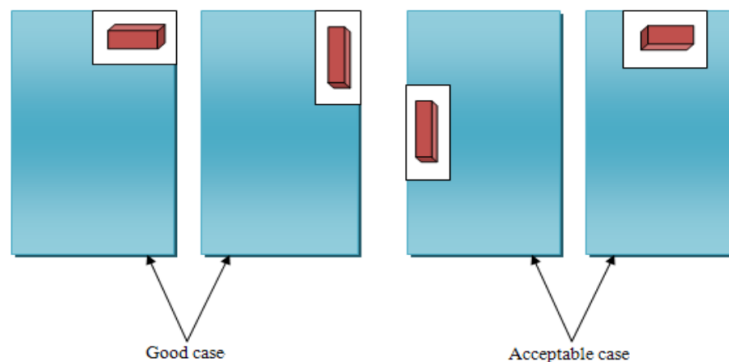


Figura 25. Emplazamientos buenos (izquierda) y aceptables (derecha) para antenas chip [26]

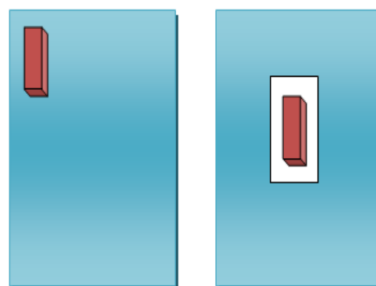


Figura 26. Emplazamientos no recomendables para antenas chip [26]

En un estudio que analiza el efecto del plano de masa en una antena chip [27], se ha investigado la influencia que tiene en la eficiencia la posición de la antena chip en la PCB, teniendo como referencia el diseño de la Figura 27.

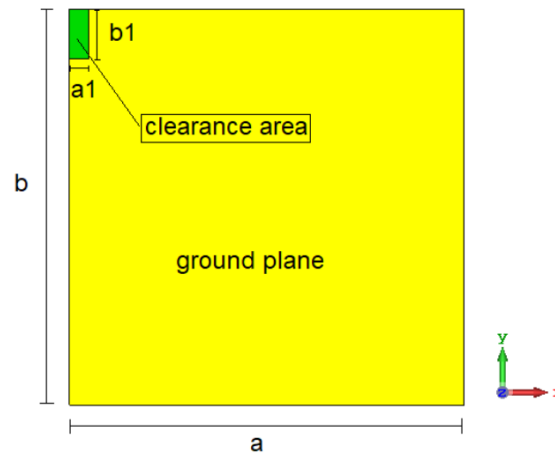


Figura 27. Parámetros de referencia de la PCB utilizada en el estudio [27]

Para distintas posiciones de la antena chip en el perímetro del plano de masa (según la Figura 28), la eficiencia varía acorde con la gráfica de la Figura 29. En ella, se puede comprobar que, cuanto más cerca de la esquina esté la antena ($y = 0$ mm), mejor eficiencia presentará.

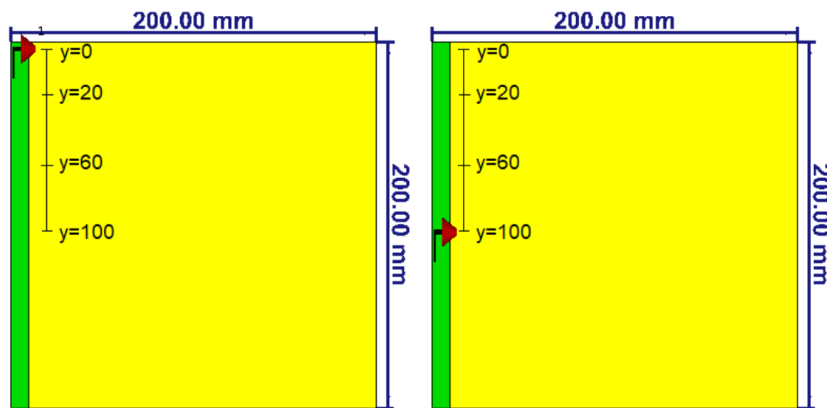


Figura 28. Distintas ubicaciones de la antena chip [27]

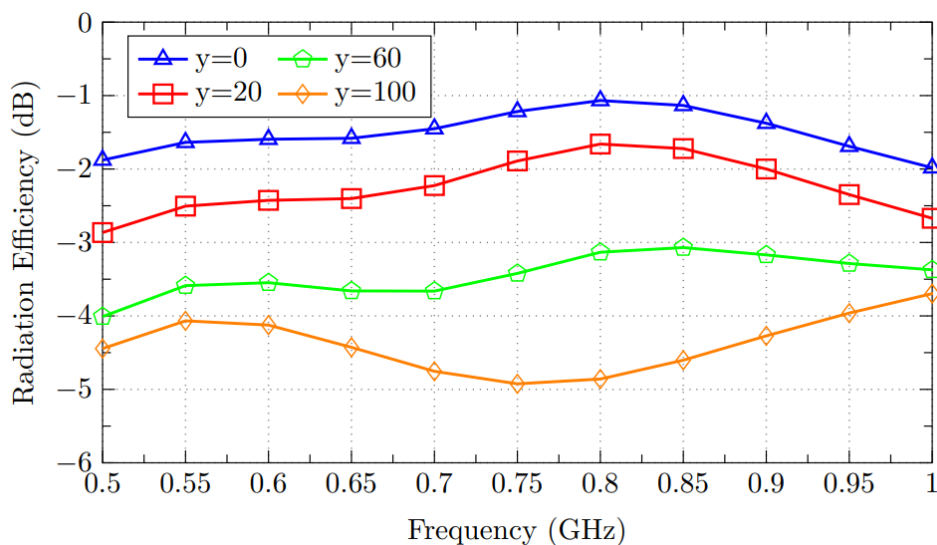


Figura 29. Eficiencia de radiación en función de la posición de la antena chip [27]

b) *Tamaño del plano de masa.*

Las antenas chip requieren un plano de masa del tamaño y posición adecuados para conformar un circuito resonante completo. Las vías, que son orificios colocados estratégicamente en la PCB para comunicar sus diferentes capas, minimizan el campo eléctrico generado, por lo que no hay que incluir demasiadas.

Por otro lado, es necesario respetar una distancia mínima entre la antena y el plano de masa; si esta no se cumple, el rendimiento de la antena puede disminuir debido a las cancelaciones producidas por las corrientes que circulan en el plano de masa que la rodea.

En [27] se ha estudiado también el efecto que tiene el tamaño del plano de masa en la eficiencia de la antena. Para ello, y tomando como referencia el diseño de la Figura 27, se han variado los parámetros a y b desde 50 mm hasta 200 mm (Figura 30), dando como resultado las eficiencias de la Figura 31. A partir de valores de $a = b = 100$ mm, la eficiencia comienza a saturarse y su incremento no es significativo al aumentar el tamaño.

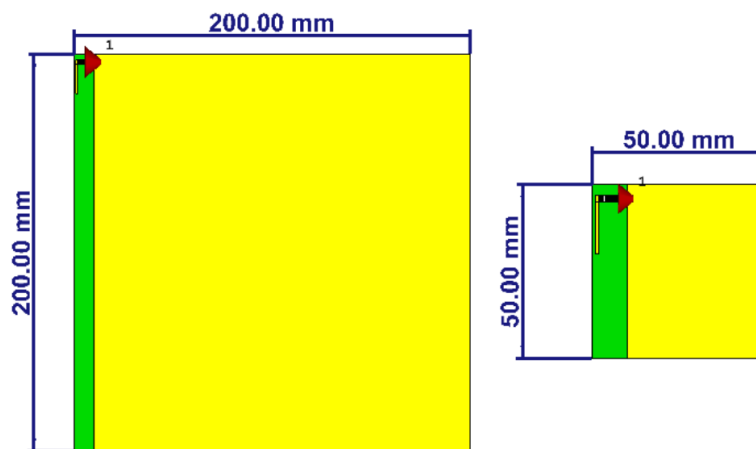


Figura 30. Distintos tamaños de la PCB [27]

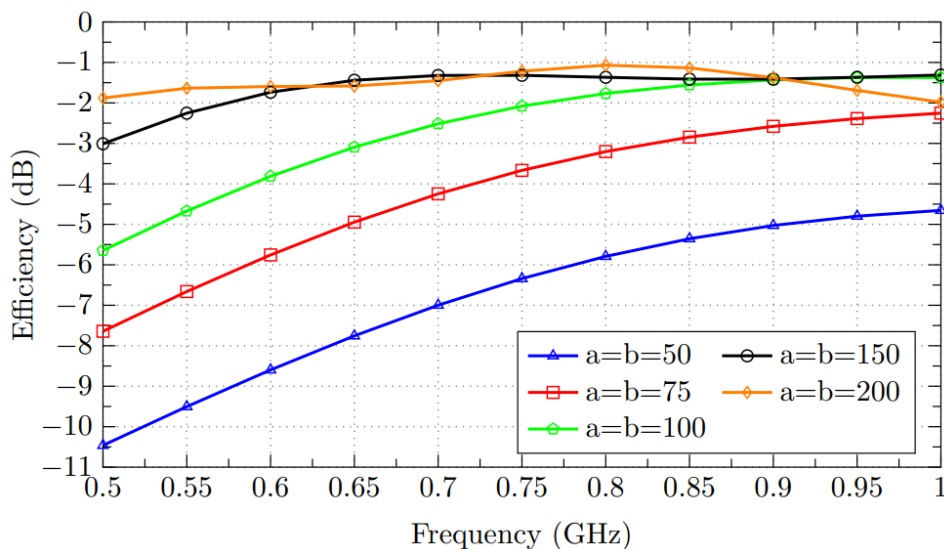


Figura 31. Eficiencia de radiación de la antena chip en función del tamaño de la PCB [27]

c) *Orientación de la antena.*

Como estas antenas junto con su plano de masa suelen ser omnidireccionales, con un diagrama de radiación muy similar al de un dipolo, deben situarse en una orientación vertical dentro del dispositivo. De esta forma, los nulos estarán situados por encima y por debajo del dispositivo, y la radiación saldrá hacia delante y hacia detrás, como ocurre en la Figura 32.

En consecuencia, le afectarán mucho los materiales que se sitúen en la dirección de radiación, en ambos sentidos, haciendo que la antena se desintonice y baje su eficiencia. La antena puede volver a sintonizarse añadiéndole una red de adaptación, sin embargo, no hay forma de hacer que aumente su eficiencia de radiación.

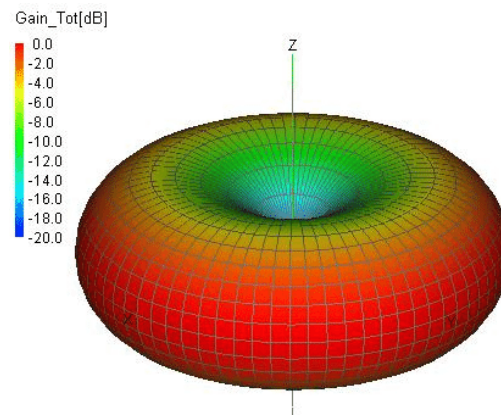


Figura 32. Diagrama de radiación de una antena chip situada verticalmente [25]

d) *Adaptación de impedancias.*

En cuarto lugar, también influye la adaptación de impedancias de todos los materiales que radian –principalmente la antena y la línea de alimentación–; si todos están adaptados entre sí, solo se reflejará una cantidad mínima de energía hacia la fuente, lo que resulta en una eficiencia total óptima. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la eficiencia de radiación es máxima a la frecuencia a la que la antena resuena. Al añadir una red de adaptación, la frecuencia se desplaza para adaptarla a la impedancia deseada, a costa de que la eficiencia de radiación disminuye.

e) *Entorno.*

En quinto y último lugar, al ser las antenas chip comúnmente utilizadas en la electrónica de mano, a menudo se implementan en envoltentes de polímero, caucho o metal para proteger la PCB de factores ambientales hostiles, como son golpes, vibraciones, humedad, polvo o productos químicos. Estas envoltentes pueden afectar al diagrama de radiación de la antena chip y deben ser evaluadas minuciosamente.

2.2.5.2 Antenas flexibles

Si bien es cierto que nunca ha sido tan fácil integrar una antena SMD, cada vez hay más diseños que llevan su rendimiento al límite. En muchos dispositivos pequeños, las antenas no cuentan con el espacio que necesitan para el plano de masa para poder garantizar un buen funcionamiento.

Las antenas impresas flexibles o FPC (*Flexible Printed Circuit*), comúnmente conocidas como antenas *flex*, son antenas que combinan los beneficios de las antenas integradas y las antenas externas. Suelen ser muy delgadas, de aproximadamente 0,15 mm de grosor, y vienen con un adhesivo que facilita notablemente su instalación (Figura 33).

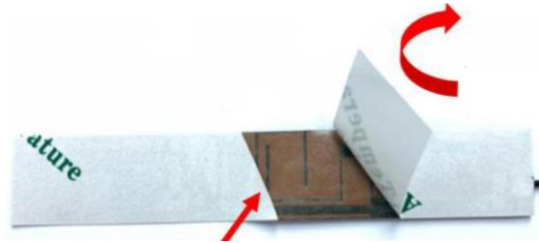


Figura 33. Antena flexible con adhesivo [28]

Este tipo de antenas se pueden fabricar utilizando distintos materiales dieléctricos y conductores [29].

Escoger un material dieléctrico adecuado es crítico para el rendimiento de la antena. La elección del sustrato se hace en función de sus propiedades dieléctricas, de su tolerancia a las deformaciones mecánicas como flexiones o torsiones, de su susceptibilidad a la miniaturización y de su resistencia en el entorno externo. La ganancia y la eficiencia de las antenas flexibles se ven reducidas por un valor alto de tangente de pérdidas del sustrato dieléctrico. Además, la permitividad dieléctrica del medio ϵ_r afecta al ancho de banda y la frecuencia de resonancia de la antena; un valor de permitividad elevado permite la miniaturización de la antena a costa de un ancho de banda de impedancia reducido y con altas pérdidas de radiación.

El grosor del sustrato es otro factor que puede afectar a la eficiencia, ganancia, ancho de banda y directividad de la antena. Para una antena flexible, siempre es un compromiso elegir el sustrato adecuado teniendo en cuenta su grosor, su rendimiento y su flexibilidad al mismo tiempo.

Usualmente se emplean tres tipos de sustrato en la fabricación de este tipo de antenas: vidrio delgado, láminas de metal y sustratos de plástico o polímero. Todos ellos son escogidos por su robustez, flexibilidad, humectabilidad y capacidad de estiramiento. Aunque el vidrio delgado es flexible, su fragilidad restringe su utilidad. Las láminas de metal pueden soportar altas temperaturas, pero su superficie rugosa y el elevado coste de los materiales limitan sus aplicaciones. Por último, los materiales plásticos o polímeros son la mejor opción para utilizar en antenas flexibles. Entre ellos se incluyen el polietileno tereftalato (PET), el polietileno naftalato (PEN), el policarbonato (PC), la polietersulfona (PES) y la poliimida (PI).

Por el contrario, el material conductor es elegido en base a su conductividad eléctrica, dictando el rendimiento de la antena y su eficiencia de radiación. En aplicaciones inalámbricas, es necesaria una alta conductividad eléctrica para asegurar una ganancia, eficiencia y ancho de banda superiores. También se busca una buena resistencia frente a la degradación causada por deformaciones mecánicas. El diseño y la forma del elemento radiante afectan a los patrones de polarización, a las frecuencias resonantes, a las pérdidas de retorno, a la ganancia y a la directividad.

Algunos materiales utilizados como conductor eléctrico en las antenas flexibles son las tintas de nanopartículas de plata y de cobre, que son las más conductoras, materiales electro-textiles (Ni/Ag-plateado, Flectron y telas conductoras no tejidas), cobre adhesivo, cinta de cobre y revestimiento de cobre.

Las antenas flexibles presentan numerosas ventajas [30]:

- Son la opción de integración más flexible en comparación con cualquier otro tipo de antena, ya que están diseñadas para doblarse, y funcionan bien en superficies planas, curvas, o incluso al ser dobladas hasta cierto punto. Pueden ubicarse verticalmente, horizontalmente o coplanares a la PCB anfitriona. Es por ello por lo que son ideales para ser utilizadas en dispositivos donde una antena SMD no cabe en la PCB anfitriona con el plano de masa requerido.

- Son compatibles con los estándares de cable UFL, y puede escogerse la longitud de cable deseada para permitir una conexión fácil a la PCB. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, al aumentar sustancialmente la longitud del cable, el rendimiento de la antena se verá disminuido.
- No requieren de plano de masa, ya que el circuito flexible está específicamente diseñado para situar la antena sobre él. Esto permite ahorrar espacio, mayores niveles de rendimiento y mayor facilidad de integración, a diferencia de lo que ocurre con las antenas chip, donde el tamaño del plano de masa afecta considerablemente a su rendimiento. Tampoco necesitan, normalmente, una red de adaptación, lo que nuevamente facilita su integración.
- Sus niveles de rendimiento son similares a los de una antena externa, debido a su diagrama de radiación omnidireccional y a sus altos niveles de eficiencia, siendo su precio inferior a estas.

Gracias a todas estas ventajas, las antenas flexibles pueden ser integradas en multitud de aplicaciones y tipos de dispositivos. Sin embargo, también presentan algunas desventajas que tener en cuenta. Si estas antenas son dobladas y plegadas en exceso, más allá de los límites recomendados, su rendimiento se verá reducido. Esto suele ocurrir en dispositivos muy compactos como los *wearables*. También es importante el material de la carcasa, ya que funcionan bien con carcasas de plástico relativamente delgadas, pero las carcasas metálicas pueden ocasionar problemas de igual modo que ocurre con las antenas chip. Por último, en lo relativo a su ubicación, las antenas flexibles deben situarse idealmente a 20 mm y, como mínimo, a 10 mm de distancia de los componentes y las superficies metálicas para permitir que la antena radie de manera eficiente.

2.2.6 Problemática con envolventes metálicas y otros materiales

Como ya se ha ido comentado a lo largo del documento, las características de las antenas integradas en dispositivos electrónicos están muy influenciadas por el entorno en el que se encuentran.

Previamente, se ha expuesto en el apartado 2.2.5.1 *Antenas chip* el efecto que tiene el tamaño del plano de masa en la eficiencia de la antena, concluyendo gracias a la Figura 31 que cuanto más pequeño es dicho plano, más afecta este a la antena.

Pero, además del plano de masa, hay otros factores del entorno que afectan a las antenas integradas. Uno de ellos, que puede considerarse el más importante, es el material de la carcasa o el chasis del dispositivo en el que se integra la antena.

Para estudiarlo, en [31] se ha simulado una PCB con su antena integrada, y se le ha añadido una carcasa de 1 mm de grosor de material ABS ($\epsilon_r = 3$), un plástico muy resistente a impactos. El modelo simulado se muestra en la Figura 34, y se compara en la Figura 35 la respuesta de esta simulación con la carcasa (línea roja) junto con la respuesta de la antena en espacio libre (línea verde).

En esta gráfica se puede comprobar que apenas se degrada la señal, pero que sí se produce un desplazamiento de la frecuencia de resonancia desde 2,492 GHz hasta 2,44 GHz, según los marcadores 1 y 2.

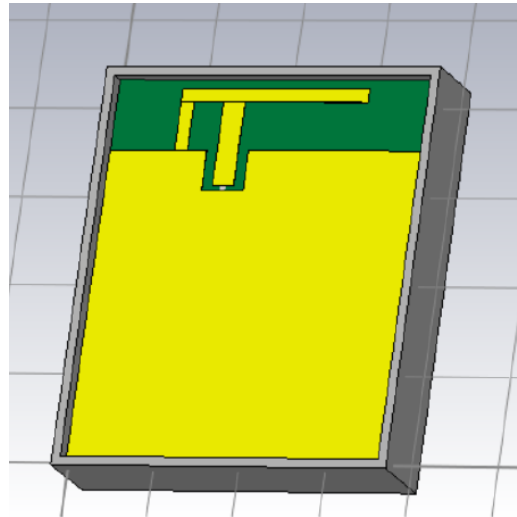


Figura 34. Diseño de antena PIFA con carcasa de ABS [31]

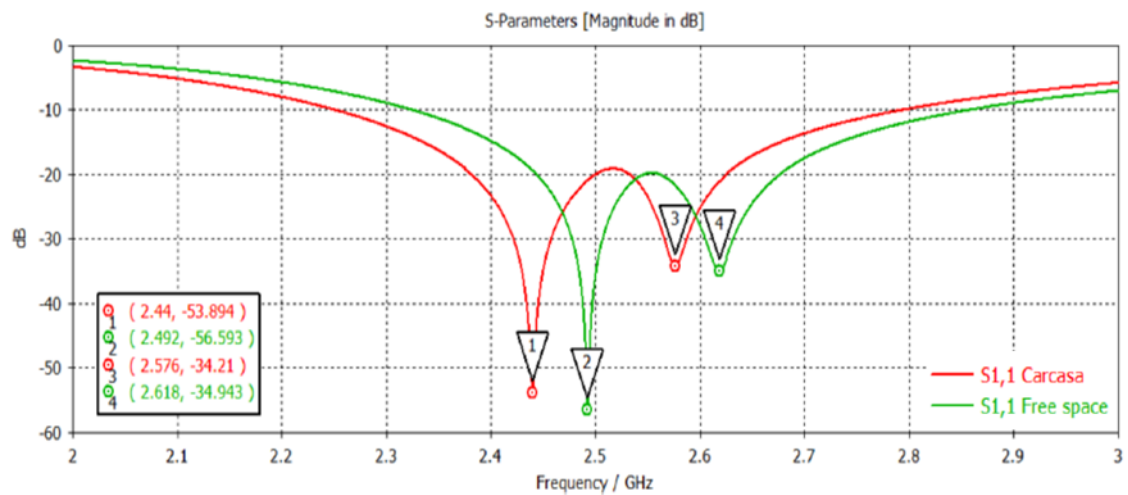


Figura 35. Comparativa S_{11} con carcasa y S_{11} en espacio libre [31]

También en [31] se ha analizado el comportamiento de la antena con la presencia de una pantalla de cristal de $\epsilon_r = 7,2$. Partiendo del modelo de la Figura 34 con carcasa de ABS, se ha diseñado el modelo de la Figura 36, al que se le ha incluido una pantalla de cristal en la cara que quedaba libre en la envolvente.

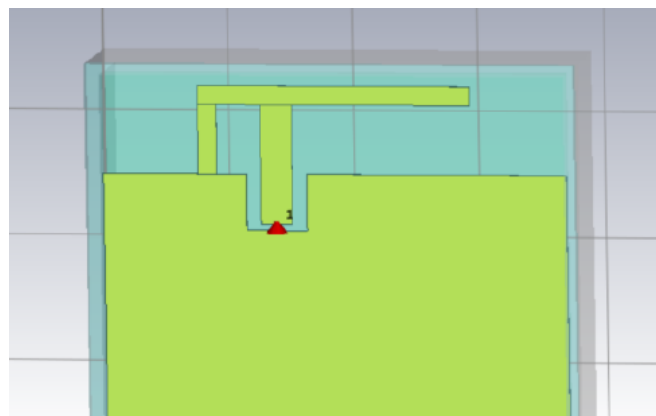


Figura 36. Diseño de antena PIFA con carcasa de ABS y cristal [31]

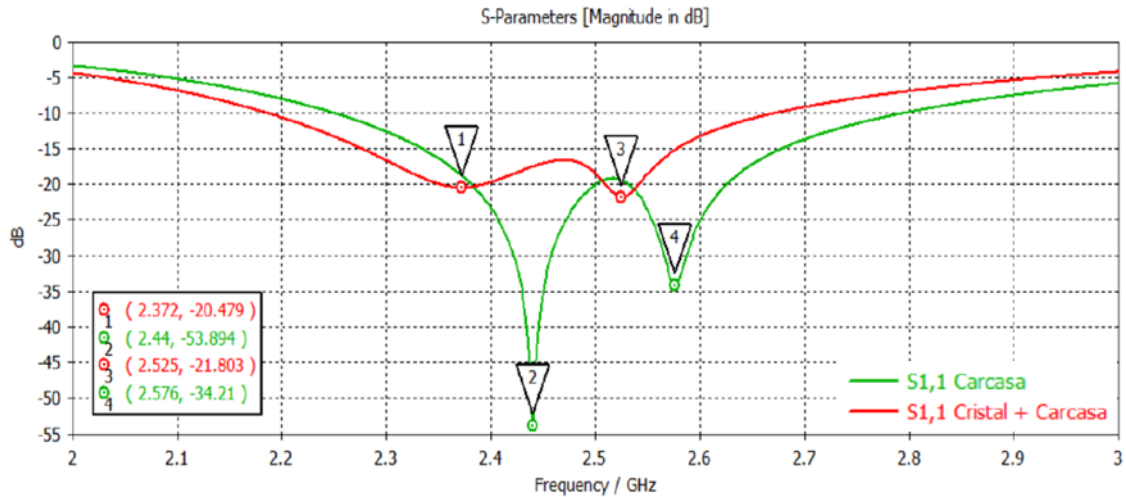


Figura 37. Comparativa S_{11} con carcasa y S_{11} con carcasa y cristal [31]

En la gráfica de la Figura 37 se compara el parámetro S_{11} de la simulación de la antena con carcasa (línea verde) con el parámetro S_{11} de la simulación de la antena con carcasa y con la pantalla de cristal (línea roja). En ella se observa cómo se ha desintonizado la respuesta, desplazando la frecuencia de resonancia incluso más que en el modelo anterior (desde 2,44 GHz hasta 2,372 GHz según los marcadores 1 y 2), y reflejando también una gran cantidad de potencia respecto al modelo con la carcasa abierta sin cristal. Con esta comparativa se puede concluir que, con una envolvente cerrada con materiales de permitividad relativa mayor a la del aire ($\epsilon_{aire} = 1$), la respuesta de la antena se ve muy afectada en cuanto a frecuencia y potencias radiada y reflejada.

En lo relativo a las envolventes metálicas, estas actúan como jaula de Faraday, apantallando y atenuando en gran medida la señal. Se ha demostrado en numerosos estudios que, debido a las corrientes inducidas en la superficie del terminal causadas por los campos generados por la antena, los efectos más apreciables de la integración de una antena en una caja metálica son: la desintonización de la frecuencia o frecuencias de operación, cierta desviación del diagrama de radiación, la disminución de la eficiencia y la ganancia, y un incremento de las componentes de polarización cruzada. En última instancia, se ven afectadas las potencias de transmisión y recepción.

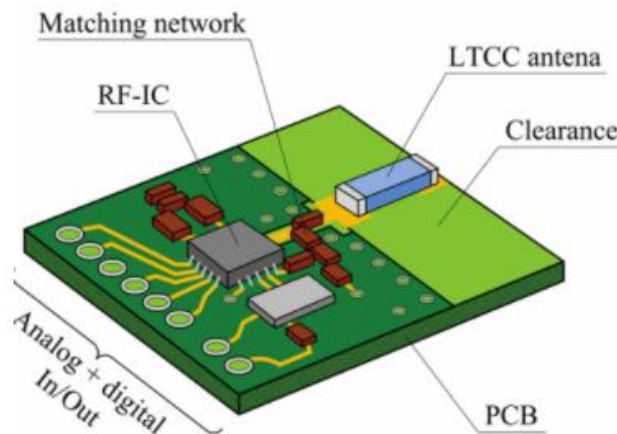
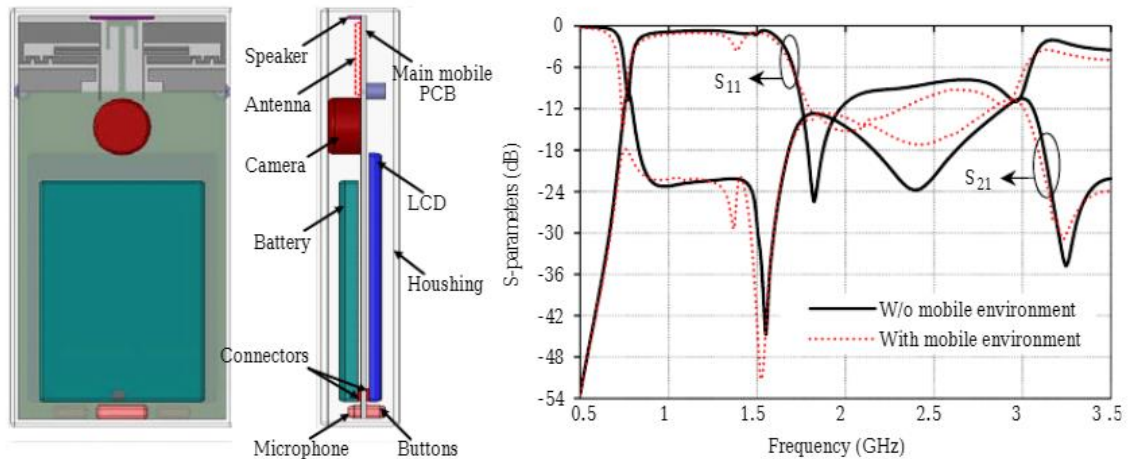


Figura 38. Ejemplo de antena integrada en la PCB de un dispositivo inalámbrico [32]

Un segundo factor que afecta a las antenas integradas es la influencia de los componentes electrónicos y otros elementos metálicos de tamaño resonante en las proximidades de esta, como ocurre en la Figura 38.

Esto es muy común en los *smartphones*, que dentro el mismo chasis integran, entre otros, la pantalla OLED o LCD, la batería, una o varias cámaras, el micrófono, varios altavoces y varias antenas. Incluso los tornillos metálicos empleados para ajustar piezas internas o sujetar la electrónica a la carcasa tienen cierto efecto en la antena.

En [33] se ha llevado a cabo un estudio sobre la influencia en los parámetros S de todo el entorno que rodea a la antena de un *smartphone*. En la Figura 39-a se ilustra el modelo 3D realizado para la simulación de dicho estudio, y en la Figura 39-b se puede comparar el parámetro S_{11} de la antena por sí sola (línea negra) con el de la antena integrada en el teléfono móvil inteligente (línea roja). En esta última se puede observar un efecto significativo del entorno en el parámetro de reflexión S_{11} , especialmente en las frecuencias más altas.



a) Antena y su entorno en un *smartphone*

b) Efecto del entorno en los parámetros S

Figura 39. Efecto del entorno en antenas integradas en *smartphone* [33]

Un tercer factor que perjudica el funcionamiento de la antena son los materiales del entorno en el que se integrará el dispositivo que contiene a la antena, como pueden ser paredes, mesas, plataformas o soportes. Estos materiales están caracterizados por su permitividad relativa ϵ_r , en función de la frecuencia, y pueden interferir o atenuar en mayor o menor medida la señal. En la Figura 40 están representados los principales obstáculos relativos a la transmisión de ondas de radiofrecuencia, ordenados de mayor a menor atenuación [34].

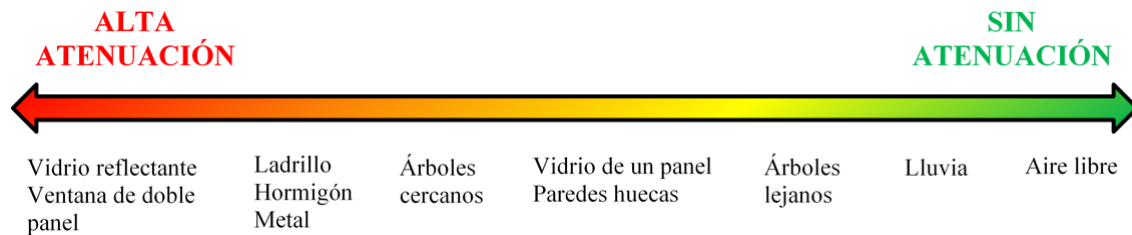


Figura 40. Materiales de mayor a menor atenuación

Por último, el cuarto factor que interviene en el rendimiento de la antena es la presencia del cuerpo humano en las proximidades de esta. La ϵ_r del cuerpo humano es muy superior a la del aire, por lo que afecta principalmente a la frecuencia de resonancia y a la adaptación de la antena.

Capítulo 3. Producto Conectado

3.1 Módulo 4G

El módulo 4G escogido para el Producto Conectado es el modelo SIM7500E [35] del fabricante asiático SIMCom, seleccionado con un criterio de coste e ilustrado en la Figura 41. Este módulo es del tipo LTE-Cat 1, el cual permite tasas de transferencia de hasta 10 Mbps en el enlace descendente o *downlink*, y hasta 5 Mbps en el enlace ascendente o *uplink*. Este estándar está diseñado específicamente para aplicaciones *Machine-to-Machine* (M2M) y para IoT industrial. En la Tabla 4 se recogen las principales características de este módulo [35].

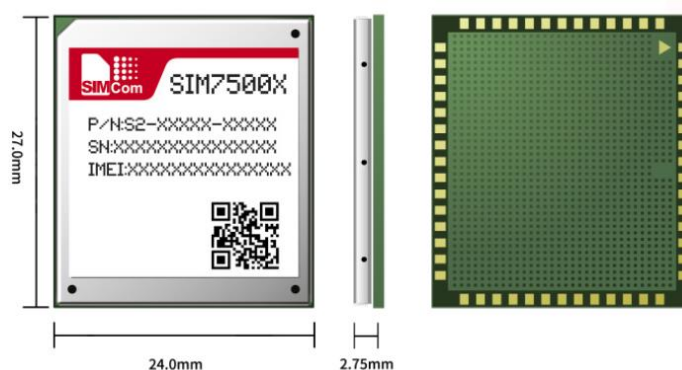


Figura 41. Módulo SIM7500E [35]

Nombre del producto	SIM7500E
Factor de forma	LGA
Dimensiones	24 x 27 x 2,75 mm
Comunicación inalámbrica	LTE-TDD / LTE-FDD / HSPA+ / WCDMA / GSM / GPRS / EDGE
Bandas de frecuencia LTE	B1 / B3 / B7 / B8 / B20
Tasas de transferencia LTE	10 Mbps (DL) / 5 Mbps (UL)
Protocolos	TCP/IP / IPV4 / IPV6 / Multi-PDP / FTP / FTPS / HTTP / HTTPS / DNS
Interfaces	SIM Card, UART, USB, ADC, I2C
Voltaje de alimentación	3,4 – 4,2 V
Consumo de potencia en LTE	1,6 mA
Temperatura de operación	-40°C hasta +85°C

Tabla 4. Especificaciones módulo SIM7500E

3.2 Antena chip Antenova Inversa SR4L034-L/R

La antena escogida por FERMAX para montar sobre su circuito módem 4G es la antena LTE Antenova Inversa SR4L034-L/R de montaje SMD [36]. En la Figura 42 se muestran las dos configuraciones posibles de la antena: L (*Left*) y R (*Right*).

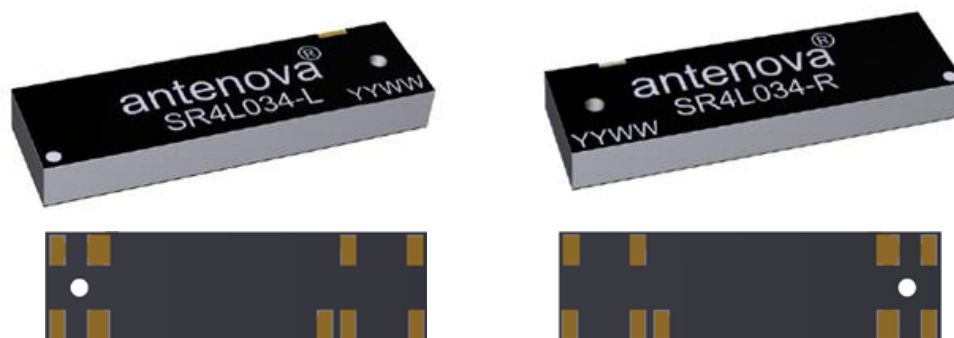


Figura 42. Antenova SR4L034-L (izquierda) y Antenova SR4L034-R (derecha) [36]

Esta antena chip está diseñada para aplicaciones 3G y 4G, según los estándares de comunicaciones móviles LTE, GSM, CDMA, DCS, PCS, WCDMA, UMTS, HSPDA, GPRS, EDGE e IMT. Las bandas de frecuencia de trabajo que utiliza son 698 – 960 MHz, 1710 – 2170 MHz, 2300 – 2400 MHz y 2500 – 2690 MHz.

Tanto de antena única como en sistemas MIMO, esta antena ha sido especialmente diseñada para cumplir con requerimientos de coexistencia y espacio mínimo al ser situada en el borde de la PCB anfitriona.

Sus principales aplicaciones son *routers* 4G Mi-Fi, equipamiento médico, *tablets*, sistemas OBD++, sistemas MIMO, estaciones *Femtocell* o picoestaciones y monitoreo remoto.

En la Tabla 5 se detallan las especificaciones técnicas más importantes de esta antena [36].

Nombre del producto	Inversa
Número de pieza	SR4L034-L / SR4L034-R
Frecuencia	698 – 960 MHz 1710 – 2170 MHz 2300 – 2400 MHz 2500 – 2690 MHz
Polarización	Lineal
Temperatura de operación	-40°C hasta 140°C
Test de condiciones medioambientales	ISO16750-4 5.1.1.1/5.1.2.1/5.3.2
Impedancia con adaptación	50 Ω
Peso	< 2,5 g
Tipo de antena	SMD
Dimensiones	28 x 8 x 3,3 mm

Tabla 5. Especificaciones Antenova SR4L034-L/R

Por otro lado, en la Tabla 6 se recogen las características de radiofrecuencia en cada banda de trabajo de la antena [36]. A partir de esta tabla y teniendo en cuenta todos los parámetros descritos en ella en su conjunto, se puede deducir que la banda de trabajo que proporcionará mejores resultados es la banda de 1710 – 2170 MHz, con una ganancia pico de 3,5 dBi, una ganancia media de -3 dBi, una eficiencia superior al 60% y unas pérdidas de retorno máximas de -5,10 dB.

	Bandas de frecuencia (MHz)				
	698 – 798	824 – 960	1710 – 2170	2300 – 2400	2500 – 2690
Pico de ganancia	0,40 dBi	1,60 dBi	3,50 dBi	3,60 dBi	2,10 dBi
Ganancia media (lineal)	-2,00 dBi	-1,10 dBi	-2,00 dBi	-1,60 dBi	-2,30 dBi
Eficiencia media	> 55%	> 70%	> 60%	> 60%	> 55%
RL máximas	-6,00 dB	-6,60 dB	-5,10 dB	-7,00 dB	-4,90 dB
ROE máximo	2,8:1	2,8:1	3,5:1	2,5:1	3,7:1

Tabla 6. Características de radiofrecuencia de Antena SR4L034-L/R

En la gráfica de la Figura 43 están representadas las pérdidas de retorno (*RL*) de la antena, medidas en la PCB de evaluación propuesta por el fabricante en la hoja de características (Part No. SR4L034-EVB-1). En esta gráfica, se puede comprobar que los mínimos se corresponden con las frecuencias cercanas a 700 MHz, 960 MHz, 1900 MHz y 2500 MHz, todas incluidas en alguna de las bandas de trabajo de la antena. La frecuencia que teóricamente proporcionará un menor coeficiente de reflexión es 1900 MHz, dentro de la banda de 1710 – 2170 MHz.

Del mismo modo, en la gráfica de la Figura 44 se ha representado el ROE (Relación de Onda Estacionaria) de la antena.

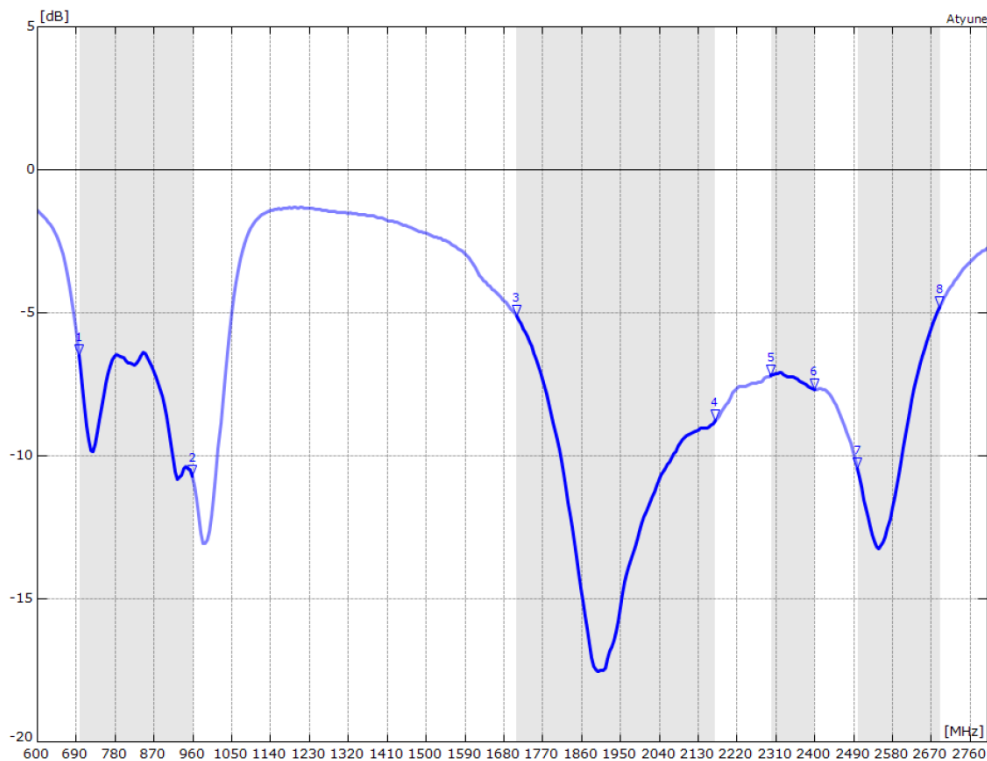


Figura 43. Pérdidas de retorno Antena SR4L034-L/R [36]

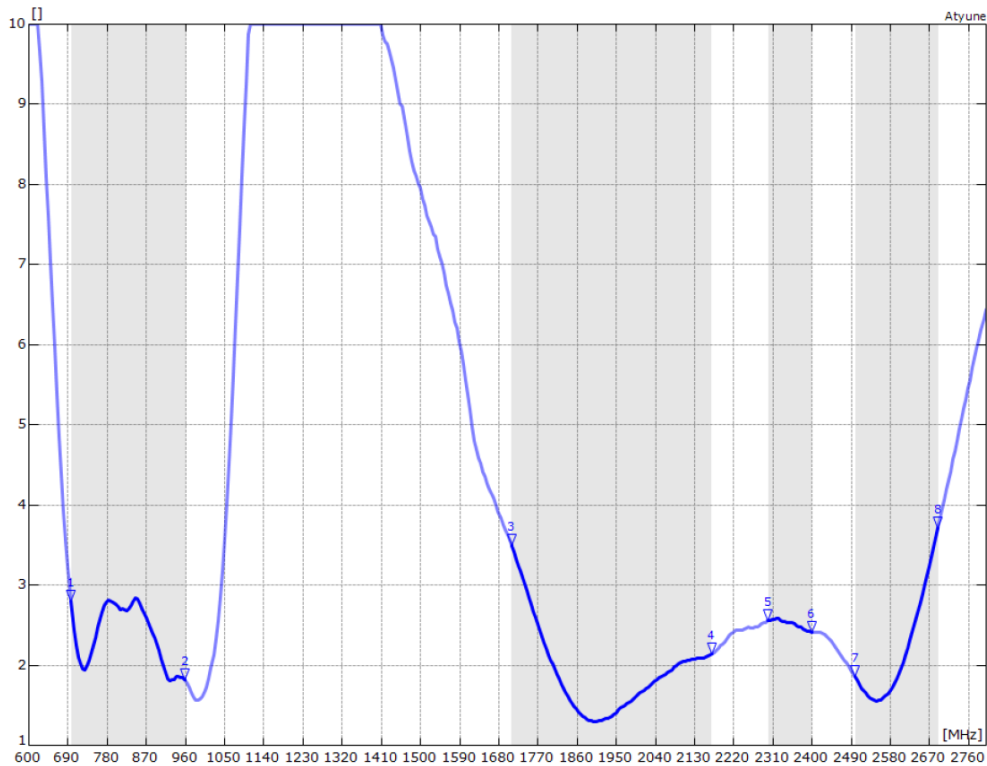


Figura 44. Relación de Onda Estacionaria Antena SR4L034-L/R [36]

Como ya se ha comentado, el fabricante ha diseñado una PCB de referencia para evaluar la antena de dimensiones 125 mm x 36 mm, mostrada en la Figura 45, y disponible para su compra. Se le ha añadido un conector SMA hembra para facilitar su evaluación.



Figura 45. PCB de evaluación SR4L034-EVB-1 [36]

Además, es necesaria la inclusión de un circuito de adaptación en la PCB anfitriona, cerca de la alimentación de la antena, para asegurar su efectividad. Dicho circuito, tal y como se ve representado en la Figura 46, necesita hasta 6 componentes, algunos de ellos incluidos únicamente por precaución. En la Tabla 7 se incluyen los valores recomendados de cada componente de la red diseñada por el fabricante para su placa de evaluación.

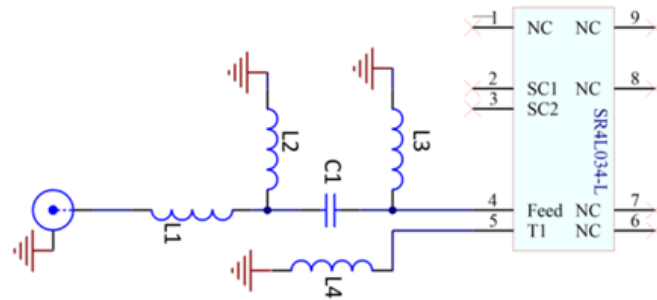


Figura 46. Circuito de adaptación de la antena Antenna SR4L034-L/R [36]

Designación	Tipo	Valor	Descripción
L1	Resistencia	0 R	Sin especificar
L2	Inductancia	22 nH	Murata LQG15HN
C1	Capacitancia	1,8 pF	Murata GJM15
L3	Inductancia	39 nH	Murata LQG15HN
L4	Inductancia	6,8 nH	Murata LQG15HN

Tabla 7. Componentes del circuito de adaptación de Antenna SR4L034-L/R

Se han tomado como ejes de referencia de la PCB de evaluación los ejes X, Y y Z representados en la Figura 47.

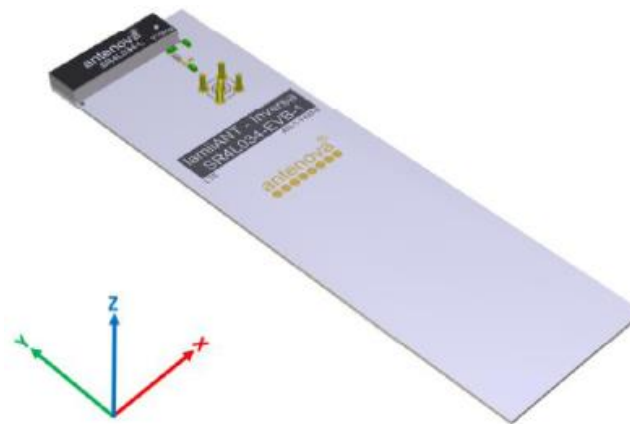


Figura 47. Orientación de referencia de la PCB de evaluación de Antenna [36]

En cuanto al diagrama de radiación, es bastante omnidireccional, especialmente en las bandas inferiores de frecuencia. En las siguientes figuras se muestran los diagramas en 2D y 3D para cada banda de trabajo:

- Banda 698 – 798 MHz (Figura 48).
- Banda 824 – 960 MHz (Figura 49).
- Banda 1710 – 2170 MHz (Figura 50).
- Banda 2300 – 2400 MHz (Figura 51).
- Banda 2500 – 2690 MHz (Figura 52).

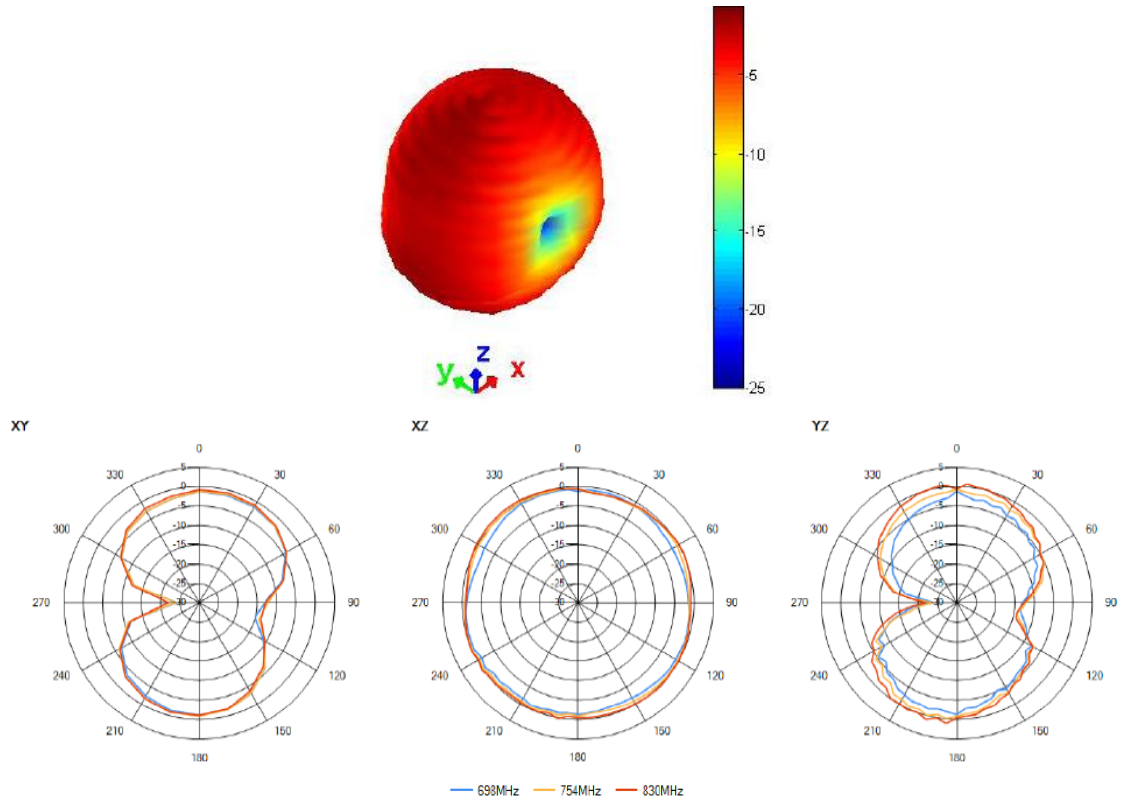


Figura 48. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 746 MHz [36]

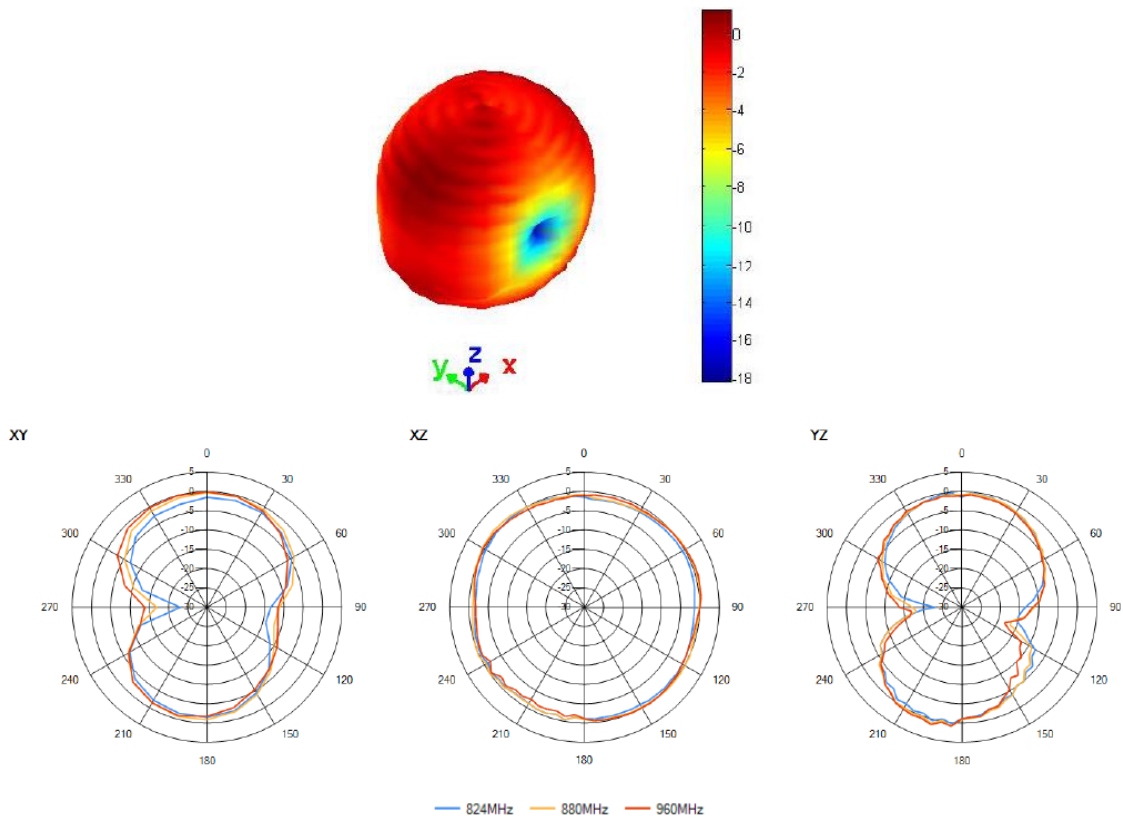


Figura 49. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 880 MHz [36]

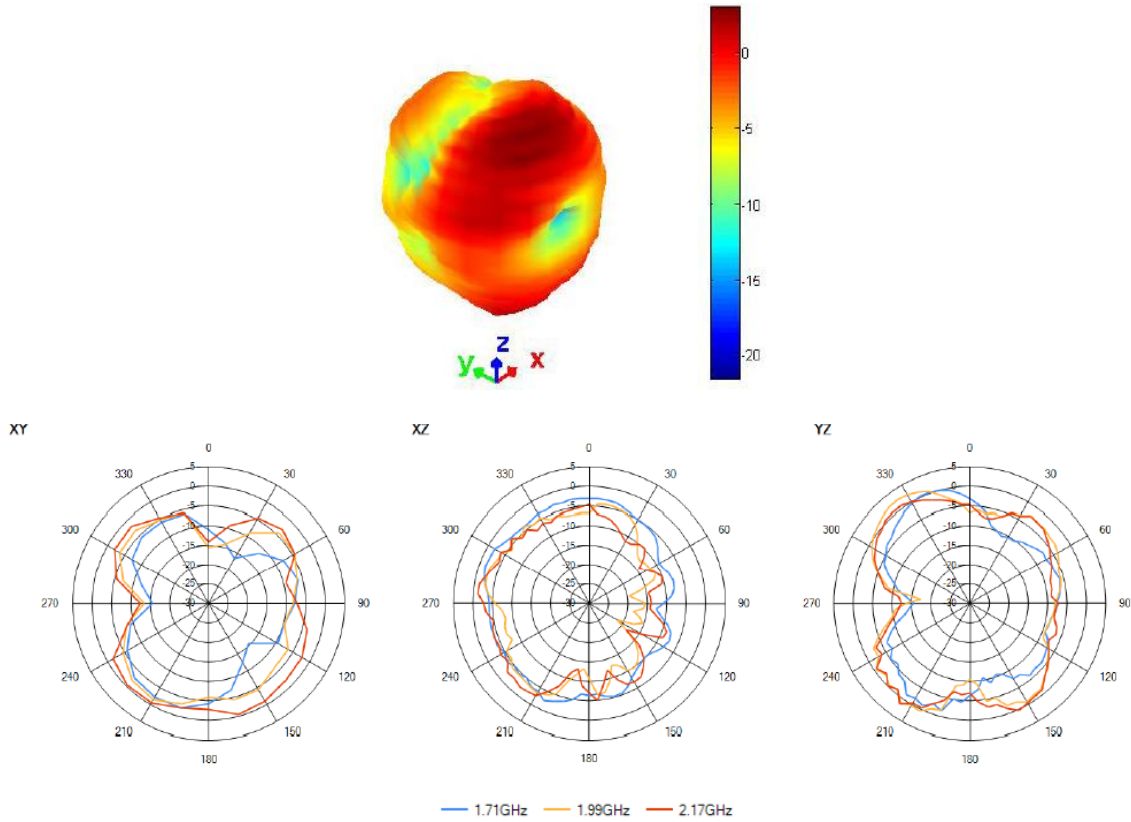


Figura 50. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 1990 MHz [36]

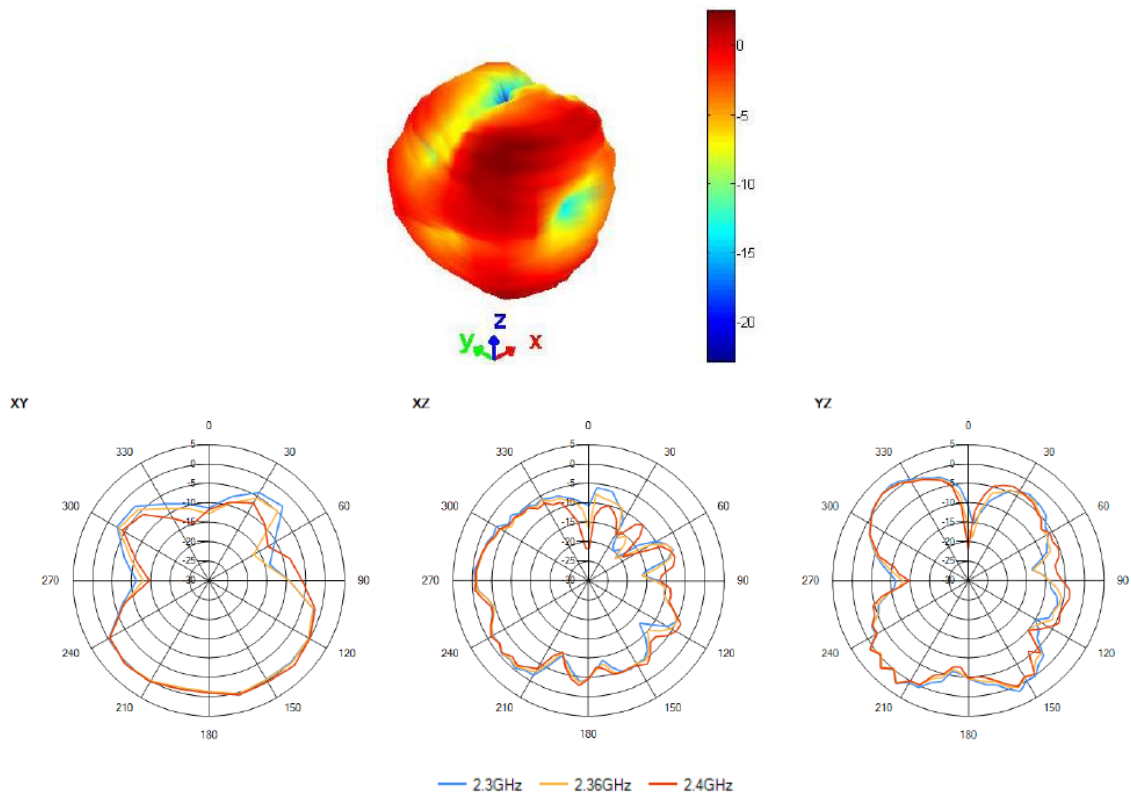


Figura 51. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 2350 MHz [36]

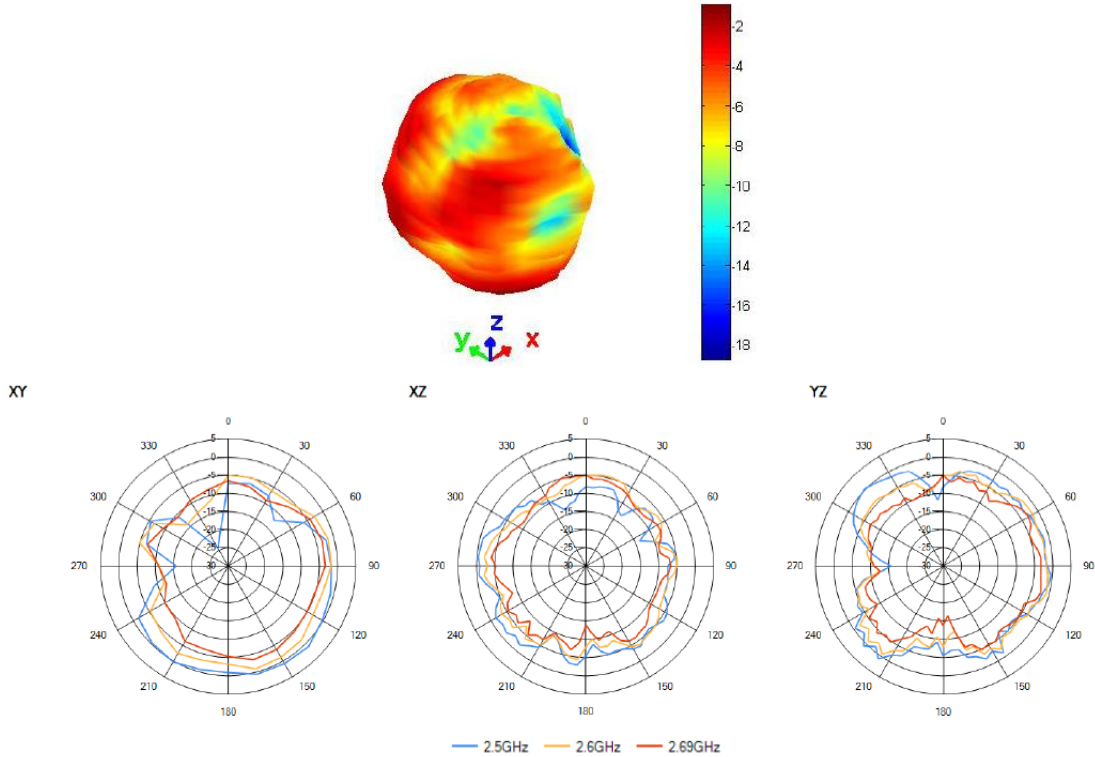


Figura 52. Diagrama de radiación 3D (arriba) y 2D (abajo) en 2600 MHz [36]

En lo relativo a la eficiencia de la antena, esta se ve afectada por la longitud de la PCB anfitriona, es decir, por la longitud del plano de masa. En la gráfica de la Figura 53 está representada la eficiencia en función de las longitudes señaladas en la Figura 54. Observando esta gráfica, se puede comprobar que la eficiencia de la antena es mayor cuanto mayor es el plano de masa, especialmente en las bajas frecuencias donde la diferencia entre eficiencias es superior.

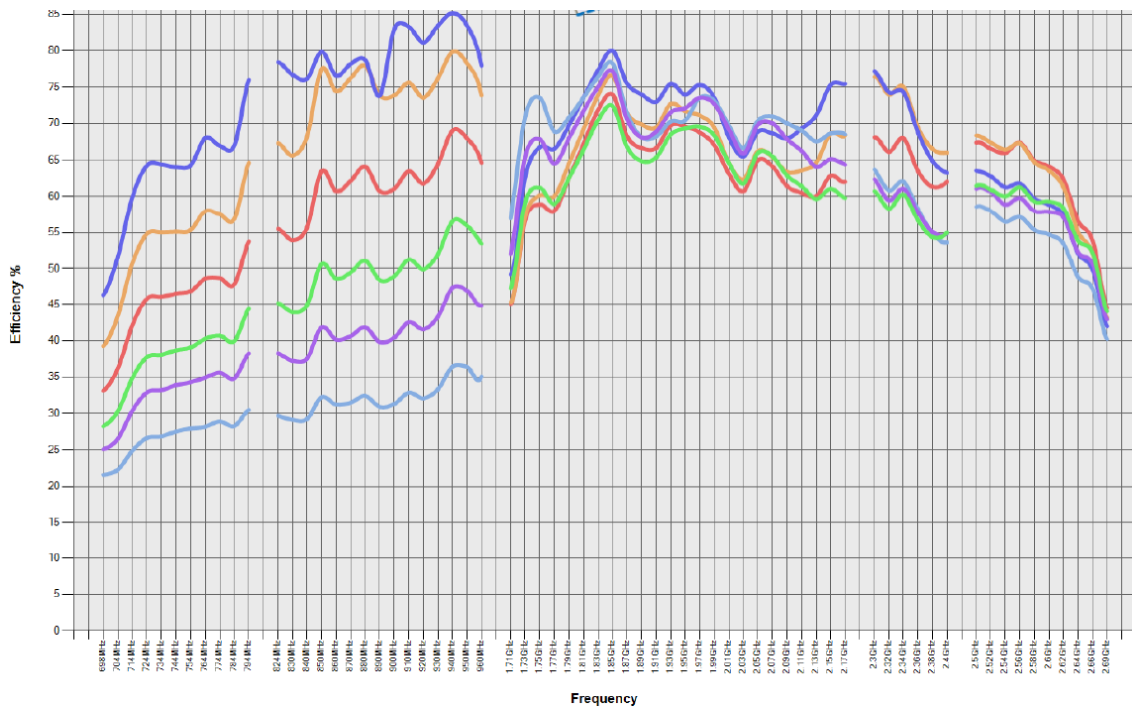


Figura 53. Eficiencia de Antena SR4L034-L/R según longitud del plano de masa [36]

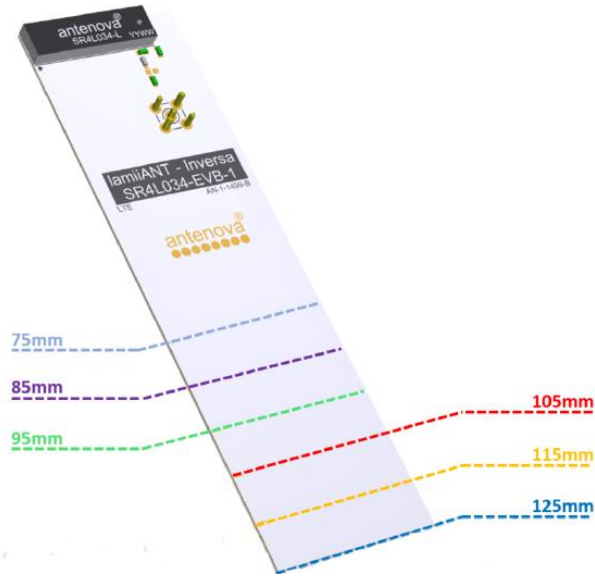


Figura 54. Longitudes del plano de masa probadas [36]

Según las indicaciones del fabricante, idealmente la antena debería situarse en una esquina de la PCB anfitriona, de forma horizontal (en el borde más corto) o vertical (en el borde más largo de la PCB) y utilizando el modelo de antena correspondiente, SR4L034-R o SR4L034-L, tal y como se indica en la Figura 55. Para la configuración vertical, se recomienda una longitud mínima del plano de masa mayor o igual a 100 mm.

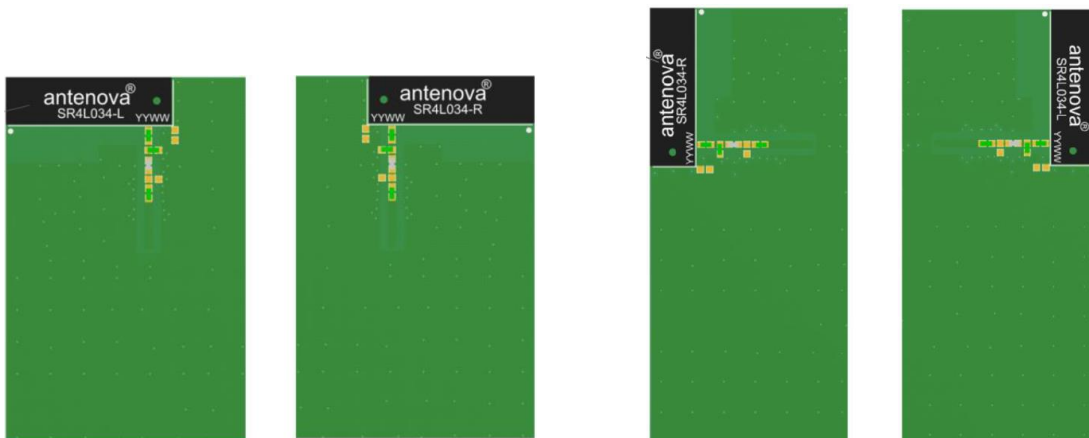


Figura 55. Emplazamiento horizontal (izq.) y vertical (dcha.) de Antenova SR4L034-L/R [36]

Mientras que lo ideal es mantener distancias entre objetos metálicos y otros componentes de la PCB, es posible tener componentes alrededor de la antena. No hay una distancia establecida, y esta varía dependiendo de la altura del componente. Así que, en lugar de establecer una distancia definida, puede aplicarse la siguiente regla: puede dibujarse una línea de proyección de 8° como límite para decidir la distancia a la que puede situarse un componente.

El ejemplo de la Figura 56 muestra un conector USB que se ha situado utilizando esta regla. Una vez que está dentro de la proyección límite de los 8 grados, se puede saber la distancia a la que emplazarlo.

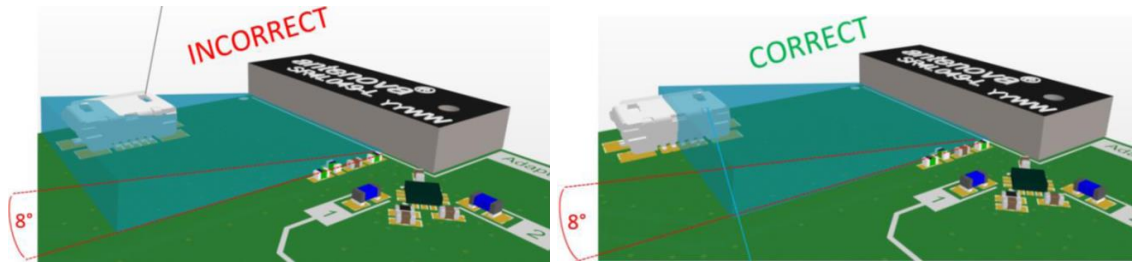


Figura 56. Regla para emplazar componentes próximos a Antena SR4L034-L/R [36]

3.3 Circuito módem 4G

Como ya se ha comentado en el apartado *1.1 Motivación y contexto*, el Producto Conectado cuenta con un diseño modular formado inicialmente por tres circuitos:

- Circuito base, donde se encuentran la alimentación, el procesador principal, las conexiones, el sistema de comunicaciones, el audio y el vídeo.
- Circuito de pulsadores y diodos LED (únicamente en el modelo CITYLINE).
- Circuito módem 4G, donde se encuentran dicho módem, la alimentación, la tarjeta SIM y la antena.

El circuito módem 4G utilizado para realizar pruebas de cobertura con diferentes videoporteros es el de la Figura 57. Este circuito consiste fundamentalmente en un módem 4G modelo SIM7500E, una SIM electrónica, y una antena Antenova SR4L034-L junto con su circuito de adaptación. Además, se le ha incluido un conector SMA hembra y un fotodiodo LED para facilitar la realización de pruebas y medidas.



Figura 57. Circuito módem 4G del Producto Conectado

Tal y como se puede comprobar en la Figura 55, se ha utilizado un emplazamiento horizontal de la antena, es decir, a lo largo del borde más corto de la PCB, y se ha escogido el modelo de antena Antenova SR4L034-L (*left*) para poder situar su circuito de adaptación a la derecha de esta.

Según la Figura 58, la placa presenta unas dimensiones de 63,5 mm de largo por 33,2 mm de ancho. En cuanto a las dimensiones del plano de masa, estas son 50,5 mm x 31,25 mm.

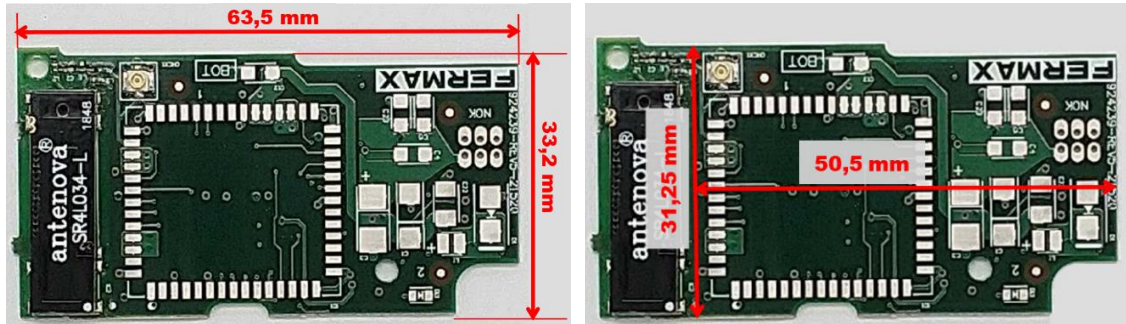


Figura 58. Dimensiones del circuito módem 4G del Producto Conectado [37]

3.4 Procedimiento y análisis de pruebas de cobertura

Todas las pruebas de campo detalladas en este documento, realizadas para estudiar la cobertura del Producto Conectado, consisten en emplazar el circuito módem 4G dentro de una placa de calle, ubicada en una pared exterior de la sede central de FERMAX, y medir los parámetros de nivel de potencia (RSRP) y calidad (RSRQ) de señal en las distintas bandas de frecuencia a las que se conecta la antena, durante un periodo de tiempo determinado.

Los resultados se visualizan en forma de tabla, en la que se recogen los valores medios de los parámetros RSRP y RSRQ obtenidos en cada banda, así como el porcentaje de tiempo que ha estado conectada la antena a cada una.

En la misma tabla también se calcula el RSRP promedio para cada una de las configuraciones, obtenido con la fórmula (3.1), a partir del RSRP medio y del porcentaje de tiempo que ha estado conectada la antena a cada banda. El promedio se calcula únicamente para el RSRP y no para el RSRQ porque, como se podrá comprobar más adelante, el segundo cuenta con valores suficientes en todos los casos y no es un parámetro crítico para la aplicación.

$$RSRP \text{ promedio} = \sum RSRP_{AVG} * \%Tiempo \quad (3.1)$$

Aunque en la tabla no se han incluido las muestras erróneas ni las muestras con un porcentaje de conexión inferior al 1%, sí que se han tenido en cuenta para el cálculo de dicho promedio.

3.5 Pruebas de cobertura con Producto Conectado

En estas pruebas se ha utilizado una placa de calle como la de la Figura 59, modelo SKYLINE. La placa se ha ubicado en una pared exterior, ya que esta sería una ubicación habitual del producto. Esto implica que la señal solo podrá salir por la parte frontal la placa, la cual es metálica en su totalidad, y afectará a la cobertura de la antena.

Como resultado se adjunta la Tabla 8, con dos de las pruebas realizadas. Los valores de RSRP se encuentran en el rango *Pobre*, por lo que esta solución no garantiza la calidad del servicio de la conectividad en cuanto a nivel de señal. Respecto a los valores de RSRQ, estos se encuentran en los rangos *Excelente* – *Bueno*, que son suficientes para garantizar la calidad de la señal. Cabe destacar que la antena solo se ha conectado a las bandas 1 (2100 MHz) y 3 (1800 MHz).



Figura 59. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX

Antena SR4L034-L (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Sin ranura	3	100%	-99,23	-10,09	-99,23 dB
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Sin ranura	3	50,49%	-92,12	-10,79	-92,99 dB
	1	28,91%	-95,78	-8,23	
	3	20,32%	-92,47	-10,77	

Tabla 8. Resultado pruebas de cobertura con Antena SR4L034-L

3.6 Estudio realizado por el iTEAM

FERMAX tiene un acuerdo de colaboración con la *Universitat Politècnica de València* (UPV), en concreto, con el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM). Este acuerdo consiste en asesorar a FERMAX en el diseño y desarrollo de una solución de conectividad LTE para sus videoporteros, así como en la elaboración de pruebas de laboratorio con las antenas y soluciones propuestas. En estas pruebas, el iTEAM mide parámetros como el coeficiente de reflexión, la ganancia o el diagrama de radiación en distintas casuísticas.

En las primeras pruebas de laboratorio se probó el circuito módem 4G del Producto Conectado con la antena Antena SR4L034-L, midiendo tanto el coeficiente de reflexión como el diagrama de radiación y la ganancia en distintas configuraciones.

En primer lugar, las medidas del coeficiente de reflexión o parámetro S_{11} en decibelios realizadas se listan y detallan a continuación [37]:

a) *Medida de la antena sin red de adaptación.*

En esta prueba se mide el parámetro S_{11} en dos antenas Antena SR4L034-L, sin tener en cuenta la red de adaptación en ninguna de ellas (ver Figura 60).

La gráfica resultada de esta medición está representada en la Figura 61. En ella se puede apreciar que, en ambas antenas sin red de adaptación, el espectro está desplazado a la derecha con respecto al *datasheet* del fabricante con red de adaptación (Figura 43).

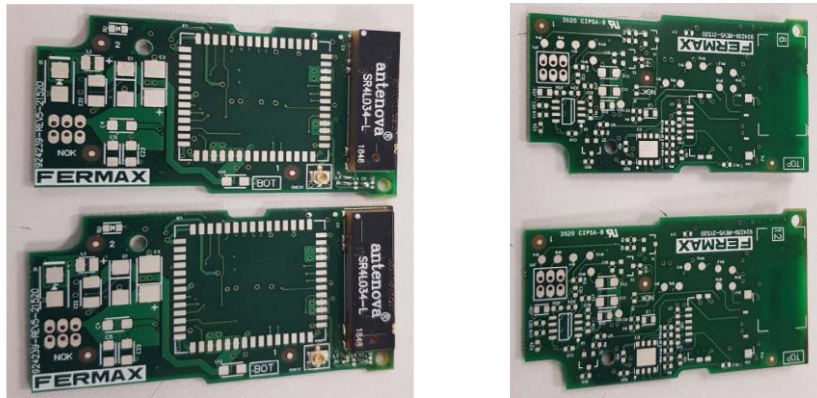


Figura 60. Medida de las antenas sin red de adaptación [37]

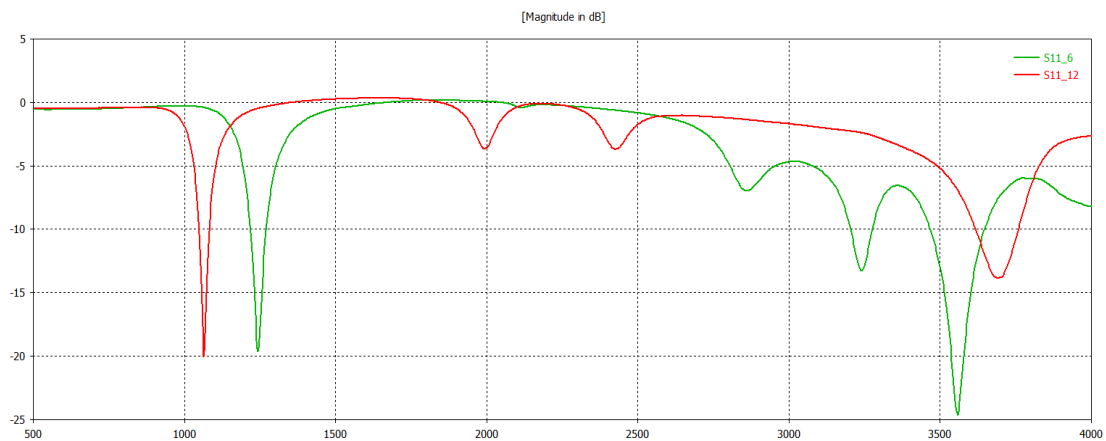


Figura 61. S_{11} medido en las antenas sin red de adaptación [37]

b) *Medida de la antena con red de adaptación.*

La configuración utilizada para estudiar este caso es nuevamente la de la Figura 60, pero esta vez con la red de adaptación, y la gráfica con los resultados obtenidos se representa en la Figura 62.

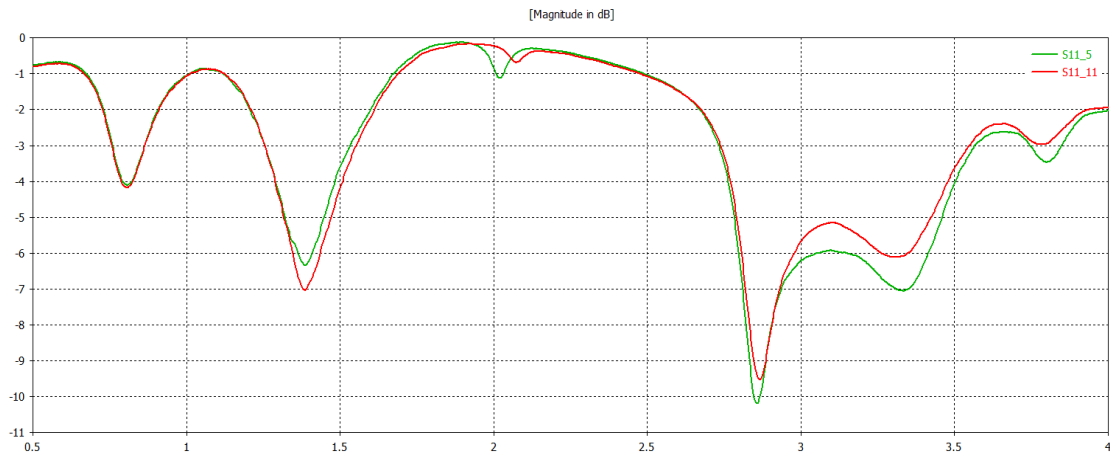


Figura 62. S_{11} medido en las antenas con red de adaptación [37]

El espectro de las antenas con la red de adaptación se asemeja más al espectro del *datasheet*; sin embargo, sigue estando desplazado hacia la derecha. Mientras que en el *datasheet* el mínimo se produce en 1900 MHz, en esta medida el mínimo está en 2800 MHz, habiendo un desplazamiento de unos 900 MHz.

c) *Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa.*

En esta medida se ha conectado el circuito módem 4G al circuito base del Producto Conectado, como se puede comprobar en la Figura 63, para estudiar el efecto de todo el conjunto de la circuitería del producto.

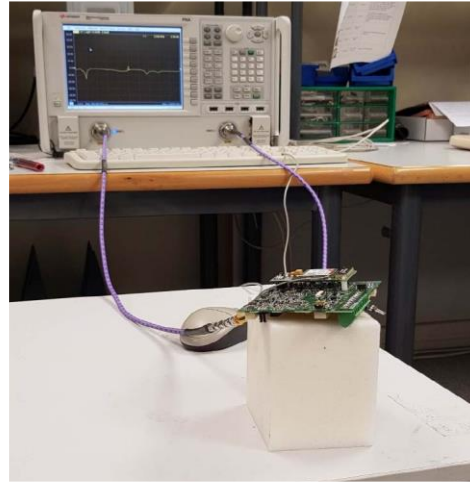


Figura 63. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [37]

En la gráfica de la Figura 64 se observa el resultado obtenido en esta medida. En ella, se puede comprobar que el espectro se encuentra incluso más desplazado que en la medida anterior, estando el mínimo esta vez en 3200 MHz, aproximadamente. En cuanto a las bajas frecuencias, los resultados son muy dispares con respecto al *datasheet*.

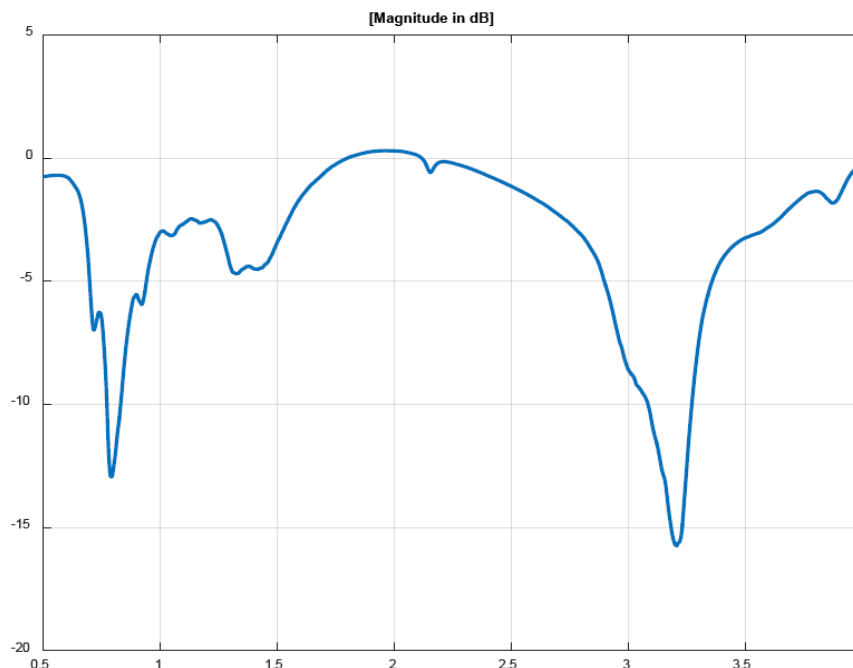


Figura 64. S_{11} medido en la antena con red de adaptación y circuitería, sin carcasa [37]

d) Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa.

Por último, con esta prueba se ha comprobado el efecto que produce la carcasa metálica sobre el producto, medido tal y como se muestra en la Figura 65. La gráfica resultada está representada en la Figura 66.

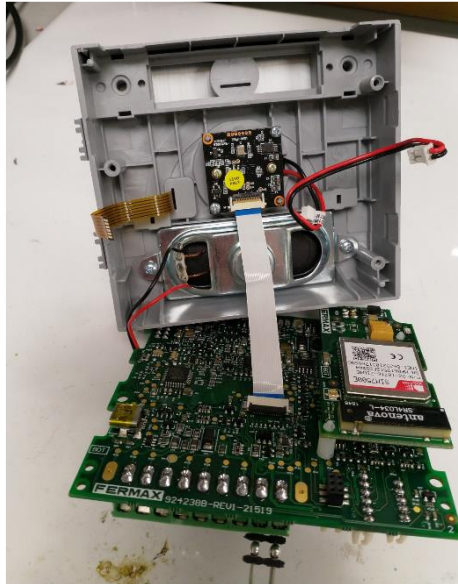


Figura 65. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [37]

En estas medidas con carcasa, el espectro se desajusta completamente aumentando el coeficiente de reflexión en todas las bandas, sumado al desplazamiento del espectro ya presente anteriormente.

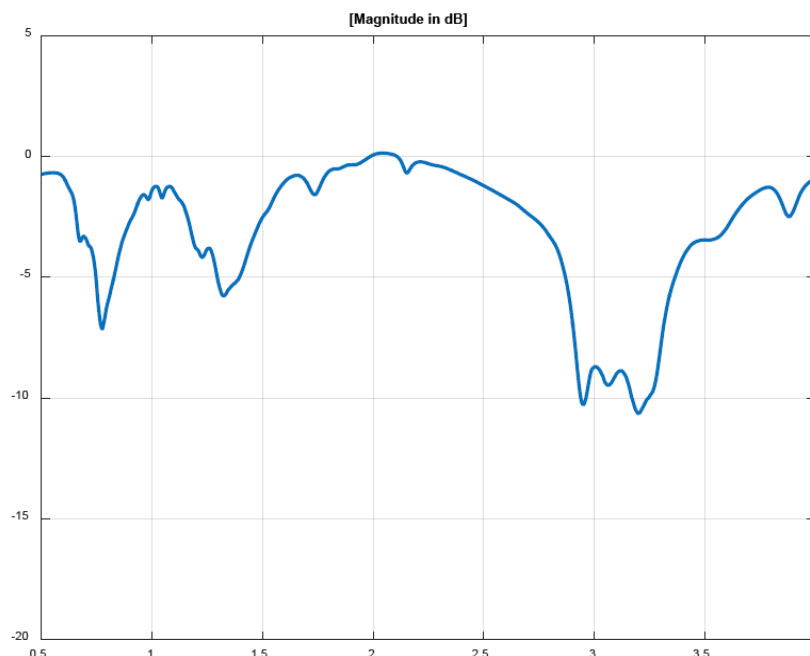


Figura 66. S_{11} medido en la antena con red de adaptación y circuitería, con carcasa [37]

A modo comparativo de todas estas medidas, en las gráficas de la Figura 67 se compara el parámetro S_{11} medido en el laboratorio en las tres configuraciones anteriores (arriba) con el S_{11} proporcionado en el *datasheet* del fabricante (abajo).

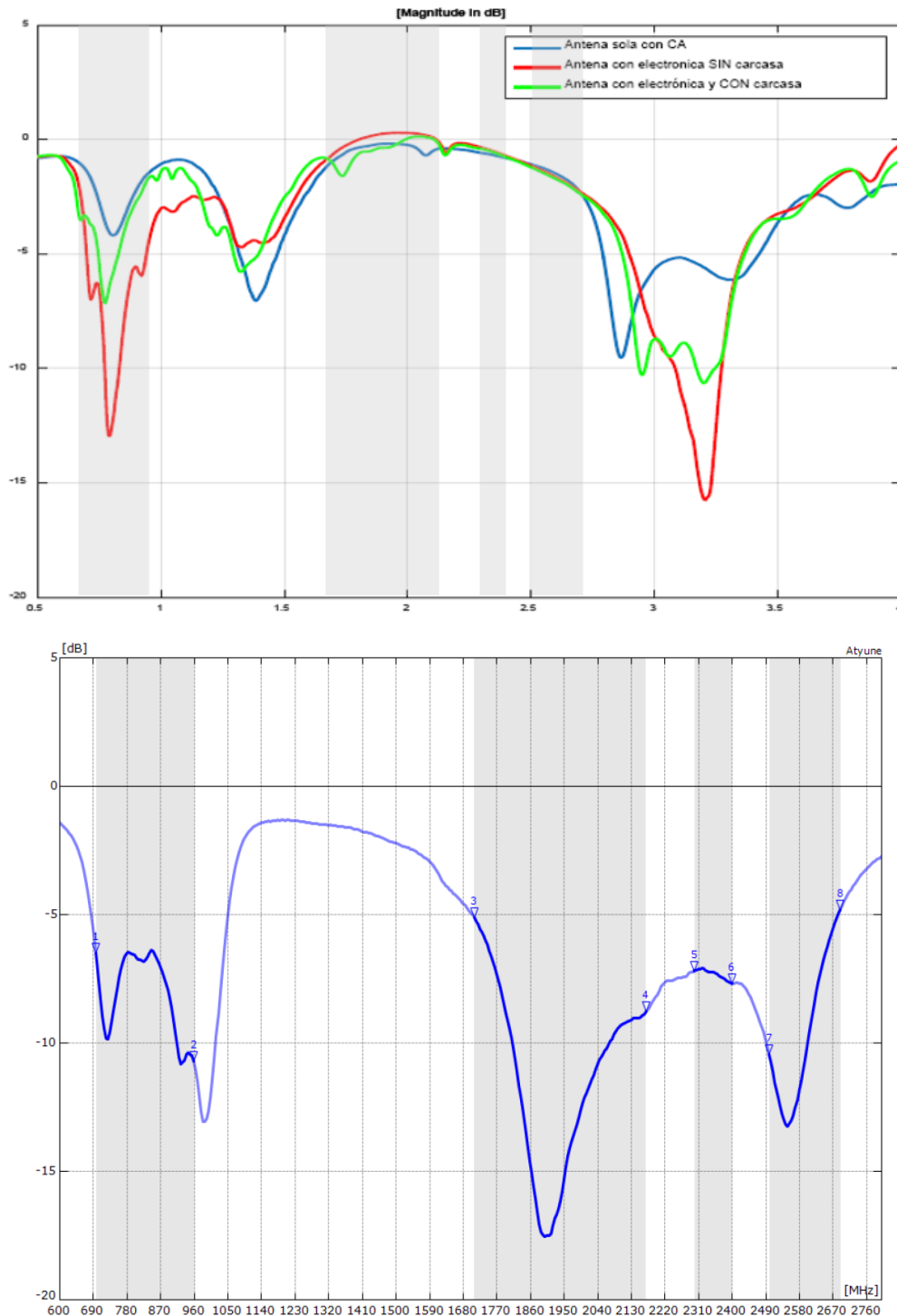


Figura 67. Comparación S_{11} de las medidas (arriba) [37] y del *datasheet* (abajo) [36]

Observando esta comparativa, se puede ver que el parámetro S_{11} está desplazado en el espectro, tal y como ya se ha comentado. Las medidas más fieles a los valores del fabricante son las realizadas únicamente con la antena y el circuito de adaptación. En este caso, el espectro está menos desplazado, aunque los valores de S_{11} son peores que los del *datasheet*.

En segundo lugar, el iTEAM ha realizado medidas del diagrama de radiación y de ganancia con la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa (ver Figura 68) y con carcasa (ver Figura 69) [38].

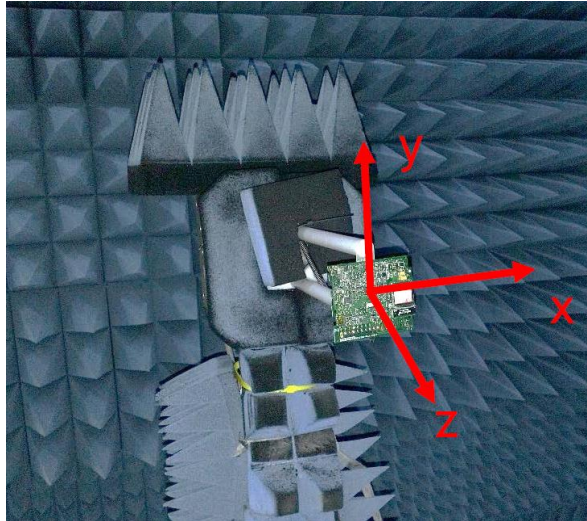


Figura 68. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [38]

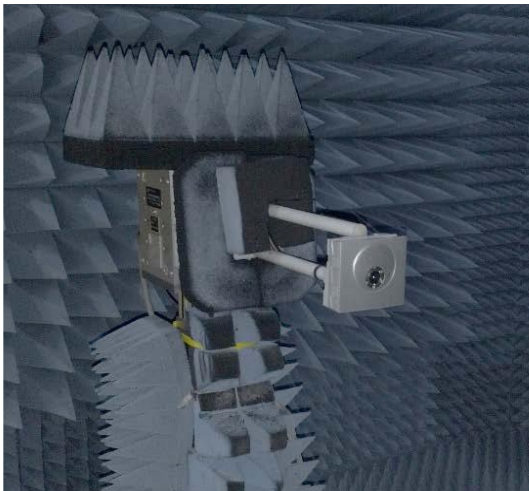


Figura 69. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [38]

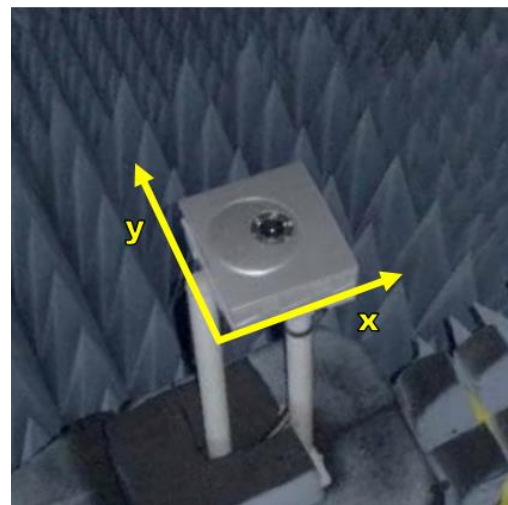
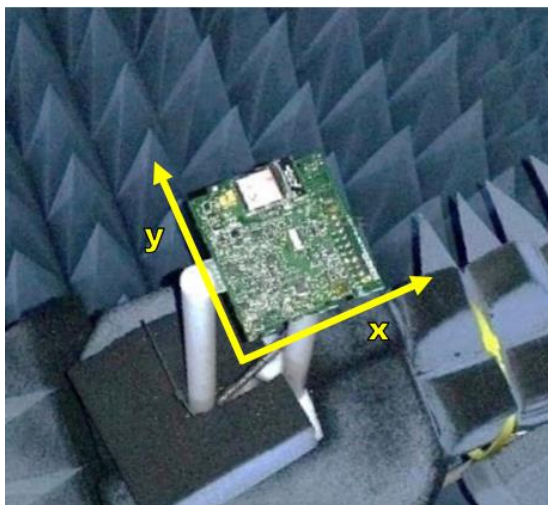


Figura 70. Ejes de referencia para diagrama de radiación 3D [38]

Los diagramas de radiación en 3D obtenidos para cada frecuencia de trabajo analizada, con ambas configuraciones, se recogen a continuación:

a) Banda 700 MHz (Figura 71).

El recuadro discontinuo marca la posición de la antena, tal y como indica en la Figura 70. Es decir, en el diagrama de la derecha, el frontal de la carcasa apuntaría hacia arriba. En el caso con carcasa, puede observarse que la radiación máxima se da hacia detrás. En la práctica esto se traduce en que el dispositivo radiaría hacia la pared, cuando lo que se busca es que radie hacia delante, hacia la calle.

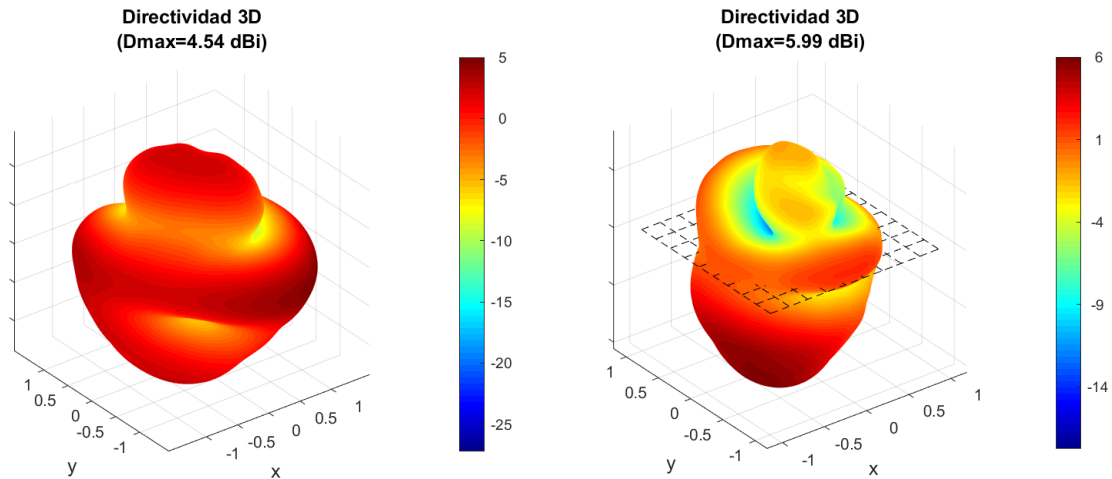


Figura 71. Diagrama de radiación 3D en 700 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

b) Banda 900 MHz (Figura 72).

En el caso con carcasa puede verse, nuevamente, que la radiación máxima se da hacia detrás. Además, en esta frecuencia los valores de directividad máxima son los peores de todas las frecuencias analizadas.

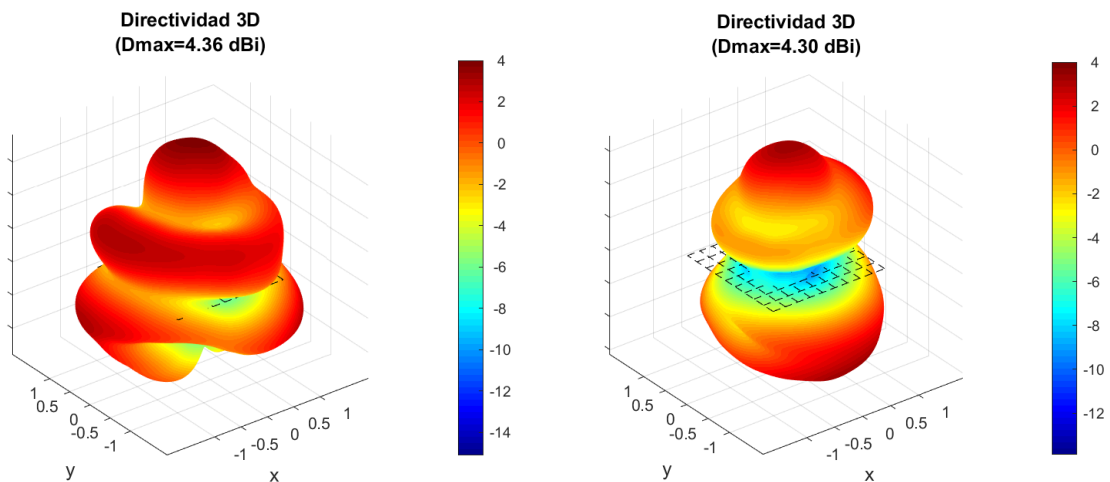


Figura 72. Diagrama de radiación 3D en 900 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

c) Banda 1300 MHz (Figura 73).

En esta frecuencia, la mayor parte de la radiación de la antena con carcasa se produce hacia delante, a diferencia de las dos frecuencias anteriores. Sin embargo, el valor de radiación máxima sigue dándose hacia detrás.

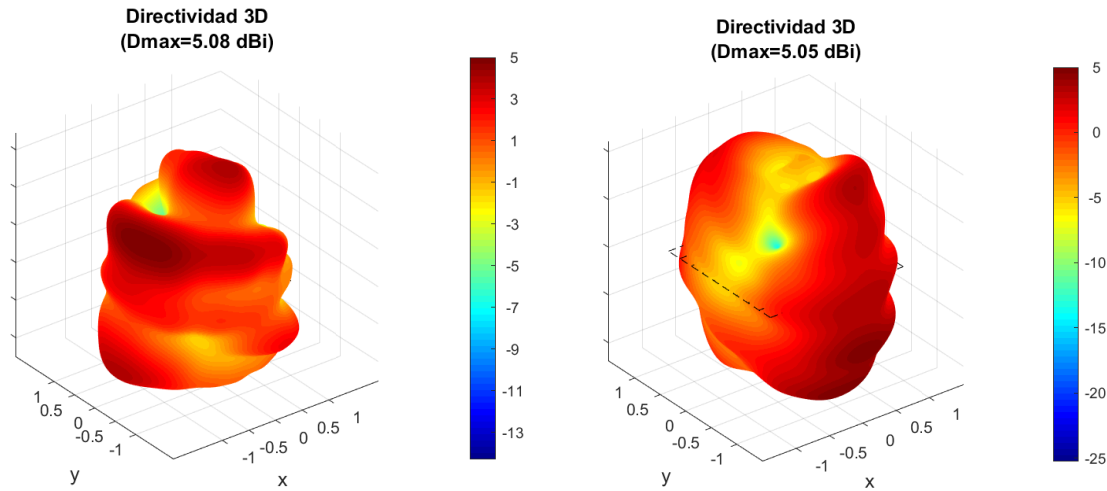


Figura 73. Diagrama de radiación 3D en 1300 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

d) Banda 1800 MHz (Figura 74).

Del mismo modo que en la frecuencia anterior, la antena con carcasa radia más potencia hacia delante que en las frecuencias de 700 y 900 MHz, pero la radiación máxima sigue dándose hacia detrás.

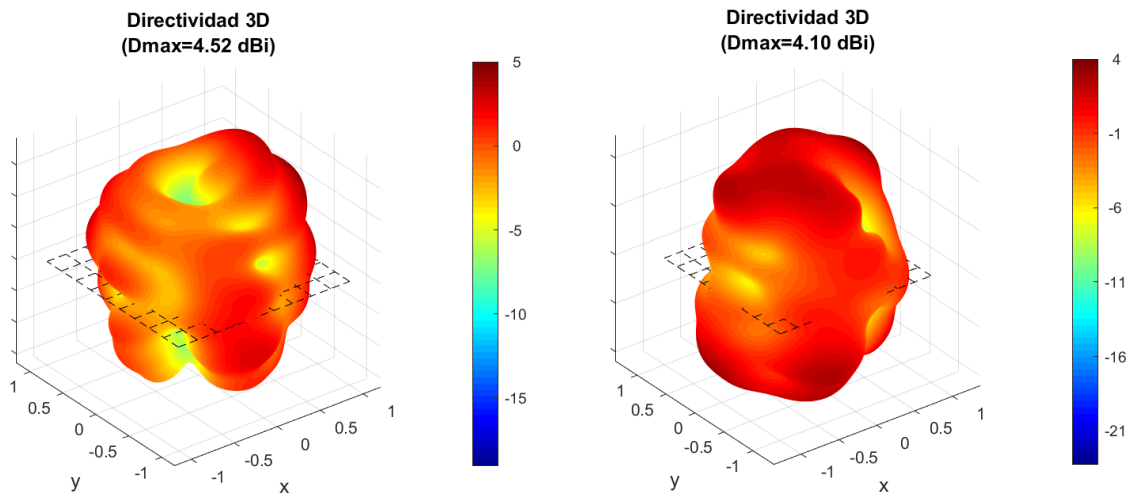


Figura 74. Diagrama de radiación 3D en 1800 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

e) Banda 3000 MHz (Figura 75).

En esta frecuencia se han obtenido los mejores valores de directividad máxima. Por otro lado, a medida que ha ido aumentando la frecuencia, la radiación se ha desplazado un poco hacia delante. Esto significa que la antena con carcasa funcionará ligeramente mejor a frecuencias más altas, como ya se ha podido comprobar en las pruebas de cobertura, donde solo se han obtenido datos

de las bandas de 1800 MHz y 2100 MHz. Sin embargo, el valor de radiación máxima se ha dado hacia detrás en todas las frecuencias, por lo que el funcionamiento de la antena seguirá siendo insuficiente en cuanto a niveles de potencia y de calidad.

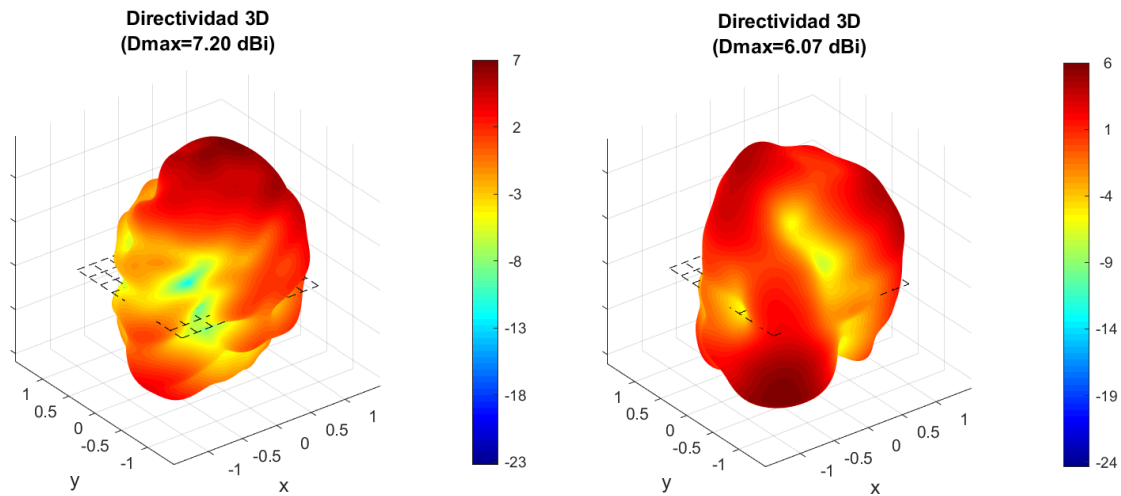


Figura 75. Diagrama de radiación 3D en 3000 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

Las conclusiones que se pueden extraer de los malos resultados obtenidos en todas estas medidas son, en primer lugar, que el plano de masa no cumple con las pautas de diseño marcadas por el fabricante y, en segundo lugar, que el frontal metálico de la placa no deja salir a la señal.

Por un lado, las dimensiones del plano de masa no son lo suficientemente grandes. El fabricante recomienda una longitud de 125 mm para el plano de masa de la antena, frente a los 50,5 mm de longitud de plano disponibles en el circuito módem 4G del Producto Conectado. Además, esta longitud se traduce en una menor eficiencia de radiación de la antena.

Otra pauta que no se cumple con respecto a lo explicado en el *datasheet* es la distancia entre la antena y el resto de los componentes, según el límite de 8° de proyección. Además, la distancia de 9 mm entre el plano de masa del circuito módem 4G y el plano de masa del circuito principal es insuficiente, y también influye en el comportamiento del conjunto.

Por último, para estas pruebas no se ha tenido en cuenta que el comportamiento de la antena cambia si el conjunto dispone de una envolvente metálica.

Por todo ello, el iTEAM aconseja seguir las recomendaciones de pistado, distancias y dimensiones del fabricante para el plano de masa.

Por otro lado, es necesario modificar la mecánica de los videoporteros para romper la jaula de Faraday. Una solución factible es añadir una apertura no metálica en el frontal. A nivel de dimensiones de la apertura, esta debe ser mayor que la mitad de la longitud de onda λ de la frecuencia más baja, es decir, la frecuencia de 800 MHz.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{800 \times 10^6} = 0,375 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{0,375}{2} = 0,1875 \text{ m} = 187,5 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Con los cálculos de las ecuaciones (3.2) y (3.3), la apertura no metálica mínima para la frecuencia menor debería de ser 187,5 mm. Del mismo modo, con las ecuaciones (3.4) y (3.5), para la frecuencia mayor (2600 MHz) la apertura debería ser superior a 57,7 mm. Una apertura de estas dimensiones no es posible con el Producto Conectado actual.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2600 \times 10^6} = 0,1154 \text{ m} \quad (3.4)$$

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{0,1154}{2} = 0,0577 \text{ m} = 57,7 \text{ mm} \quad (3.5)$$

3.7 Pruebas con aperturas en el metal

Siguiendo la recomendación del iTEAM de añadir una apertura no metálica en el frontal de la placa, se han planteado tres nuevas pruebas. En primer lugar, se ha probado el circuito módem 4G en una placa como la de la Figura 76, cuyo frontal presenta una ranura en el metal de dimensiones 77 x 15 mm utilizada para los pulsadores. Estas dimensiones están bastante alejadas de los 187,5 mm recomendados por el iTEAM.



Figura 76. Placa de calle modelo CITYLINE de FERMAX con ranura

Los resultados de cobertura medidos en esta prueba están recogidos en la Tabla 9. Si se presta atención a los valores de RSRP, estos han mejorado notablemente con respecto a los valores obtenidos con el frontal sin apertura en el metal (Tabla 8), llegando a alcanzar el rango de nivel de señal *Bueno*. En cuanto a los valores de RSRQ, son similares en ambos casos.

Antenova SR4L034-L (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Con ranura	3	65,97%	-88,35	-10,49	-89,25 dB
	3	22,60%	-88,95	-10,97	
	1	10,65%	-99,61	-9,41	

Tabla 9. Resultado pruebas de cobertura Antenova SR4L034-L con ranura no metálica

En segundo lugar, se ha probado el mismo circuito dentro de un módulo de plástico que supone una apertura en el metal de dimensiones 105 x 47 mm, tal y como se muestra en la Figura 77, conectado al circuito base de la placa mediante cables externos. Además de contar con una apertura mayor en el metal, más próxima a los 187,5 mm recomendados por el iTEAM, el circuito módem 4G se ha alejado del circuito base del Producto Conectado, lo que hace que el segundo no interfiera tanto con la antena y se mejore así su cobertura.



Figura 77. Placa de calle modelo CITYLINE de FERMAX con módulo de plástico pequeño

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos con esta configuración. Comparando los valores medios tanto de RSRP como de RSRQ con los obtenidos en la Tabla 8 (sin ranura) y la Tabla 9 (con ranura de 77 x 15 mm), se puede concluir que, cuanto mayor sea la superficie no metálica en la placa, mejor cobertura tendrá esta, alcanzando incluso valores del rango *Excelente* de RSRP en una de las bandas, y de RSRQ en todas ellas.

Antenova SR4L034-L (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	65,79%	-78,26	-9,07	-81,08 dB
	3	17,83%	-81,65	-7,23	
	1	16,06%	-92,66	-9,64	

Tabla 10. Resultado pruebas de cobertura con módulo de plástico pequeño

En tercer y último lugar, se ha probado a situar el circuito en un módulo de plástico el doble de grande que el anterior, de dimensiones 105 x 94 mm, como en la placa de la Figura 78. Esta es la apertura no metálica con mayores dimensiones que hay disponible en FERMAX. De igual modo que con el módulo de plástico más pequeño, el circuito módem 4G está conectado mediante cables externos, y está alejado del circuito base de la placa.



Figura 78. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX con módulo de plástico grande

Los parámetros de cobertura medidos con este módulo grande de plástico están recogidos en la Tabla 11. Si se compara el valor promedio de RSRP calculado con el de la Tabla 10, es posible comprobar que, con el doble de superficie no metálica, se ha mejorado únicamente 1 dB el nivel de potencia de la señal, por lo que la diferencia entre utilizar un módulo de plástico de un tamaño u otro no es sustancial. En cuanto a los valores de RSRQ, son similares con ambos módulos para las mismas bandas de frecuencia.

Antena SR4L034-L (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico grande	3	60,40%	-78,35	-9,25	-80,27 dB
	3	37,56%	-83,15	-5,13	
	1	1,71%	-92,80	-9,81	

Tabla 11. Resultado pruebas de cobertura con módulo de plástico grande

3.8 Influencia de los materiales

Además de estudiar el efecto que tienen las distintas aperturas en el metal del frontal del videoportero, es necesario tener en cuenta la envolvente metálica total que rodea a la antena, así como el efecto que causa su instalación en un material de construcción u otro.

Por este motivo, se prueba y se compara la utilización de una caja de empotrar metálica frente a una caja de plástico, a la vez que la instalación en una pared de ladrillo frente a la instalación fuera de esta, en una ventana de vidrio. En estas pruebas se sitúa el circuito módem 4G rectangular dentro de un módulo pequeño de plástico (105 x 47 mm), conectado al circuito base del amplificador mediante cables externos.

En concreto, se prueban simultáneamente las cuatro combinaciones posibles con las configuraciones comentadas:

- Caja de empotrar metálica instalada en la pared (Figura 79).
- Caja de empotrar metálica instalada fuera de la pared, en concreto, apoyada en una ventana de vidrio (Figura 80).
- Caja de empotrar de plástico instalada en la pared (Figura 81).
- Caja de empotrar de plástico instalada fuera de la pared, apoyada en una ventana de vidrio (Figura 82).



Figura 79. Placa con caja de empotrar metálica en la pared



Figura 80. Placa con caja de empotrar metálica en la ventana



Figura 81. Placa con caja de empotar de plástico en la pared



Figura 82. Placa con caja de empotar de plástico en la ventana

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 12. Por un lado, si se comparan los materiales para la caja de empotrar, se obtiene una mejor cobertura con la caja metálica. Por el otro, al comparar la pared con el vidrio de la ventana, se consiguen mejores niveles de potencia y calidad de señal con la pared de ladrillo. Además, en todos los casos, la banda que mejor funciona es la banda 3, de 1800 MHz.

Para razonarlo, se calculan en la Tabla 13 y según la ecuación (3.6) las longitudes de onda (λ) de todas las bandas implicadas, así como las relaciones $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.6)$$

También es necesario conocer la separación entre la antena y el fondo de la caja de empotrar y/o la pared, que es de 55 mm.

Antenova SR4L034-L (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Caja metálica en pared	3	67,19%	-78,87	-8,95	-82,41 dB
	1	24,73%	-92,23	-9,77	
	3	5,26%	-79,10	-7,21	
	1	2,67%	-91,86	-10,36	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Caja metálica en ventana	3	88,23%	-92,19	-8,81	-93,14 dB
	1	5,30%	-97,71	-9,17	
	3	3,99%	-95,41	-11,48	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Caja de plástico en pared	3	73,30%	-84,08	-9,56	-84,80 dB
	3	22,62%	-85,49	-6,82	
	1	3,06%	-97,40	-10,13	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Caja de plástico en ventana	3	65,89%	-95,48	-9,88	-97,61 dB
	1	18,84%	-102,89	-10,68	
	3	4,85%	-96,25	-10,77	
	1	3,56%	-100,24	-9,52	
	3	3,21%	-96,41	-11,89	

Tabla 12. Resultado pruebas de cobertura con distintos materiales

Banda	Frecuencia (MHz)	λ (mm)	$\lambda/2$ (mm)	$\lambda/4$ (mm)
1	2100	142,9	71,4	35,7
3	1800	166,7	83,3	41,7
20	800	375	187,5	93,8

Tabla 13. Longitudes de onda de las bandas LTE

Estos 55 mm de distancia están algo alejados de los valores de $\frac{\lambda}{4}$ en las frecuencias de interés, que es la relación más problemática; cuanto más alejada esté la antena de la distancia de $\frac{\lambda}{4}$, más aprovechará el plano de masa para radiar.

Además, a esta distancia el metal está actuando como un reflector, por lo que la señal que le llega rebota y es reflejada hacia delante, en favor de la antena, y tanto el metal como la pared están aislando la parte trasera de la placa de posibles interferencias.

Por todo esto, la situación más favorable para el videopertero es la utilización de una caja de empotrar metálica instalada en una pared convencional, obteniendo un RSRP promedio en el rango *Bueno*.

En el *Anexo I. Resultados de cobertura con circuito módem 4G rectangular* se adjuntan los datos recopilados durante todas las pruebas de este capítulo al completo.

Capítulo 4. Rediseño del Producto Conectado con circuito en L

Con todas estas conclusiones y recomendaciones recogidas, FERMAX ha diseñado un nuevo Producto Conectado con la PCB del circuito módem 4G en forma de L, tal y como se muestra en la Figura 83.



Figura 83. Circuito módem 4G del Producto Conectado en L

Para ello, se han seguido las especificaciones del fabricante de la antena en el diseño del plano de masa, replicando las zonas sin cobre (*clearance*) conforme al *datasheet* [36] y aumentando su tamaño lo máximo posible, sin poder llegar a replicar los 125 mm recomendados debido a las limitaciones físicas del diseño. Por este mismo motivo, tampoco se ha podido alejar el PCB del circuito módem 4G del PCB del circuito principal. Las dimensiones de este circuito módem 4G en L son las mostradas en la Figura 84.

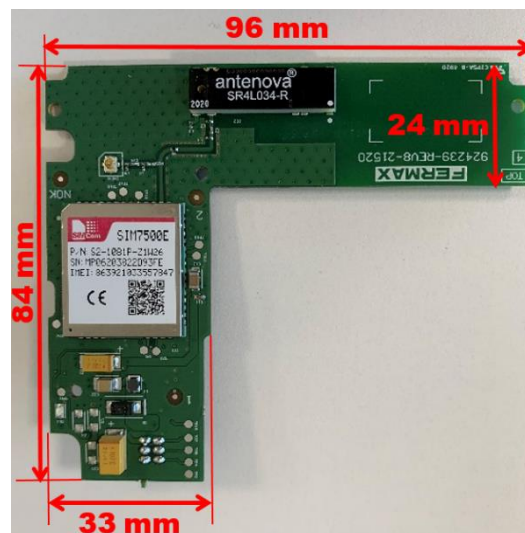


Figura 84. Dimensiones del circuito módem 4G del Producto Conectado en L

La reubicación de la antena se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la existencia de una apertura no metálica correspondiente a los pulsadores del frontal de los videoporteros; es decir, la antena está situada a la altura de esta ranura, como se verá más adelante. El principal problema es que las dimensiones máximas posibles de esta apertura son 97 x 15 mm, aproximadamente la mitad de los 187,5 mm recomendados por el iTEAM para asegurar un buen funcionamiento en las frecuencias más bajas.

Otro aspecto que destacar es que se ha cambiado el modelo de la antena Antenova SR4L034-L (*left*) por el modelo Antenova SR4L034-R (*right*) para ajustar el diseño y poder situar el circuito de adaptación a la izquierda de la antena, lo más cerca posible del módulo 4G. En este caso, se ha utilizado un emplazamiento vertical, es decir, a lo largo del borde de mayor longitud de la PCB anfitriona, como se indicaba en la Figura 55. Sin embargo, no se ha podido seguir la recomendación del fabricante de situar la antena en una esquina de la PCB.

Esta propuesta obliga a no poner el circuito de LEDs y pulsadores de las placas CITYLINE, por lo que, en principio, la solución de conectividad 4G solo se incluirá en las placas SKYLINE. Por tanto, en esta nueva versión del Producto Conectado, el diseño modular está formado por dos circuitos:

- Circuito base, donde se encuentran la alimentación, el procesador principal, las conexiones, el sistema de comunicaciones, el audio y el vídeo.
- Circuito módem 4G, donde se encuentra dicho módem, la alimentación, la tarjeta SIM electrónica y la antena.

4.1 Pruebas de cobertura con Producto Conectado con circuito en L

Una vez fabricado el circuito rediseñado en forma de L del Producto Conectado, se ha probado su funcionamiento. Para ello, y como se ha situado la antena a la altura de la ranura no metálica, se han utilizado en primer lugar tres tamaños distintos de ranura, mostrados en la Figura 85: pequeña (57 x 15 mm), mediana (77 x 15 mm) y grande (97 x 15 mm), y una configuración sin ranura como la de la misma figura.



Figura 85. Placas sin ranura, con ranura pequeña, mediana y grande (de izquierda a derecha)

De todas las pruebas llevadas a cabo, se van a detallar las más significativas en cuanto a las conclusiones que se pueden extraer, y agrupadas según el tipo de ranura utilizado:

a) Placa sin ranura (Figura 85).

Los resultados de RSRP y RSRQ obtenidos se recogen en la Tabla 14. Como era de esperar, estos son insuficientes al no presentar ninguna apertura en el metal. Sin embargo, en las pocas muestras tomadas en la banda 20, los valores de RSRP son sorprendentemente *Excelentes*, y por ello han sido incluidos en esta tabla a pesar de tener un porcentaje de conexión inferior al 1%.

Antena SR4L034-R (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Sin ranura	3	50,67%	-92,05	-9,80	-92,51 dB
	1	48,45%	-93,03	-9,28	
	20	0,25%	-77,50	-9,22	

Tabla 14. Resultado pruebas de cobertura Antena SR4L034-R sin ranura

b) Placa con ranura pequeña, de dimensiones 57 x 15 mm (Figura 85).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 15. Estos son los esperados al ser la apertura de menor tamaño. La banda 20 es la que mejores valores de RSRP proporciona, y a la que menos veces se ha conectado la antena.

Antena SR4L034-R (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura pequeña	3	66,95%	-82,08	-10,32	-86,07 dB
	1	25,80%	-97,09	-9,83	
	3	3,24%	-82,92	-11,45	
	20	2,10%	-77,61	-12,04	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura pequeña	3	62,49%	-80,85	-10,50	-87,14 dB
	1	29,63%	-98,88	-8,66	
	1	4,71%	-101,96	-10,47	
	3	3,07%	-81,42	-11,47	

Tabla 15. Resultado pruebas de cobertura Antena SR4L034-R con ranura pequeña

c) Placa con ranura mediana, de dimensiones 77 x 15 mm (Figura 85).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 16. Estos resultados son bastante buenos durante la mayoría del tiempo que está conectada la antena. En base al RSRP promedio calculado, esta configuración es la mejor de los tres tamaños de ranura estudiados.

Antena SR4L034-R (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura mediana	3	51,45%	-79,31	-10,63	-81,28 dB
	1	24,17%	-88,72	-10,04	
	3	24,13%	-78,70	-10,31	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura mediana	3	50,73%	-80,29	-9,93	-83,72 dB
	3	25,13%	-81,70	-11,11	
	1	23,53%	-93,35	-8,32	
	20	0,53%	-92,94	-15,02	

Tabla 16. Resultado pruebas de cobertura Antena SR4L034-R con ranura mediana

d) Placa con ranura grande, de dimensiones 97 x 15 mm (Figura 85).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 17. En este caso, han sido peores de lo esperado para ser la ranura de mayor tamaño, ya que se había asumido que cuanto mayor sea la apertura en el metal, se obtendrían valores más altos de RSRP.

Antena SR4L034-R (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	1	98,10%	-89,32	-9,43	-89,37 dB
	3	1,43%	-92,05	-8,93	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	70,89%	-85,88	-10,46	-87,42 dB
	1	27,16%	-91,73	-8,62	
	3	1,77%	-87,02	-11,41	

Tabla 17. Resultado pruebas de cobertura Antena SR4L034-R con ranura grande

Como era de esperar, en la mecánica sin ranura los resultados obtenidos son los peores de todas las pruebas realizadas. Sin embargo, lo sorprendente es que los segundos peores resultados se han obtenido en la mecánica con la ranura no metálica grande, junto con los obtenidos en la ranura pequeña. Expresado de otra forma, los mejores valores de cobertura se han conseguido con la mecánica con la ranura mediana.

Para explicar este efecto, se tienen en cuenta las relaciones de λ calculadas en la Tabla 13 para todas las bandas de frecuencia implicadas.

Observando las dimensiones de las ranuras estudiadas, los 77 mm de la ranura mediana son equiparables a la relación de $\frac{\lambda}{2}$ de las bandas 1 ($\frac{\lambda}{2} = 71,4$ mm) y 3 ($\frac{\lambda}{2} = 83,3$ mm). Es por ello por lo que se produce un mayor acoplamiento entre la antena con su plano de masa y la ranura de estas dimensiones.



Figura 86. Placa de calle modelo SKYLINE de FERMAX con módulo grande de plástico

En segundo lugar, se ha probado a situar el circuito en L dentro de un módulo de plástico grande como el de la Figura 86, de dimensiones 105 x 94 mm, y que es igual al de la Figura 78. Este circuito se ha conectado al circuito base del Producto Conectado mediante cables externos, de tal modo que se encuentra alejado de dicha PCB y su influencia sobre la antena es menor.

La Tabla 18 recoge los valores de cobertura obtenidos en esta prueba. Al comparar los valores de RSRP y RSRQ con los obtenidos en las pruebas con la ranura mediana –que es la mejor de las tres ranuras probadas–, mostrados en la Tabla 16, es posible concluir que la anchura de la apertura en el metal también influye en la cobertura. Si se presta atención a los valores de RSRP promedio de ambas tablas, con esta configuración se han ganado, como mínimo, 5 dB de nivel de potencia en promedio.

Es por ello por lo que, cuanto mayor sea la superficie no metálica en la placa, mejores valores de cobertura se obtendrán, llegando a estar durante el 85% del tiempo que está conectada la antena en el rango *Excelente*, tanto en RSRP como en RSRQ.

Antenova SR4L034-R (SMD)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico grande	3	85,61%	-74,42	-7,98	-75,74 dB
	1	13,67%	-83,83	-9,93	
	1	0,65%	-84,54	-10,02	

Tabla 18. Resultado pruebas de cobertura con módulo grande de plástico

Tras analizar los resultados de estas pruebas se ha podido comprobar que, con este nuevo circuito módem 4G en L rediseño para el Producto Conectado, se han mejorado bastante los resultados – en particular los valores del parámetro RSRP– con respecto a los obtenidos en el diseño anterior, con forma rectangular.

De todas las configuraciones probadas, se han obtenido mejores valores de cobertura al situar el circuito módem 4G en L dentro del módulo grande de plástico. Como ya se ha comentado, esto es debido a que es la configuración con mayor superficie no metálica en el Producto Conectado. La segunda mejor solución consiste en incluir una ranura mediana de dimensiones 77 x 15 mm en el frontal de la placa.

En cuanto a las bandas de trabajo, las que proporcionan mejores valores en los parámetros de cobertura son la banda 20 y la banda 3, en la mayoría de los casos. Este funcionamiento está ligado a la ubicación donde se han llevado a cabo las pruebas y, en consecuencia, a las estaciones base a las que se ha podido conectar la antena.

La banda 20, de 800 MHz, es la banda a la que menos veces se conecta la antena a pesar de su buen funcionamiento en la mayoría de los casos. Prácticamente se conecta solo cuando se alimenta la placa, cuando se reinicia el módem o cuando la antena hace un escaneo para la re-selección de celda. El motivo puede ser que la compañía telefónica restrinja más estas bandas bajas de frecuencia.

Por todo esto, la solución más factible hasta el momento en cuanto a resultados es el circuito módem 4G en L, con la antena chip Antenova SR4L034-R de montaje SMD, ubicado dentro de un módulo de plástico grande de dimensiones 105 x 94 mm situado en el frontal de la placa.

A pesar de ello, esta configuración es la menos estética de todas las estudiadas. Por este motivo, la solución más factible teniendo en cuenta tanto los buenos resultados como el diseño estético es la ubicación dicho circuito en una placa con una ranura mediana en el frontal.

En el *Anexo II. Resultados de cobertura con circuito módem 4G en L* se adjuntan los datos recopilados durante las pruebas de este capítulo al completo.

4.2 Estudio realizado por el iTEAM

En estas segundas pruebas realizadas por el iTEAM, se probó el circuito módem 4G del Producto Conectado rediseñado en L (ver Figura 87), con la antena Antenova SR4L034-R. En ellas, se midió tanto el coeficiente de reflexión como el diagrama de radiación y la ganancia con los tres tamaños de apertura en el metal de la carcasa analizados en las pruebas de cobertura: pequeña (57 x 15 mm), mediana (77 x 15 mm) y grande (97 x 15 mm).



Figura 87. Producto Conectado con circuito en L para pruebas iTEAM [39]

Tal y como se puede comprobar en la Figura 88, se han escogido tres placas de tamaño y diseño lo más similar posible para estudiar de forma precisa el efecto que produce cada una de estas ranuras en el Producto Conectado.

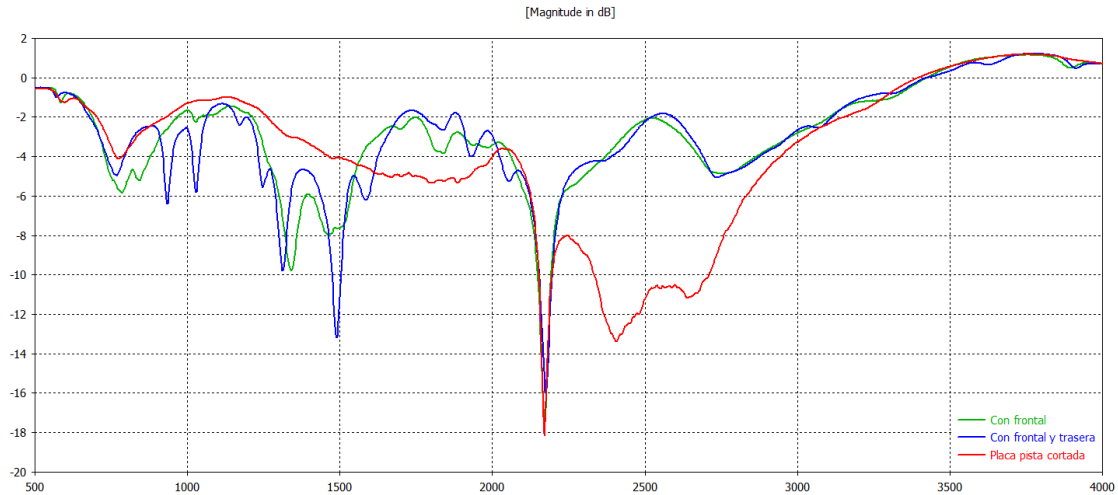


Figura 88. Ranuras pequeña, mediana y grande (de izq. a dcha.) para pruebas iTEAM [39]

En primer lugar, para obtener el coeficiente de reflexión o parámetro S_{11} en dB se han realizado 3 medidas por cada uno de los tres tamaños de ranura: una medida de la placa solo con la circuitería (gráfica de color rojo), una medida con la circuitería y la carcasa frontal (gráfica de color verde), y una medida con la circuitería, la carcasa frontal y la carcasa trasera (gráfica de color azul). Los resultados de estas medidas para cada uno de los tamaños se detallan a continuación [39]:

a) *Medida de la antena con circuitería, en carcasa con ranura grande.*

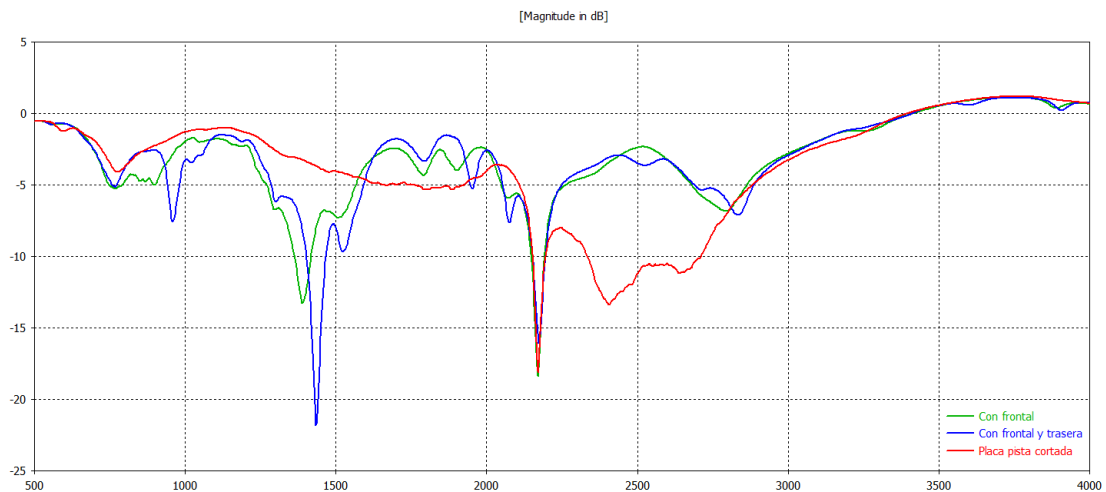
En esta prueba se ha medido el parámetro S_{11} en la placa solo con la circuitería, con la circuitería y la carcasa frontal con ranura grande, y con la circuitería, la carcasa frontal con ranura grande y la carcasa trasera, como ya se ha comentado. La gráfica resultada de estas tres mediciones está representada en la Figura 89.



Teniendo en cuenta la configuración más realista, es decir, la de la antena con circuitería y ambas carcasas (gráfica en azul), los valores del parámetro S_{11} en las bandas de funcionamiento de la antena oscilan entre -2 dB (en las frecuencias de 1800 MHz y 2600 MHz) y -5 dB (en las frecuencias de 800 MHz y 2100 MHz).

b) *Medida de la antena con circuitería, en carcasa con ranura mediana.*

Para esta prueba se han medido las tres configuraciones ya comentadas, pero con la apertura no metálica de tamaño mediano. En la gráfica de la Figura 90 se muestran los resultados obtenidos. Mirando la gráfica azul como en el caso anterior, los valores de S_{11} en las bandas de interés oscilan entre -2 dB (en la frecuencia de 1800 MHz) y -7 dB (en la frecuencia de 2100 MHz).



c) *Medida de la antena con circuitería, en carcasa con ranura pequeña.*

De igual modo, en esta prueba se han realizado las 3 medidas comentadas para la ranura de tamaño pequeño, y estas se representan en la gráfica de la Figura 91. Observando una vez más la gráfica más realista, los valores de S_{11} con esta ranura oscilan entre -2 dB (en la frecuencia de 900 MHz) y -5 dB (en la frecuencia de 2600 MHz).

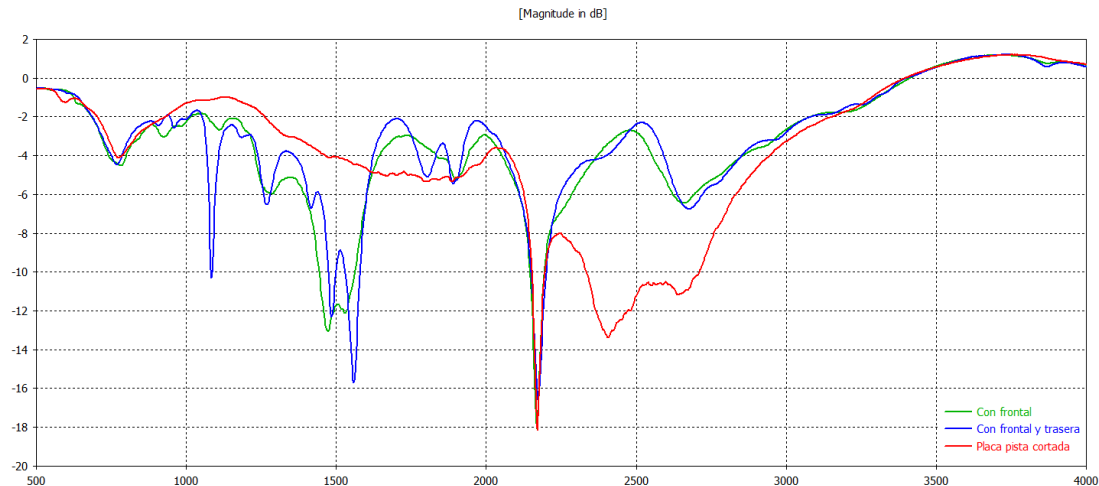


Figura 91. S_{11} medido en la antena con carcasa con ranura pequeña [39]

Tras analizar en detalle las gráficas de las tres ranuras, se puede observar que en la medida sin carcasa (color rojo) aparece un pico de resonancia de la antena en 2200 MHz. Sin embargo, al añadir las carcasa, además de este pico debido a la antena aparecen nuevas resonancias debidas a la carcasa (gráficas en color verde y azul). Estas nuevas resonancias varían en función del tamaño de ranura utilizado.

La ranura no metálica que mejores resultados proporciona en las bandas de interés es la mediana, ya que los valores del parámetro S_{11} conseguidos son los más bajos de las tres configuraciones. Esta conclusión coincide con la extraída en las pruebas de cobertura, donde los mejores valores de RSRP y RSRQ durante la mayor parte del tiempo se obtenían en la ranura mediana.

En la Figura 92 se comparan la gráfica de la ranura mediana analizada con la gráfica proporcionada por el fabricante de la antena. El límite para asegurar un buen funcionamiento por parte del fabricante es aproximadamente -5 dB (marcadores 3 y 8 de su gráfica) y, como ya se ha comentado antes en la placa analizada, los valores obtenidos en ella oscilan entre -2 dB y -7 dB según la frecuencia. Aunque los resultados podrían ser mucho mejores en cuanto a la adaptación, son suficientes para garantizar una calidad de servicio y cobertura mínimas durante la mayor parte del tiempo de funcionamiento de la antena.

Por otra parte, en esta comparación también se puede observar que el espectro sigue desplazado con respecto al del *datasheet*. Sin embargo, al comparar en la Figura 93 el espectro obtenido con la apertura de una ranura mediana, con el espectro obtenido con el Producto Conectado sin rediseñar y sin ninguna apertura en el metal, se puede comprobar que se ha mejorado en este aspecto. Es decir, gracias a los cambios realizados en el rediseño del producto, el espectro se asemeja más al del fabricante que antes.

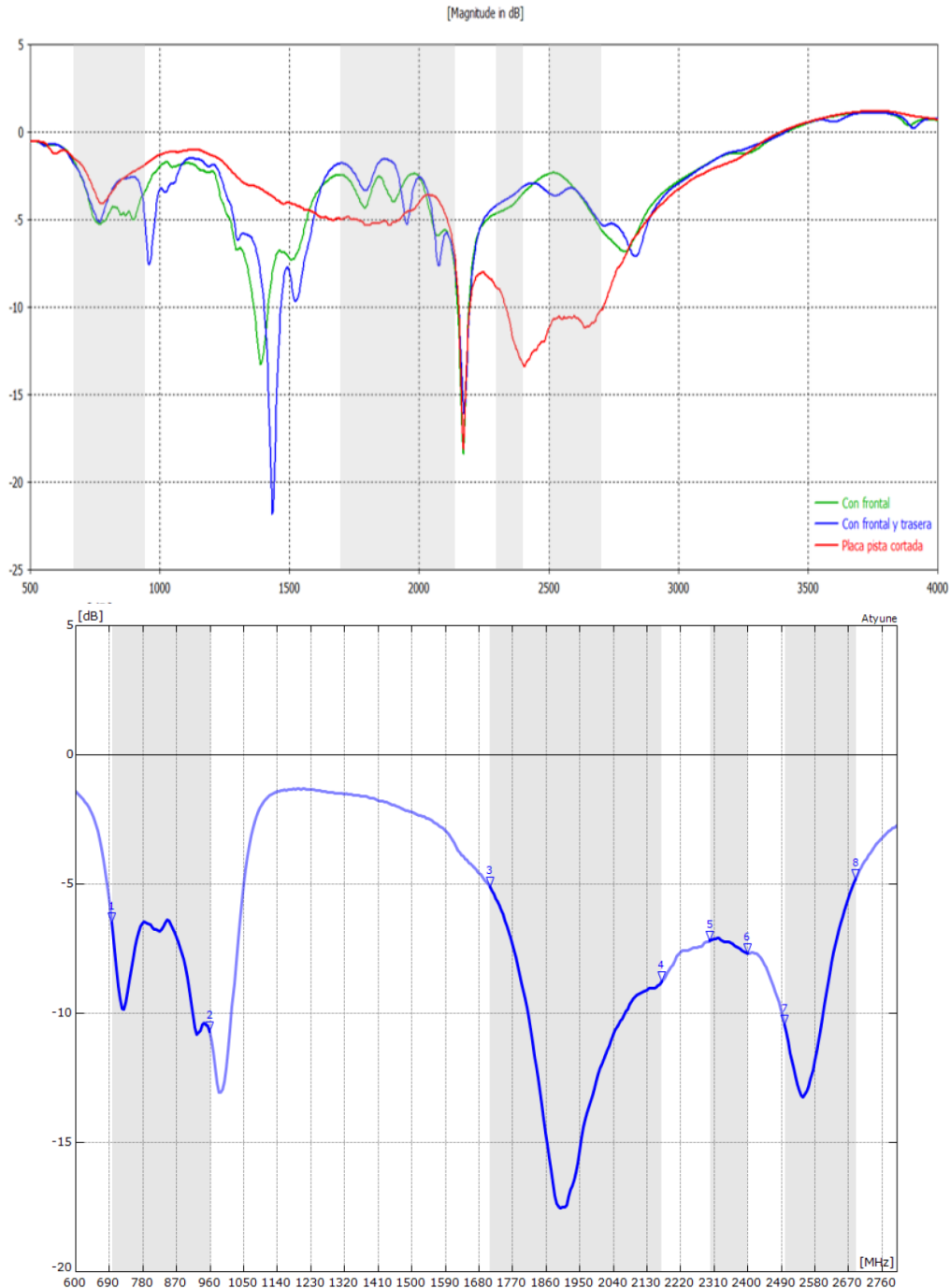


Figura 92. Comparación S_{11} de la ranura mediana (arriba) [39] y del datasheet (abajo) [36]

En concreto, si se observa la línea verde en ambas gráficas, que corresponde con las medidas de la antena con circuitería y con la carcasa frontal, es posible observar que la resonancia que anteriormente estaba en 3000 MHz aproximadamente, ahora se ha desplazado a 2200 MHz, acercándose más al valor proporcionado en la gráfica del fabricante, 1900 MHz.

También cabe destacar en esta figura que, observando en la gráfica de abajo la curva más realista (gráfica de color verde, con frontal), los valores máximos de S_{11} de cada banda sin ranura y con la versión rectangular del circuito módem 4G oscilan entre 0 dB y -3,5 dB en las frecuencias de interés.

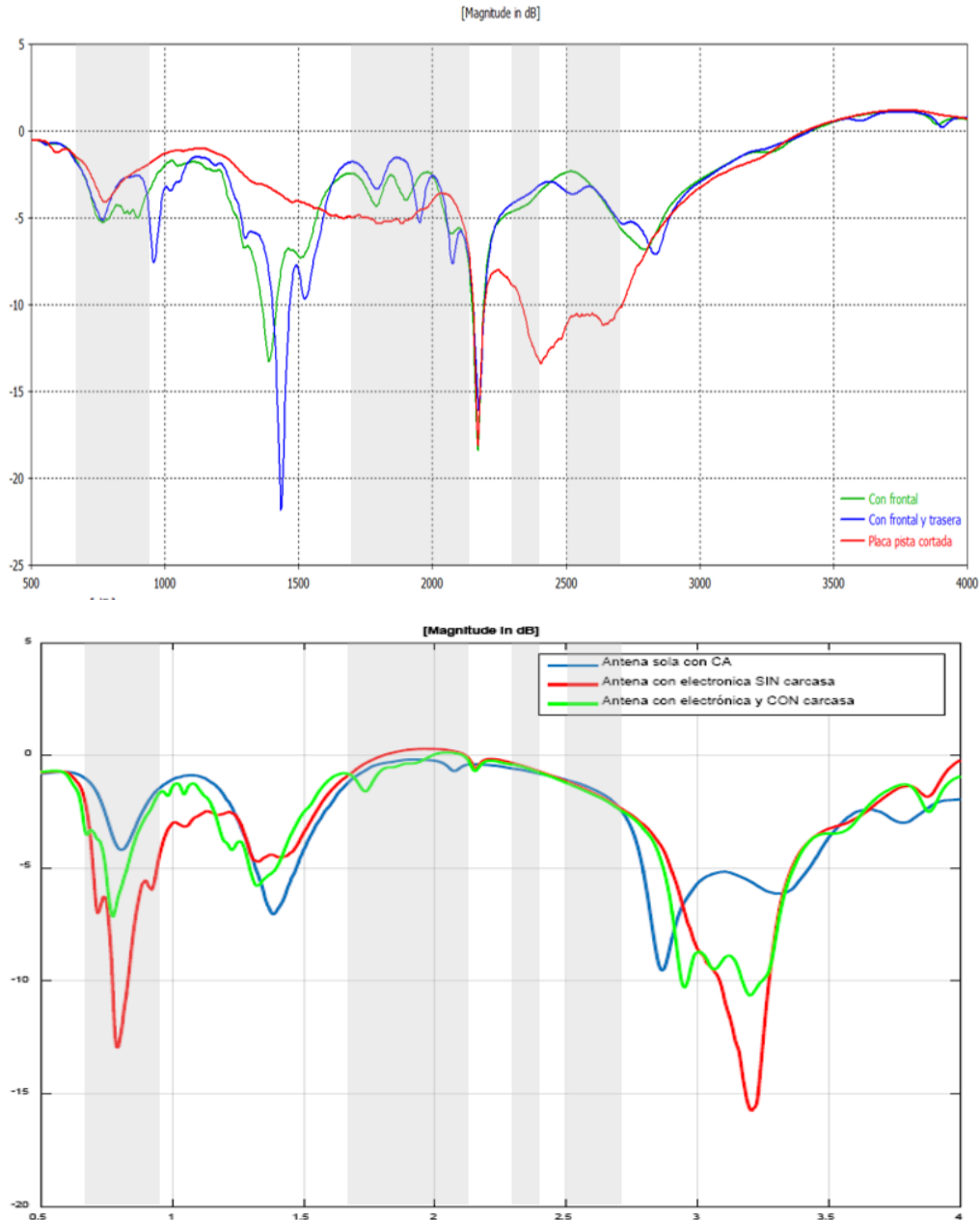


Figura 93. Comparación S_{11} de la ranura mediana (arriba) y sin ranura (abajo) [39]

Para analizar la adaptación en detalle, en la Tabla 19 se recogen los valores máximos y, por tanto, peores aproximados del parámetro S_{11} en decibelios, en las frecuencias de interés y en los tres casos estudiados más realistas: fabricante, producto inicial sin ranura y producto rediseñado con ranura de tamaño mediano.

	Bandas de frecuencia (MHz)				
	698 – 798	824 – 960	1710 – 2170	2300 – 2400	2500 – 2690
Fabricante	-6,0 dB	-6,6 dB	-5,1 dB	-7,0 dB	-4,9 dB
Sin ranura	-3,5 dB	-2,0 dB	0,0 dB	-0,5 dB	-1,0 dB
Ranura mediana	-2,0 dB	-3,0 dB	-2,0 dB	-3,5 dB	-3,5 dB

Tabla 19. Comparativa del parámetro S_{11} máximo

De esta comparativa se puede concluir que, al rediseñar el Producto Conectado, se ha mejorado la adaptación de la antena con respecto al diseño inicial, pero sin llegar a alcanzar los valores proporcionados en el *datasheet* del fabricante.

Sin embargo, tal y como se ha mencionado anteriormente, según el fabricante se necesitan al menos -5 dB de pérdidas de retorno para asegurar un buen funcionamiento de la antena, y este valor mínimo se cumple en algunas partes del espectro de las frecuencias de interés. Es por ello por lo que, aunque la adaptación no sea igual a la de la antena según el fabricante, es suficiente para garantizar una calidad de servicio y cobertura mínimas durante la mayor parte del tiempo de funcionamiento de la antena. Esto explica los buenos resultados obtenidos en las pruebas de cobertura para esta configuración en el apartado 4.1. *Pruebas de cobertura con Producto Conectado con circuito en L*.

En segundo lugar, el iTEAM ha realizado medidas del diagrama de radiación y de la ganancia con la antena con circuitería, por un lado, sin carcasa (ver Figura 94) y por otro con las carcasas trasera y frontal de ranura mediana (ver Figura 95) [38].

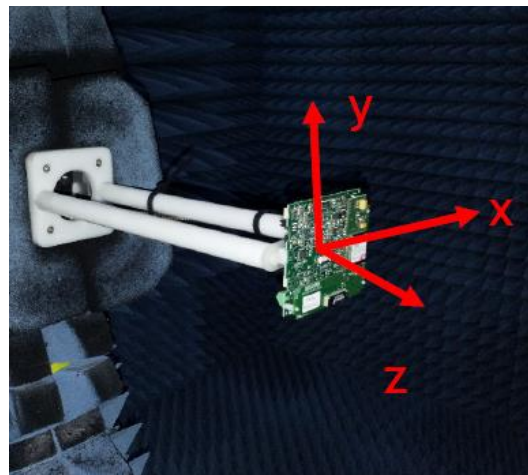


Figura 94. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, sin carcasa [38]

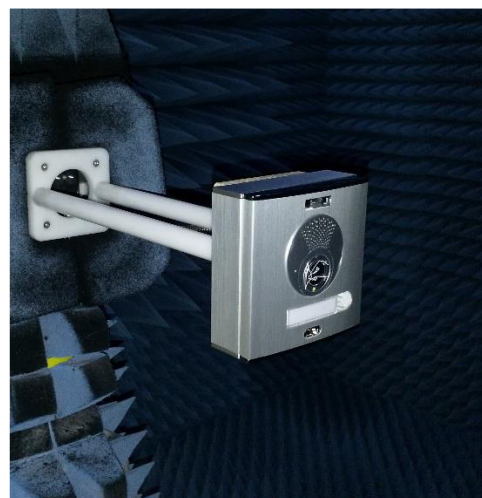


Figura 95. Medida de la antena con red de adaptación y con circuitería, con carcasa [38]

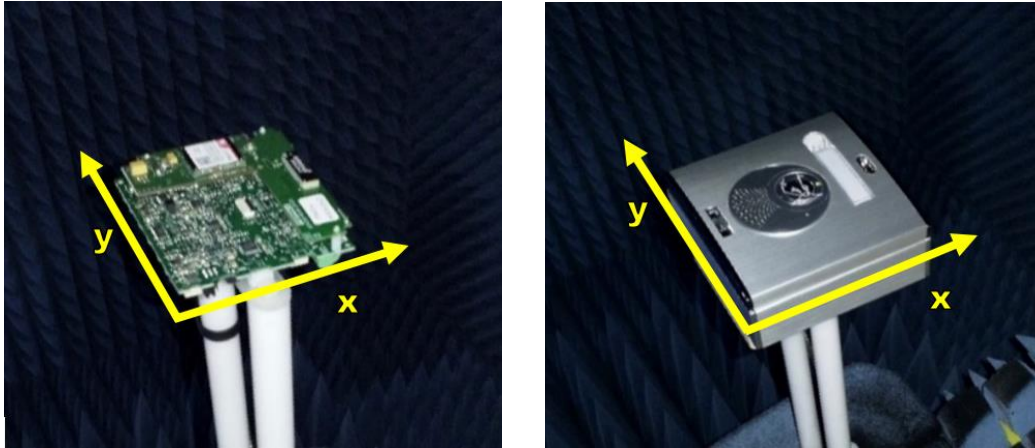


Figura 96. Ejes de referencia para diagrama de radiación 3D [38]

Los diagramas de radiación en 3D obtenidos para la frecuencia de 1800 MHz, con ambas configuraciones, están representados en la Figura 97. El recuadro discontinuo marca la posición de la antena, tal y como se puede ver en la Figura 96. Es decir, en el diagrama de la derecha, el frontal de la carcasa apuntaría hacia arriba.

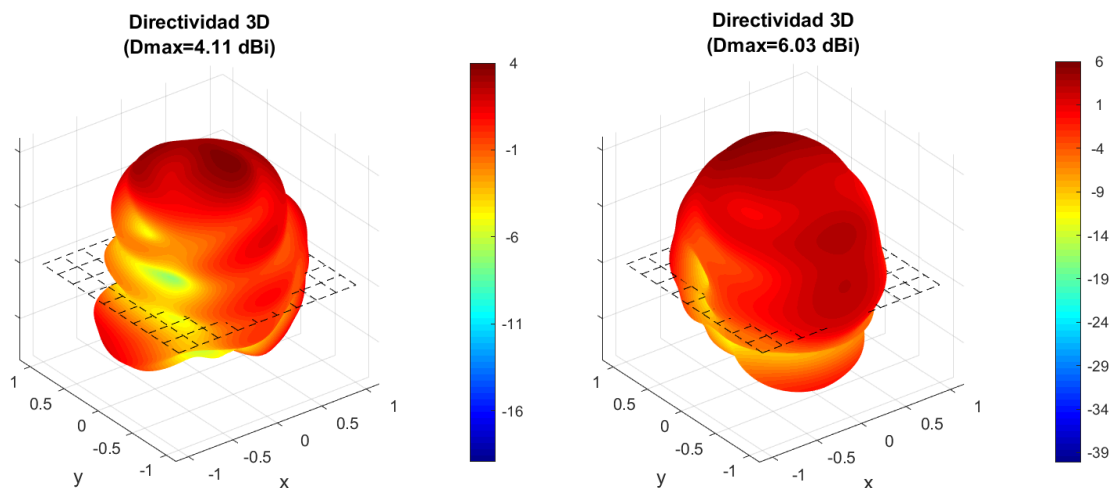


Figura 97. Diagrama de radiación 3D en 1800 MHz sin (izq.) y con carcasa (dcha.) [38]

La ganancia de la antena sin carcasa es 0,264 dB, lo que supone una eficiencia de radiación del 41,025%, mientras que la ganancia de la antena con carcasa es -3,002 dB, lo que se traduce en una eficiencia del 12,488%.

En el diagrama con carcasa y con ranura mdiana se puede ver que, ahora, la radiación es hacia delante, a diferencia de lo que ocurría con el producto inicial con la carcasa sin ranura. Sin embargo, la eficiencia de radiación es solo del 12,488%, lo cual significa que se está perdiendo aproximadamente un 88% de la potencia que podría radiar la antena.

Para comparar mejor ambas versiones del Producto Conectado, se representan en la Figura 98 los diagramas de radiación con carcasa de ambos productos: inicial sin ranura y con circuito módem 4G rectangular, y actual con ranura mediana y con circuito módem 4G en L, para la frecuencia de 1800 MHz.

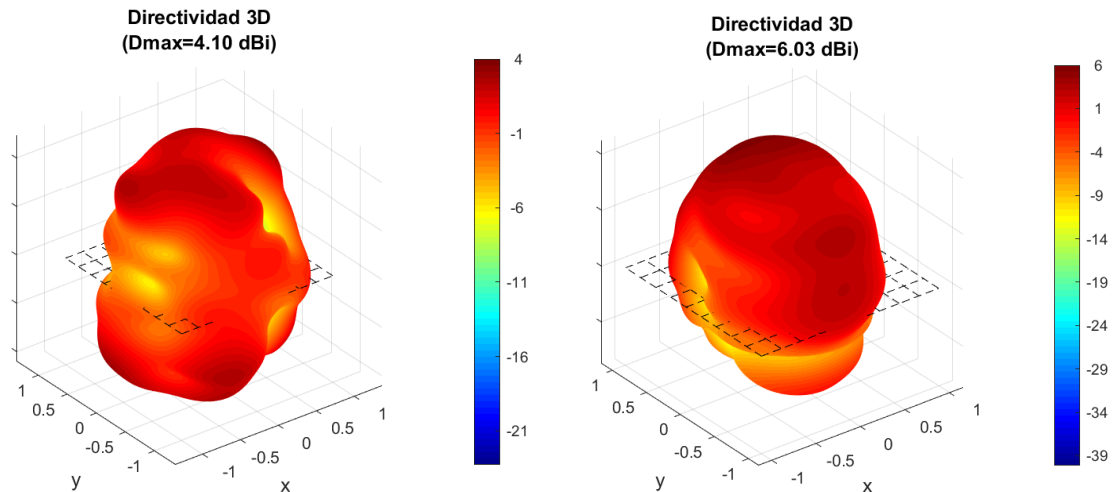


Figura 98. Diagrama de radiación 3D inicial (izq.) y actual (dcha.) a 1800 MHz [38]

Como ya se ha dicho, con el rediseño del Producto Conectado se ha conseguido que la radiación de la antena sea hacia delante, hacia la calle, en vez de hacia la pared. Además, se ha mejorado el valor de directividad máxima en 2 dB para la frecuencia analizada.

Después de estudiar los resultados de las pruebas realizadas por el iTEAM, y del mismo modo que se concluyó en las pruebas de cobertura, los próximos pasos para mejorar la adaptación, la radiación y la eficiencia de la antena son, por un lado, mejorar la adaptación de la antena y, por el otro, cambiar el diseño exterior de los frontales para incluir una apertura en el metal del tamaño adecuado y de la manera más estética posible.

Capítulo 5. Solución alternativa: Antena dipolo flexible

Una solución alternativa que tener en cuenta es la utilización de antenas flexibles adhesivas conectadas al circuito módem 4G del Producto Conectado.

Para probar la cobertura y el funcionamiento de estos dispositivos, se prueban antenas dipolo flexibles de distintos tamaños, fabricantes y diseños. Todas las antenas utilizadas se recogen en la Tabla 20, junto con las características principales de cada una de ellas.

Esta solución, por un lado, es fácil de implementar, ya que son antenas planas, de poco peso, y basta con pegarlas a una superficie de plástico y conectarlas al conector SMA hembra del circuito. Sin embargo, el emplazamiento en las placas de calle puede complicarse, ya que hay pocas superficies no metálicas y es necesario conectarlas en el momento de la instalación.

Antena	Frecuencias (MHz)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Funcionamiento
Molex 105263-0001 [40] (Figura 99)	824-960 1710-2690	106,7	13	0,1	Dipolo simétrico
Molex 212570-0150 [28] (Figura 100)	824-960 1710-2170	40,4	15,4	0,1	Dipolo asimétrico
Molex 209142-0180 [41] (Figura 101)	698-960 1710-2690 3300-3800	85	14,5	0,1	Dipolo asimétrico
Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100 [42] (Figura 102)	698-803 791-960 1710-2200 2300-2400 2496-2690 3300-3800 1553-1609 2400-2485	64	17	0,2	Dipolo asimétrico
Antenova SRFC015-150 [43] (Figura 103)	824-960 1710-1990 2110-2170 2300-2400 2500-2690	80	20	0,15	Dipolo asimétrico
RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL [44] (Figura 104)	700-960 1800-2700	80	21	0,3	Dipolo simétrico
RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL [45] (Figura 105)	700-960 1800-2700	40	15	0,3	Dipolo asimétrico

Tabla 20. Antenas flexibles adhesivas seleccionadas



Figura 99. Antena Molex 105263-0001



Figura 100. Antena Molex 212570-0150



Figura 101. Antena Molex 209142-0180



Figura 102. Antena Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100

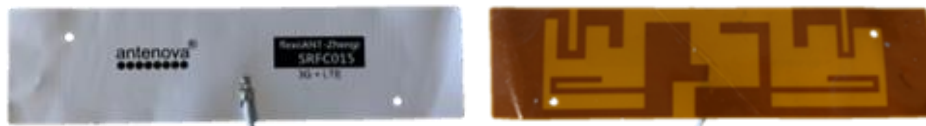


Figura 103. Antena Antenova SRFC015-150



Figura 104. Antena RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL



Figura 105. Antena RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL

5.1 Pruebas de cobertura con antenas dipolo flexibles

Las dos alternativas planteadas para realizar pruebas con las antenas de tipo dipolo flexibles son, en primer lugar, pegarla en una ranura no metálica grande de dimensiones 97 x 15 mm y, en segundo lugar, pegarla a un módulo de plástico pequeño, cuyas dimensiones son 105 x 47 mm. Para ello, están conectadas al circuito módem 4G rectangular.

Si finalmente se optara por esta solución, habría que alterar el diseño estético de la placa para integrar una apertura o ranura de plástico del tamaño adecuado sin que quede antiestético.

Por tanto, las pruebas realizadas con este tipo de antenas consisten en medir, con todas las antenas indicadas en la Tabla 20, los parámetros medios de potencia (RSRP) y calidad (RSRQ) de señal simultáneamente en dos antenas del mismo modelo; una de ellas situada en la ranura grande de 97 x 15 mm como en la Figura 106, y la otra en un módulo de plástico pequeño de 105 x 47 mm, tal y como se muestra en la Figura 107. Para poder pegar las antenas en la ranura, se ha incluido en la mecánica una pieza de plástico que la cubre por completo. Además, cabe destacar que las mecánicas utilizadas tienen diferente tamaño.

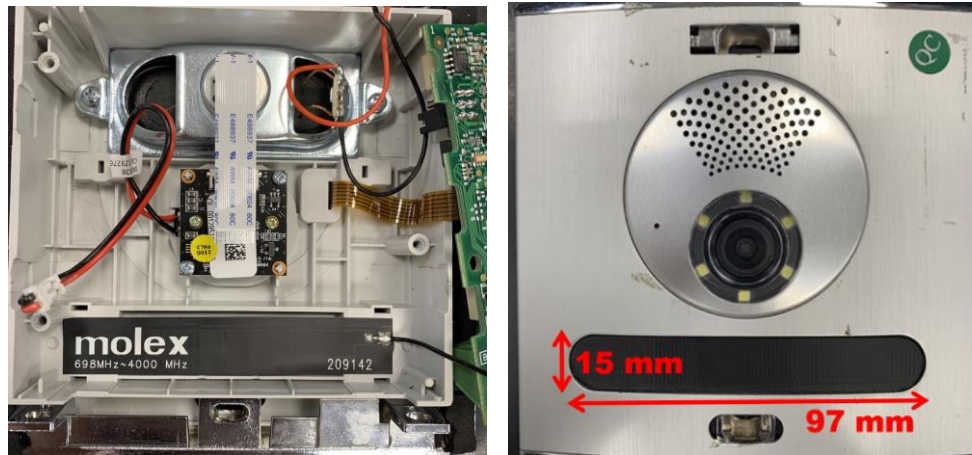


Figura 106. Antena flexible pegada en la ranura no metálica grande

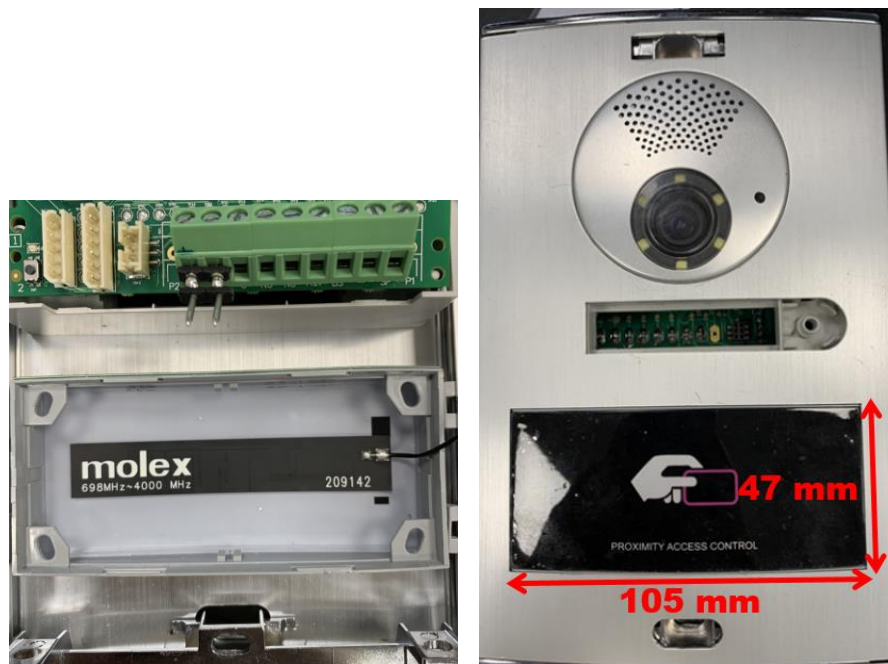


Figura 107. Antena flexible pegada en el módulo de plástico pequeño

a) Antena Molex 105263-0001 (106,7 x 13 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 21. Los parámetros en general no alcanzan los resultados esperados, especialmente en la ranura grande, ya que la antena es demasiado larga y no se ajusta bien ni en esta ranura ni en el módulo de plástico.

Molex 105263-0001 (106,7 x 13 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	97,48%	-81,42	-10,25	-81,73 dB
	3	1,44%	-98,81	-11,93	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	57,16%	-75,28	-10,57	-77,58 dB
	1	35,04%	-81,95	-7,31	
	3	7,52%	-75,93	-11,45	

Tabla 21. Resultados de cobertura con Molex 105263-0001

b) Antena Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 22. Al tratarse de una antena bastante pequeña, los valores obtenidos de ambos parámetros son muy buenos en ambas posiciones, dentro de los rangos *Excelente* – *Bueno*. Esto es debido a que la superficie sin aluminio en ambas aperturas del metal es mayor.

Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	79,50%	-79,14	-10,98	-80,52 dB
	1	17,03%	-86,79	-8,49	
	3	2,84%	-80,20	-11,42	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	55,03%	-72,02	-9,50	-72,15 dB
	1	44,97%	-72,32	-7,44	

Tabla 22. Resultados de cobertura con Molex 212570-0150

c) Antena Molex 209142-0180 (85 x 14,5 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 23. Nuevamente, es una antena bastante grande, lo que significa que los resultados son regulares, similares a los de la primera antena Molex comentada.

Molex 209142-0180 (85 x 14,5 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	70,50%	-85,27	-10,80	-88,80 dB
	1	14,87%	-96,86	-8,99	
	1	12,95%	-98,99	-11,22	
	3	1,68%	-87,04	-11,19	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	70,26%	-70,43	-9,93	-73,50 dB
	1	29,50%	-80,80	-7,81	

Tabla 23. Resultados de cobertura con Molex 209142-0180

d) Antena Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100 (64 x 17 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 24. Esta antena es de tamaño mediano, por lo que es una solución intermedia para el módulo de plástico, pero que funciona especialmente mal en la ranura grande.

Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100 (64 x 17 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	1	77,53%	-96,15	-8,93	-91,32 dB
	3	22,47%	-74,64	-9,94	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	51,60%	-74,79	-9,27	-76,06 dB
	1	45,95%	-76,61	-7,11	
	20	2,46%	-91,99	-10,01	

Tabla 24. Resultados de cobertura con Linx Technologies ANT-LPC-FPC-100

e) Antena Antenova SRFC015-150 (80 x 20 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 25. Esta antena también presenta un tamaño mediano, así que también es una solución intermedia para ambas posiciones, aunque sus resultados son bastante mejores que los de las otras antenas de tamaño parecido.

Antenova SRFC015-150 (80 x 20 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	94,10%	-81,96	-10,05	-82,62 dB
	1	5,90%	-93,08	-9,61	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	68,94%	-68,91	-9,21	-70,81 dB
	1	30,72%	-75,06	-7,59	

Tabla 25. Resultados de cobertura con Antenova SRFC015-150

f) Antena RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL (80 x 21 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 26. Al igual que las dos últimas antenas comentadas, es de tamaño mediano, y los resultados obtenidos son similares a los de estas.

RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL (80 x 21 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	62,79%	-84,32	-10,70	-89,83 dB
	1	34,22%	-97,49	-9,28	
	20	2,16%	-89,19	-11,84	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	1	60,15%	-77,82	-7,15	-76,06 dB
	3	38,32%	-73,00	-9,41	
	20	1,52%	-84,12	-10,95	

Tabla 26. Resultados de cobertura con RF Solutions ANT-GFPCB2180-UFL

g) Antena RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL (40 x 15 mm).

Los resultados de RSRP y RSRQ medios obtenidos se recogen en la Tabla 27. Es la antena de menor tamaño, por lo que su funcionamiento ha sido bueno en ambas posiciones, pero siempre mejor en el módulo de plástico. Tiene un comportamiento similar a la antena Molex 212570-0150 de sus mismas dimensiones.

RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL (40 x 15 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	65,65%	-87,23	-10,22	-86,67 dB
	1	26,52%	-85,47	-8,80	
	1	4,35%	-86,51	-10,48	
	3	1,96%	-87,56	-11,21	
	20	1,52%	-82,57	-9,37	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	54,66%	-74,09	-10,19	-74,62 dB
	3	41,87%	-75,48	-11,63	
	1	3,47%	-72,54	-7,14	

Tabla 27. Resultados de cobertura con RF Solutions ANT-GFPCB1540-UFL

Tras analizar los resultados de todas las pruebas, se han extraído una serie de conclusiones generales. En primer lugar, respecto a las bandas de trabajo, se puede concluir que la banda 3 proporciona mejores valores de RSRP (potencia), y la banda 1 proporciona mejores valores de RSRQ (calidad). La banda 20, sin embargo, funciona más o menos igual en ambos parámetros. Por lo general, en los casos en los que se obtienen valores *Excelentes* de RSRP y RSRQ, la antena cambia menos veces de banda de trabajo.

En segundo lugar, en lo relativo a la comparación entre ambas posiciones, cuanto mayor es la apertura –como es el caso del módulo de plástico pequeño –, se obtienen mejores valores de RSRP y RSRQ. Esto se debe a que, como ya se ha ido comentando a lo largo de todas las pruebas, el metal interfiere menos con la antena.

Por otro lado, cuanto más pequeña es la antena, se tiene más espacio sin aluminio, por lo que también proporciona mejores valores de RSRP y RSRQ tanto en el módulo de plástico pequeño como en la ranura no metálica grande. En cuanto a las antenas de mayor tamaño, por lo general funcionan bien en el módulo de plástico, pero bastante peor en la ranura no metálica.

Como conclusión final, se ha obtenido una gran mejora con respecto a los resultados del Producto Conectado con el circuito módem 4G rectangular y con la antena chip, tanto en la configuración con ranura (Tabla 9) como en el módulo de plástico pequeño (Tabla 10).

Las antenas que han proporcionado mejor cobertura son Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm) y Antenova SRFC015-150 (80 x 20 mm). Se ha escogido la primera de ellas para continuar haciendo pruebas, debido a su menor tamaño.

En el *Anexo III. Resultados de cobertura con antenas flexibles* se adjuntan los datos recopilados durante las pruebas de este apartado al completo.

5.2 Antena flexible Molex 212570-0150

La Molex 212570-0150 es una antena flexible de bajo perfil, con alimentación por un lado a través de un cable coaxial de 150 mm, y que cuenta con un adhesivo de doble cara para facilitar su montaje. En la Figura 108 se observan las diferentes capas que conforman la antena. El sustrato dieléctrico que utiliza es la poliimida (PI), y como material conductor emplea el cobre (Cu).

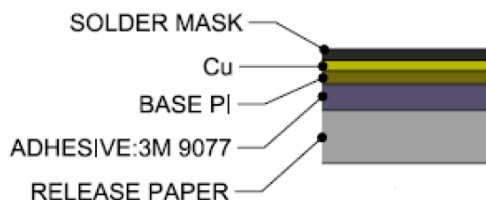


Figura 108. Capas de la antena Molex 212570-0150 [28]

En concreto, tal y como se puede observar en la Figura 100, se trata de un dipolo de muy pequeño tamaño diseñado para aplicaciones en las bandas de 824 – 960 MHz y 1710 – 2170 MHz, en el que cada uno de los dos brazos radia en una de estas dos bandas. En la Tabla 28 se detallan las especificaciones técnicas más importantes de esta antena [28].

Nombre del producto	824~2170MHz Flexible Antenna Side-Fed
Número de pieza	212570-0150
Frecuencia	824 – 960 MHz 1710 – 2170 MHz
Polarización	Lineal
Temperatura de operación	-40°C hasta 85°C
Potencia RF	2 W
Impedancia con adaptación	50 Ω
Peso	0,899 g
Tipo de antena	Flexible
Dimensiones	40,4 x 15,4 x 0,1 mm
Longitud del cable	150 mm
Diámetro del cable	1,13 mm
Tipo de conector	Compatible con UFL/MHF-I

Tabla 28. Especificaciones Molex 212570-0150

Por otro lado, en la Tabla 29 se recogen las características de radiofrecuencia en cada banda de trabajo de la antena [28]. A partir de esta tabla, es posible deducir que la mejor banda de trabajo es la banda de 1710 – 2170 MHz, ya que la eficiencia y la ganancia máxima son mayores.

	Bandas de frecuencia (MHz)	
	824 – 960	1710 – 2170
Pico de ganancia (máxima)	-0,45 dBi	1,76 dBi
Eficiencia media total	> 30%	> 60%
RL máximas	< -5 dB	< -5 dB

Tabla 29. Características de radiofrecuencia Molex 212570-0150

Para caracterizar la antena y su rendimiento, se ha pegado la antena en un bloque de material PC/ABS de 2 mm de grosor y se han utilizado un VNA o Analizador de Redes Vectorial (Figura 109) y una cámara OTA (*Over-The-Air*) (Figura 110). Se han tomado como ejes de referencia los ejes X, Y y Z representados en la Figura 111.

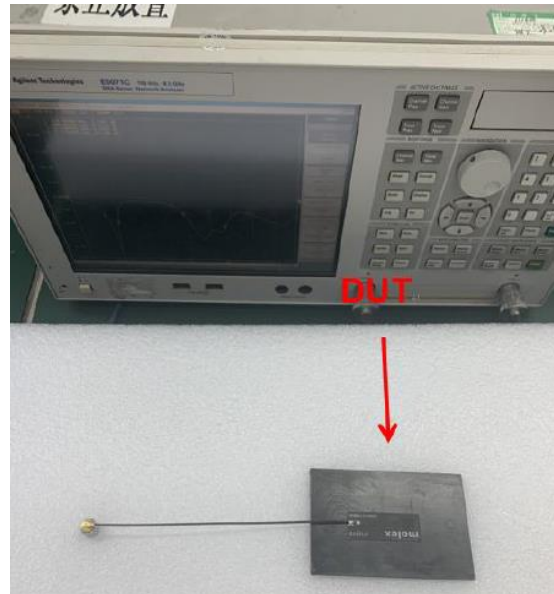


Figura 109. Antena cargada y VNA [28]

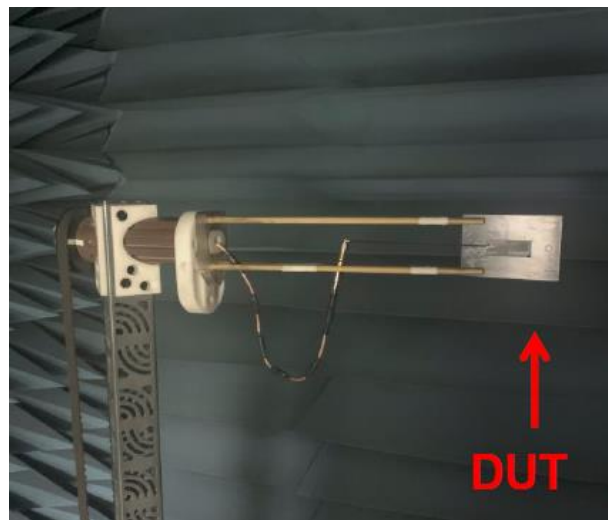


Figura 110. Antena cargada en cámara OTA [28]

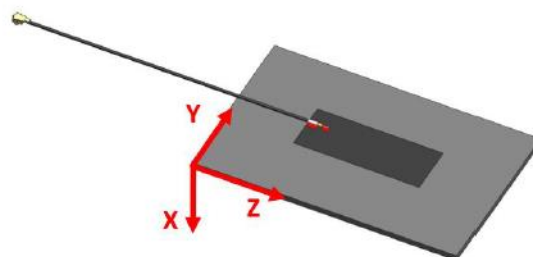


Figura 111. Orientación de referencia para la evaluación [28]

En la Figura 112 y la Figura 113 están representadas las pérdidas de retorno de la antena en espacio libre para las frecuencias de 824 – 960 MHz y 1710 – 2170 MHz, respectivamente. En ellas se puede comprobar que las pérdidas de retorno máximas en esas bandas son de -5 dB, tal y como se indica en la Tabla 29.

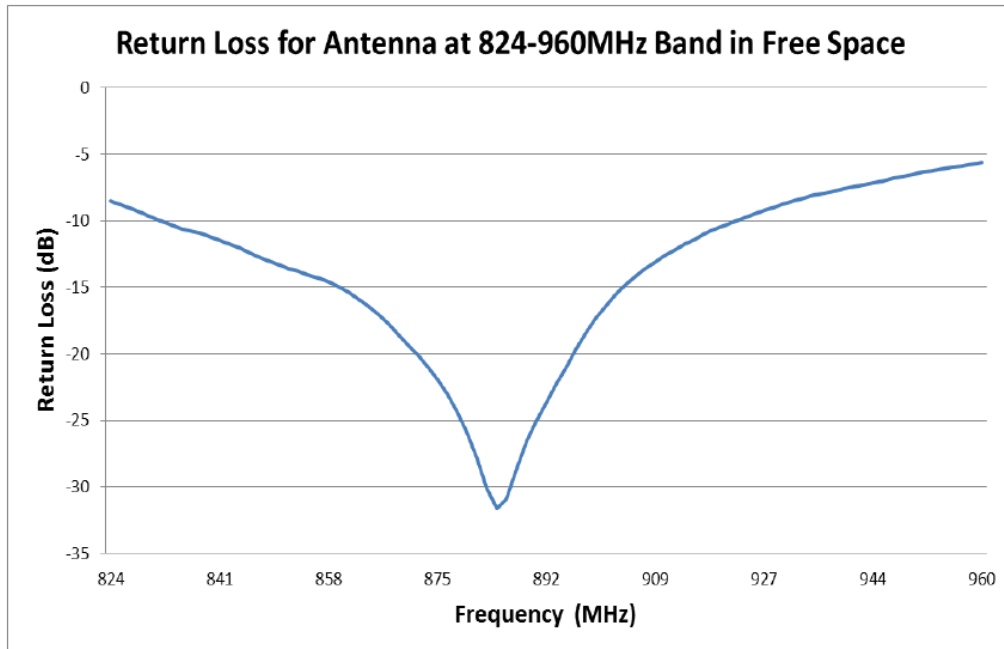


Figura 112. Pérdidas de retorno Molex 212570-0150 en 824-960 MHz [28]

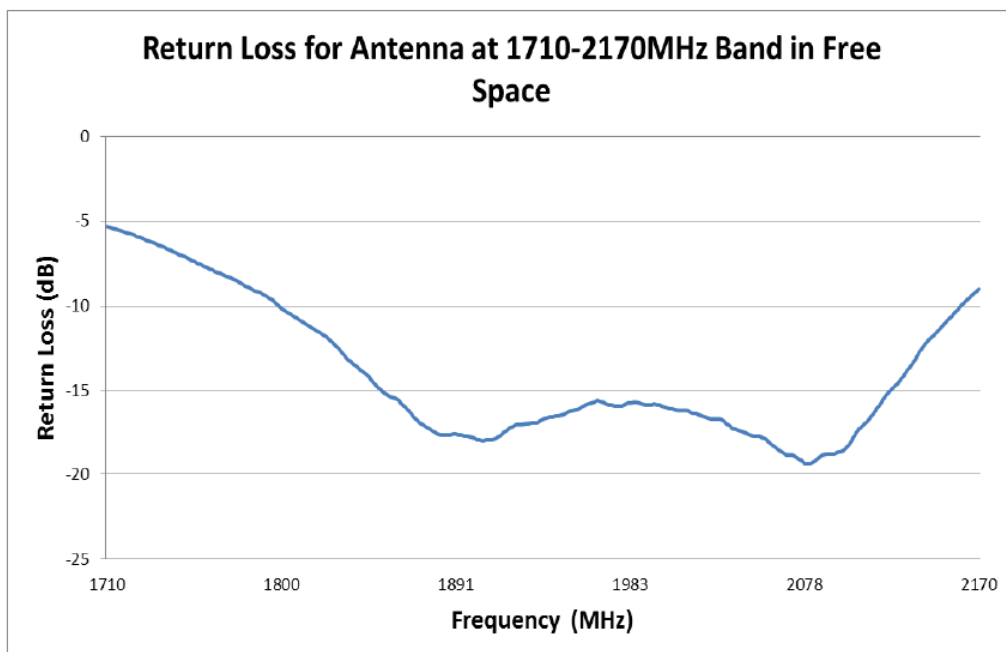


Figura 113. Pérdidas de retorno Molex 212570-0150 en 1710-2170 MHz [28]

Del mismo modo, en las gráficas de la Figura 114 y la Figura 115 se representa la eficiencia de la antena en espacio libre, para las mismas bandas, donde también se corroboran las eficiencias especificadas en la Tabla 29.

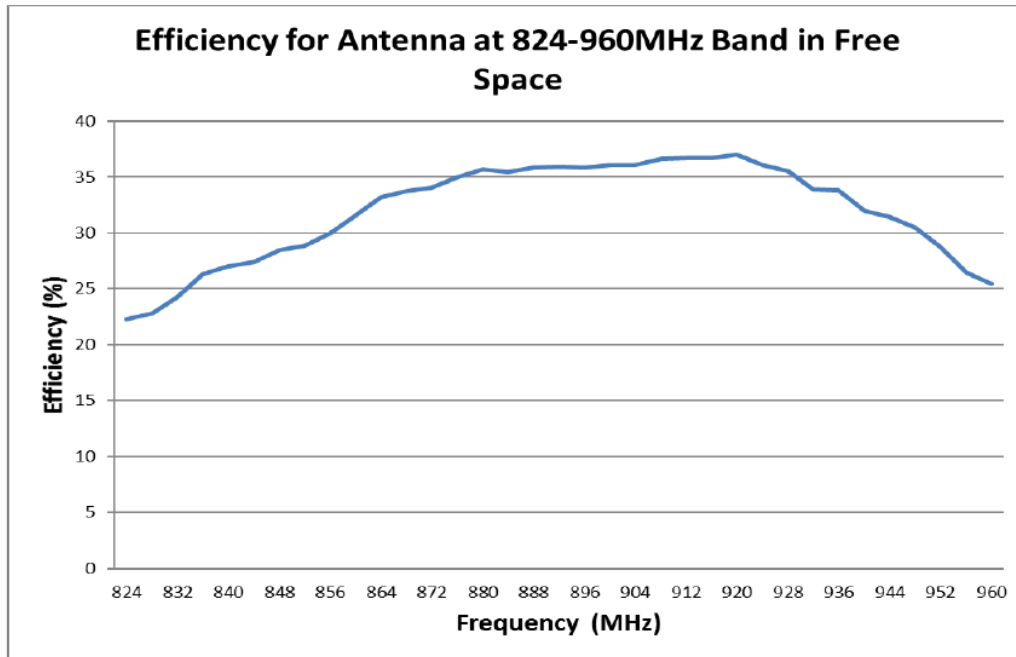


Figura 114. Eficiencia Molex 212570-0150 en 824-960 MHz [28]

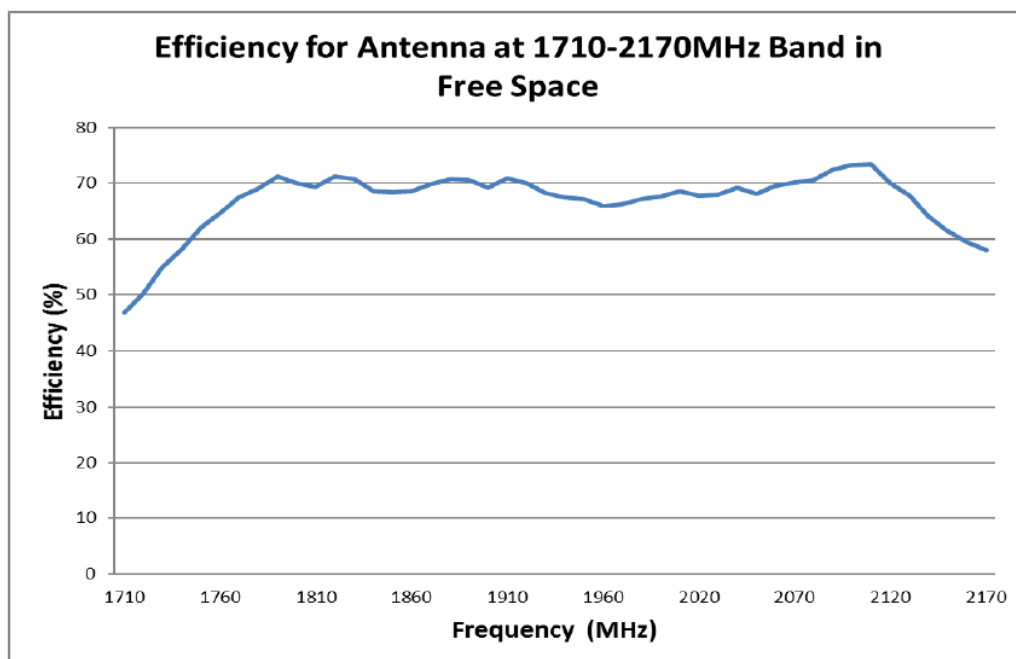


Figura 115. Eficiencia Molex 212570-0150 en 1710-2170 MHz [28]

En cuanto a los parámetros de radiación, el fabricante proporciona los siguientes diagramas en 2D y 3D para cada frecuencia de interés:

- 824 MHz (Figura 116).
- 960 MHz (Figura 117).
- 1710 MHz (Figura 118).
- 2170 MHz (Figura 119).

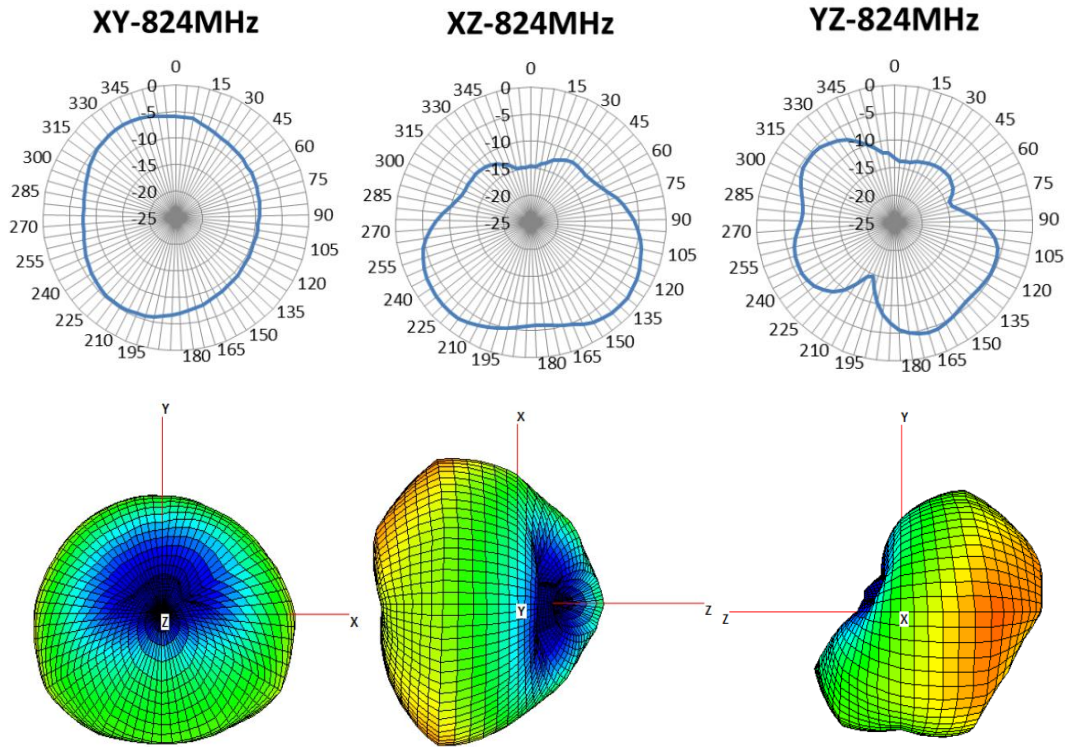


Figura 116. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 824 MHz [28]

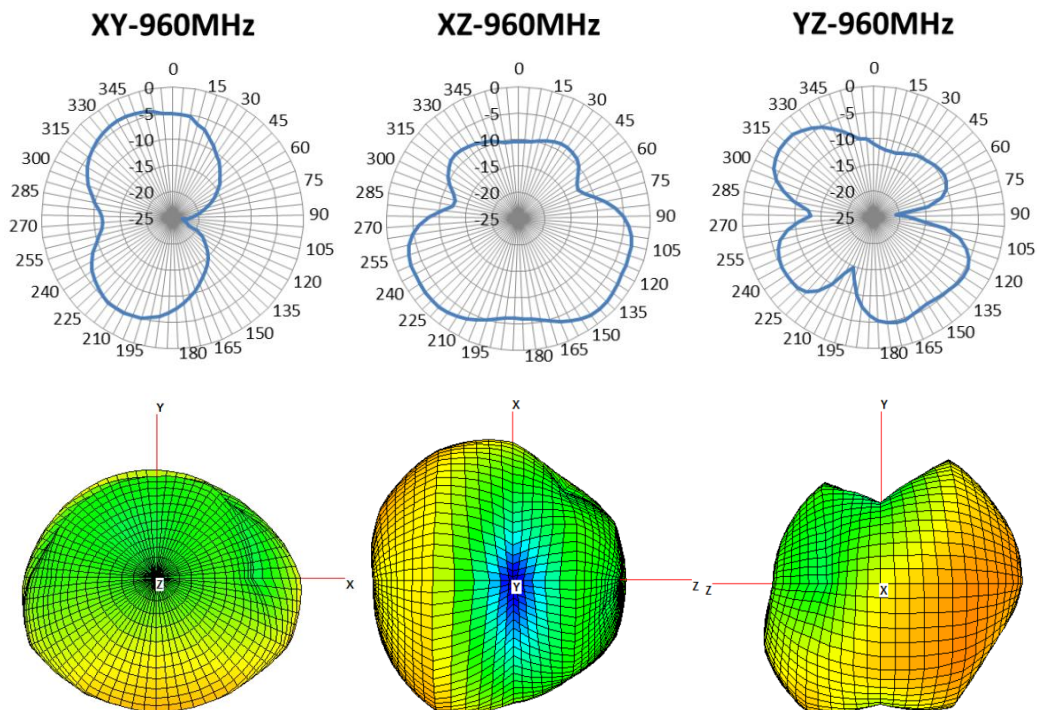


Figura 117. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 960 MHz [28]

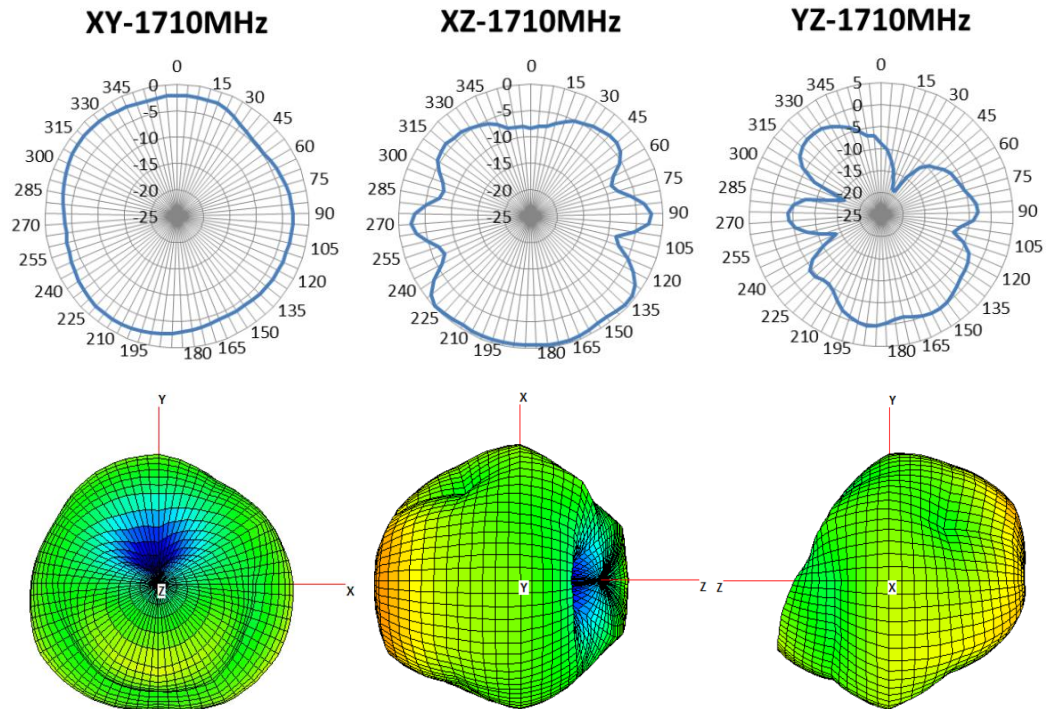


Figura 118. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 1710 MHz [28]

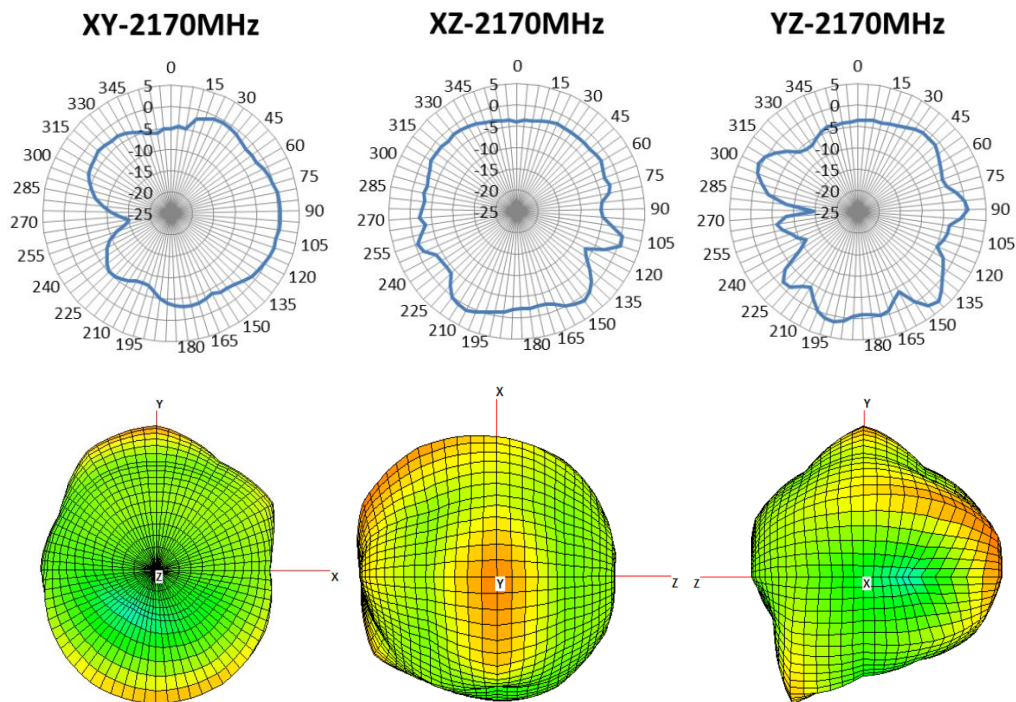


Figura 119. Diagrama de radiación 2D (arriba) y 3D (abajo) en 2170 MHz [28]

La longitud del cable coaxial soldado a la antena tiene cierta influencia sobre el rendimiento de esta. Para estudiarlo, el fabricante ha analizado 6 longitudes distintas del cable: 50 mm, 100 mm, 200 mm, 250 mm y 300 mm, y ha representado las pérdidas de retorno (Figura 120 y Figura 121) y la eficiencia (Figura 122 y Figura 123) para las dos bandas de trabajo.

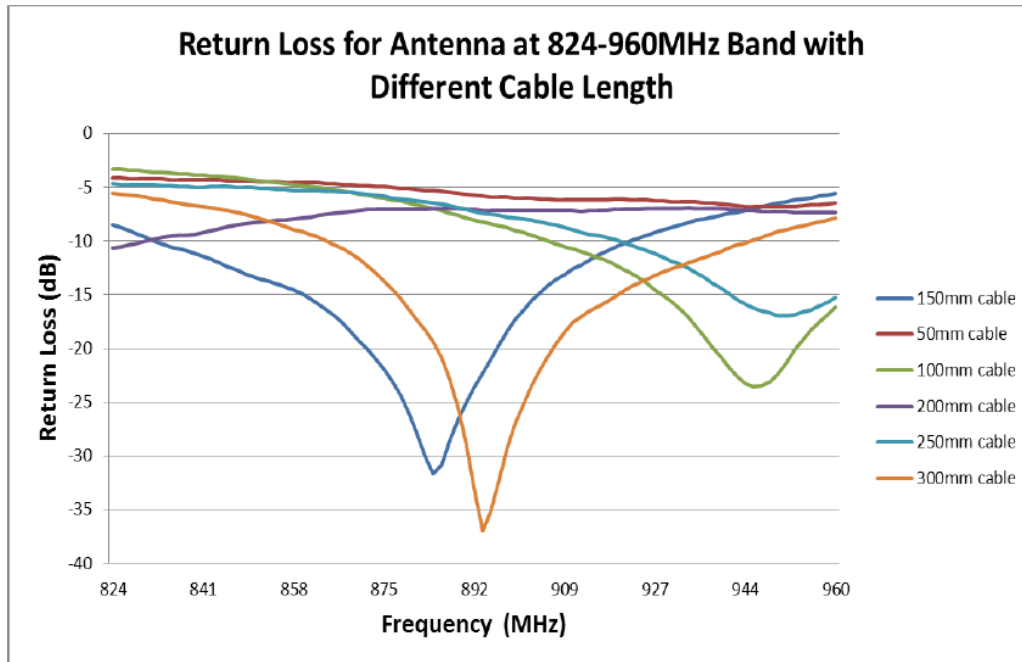


Figura 120. Pérdidas de retorno a 824-960 MHz con diferentes longitudes de cable [28]

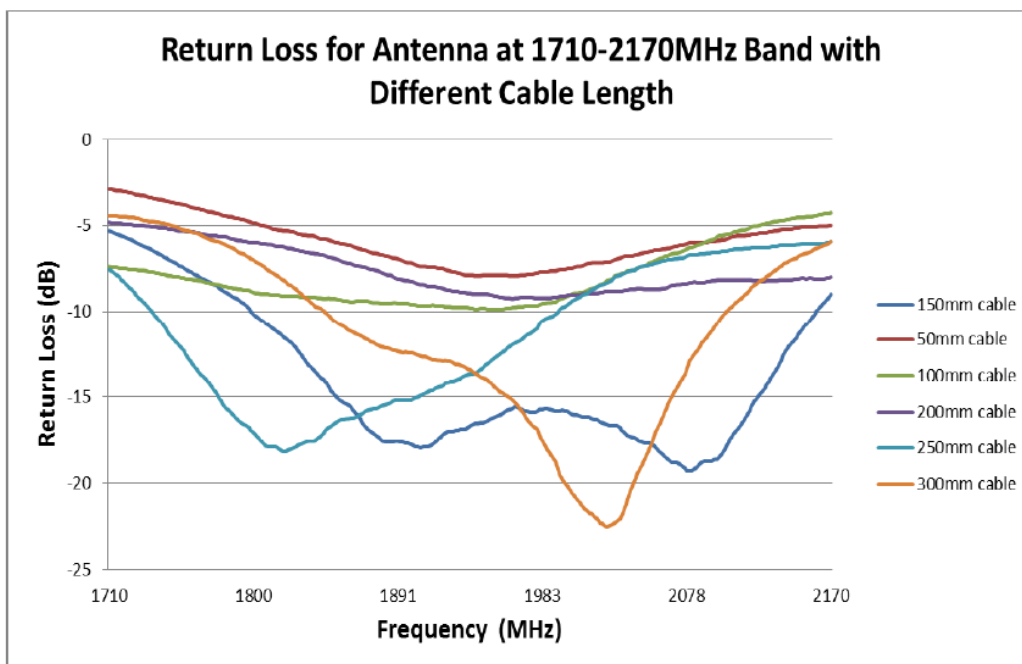


Figura 121. Pérdidas de retorno a 1710-2170 MHz con diferentes longitudes de cable [28]

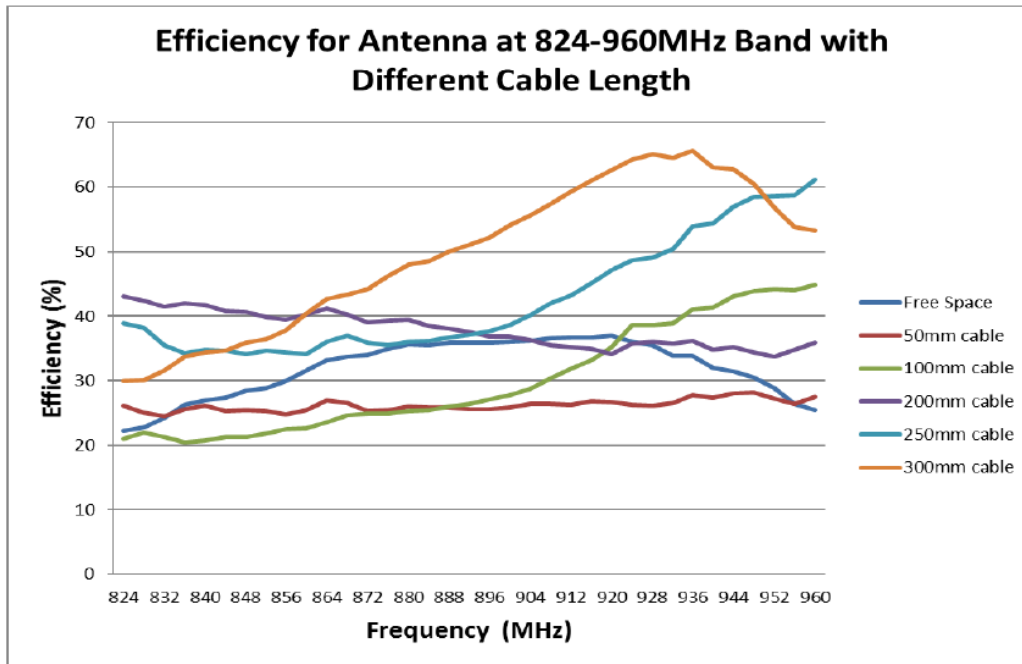


Figura 122. Eficiencia a 824-960 MHz con diferentes longitudes de cable [28]

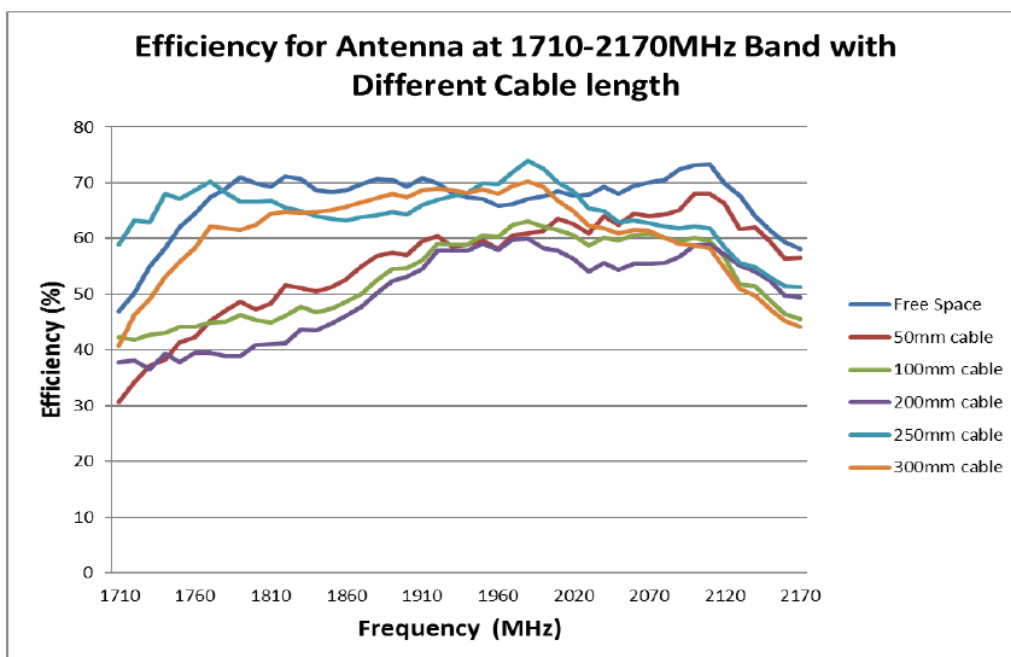


Figura 123. Eficiencia a 1710-2170 MHz con diferentes longitudes de cable [28]

Para asegurar un buen funcionamiento de la antena, la longitud del cable debería ser mayor a 100 mm. Cuando la longitud es inferior, la frecuencia de resonancia se desplaza y la eficiencia de la antena disminuye, especialmente en la banda de 824 – 960 MHz.

Es importante destacar que, al montar la antena en el dispositivo, el cable debe separarse al menos 5 mm del borde de la antena para alcanzar el mejor rendimiento posible, tal y como se muestra en la Figura 124; si el cable se junta con la antena, su rendimiento se verá perjudicado.

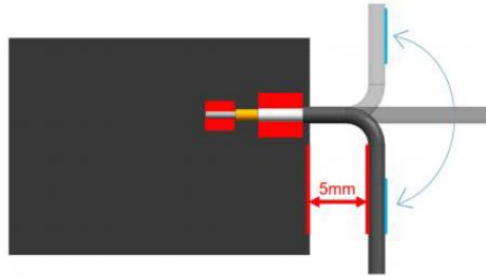


Figura 124. Separación del cable coaxial [28]

También es necesario considerar las distancias con otros planos de masa, ya que estos tienen algo de influencia en el rendimiento de las bandas bajas de frecuencia. El fabricante sugiere una distancia mínima de 15 mm entre la antena y el plano de masa perpendicular o paralelo a ella.

5.3 Pruebas de cobertura con antena Molex 212570-0150

Tras seleccionar la antena Molex 212570-0150 en base a sus buenos resultados de cobertura y a su reducido tamaño, se han llevado a cabo una serie de pruebas para estudiar cuál es la mejor configuración para esta.

En estas pruebas, se ha situado la antena flexible en todos los tamaños de apertura no metálica disponibles: ranura pequeña (57 x 15 mm), ranura mediana (77 x 15 mm), ranura grande (97 x 15 mm), módulo de plástico pequeño, de dimensiones 105 x 47 mm, y módulo grande de plástico, de dimensiones 105 x 94 mm (Figura 125 y Figura 126).



Figura 125. Placas con ranura pequeña, mediana y grande (de izquierda a derecha)



Figura 126. Molex 212570 en módulo de plástico pequeño (izquierda) y grande (derecha)

Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm)					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura pequeña	3	69,87%	-89,78	-9,88	-90,47 dB
	1	24,93%	-93,44	-8,04	
	20	3,15%	-81,53	-8,65	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura mediana	3	74,33%	-82,31	-9,35	-82,63 dB
	3	20,70%	-82,66	-10,66	
	1	4,69%	-91,91	-10,01	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Ranura grande	3	57,05%	-85,73	-9,70	-88,51 dB
	1	40,55%	-92,55	-8,83	
	3	1,81%	-86,21	-12,10	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico pequeño	3	85,14%	-73,75	-7,42	-74,75 dB
	1	13,86%	-81,52	-8,31	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Módulo de plástico grande	3	97,60%	-70,93	-7,72	-71,01 dB
	1	-1,99%	-81,43	-8,97	

Tabla 30. Resultado pruebas de cobertura con Molex 212570-0150



Los valores de los parámetros de cobertura recogidos en estas pruebas se encuentran en la Tabla 30. De igual modo que se ha ido concluyendo a lo largo de todo este documento, se puede comprobar que, cuanto mayor superficie no metálica haya en la placa, mejores valores de RSRP promedio se obtienen, a excepción de la ranura mediana donde se produce un mejor acoplo de la señal en comparación con la ranura grande. En cuanto al parámetro de calidad RSRQ, no es limitante en ninguna de las configuraciones ya que, en todas las bandas, alcanza como mínimo valores del rango *Bueno*, más que suficientes para garantizar la calidad de la señal.

Respecto a las bandas de trabajo, cabe destacar que esta antena se conecta muchas menos veces a la banda 20 y, cuando lo hace, enseguida cambia de banda, igual que ocurre con la antena chip Antenova SR4L034-R.

Por todo esto, la solución de situar una antena dipolo flexible adhesiva de tamaño pequeño como la Molex 212570-0150 pegada a una superficie de plástico es factible, y se reservará como solución alternativa en caso de que la cobertura con la antena chip del circuito módem 4G en forma de L no sea suficiente.

En el *Anexo IV. Resultados de cobertura con antena Molex 212570-0150* se adjuntan los datos recopilados durante las pruebas de este apartado al completo.

Capítulo 6. Comparativa de las alternativas

Tras llevar a cabo este estudio sobre las diferentes alternativas de conectividad para los videoporteros conectados, y una vez recogidos todos los datos de cobertura con todas las configuraciones estudiadas, estos se han englobado en la Tabla 31 para facilitar su comparación. El parámetro utilizado para esta comparativa es el RSRP promedio, puesto que tiene en cuenta tanto los valores medidos de RSRP en cada banda, como el porcentaje de tiempo que ha estado conectada la antena a dicha banda.

	RSRP promedio (dB)		
	Circuito módem 4G rectangular	Circuito módem 4G en L	Antena flexible Molex 212570-0150
Sin ranura	-99,23 -92,99	-92,51	-
Ranura pequeña	-	-86,07 -87,14	-90,47
Ranura mediana	-89,25	-81,28 -83,72	-82,63
Ranura grande	-	-89,37 -87,42	-80,52 -88,51
Módulo de plástico pequeño	-81,08	-	-72,15 -74,75
Módulo de plástico grande	-80,27	-75,74	-71,01

Tabla 31. Tabla comparativa de las alternativas de conectividad 4G

A partir del estudio realizado y con la ayuda de esta tabla, se han extraído una serie de conclusiones, detalladas a continuación.

En primer lugar, para que el sistema funcione correctamente, es suficiente con valores de RSRP y RSRQ que se encuentren en el rango *Bueno*, ya que la tasa de transmisión máxima es de 300 kbps. En prácticamente todas las pruebas realizadas, los valores del parámetro de calidad RSRQ están en los rangos *Excelente* – *Bueno*, por lo que el factor limitante será el parámetro de potencia, RSRP.

En segundo lugar, con el rediseño del circuito en L siguiendo las indicaciones del fabricante de la antena (dimensiones, plano de masa, *clearance*, red de adaptación...), se ha mejorado la cobertura con respecto al circuito inicialmente planteado, con forma rectangular.

Las antenas flexibles son las que mejores valores de cobertura han proporcionado de las tres alternativas estudiadas. Esto es debido a que con la antena chip, lo que realmente está radiando es el plano de masa, y esta radiación se ve afectada por numerosos factores, mientras que la antena flexible es más robusta frente a esos mismos factores. Sin embargo, su instalación es más laboriosa si se compara con una antena chip de montaje SMD, donde el producto sale completamente montado de fábrica. En el caso de la antena flexible, es necesario pegarla en el momento de la instalación con cierta precisión.

Respecto a las configuraciones utilizadas, la mejor de ellas para las tres alternativas de conectividad es la utilización de un módulo grande de plástico (105 x 94 mm), donde se debe situar la antena, seguido de la utilización de un módulo de plástico pequeño (105 x 47 mm) en el circuito rectangular y la antena flexible Molex, y de una ranura mediana (77 x 15 mm) en el caso del circuito en L.

Además, cabe destacar que, aunque el módulo de plástico grande tiene el doble de tamaño que el módulo pequeño, solo se ha conseguido una mejora de 1–3 dB con su uso.



En cuanto a las bandas de frecuencia, generalmente la que mejor funciona es la banda 3, de 1800 MHz, seguida de la banda 20, de 800 MHz, aunque depende de la configuración empleada, de la ubicación donde se encuentre la antena y de las estaciones base disponibles en esa ubicación.

A pesar de los buenos valores de cobertura obtenidos en la banda 20, tanto la antena chip como la antena flexible se conectan menos veces a ella. Como ya se ha comentado, es probable que la compañía telefónica restrinja más esta banda.

En lo que respecta a la instalación, al situar la placa en una pared y con una caja de empotrar metálica, ambos materiales están aislando a la antena de interferencias por su parte posterior, y están haciendo que parte de la señal se refleje hacia delante, en el sentido de interés.

Por todo esto, se hace necesario encontrar una solución de compromiso entre los resultados de cobertura, la estética y la facilidad de instalación.

A priori, la solución más factible es el circuito módem 4G en forma de L con la antena chip Antenova SR4L034-R de montaje SMD, ubicado en una placa con una ranura no metálica de dimensiones 77 x 15 mm (mediana). No obstante, se reservarán tanto la antena flexible como las configuraciones con módulos más grandes como soluciones alternativas en caso de que la solución instalada no cumpla con los requisitos de nivel de potencia y calidad de señal.

Capítulo 7. Instalaciones piloto

Con toda la información recabada a lo largo de este proyecto, FERMAX ha comenzado un despliegue de pruebas piloto con el Producto Conectado en instalaciones de videoportero reales. El Producto Conectado tomado como referencia para todas ellas es aquel cuyo frontal no presenta ninguna ranura en el metal, y que incluye el circuito módem 4G rectangular. Esto se debe a que ya se han fabricado varias unidades de dicho circuito, mientras que el circuito en L es todavía un prototipo y hay muy pocos fabricados.

Para validar el funcionamiento del Producto Conectado tras su instalación se miden, como se ha hecho hasta ahora, los parámetros de calidad de servicio de la cobertura LTE: RSRP y RSRQ. Si estos son suficientes, se procede a realizar un desvío de llamada real hacia un teléfono móvil para comprobar que la llamada se ve y se escucha adecuadamente, y así dar por válida la instalación.

Por el contrario, si los parámetros no son suficientes, se cambiará la configuración del Producto Conectado de referencia instalado y se utilizará alguna de las alternativas analizadas en este proyecto, en función de las condiciones de cada entorno de prueba piloto.

Un aspecto que hasta ahora no se ha tenido en cuenta es la cobertura que proporciona la compañía telefónica en la zona de la instalación. Como ya se ha mencionado con anterioridad, las pruebas del *Capítulo 3*, del *Capítulo 4* y del *Capítulo 5* han sido realizadas en la sede central de FERMAX, en Valencia. Según la Figura 127 y la Figura 128, el operador contratado dispone de varias estaciones base y, por lo tanto, proporciona buena cobertura 4G en los alrededores de la empresa. Es por este motivo por el que no ha habido ningún problema relativo a este aspecto.

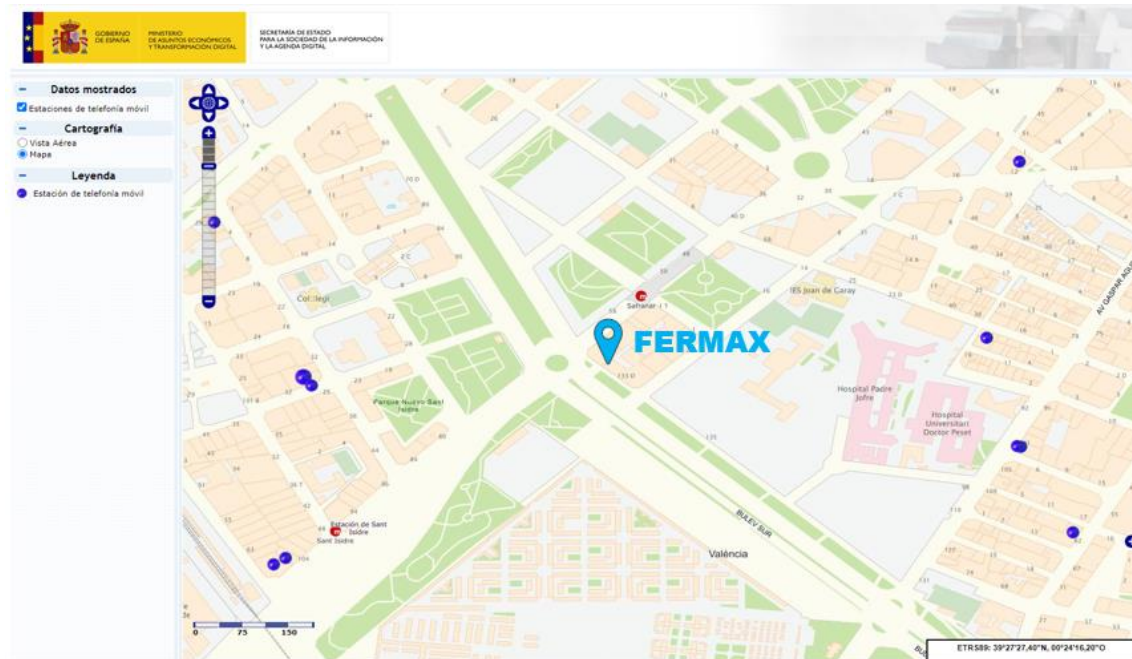


Figura 127. Estaciones base cercanas a FERMAX [46]

Sin embargo, existe la posibilidad de que en la zona de las instalaciones piloto el Producto Conectado no disponga de suficiente cobertura por parte del operador de telefonía. Cuando se dé este problema, se cambiará la SIM electrónica del circuito módem 4G por una tarjeta SIM multioperador, para que la antena se conecte a la estación base de otro operador que le proporcione mejor cobertura. El único inconveniente es que el operador actual subcontrata los servicios de un segundo operador y, por motivos económicos, solo pondrá a nuestra disposición estaciones base con cobertura 3G bajo la tecnología UMTS.

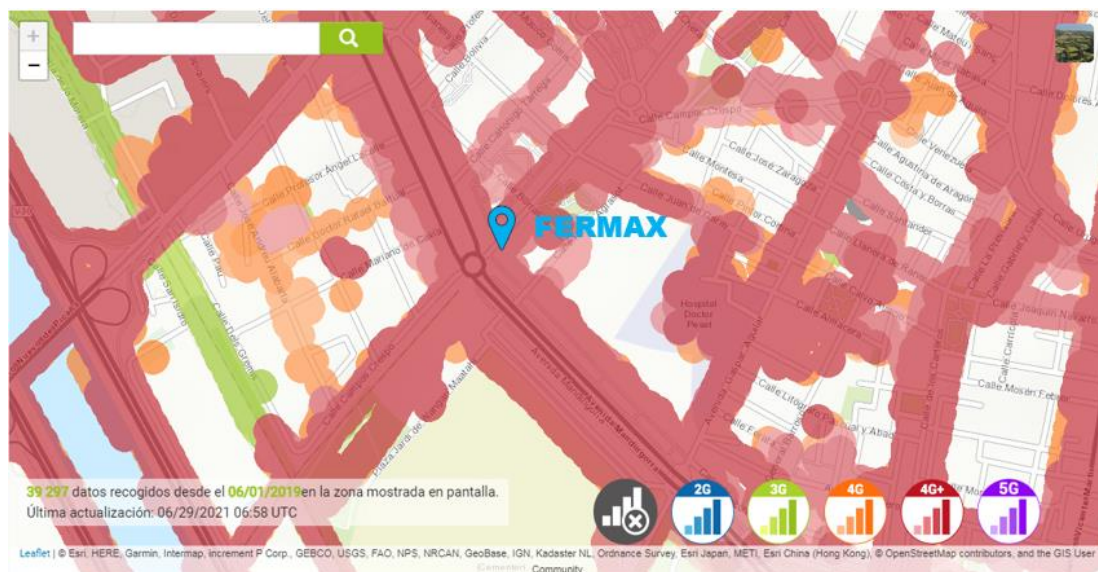


Figura 128. Mapa de cobertura de FERMAX [47]

Es preciso señalar que los parámetros de nivel de señal y calidad de señal de la tecnología UMTS son diferentes a los de LTE, pero son equiparables: RSCP (*Received Signal Code Power*) en UMTS es equivalente a RSRP en LTE y, del mismo modo, EC/IO (*Signal-to-Interference Ratio*) es equivalente a RSRQ. La principal diferencia entre ellos es la clasificación de calidad que utilizan. En el caso de UMTS, se utilizan los rangos mostrados en la Tabla 32 para el parámetro de nivel de señal RSCP, y los recogidos en la Tabla 33 para el parámetro de calidad de señal EC/IO.

RSCP (dB)	Señal	Descripción
> -60	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-60 a -75	Bueno	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-75 a -85	Justo	Pueden alcanzarse velocidades de datos justas pero útiles, rápidas y fiables
-85 a -95	Pobre	El rendimiento caerá drásticamente
-95 a -124	Muy pobre	Desconexión

Tabla 32. Nivel de señal según valores de RSCP para UMTS [14]

EC/IO (dB)	Señal	Descripción
> -6	Excelente	Señal fuerte con velocidades máximas de datos
-6 a -10	Bueno	Señal fuerte con buenas velocidades de datos
-10 a -25	Pobre	Pueden alcanzarse velocidades de datos fiables, pero es posible que haya datos marginales con pérdidas. Cuando este valor se acerca a -20, el rendimiento caerá drásticamente

Tabla 33. Calidad de señal según valores de EC/IO para UMTS [14]

Hasta el momento solo se han realizado tres instalaciones piloto, pero FERMAX tiene previsto el despliegue de nuevas instalaciones de Producto Conectado para recopilar más información. En el *Anexo V. Resultados de cobertura en instalaciones piloto* se adjuntan los datos obtenidos durante las pruebas de este capítulo al completo.

7.1 Instalación piloto 01

Esta instalación se encuentra en el barrio de Monteolivete de la ciudad de Valencia. La placa instalada inicialmente en esta ubicación, mostrada en la Figura 129, es una placa modelo CITYLINE sin ranuras y con el circuito módem 4G rectangular, como ya se ha mencionado antes.



Figura 129. Placa original de la instalación piloto 01

Con esta configuración, la antena no se conecta a 4G en el momento de la prueba, por lo que se opta por cambiar el circuito módem 4G por uno en forma de L, y se cambia también el frontal de la placa por uno con una ranura de tamaño mediano, tal y como se muestra en la Figura 130.



Figura 130. Placa sustitutiva de la instalación piloto 01

En este caso, la antena sí que se conecta a 4G, pero en la Tabla 34 se puede comprobar que el nivel de potencia RSRP recibido se encuentra en el rango *Sin señal* durante todo el tiempo que dura la prueba y, en consecuencia, el desvío de llamada no funciona.

Para comprobar si el motivo de este bajo nivel de señal es el operador telefónico, se le inserta a esta misma placa con la ranura mediana una tarjeta SIM multioperador y se miden nuevos datos, recogidos, nuevamente, en la Tabla 34.

Instalación piloto 01 – Producto Conectado					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Circuito en L – SIM original	3	74,24%	-109,18	-16,35	-108,86 dB
	20	13,72%	-107,91	-16,67	
	3	4,46%	-110,82	-17,69	
	20	4,40%	-108,47	-17,82	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSCP (dB)	EC/IO (dB)	RSCP promedio
Circuito en L – SIM multiop.	IMT 2000	95,50%	-93,40	-7,92	-93,45 dB
	IMT 2000	3,84%	-94,68	-8,64	

Tabla 34. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 01

Según lo expuesto previamente, la tarjeta SIM multioperador permite únicamente la conexión a las bandas de 3G; en este caso, la antena se ha conectado a la banda IMT de 2000 MHz en dos estaciones base distintas, con niveles de potencia RSCP en el rango *Pobre* y niveles de calidad EC/IO del rango *Buena*. Con esta configuración, se han aumentado alrededor de 15 dB de nivel de potencia promedio, además de haber mejorado notablemente la calidad de la señal. Esta mejora justifica el buen funcionamiento obtenido con el desvío de llamada del Producto Conectado.

Para demostrar la mejora obtenida con la tarjeta SIM multioperador, se incluyen en la Figura 131 un mapa con las estaciones base cercanas a la instalación, en la Figura 132 un mapa que representa la cobertura existente en la zona para el operador contratado, y en la Figura 133 otro mapa que muestra la cobertura en la misma zona con el segundo operador. Gracias a ellos, se puede comprobar que el segundo operador cubre más zonas y proporciona más cobertura dentro del barrio de Monteolivete.

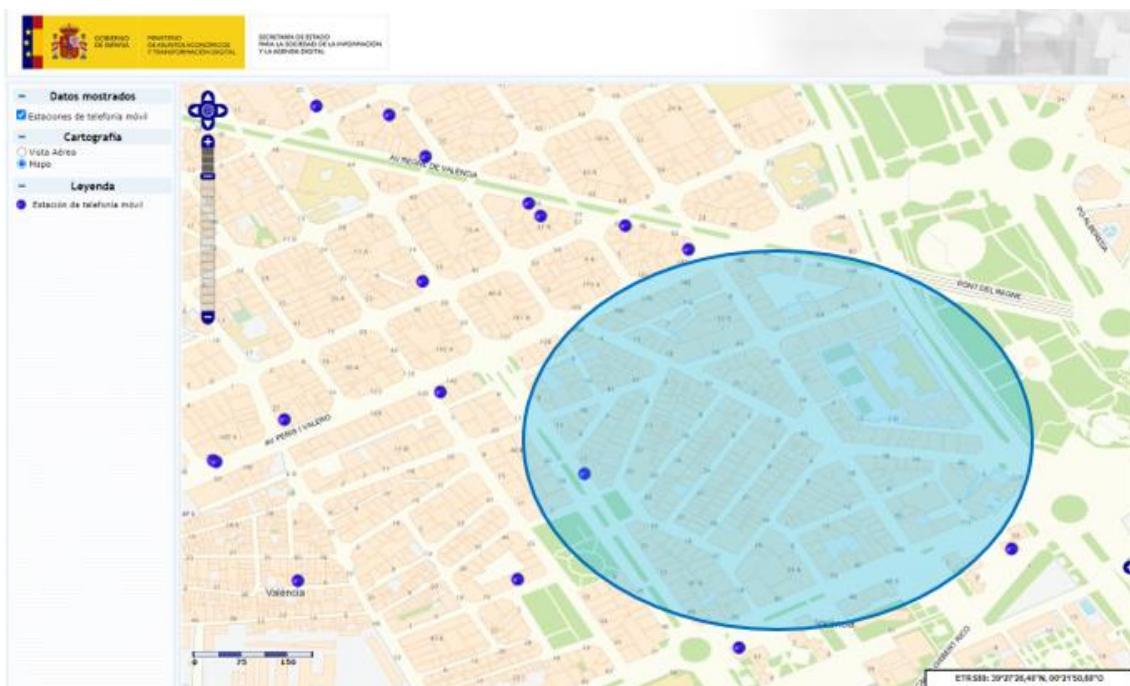


Figura 131. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 01 [46]



Figura 132. Mapa de cobertura de la instalación piloto 01 con operador original [47]

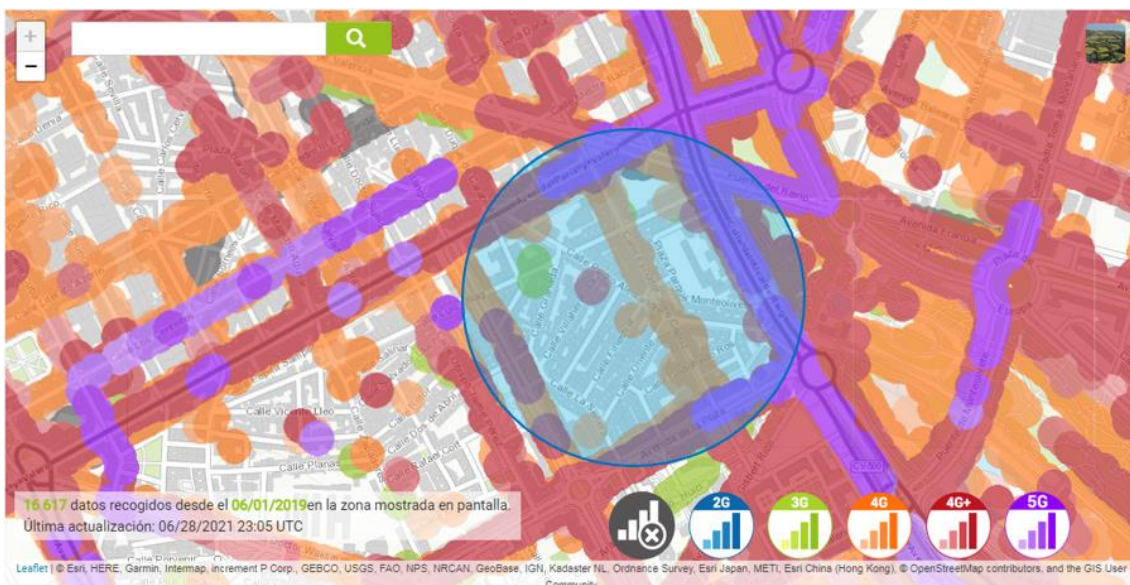


Figura 133. Mapa de cobertura de la instalación piloto 01 con segundo operador [47]

7.2 Instalación piloto 02

Esta segunda instalación está ubicada en el barrio de Cabañal-Cañamelar, también en la ciudad de Valencia. La placa instalada en este emplazamiento es un modelo SKYLINE sin ranura, con el circuito módem 4G rectangular, mostrada en la Figura 134.

En esta ocasión, la antena se conecta a 4G desde el inicio de la prueba, obteniendo valores de RSRP del rango *Buena* y valores de RSRQ del rango *Excelente* (Tabla 35). Como consecuencia a estos buenos valores de calidad de servicio LTE, el desvío de llamada desde la placa hasta un *smartphone* asociado funciona perfectamente.

El motivo de estos resultados es la cobertura proporcionada por el operador en este barrio. En la Figura 135 se pueden observar varias estaciones base en la zona de la instalación piloto, lo que se traduce en mejor cobertura del operador contratado, tal y como se puede ver en la Figura 136.



Figura 134. Placa de la instalación piloto 02

Instalación piloto 02 – Producto Conectado					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Circuito rectangular	3	98,31%	-87,03	-6,21	-86,90 dB
	20	1,63%	-82,40	-7,61	

Tabla 35. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 02

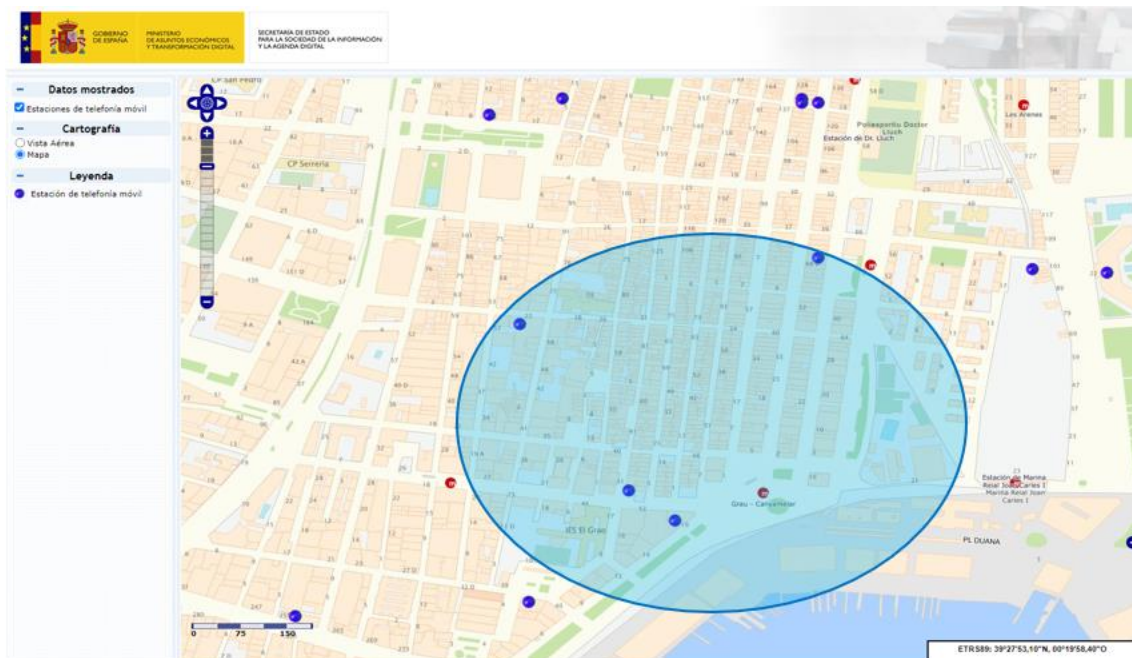


Figura 135. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 02 [46]



Figura 136. Mapa de cobertura de la instalación piloto 02 con operador original [47]

7.3 Instalación piloto 03

La tercera instalación piloto se encuentra en la urbanización de Mas Camarena, en Paterna (Valencia). En esta ocasión la placa instalada es del modelo SKYLINE, sin ranura y con el circuito módem 4G rectangular. Además, tiene adyacente a ella una placa con dos módulos de plástico pequeños y un módulo de plástico grande, utilizados como tarjeteros y lector de proximidad, tal como se aprecia en la Figura 137.



Figura 137. Placa original de la instalación piloto 03

Con esta configuración inicial, la antena con la SIM electrónica no es capaz de establecer conexión 4G, puesto que hay pocas estaciones base instaladas en la zona (Figura 138) y, por consiguiente, el operador no proporciona apenas cobertura (Figura 139).

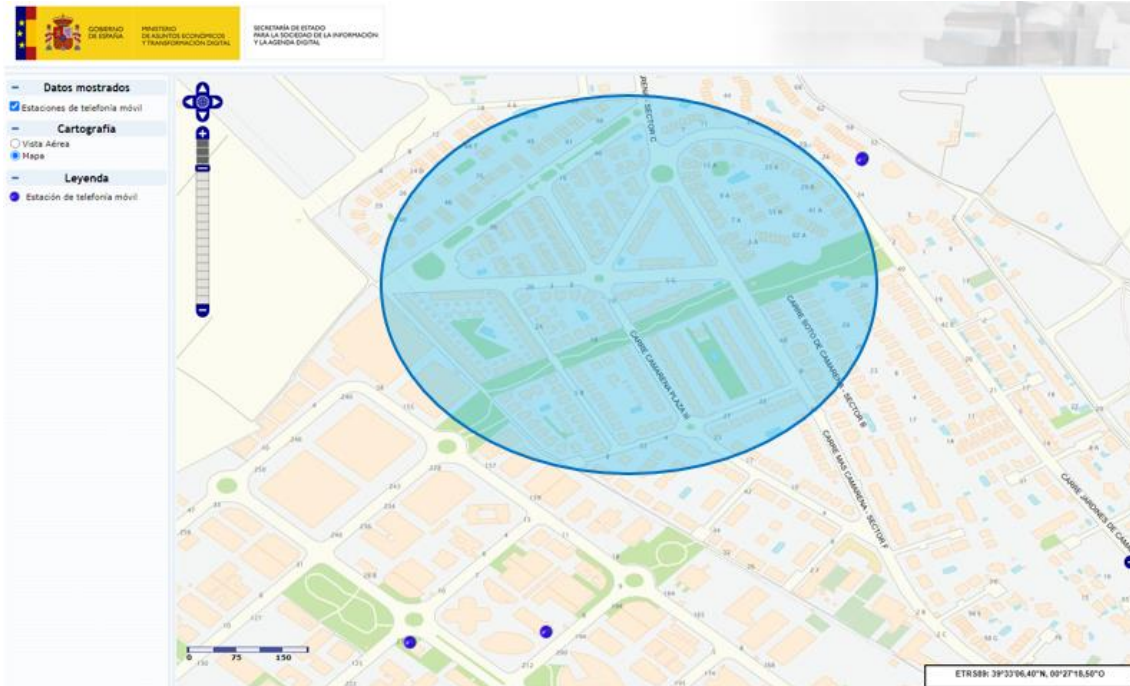


Figura 138. Estaciones base cercanas a la instalación piloto 03 [46]

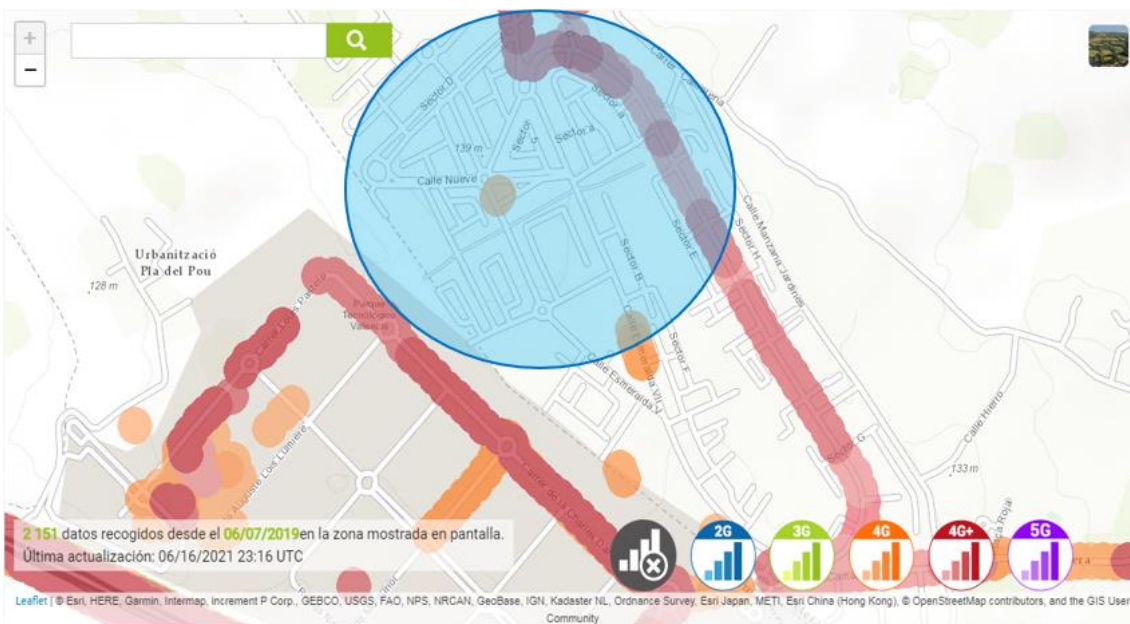


Figura 139. Mapa de cobertura de la instalación piloto 03 con operador original [47]

Para intentar solucionarlo, se instala una tarjeta SIM multioperador, manteniendo la configuración inicial. Con ella, la antena logra conectarse al 3G de un segundo operador en escasas ocasiones, obteniendo los valores de RSCP y EC/IO de la Tabla 36. En ella, se puede comprobar que la antena ha estado desconectada durante prácticamente el 80% del tiempo que ha durado la prueba. Para tener en cuenta estas muestras erróneas a la hora de calcular el RSCP promedio, se le atribuyen los peores RSCP y EC/IO posibles, -124 dB y -25 dB respectivamente.

Instalación piloto 03 – Producto Conectado					
Configuración	Banda	% Tiempo	RSCP (dB)	EC/IO (dB)	RSCP promedio
Circuito rectangular – SIM multiop.	Sin conexión	79,14%	-124,00*	-25,00*	-119,81 dB
	WCDMA 900	17,84%	-103,29	-17,41	
	WCDMA 900	2,30%	-107,51	-17,94	
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Circuito en L	3	100,00%	-112,66	-16,94	-112,66 dB
Configuración	Banda	% Tiempo	RSRP (dB)	RSRQ (dB)	RSRP promedio
Antena flexible	3	92,86%	-90,89	-8,91	-90,92 dB
	20	7,10%	-91,78	-11,43	

Tabla 36. Resultado pruebas de cobertura de instalación piloto 03

Si se observa el mapa del segundo operador en esta zona (Figura 140), se comprueba que la cobertura que proporciona es mayor, pero no suficiente.



Figura 140. Mapa de cobertura de la instalación piloto 03 con segundo operador [47]

En un segundo intento por mejorar el nivel de señal, se cambia el circuito módem 4G rectangular por uno en forma de L con SIM electrónica, y se instala el frontal con una ranura de tamaño mediano mostrado en la Figura 141. Sin embargo, con esta alternativa la señal no mejora lo suficiente (Tabla 36).



Figura 141. Placa provisional de la instalación piloto 03

Finalmente, y aprovechando la placa adyacente con tres módulos de plástico, se prueba a conectar y pegar en el primero de ellos una antena flexible adhesiva, modelo Molex 212570-0150, según se muestra en la Figura 142.

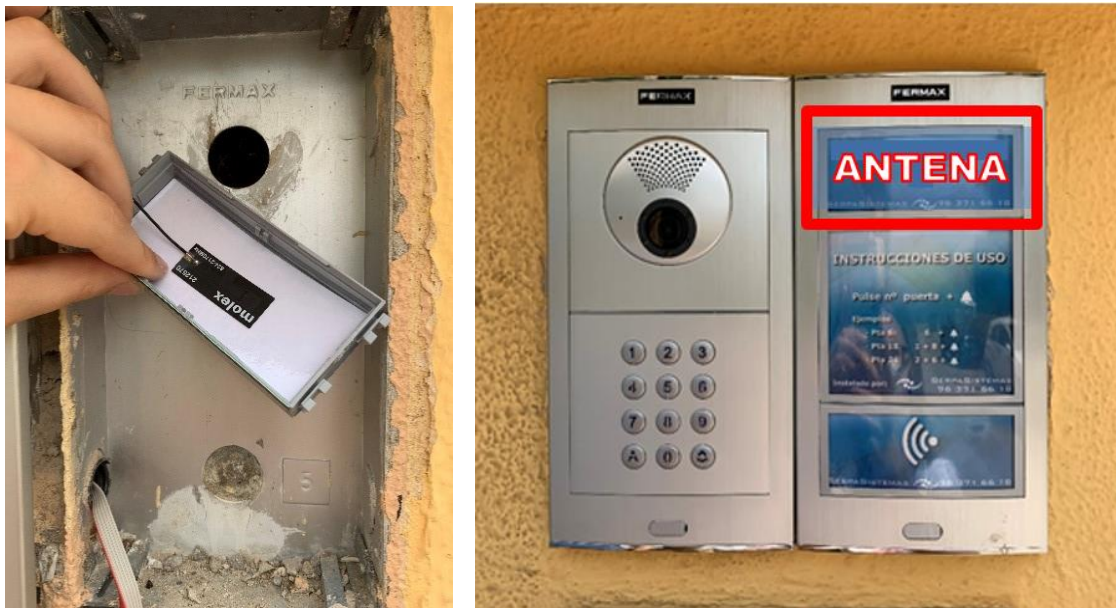


Figura 142. Conexión de antena flexible adhesiva en instalación piloto 03

En este caso, ambos parámetros de calidad de servicio de LTE se han visto mejorados (Tabla 36). Aunque el RSRP se encuentra en el rango *Pobre*, el RSRQ es *Excelente* durante más del 90% del tiempo, lo que significa que hay poco ruido en la comunicación y que la antena es capaz de intercambiar información con la estación base. Esto se traduce en que el desvío de llamada funciona correctamente.

Capítulo 8. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

8.1 Conclusiones de este Trabajo Fin de Máster

Tras todo el proceso de investigación acerca de las antenas integradas en dispositivos electrónicos con envoltentes metálicas y la problemática que esto supone, y seguido del desarrollo de pruebas de campo para estudiar su comportamiento en diferentes condiciones, se puede concluir que se han encontrado varias soluciones factibles de conectividad 4G para el Producto Conectado de FERMAX. Por lo tanto, se ha cumplido el objetivo general de este Trabajo Fin de Máster.

El estudio teórico llevado a cabo ha servido, en primer lugar, para comprender las bases de la tecnología LTE y, en segundo lugar, para conocer en profundidad el funcionamiento de las antenas integradas y los problemas que pueden derivar de su entorno. También se han estudiado algunas de las posibilidades comerciales que ofrece el mercado en lo que a antenas integradas se refiere para, finalmente, decidir cuáles utilizar.

Seguidamente, las pruebas de campo realizadas en un entorno controlado como es el edificio de la sede central de FERMAX han permitido esclarecer las principales ideas extraídas en el estudio teórico previo. Gracias a ellas, se puede concluir que los parámetros de calidad de servicio LTE utilizados son un buen indicador para comprobar de manera objetiva el buen funcionamiento del desvío de llamada en el Producto Conectado. Estas pruebas también han permitido seleccionar y proponer las alternativas más factibles de conectividad.

Hay dos enfoques diferentes para escoger la solución final de conectividad. Si se tiene como prioridad el nivel de cobertura y la calidad de la señal, la solución más fiable es la utilización de una antena flexible Molex 212570-0150 pegada en un módulo pequeño de plástico de dimensiones 105 x 47 mm. Esta solución obliga a incluir el módulo de plástico mencionado en todos los modelos de Producto Conectado, cuando actualmente se ofrece como un módulo opcional.

Por el contrario, si se le da más importancia a mantener la estética del producto e incorporar los menores cambios posibles al frontal de la placa por un motivo económico y de diseño, la mejor solución es utilizar el circuito módem 4G en forma de L, con una antena chip Antenova SR4L034-R, y ubicarlo en una placa con una ranura no metálica mediana de dimensiones 77 x 15 mm.

Finalmente, el planteamiento y la ejecución pruebas de campo en varias instalaciones piloto han permitido comprobar el correcto funcionamiento de ambas alternativas propuestas, y además han ayudado a detectar otros posibles problemas que tener en cuenta, como puede ser la falta de cobertura en la zona de la instalación.

Después de toda la información recabada, de la comparación entre pruebas y alternativas, y de la obtención de las conclusiones aquí expuestas, la empresa FERMAX es la que tomará la decisión final y optará por una alternativa u otra en función de sus necesidades.

8.2 Trabajo futuro

A pesar de haber alcanzado el objetivo general planteado al comienzo de este proyecto, aparecen numerosas mejoras que se podrían incorporar a ambas alternativas en el futuro.

Por una parte, y habiendo obtenido una mejora notoria con su rediseño en forma de L, es posible optimizar todavía más el diseño del circuito módem 4G y del frontal de la placa para obtener mejores niveles de potencia y calidad de señal 4G. Algunas de estas mejoras serían:

- Garantizar la adaptación de impedancia entre la antena y la pista que la conecta con el módulo 4G.
- Recalcular el circuito de adaptación de la antena.

- Aumentar el tamaño del plano de masa de la PCB y el de la zona de *clearance*.
- Reposicionar la antena en la PCB.
- Optimizar el tamaño de la apertura mecánica en el metal para conseguir que la señal se acople mejor a ella.

Por otra parte, respecto a la antena flexible seleccionada, también se podrían implementar algunas mejoras con respecto a la PCB, al frontal y a la configuración de la propia antena:

- Mejorar la impedancia de la pista que conecta la antena con el módulo 4G en la PCB.
- Escoger la longitud del cable coaxial mínima necesaria para su conexión y respetar las recomendaciones del *datasheet* con respecto a la colocación de este.
- Optimizar las dimensiones de la apertura mecánica en el frontal de la placa.

Además de todas estas mejoras, sería muy interesante simular todo el Producto Conectado en su conjunto, incluyendo todas las partes, materiales y componentes electrónicos que lo conforman, para así poder estudiar el efecto que ejerce individualmente cada elemento en el producto mediante el análisis de los parámetros de ganancia, eficiencia, coeficiente de reflexión y diagrama de radiación.

Otra línea de trabajo podría ser el estudio, tanto mediante simulación como con pruebas de campo, del comportamiento del Producto Conectado instalado sobre diferentes materiales de construcción.

Tal y como se ha comprobado con las pruebas en las instalaciones piloto es posible que, incluso con estas mejoras, la antena no logre conectarse a 4G debido a la mala cobertura en algunas ubicaciones. La solución contemplada de utilizar una tarjeta SIM multioperador puede funcionar en algunos casos, pero la conexión no sería verdaderamente 4G.

Dos posibles mejoras para tratar de solventar este problema serían, por un lado, preparar el circuito módem 4G para que conmute entre la antena chip y la antena flexible, dependiendo de la que tenga mejor cobertura y, por otro lado, incluir un conector accesible al exterior para instalar una antena totalmente externa al producto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas propuestas implicarían un cambio demasiado grande en la estética del Producto Conectado.

Capítulo 9. Pliego de condiciones

En primer lugar, en este capítulo se destaca el equipamiento más relevante utilizado para el desarrollo de este proyecto, así como sus principales características (Tabla 37). En el caso de las diferentes placas de calle utilizadas para todas las pruebas, se engloban en las dos gamas de FERMAX: placa SKYLINE y placa CITYLINE. En segundo lugar, están representados los tres principales esquemas de conexión de los sistemas de videoportero con el Producto Conectado de FERMAX: edificio básico, edificio con varios accesos y urbanización con entrada general y varios bloques.

9.1 Materiales y equipos utilizados






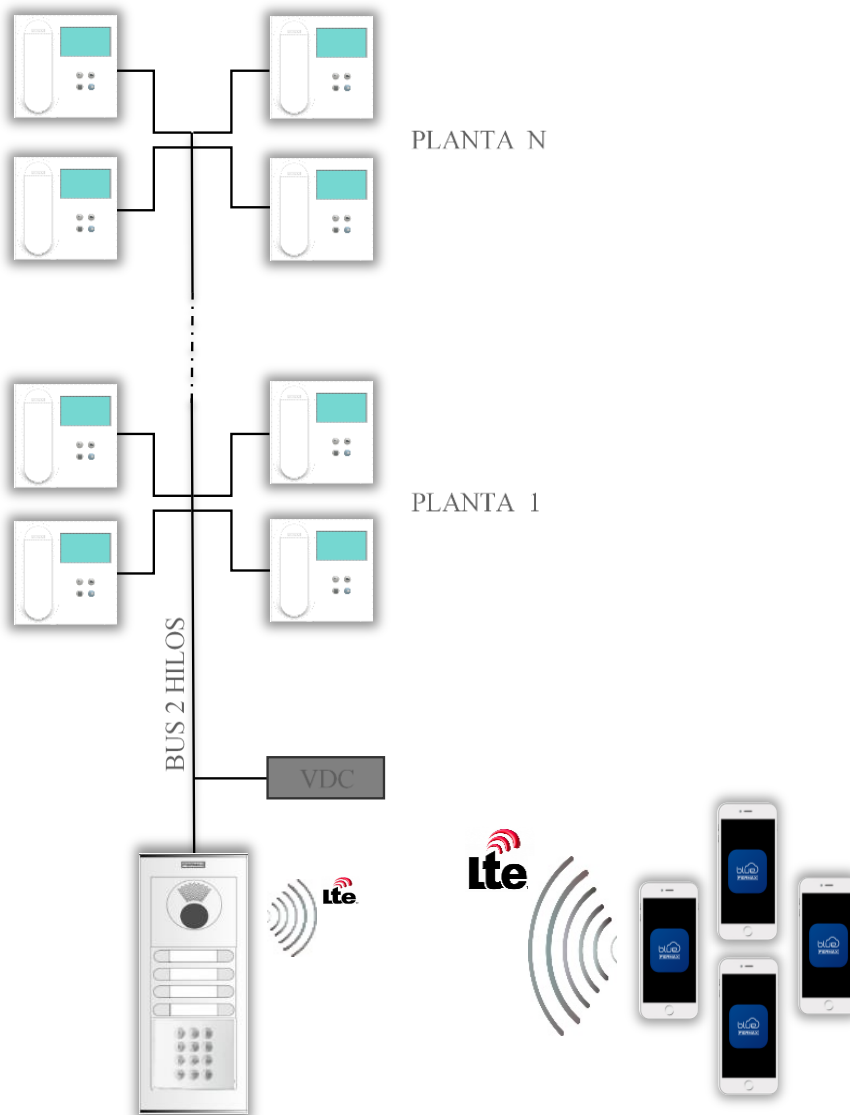
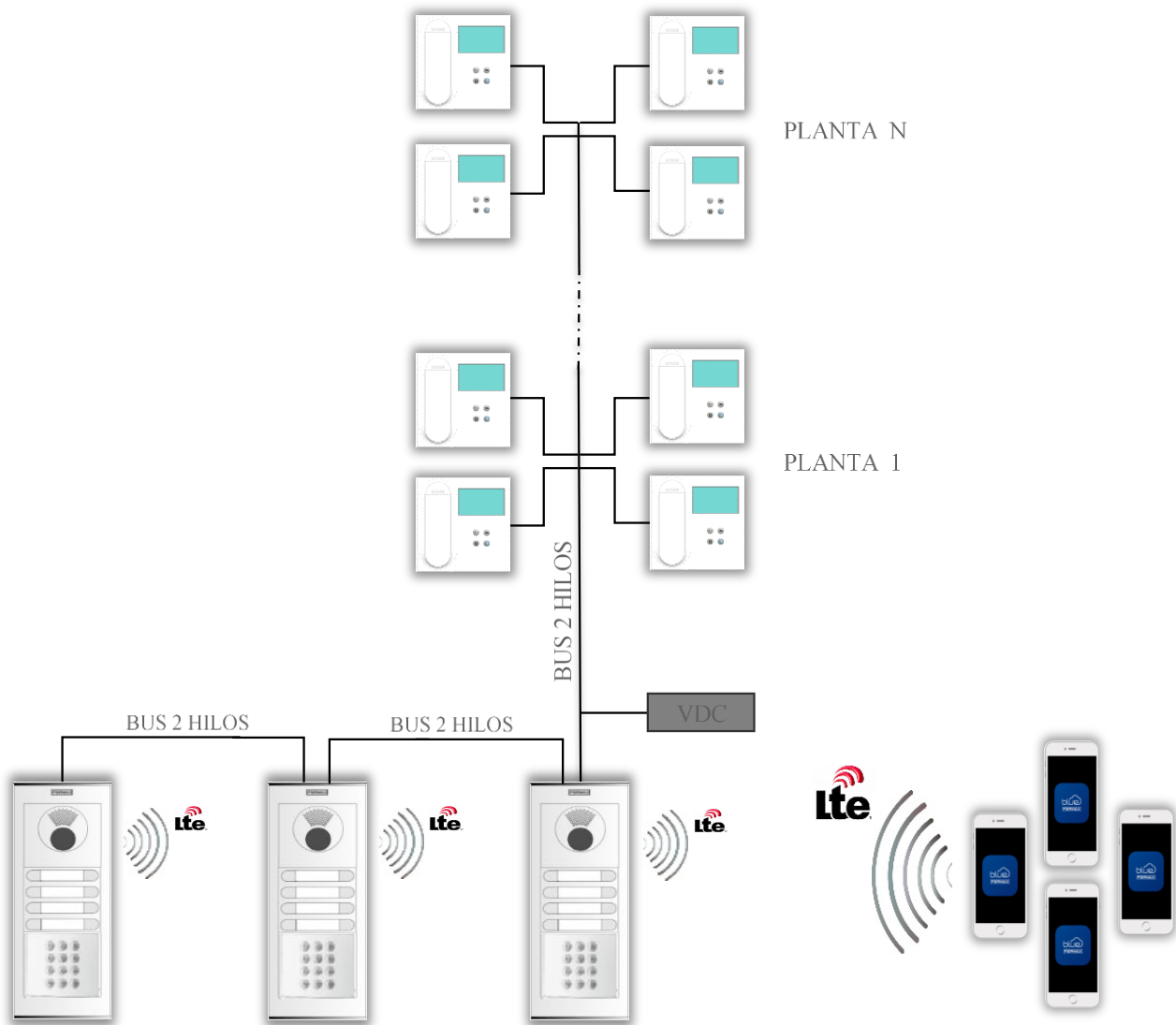
Equipo	Características principales
Antena chip Antenova Inversa SR4L034-L/R [43] 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: SMD - Frecuencias: 698 – 960 MHz, 1710 – 2170 MHz, 2300 – 2400 MHz, 2500 – 2690 MHz - Impedancia con adaptación: 50 Ω - Polarización: lineal - Dimensiones: 28 x 8 x 3,3 mm
Antena Molex 212570-0150 [28] 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: flexible - Frecuencias: 824 – 960 MHz, 1710 – 2170 MHz - Impedancia con adaptación: 50 Ω - Polarización: lineal - Dimensiones: 40,4 x 15,4 x 0,1 mm - Longitud del cable: 150 mm
Módulo 4G SIM7500E [35] 	<ul style="list-style-type: none"> - Bandas de frecuencia: 1, 3, 7, 8, 20 - Comunicación: LTE-TDD / LTE-FDD / HSPA+ / WCDMA / GSM / GPRS / EDGE - Interfaces: SIM Card, UART, USB, ADC, I2C - Tasa de transferencia: 10 Mbps (DL) / 5 Mbps (UL) - Dimensiones: 24 x 27 x 2,75 mm
Placa CITYLINE de FERMAX [4] 	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño: monobloque - Módulos disponibles: audio, audio + vídeo, pulsadores, lector de proximidad, teclado, tarjetero, pantalla LCD - Anchura: 130 mm - Alturas disponibles: 9
Placa SKYLINE de FERMAX [5] 	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño: modular - Módulos disponibles: audio, audio + vídeo, pulsadores, lector de proximidad, teclado, tarjetero, informativo, <i>display</i> digital - Anchura: 130 mm - Alturas disponibles: 8

Tabla 37. Equipamiento utilizado en este proyecto

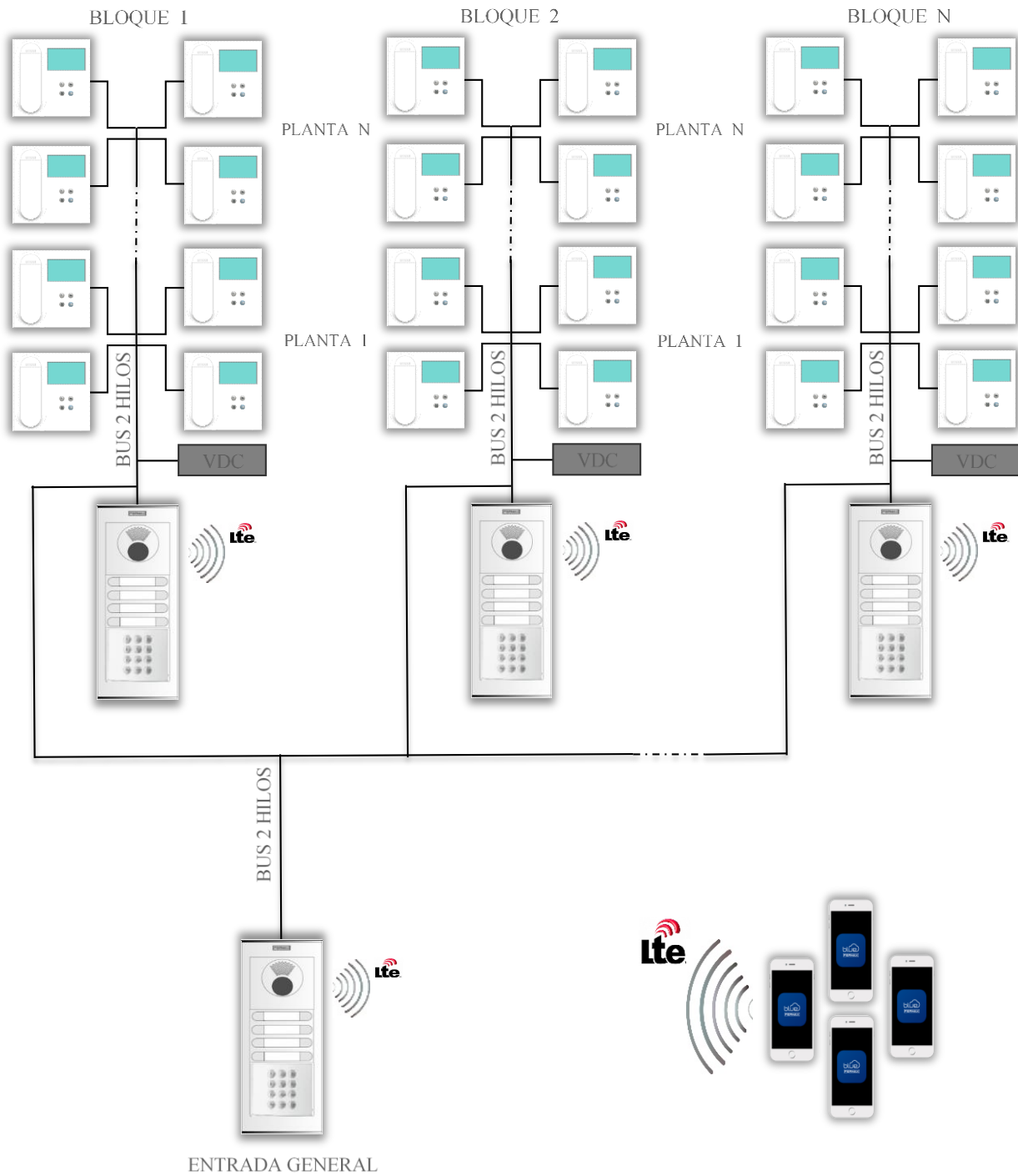
9.2 Esquemas de conexión



NÚMERO	1
TÍTULO	CONEXIONADO DE UN EDIFICIO BÁSICO CON PRODUCTO CONECTADO
PROYECTO	Desarrollo de una solución de conectividad inalámbrica de antenas integradas con envolventes metálicas
EMPRESA	FERMAX
AUTOR	Marta García Mota
REVISADO	Eva Antonino Daviu y Ernesto Sornosa Alba



NÚMERO	2
TÍTULO	CONEXIONADO DE UN EDIFICIO CON VARIOS ACCESOS CON PRODUCTO CONECTADO
PROYECTO	Desarrollo de una solución de conectividad inalámbrica de antenas integradas con envolventes metálicas
EMPRESA	FERMAX
AUTOR	Marta García Mota
REVISADO	Eva Antonino Daviu y Ernesto Sornosa Alba



NÚMERO	3
TÍTULO	CONEXIONADO DE UNA URBANIZACIÓN CON ENTRADA GENERAL Y VARIOS BLOQUES CON PRODUCTO CONECTADO
PROYECTO	Desarrollo de una solución de conectividad inalámbrica de antenas integradas con envolventes metálicas
EMPRESA	FERMAX
AUTOR	Marta García Mota
REVISADO	Eva Antonino Daviu y Ernesto Sornosa Alba

Capítulo 10. Bibliografía

- [1] Cisco, «Cisco Annual Internet Report (2018-2023),» 2020.
- [2] «FERMAX PROFESSIONAL,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/spain/pro.html>.
- [3] FERMAX, «BLUE by FERMAX,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/blue/es>.
- [4] FERMAX, «Placa CITYLINE,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/spain/pro/productos/videoporteros/placas/SF-10-placa-cityline.html>.
- [5] FERMAX, «Placa SKYLINE,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/spain/pro/productos/videoporteros/placas/SF-11-placa-skyline.html>.
- [6] FERMAX, «Monitor VEO Wi-Fi,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/spain/pro/productos/videoporteros/monitores/SF-106-monitor-veo-wifi.html>.
- [7] FERMAX, «Monitor VEO-XS Wi-Fi,» [En línea]. Available: <https://www.fermax.com/spain/pro/productos/videoporteros/monitores/SF-107-monitor-veoxs-wifi.html>.
- [8] 3GPP, «Technical Report 25.913. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),» v9.0.0, 2009.
- [9] «Lte Encyclopedia,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>.
- [10] Top Optimized Technologies, Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información, «Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos,» [En línea]. Available: <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/cobertura/Otros%20documentos%20interes/Estudio-requisitos-tecnicos-coberturaLTE.pdf>.
- [11] H. Holma y A. Toskala, LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, Second ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [12] BandaAncha.eu, «Frecuencias y bandas LTE en España,» [En línea]. Available: https://wiki.bandaancho.st/Frecuencias_y_bandas_LTE_en_Espa%C3%B1a.
- [13] Zyxel Networks, «Parámetros de calidad de señal LTE,» [En línea]. Available: <https://support.zyxel.eu/hc/es/articles/360005188999-Par%C3%A1metros-de-calidad-de-se%C3%B1al-LTE>.
- [14] Teltonika Networks, «Mobile Signal Strength Recommendations,» [En línea]. Available: https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile_Signal_Strength_Recommendations.
- [15] 3GPP, «Technical Specification 36.133. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Requirements for support of radio resource management,» v17.0.0, 2020.
- [16] IEEE, «IEEE Standard: Definitions of Terms for Antennas,» 1983.

- [17] Á. Cardama Aznar, L. Jofre Roca, J. M. Rius Casals, J. Romeu Robert, S. Blanch Boris y M. Ferrando Bataller, *Antenas*, Segunda ed., Edicions UPC, 2002.
- [18] M. Ferrando Bataller, «Impedancia de antenas,» PoliMedia, Universitat Politècnica de València, 2016. [En línea]. Available: <https://media.upv.es/#/portal/video/c98de4a0-d0ac-11e5-8c9f-5781f1feddfe>.
- [19] J. Anguera y A. Pérez, *Teoría de Antenas: Guía de estudio*, Ingeniería La Salle: Universitat Ramon LLull, 2011.
- [20] M. Ferrando Bataller y A. Valero, «Antenas: Introducción. Parámetros de antenas,» Dep. Comunicaciones, Universitat Politècnica de València, 2003. [En línea]. Available: http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Tema_1.PDF.
- [21] W. L. Stutzman y G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Third ed., John Wiley & Sons, 2012.
- [22] J. P. Navarro Castillo, «Diseño y Optimización de Estructuras de Adaptación Basadas en Acoplamientos para Sistemas Inalámbricos,» Proyecto Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- [23] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, Second ed., Prentice Hall, 1997.
- [24] I.-G. Cho, C. Lee, Y. Lee, J. Oh, J. Jinwoo, H. Lee y Y. Lim, «A design of the multi-band chip antenna using meander line PIFA structure for mobile phone handset,» de *2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology 3*, 2008.
- [25] GlobalSpec, «Chip Antennas Information,» Engineering 360, [En línea]. Available: https://www.globalspec.com/learnmore/semiconductors/communication_ic/chip_antenna.
- [26] NXP Semiconductors, «BLE Antenna Design Guide - Application Note,» 2018.
- [27] J. Molins-Benlliure, M. Cabedo-Fabrés, E. Antonino-Daviu y M. Ferrando-Bataller, «Effect of the ground plane in UHF Chip antenna,» de *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020.
- [28] Molex, «212570-0150 Application Specification,» [En línea]. Available: https://www.molex.com/pdm_docs/as/2125700100-000.pdf.
- [29] S. G. Kirtania, A. W. Elger, M. R. Hasan, A. Wisniewska, K. Sekhar, T. Karacolak y P. K. Sekhar, «Flexible Antennas: A Review,» *Micromachines*, vol. 11, nº 9, p. 847, 2020.
- [30] Antenova, «What are the benefits of flexible circuit antennas?,» 2021. [En línea]. Available: <https://blog.antenova.com/what-are-the-benefits-of-flexible-circuit-antennas>.
- [31] S. Martínez Giménez, «Estrategias de integración de antenas compactas en dispositivos de muñeca tipo “smartwatch”,» Trabajo Final de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, 2019.
- [32] P. M. Slobodzian, «Challenges of design and practical application of LTCC chip antennas,» de *2015 12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, Nis, Serbia, 2015.
- [33] H. S. Singh, G. K. Pandey, P. K. Bharti y M. K. Meshram, «Compact Printed Diversity Antenna for LTE700/GSM1700/1800/UMTS/Wi-Fi/Bluetooth/LTE2300/2500 Applications for Slim Mobile Handsets,» *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 56, pp. 83-91, 2015.



- [34] FrontierUS, «Specifying the Right Antenna,» [En línea]. Available: <https://www.frontiercomputercorp.com/specifying-the-right-antenna/>.
- [35] SIMCom, «SIM7500X Product Details,» [En línea]. Available: <https://www.simcom.com/product/SIM7500X.html>.
- [36] Antenova, «Inversa LTE Antenna Product Specification,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/pdfdocs/Inversa-SR4L034-PS-10.pdf>.
- [37] iTEAM, «Medidas UPV para FERMAX,» Universitat Politècnica de València, Noviembre 2020.
- [38] iTEAM, «Medidas diagrama de radiación antenas FERMAX,» Universitat Politècnica de València, Febrero 2021.
- [39] iTEAM, «Medidas UPV FERMAX,» Universitat Politècnica de València, Enero 2021.
- [40] Molex, «105263-0001 Product Specification,» [En línea]. Available: https://www.molex.com/pdm_docs/ps/PS-105263-003-001.pdf.
- [41] Molex, «209142-0180 Application Specification,» [En línea]. Available: https://www.molex.com/pdm_docs/as/2091420180-000.pdf.
- [42] Linx Technologies, «ANT-LPC-FPC-100 Datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/238/ant-lpc-fpc-100-ds-1760204.pdf>.
- [43] Antenova, «SRFC015-150 Product Specification,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/23/Zenghi-SRFC015-PS-1.0-938227.pdf>.
- [44] RF Solutions, «ANT-GFPCB2180-UFL Product Specification,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/975/1548668060ANT-GFPCB8-1-1568146.pdf>.
- [45] RF Solutions, «ANT-GFPCB1540-UFL Product Specification,» [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/975/1539854217ANT-GFPCB-1-1568157.pdf>.
- [46] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, Gobierno de España, «Infoantenas,» [En línea]. Available: <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do>.
- [47] nPerf, «Mapa de cobertura 3G / 4G / 5G en Valencia, España,» [En línea]. Available: <https://www.nperf.com/es/map/ES/2509954.Valencia/-/signal/>.

Anexos

Anexo I. Resultados de cobertura con circuito módem 4G rectangular

Banda	Frecuencia (MHz)
1	2100 (1920-2170)
3	1800 (1710-1885)
20	800 (791-862)

Leyenda	RSRP	RSRQ
Excelente	> -80 dB	> -10 dB
Bueno	-80 a -90 dB	-10 a -15 dB
Pobre	-90 a -100 dB	-15 a -20 dB
Sin señal	< -100 dB	< -20 dB

Antena	Posición	Banda	Estación Base	Nº muestras	% Tiempo	RSRP (dB)			RSRQ (dB)			RSRP (dB) PROMEDIO
						Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	
Antenova SR4L034-L, Circuito rectangular	Sin ranura	3	118023700	1919	100,00%	-95,90	-99,23	-111,90	-7,30	-10,09	-17,50	-99,23
	Sin ranura	3	118023690	1451	50,49%	-87,90	-92,12	-96,40	-7,20	-10,79	-16,60	-92,99
		1	118023694	831	28,91%	-94,00	-95,78	-100,30	-7,50	-8,23	-12,20	
	Ranura mediana	3	118023700	584	20,32%	-89,30	-92,47	-97,50	-8,50	-10,77	-16,70	-89,25
		3	118023700	254	65,97%	-84,10	-88,35	-94,60	-8,50	-10,49	-15,90	
		3	118023690	87	22,60%	-86,30	-88,95	-91,10	-9,20	-10,97	-15,30	
		1	118023694	41	10,65%	-96,70	-99,61	-102,70	-8,40	-9,41	-12,50	
		1	118023704	1	0,26%	-99,40	-99,40	-99,40	-10,80	-10,80	-10,80	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023700	2015	65,79%	-75,60	-78,26	-84,40	-5,90	-9,07	-15,10	-81,08
		3	118023690	546	17,83%	-80,80	-81,65	-82,40	-6,00	-7,23	-13,50	
		1	118023694	492	16,06%	-91,20	-92,66	-95,40	-8,50	-9,64	-15,40	
		1	118023704	3	0,10%	-93,00	-93,93	-94,50	-9,70	-10,53	-12,00	
		3	117914398	1	0,03%	-99,50	-99,50	-99,50	-15,80	-15,80	-15,80	
	Módulo de plástico grande	3	117853194	1	0,03%	-99,70	-99,70	-99,70	-11,30	-11,30	-11,30	-80,27
		3	118023700	2607	60,40%	-77,20	-78,35	-90,50	-6,40	-9,25	-15,70	
3		118023690	1621	37,56%	-81,00	-83,15	-89,70	-4,10	-5,13	-11,30		
1		118023694	74	1,71%	-91,90	-92,80	-95,40	-8,90	-9,81	-13,90		
Antenova SR4L034-L, Circuito rectangular, Materiales	Módulo de plástico pequeño Pared + caja metálica	3	118023700	3973	67,19%	-75,90	-78,87	-90,00	-5,50	-8,95	-16,30	-82,41
		1	118023694	1462	24,73%	-88,80	-92,23	-100,50	-8,30	-9,77	-17,50	
		3	118023690	311	5,26%	-78,70	-79,10	-83,10	-6,20	-7,21	-13,70	
	Módulo de plástico pequeño Ventana + caja metálica	3	118023700	5193	88,23%	-87,10	-92,19	-101,90	-4,10	-8,81	-15,90	-93,14
		3	118023690	235	3,99%	-91,10	-95,41	-101,70	-6,90	-11,48	-17,40	
		IMT 2000	68560997	120	2,04%	-86,00	-88,17	-90,00	-6,00	-7,02	-13,00	
	Módulo de plástico pequeño Pared + caja plástico	1	118023694	17	0,29%	-98,30	-101,84	-106,70	-8,90	-10,81	-14,90	-84,80
		20	118023701	5	0,08%	-85,30	-88,18	-91,30	-8,40	-10,44	-14,00	
		3	118023700	4335	73,30%	-81,60	-84,08	-114,10	-4,20	-9,56	-16,60	
		3	118023690	1338	22,62%	-84,80	-85,49	-97,10	-5,80	-6,82	-16,00	
		1	118023704	181	3,06%	-95,80	-97,40	-99,60	-8,60	-10,13	-16,00	
	Módulo de plástico pequeño Ventana + caja plástico	1	118023694	52	0,88%	-95,80	-97,16	-98,80	-8,70	-10,33	-14,80	-97,61
		3	118023700	3900	65,89%	-86,70	-95,48	-105,20	-4,80	-9,88	-17,30	
		1	118023694	1115	18,84%	-93,60	-102,89	-105,40	-8,70	-10,68	-15,40	
		3	117955614	287	4,85%	-94,30	-96,25	-107,50	-7,50	-10,77	-17,00	
1		118023704	211	3,56%	-96,90	-100,24	-109,20	-7,30	-9,52	-14,90		
3		118023690	190	3,21%	-92,30	-96,41	-105,30	-5,90	-11,89	-16,90		
IMT 2000		68560998	119	2,01%	-85,00	-86,64	-88,00	-5,50	-5,99	-10,50		
3		117933578	86	1,45%	-100,90	-104,76	-106,10	-10,30	-13,90	-17,70		
3	117914398	2	0,03%	-108,40	-108,50	-108,60	-16,50	-17,65	-18,80			
3	118027274	1	0,02%	-111,30	-111,30	-111,30	-11,20	-11,20	-11,20			

Anexo II. Resultados de cobertura con circuito módem 4G en L

Banda	Frecuencia (MHz)
1	2100 (1920-2170)
3	1800 (1710-1885)
20	800 (791-862)

Leyenda	RSRP	RSRQ
Excelente	> -80 dB	> -10 dB
Bueno	-80 a -90 dB	-10 a -15 dB
Pobre	-90 a -100 dB	-15 a -20 dB
Sin señal	< -100 dB	< -20 dB

Antena	Posición	Banda	Estación Base	Nº muestras	% Tiempo	RSRP (dB)			RSRQ (dB)			RSRP (dB) PROMEDIO
						Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	
Antenova SR4L034-R, Circuito en L	Sin ranura	3	118023700	1207	50,67%	-87,80	-92,05	-99,00	-8,30	-9,80	-17,00	-92,51
		1	118023694	1154	48,45%	-91,20	-93,03	-97,90	-8,10	-9,28	-16,60	
		1	118023704	10	0,42%	-93,50	-94,08	-95,60	-8,80	-10,22	-11,10	
		20	118023701	6	0,25%	-76,90	-77,50	-78,40	-7,30	-9,22	-12,20	
		3	117955614	4	0,17%	-98,90	-99,30	-100,10	-11,70	-13,30	-14,90	
		3	118023690	1	0,04%	-100,80	-100,80	-100,80	-19,40	-19,40	-19,40	
	Ranura pequeña	3	118023700	1754	66,95%	-80,40	-82,08	-89,30	-8,50	-10,32	-17,40	-86,07
		1	118023694	676	25,80%	-96,50	-97,09	-98,10	-9,10	-9,83	-14,70	
		3	118023690	85	3,24%	-82,00	-82,92	-88,00	-9,40	-11,45	-16,80	
		20	118023701	55	2,10%	-75,80	-77,61	-80,00	-7,30	-12,04	-16,80	
		1	118023704	48	1,83%	-92,90	-95,73	-98,40	-8,70	-10,12	-14,90	
	Ranura pequeña	3	118023700	493	90,46%	-80,00	-82,41	-89,10	-8,60	-10,67	-15,90	-83,35
		1	118023694	46	8,44%	-92,60	-94,01	-95,50	-8,00	-8,50	-11,10	
		20	118023701	4	0,73%	-75,00	-75,12	-75,50	-7,70	-9,52	-11,10	
		1	118023704	1	0,18%	-96,30	-96,30	-96,30	-11,50	-11,50	-11,50	
		3	118023690	1	0,18%	-83,40	-83,40	-83,40	-10,90	-10,90	-10,90	
	Ranura pequeña	3	118023700	3435	62,49%	-78,20	-80,85	-87,70	-8,80	-10,50	-17,80	-87,14
		1	118023694	1629	29,63%	-94,20	-98,88	-103,40	-7,60	-8,66	-14,70	
		1	118023704	259	4,71%	-98,80	-101,96	-105,50	-9,00	-10,47	-15,10	
		3	118023690	169	3,07%	-79,30	-81,42	-85,40	-9,20	-11,47	-17,00	
		20	118023701	1	0,02%	-78,90	-78,90	-78,90	-11,50	-11,50	-11,50	
	Ranura mediana	3	118023700	423	82,30%	-77,90	-79,93	-85,30	-7,90	-10,77	-15,50	-82,09
		1	118023694	91	17,70%	-89,70	-92,15	-96,10	-7,70	-8,68	-12,10	
	Ranura mediana	3	118023690	1224	51,45%	-77,90	-79,31	-86,20	-9,30	-10,63	-16,10	-81,28
		1	118023694	575	24,17%	-87,10	-88,72	-95,80	-8,00	-10,04	-14,00	
		3	118023700	574	24,13%	-77,50	-78,70	-87,00	-8,40	-10,31	-16,60	
		3	117987348	1	0,04%	-101,00	-101,00	-101,00	-14,50	-14,50	-14,50	
	Ranura mediana	3	118023700	1328	50,73%	-78,50	-80,29	-87,00	-8,00	-9,93	-16,40	-83,72
		3	118023690	658	25,13%	-80,60	-81,70	-85,50	-9,40	-11,11	-17,80	
		1	118023694	616	23,53%	-89,00	-93,35	-98,80	-7,60	-8,32	-15,40	
		20	118023701	14	0,53%	-92,50	-92,94	-93,40	-13,20	-15,02	-16,00	
	Ranura mediana	3	118023700	233	58,99%	-81,80	-84,93	-90,50	-8,10	-10,43	-15,20	-86,93
		1	118023694	103	26,08%	-91,40	-92,08	-92,90	-8,30	-9,08	-14,40	
		3	118023690	44	11,14%	-83,20	-85,19	-86,50	-9,20	-11,05	-14,50	
		1	118023704	14	3,54%	-93,20	-93,81	-94,30	-9,90	-11,07	-13,90	
	Ranura mediana	3	118023700	290	73,42%	-77,60	-78,66	-91,30	-8,30	-10,20	-15,70	-84,62
1		118023704	64	16,20%	-98,80	-100,59	-105,30	-9,00	-10,60	-14,70		
1		118023694	41	10,38%	-98,70	-101,89	-104,20	-9,40	-11,36	-15,30		
Ranura mediana	3	118023700	3879	70,53%	-77,70	-79,73	-85,60	-8,30	-9,98	-16,50	-84,43	
	1	118023694	1616	29,38%	-89,70	-95,89	-101,40	-7,60	-9,26	-13,70		
	1	118023704	1	0,02%	-98,10	-98,10	-98,10	-10,80	-10,80	-10,80		
	1	118023694	2013	76,83%	-88,30	-89,73	-99,60	-8,10	-8,76	-15,50		
Ranura grande	3	118023700	602	22,98%	-86,80	-89,01	-140,00	-7,30	-9,98	-20,00	-89,55	
	3	117933578	4	0,15%	-101,10	-101,18	-101,30	-10,80	-12,30	-13,50		
	1	118023694	412	98,10%	-88,10	-89,32	-92,90	-8,40	-9,43	-15,10		
Ranura grande	3	118023700	6	1,43%	-89,20	-92,05	-96,40	-8,10	-8,93	-9,50	-89,37	
	1	118023704	2	0,48%	-89,80	-89,90	-90,00	-9,50	-10,15	-10,80		
	3	118023700	3891	70,89%	-83,40	-85,88	-94,50	-8,40	-10,46	-16,70		
Ranura grande	1	118023694	1491	27,16%	-89,90	-91,73	-100,50	-7,80	-8,62	-13,80	-87,42	
	3	118023690	97	1,77%	-85,70	-87,02	-92,20	-9,50	-11,41	-16,60		
	1	118023704	5	0,09%	-91,90	-94,12	-95,90	-10,00	-10,92	-12,70		
	3	118023700	2630	85,61%	-71,70	-74,42	-85,30	-4,10	-7,98	-15,20		
Módulo de plástico grande	1	118023694	420	13,67%	-82,60	-83,83	-87,40	-8,80	-9,93	-15,40	-75,74	
	1	118023704	20	0,65%	-83,20	-84,54	-87,20	-9,00	-10,02	-13,70		
	3	118023690	1	0,03%	-79,60	-79,60	-79,60	-9,70	-9,70	-9,70		

Anexo III. Resultados de cobertura con antenas flexibles

Banda	Frecuencia (MHz)
1	2100 (1920-2170)
3	1800 (1710-1885)
20	800 (791-862)

Leyenda	RSRP	RSRQ
Excelente	> -80 dB	> -10 dB
Bueno	-80 a -90 dB	-10 a -15 dB
Pobre	-90 a -100 dB	-15 a -20 dB
Sin señal	< -100 dB	< -20 dB

Antena	Posición	Banda	Estación Base	Nº muestras	% Tiempo	RSRP (dB)			RSRQ (dB)			RSRP (dB) PROMEDIO
						Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	
Molex 105263-0001 (106,7 x 13 mm)	Ranura grande	3	118023700	812	97,48%	-70,90	-81,42	-96,90	-7,70	-10,25	-15,70	-81,73
		3	118023690	12	1,44%	-96,70	-98,81	-101,30	-10,80	-11,93	-15,20	
		3	117955614	4	0,48%	-97,20	-98,17	-99,40	-10,10	-11,22	-13,30	
		1	118023704	2	0,24%	-97,40	-97,45	-97,50	-8,90	-9,15	-9,40	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023700	403	57,16%	-74,30	-75,28	-88,30	-8,20	-10,57	-15,00	-77,58
		1	118023694	247	35,04%	-80,90	-81,95	-95,00	-6,80	-7,31	-12,30	
		3	118023690	53	7,52%	-74,50	-75,93	-76,40	-9,40	-11,45	-16,50	
Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm)	Ranura grande	3	118023700	252	79,50%	-77,00	-79,14	-91,90	-8,40	-10,98	-15,80	-80,52
		1	118023694	54	17,03%	-85,80	-86,79	-90,30	-7,60	-8,49	-13,60	
		3	118023690	9	2,84%	-79,60	-80,20	-80,90	-10,30	-11,42	-13,70	
		20	118023701	1	0,32%	-82,80	-82,80	-82,80	-9,50	-9,50	-9,50	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023700	164	55,03%	-70,80	-72,02	-82,90	-7,00	-9,50	-15,40	-72,15
		1	118023694	134	44,97%	-71,20	-72,32	-74,20	-6,80	-7,44	-12,00	
Molex 209142-0180 (85 x 14,5 mm)	Ranura grande	3	118023700	294	70,50%	-83,70	-85,27	-89,60	-8,70	-10,80	-15,60	-88,80
		1	118023704	62	14,87%	-94,20	-96,86	-98,20	-7,50	-8,99	-13,50	
		1	118023694	54	12,95%	-97,50	-98,99	-100,70	-9,00	-11,22	-14,90	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023690	7	1,68%	-85,00	-87,04	-89,40	-9,30	-11,19	-15,10	-73,50
		3	118023700	293	70,26%	-68,70	-70,43	-75,60	-7,80	-9,93	-15,10	
		1	118023694	123	29,50%	-79,00	-80,80	-87,00	-7,10	-7,81	-11,20	
Linx ANT- LPC-FPC-100 (64 x 17 mm)	Ranura grande	1	118023694	314	77,53%	-92,70	-96,15	-99,60	-7,50	-8,93	-12,80	-91,32
		3	118023700	91	22,47%	-73,20	-74,64	-79,10	-8,40	-9,94	-14,60	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023700	210	51,60%	-72,90	-74,79	-81,80	-7,10	-9,27	-15,30	-76,06
		1	118023694	187	45,95%	-75,30	-76,61	-84,20	-6,70	-7,11	-9,10	
Antenova SRFC015-150 (80 x 20 mm)	Ranura grande	3	118023700	271	94,10%	-80,30	-81,96	-86,30	-8,40	-10,05	-15,90	-82,62
		1	118023694	17	5,90%	-92,60	-93,08	-93,60	-8,60	-9,61	-12,70	
	Módulo de plástico pequeño	3	118023700	202	68,94%	-67,80	-68,91	-83,20	-7,30	-9,21	-15,40	-70,81
		1	118023694	90	30,72%	-73,30	-75,06	-81,70	-7,00	-7,59	-11,20	
RF Solutions ANT- GFPCB2180- UFL (80 x 21 mm)	Ranura grande	3	118023700	372	62,79%	-83,00	-84,32	-89,00	-8,50	-10,70	-16,10	-89,83
		1	118023694	206	34,22%	-96,40	-97,49	-100,20	-8,20	-9,28	-14,20	
		20	118023701	13	2,16%	-86,80	-89,19	-98,00	-9,00	-11,84	-18,90	
		3	118023690	6	1,00%	-85,20	-85,48	-85,70	-11,30	-13,80	-15,40	
		20	118023691	4	0,66%	-89,00	-89,60	-89,90	-12,00	-13,35	-14,90	
	Módulo de plástico pequeño	1	118023694	237	60,15%	-76,40	-77,82	-88,00	-6,70	-7,15	-13,80	-76,06
		3	118023700	151	38,32%	-70,90	-73,00	-91,10	-6,70	-9,41	-15,60	
RF Solutions ANT- GFPCB1540- UFL (40 x 15 mm)	Ranura grande	3	118023700	302	65,65%	-84,20	-87,23	-92,70	-7,90	-10,22	-15,20	-86,67
		1	118023694	122	26,52%	-84,20	-85,47	-90,00	-8,00	-8,80	-14,10	
		1	118023704	20	4,35%	-84,70	-86,51	-89,10	-9,60	-10,48	-14,30	
		3	118023690	9	1,96%	-86,90	-87,56	-90,70	-9,90	-11,21	-13,10	
	Módulo de plástico pequeño	20	118023701	7	1,52%	-82,00	-82,57	-83,20	-8,20	-9,37	-10,80	-74,62
		3	118023700	252	54,66%	-71,90	-74,09	-82,30	-8,30	-10,19	-15,20	
		3	118023690	193	41,87%	-73,40	-75,48	-82,50	-9,70	-11,63	-18,10	
		1	118023694	16	3,47%	-71,90	-72,54	-73,10	-6,80	-7,14	-8,50	

Anexo IV. Resultados de cobertura con antena Molex 212570-0150

Banda	Frecuencia (MHz)
1	2100 (1920-2170)
3	1800 (1710-1885)
20	800 (791-862)

Leyenda	RSRP	RSRQ
Excelente	> -80 dB	> -10 dB
Bueno	-80 a -90 dB	-10 a -15 dB
Pobre	-90 a -100 dB	-15 a -20 dB
Sin señal	< -100 dB	< -20 dB

Antena	Posición	Banda	Estación Base	Nº muestras	% Tiempo	RSRP (dB)			RSRQ (dB)			RSRP (dB) PROMEDIO
						Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	
Molex 212570-0150 (40,4 x 15,4 mm)	Ranura pequeña	3	118023700	2926	69,87%	-86,50	-89,78	-98,60	-8,20	-9,88	-16,30	-90,47
		1	118023694	1044	24,93%	-91,50	-93,44	-102,40	-7,20	-8,04	-12,60	
		20	118023701	132	3,15%	-80,00	-81,53	-85,00	-7,00	-8,65	-14,30	
		3	118023690	85	2,03%	-90,30	-91,30	-91,80	-10,30	-11,86	-15,30	
		1	118023704	1	0,02%	-103,00	-103,00	-103,00	-10,30	-10,30	-10,30	
	Ranura mediana	3	118023700	2172	74,33%	-79,90	-82,31	-95,30	-5,20	-9,35	-16,50	-82,63
		3	118023690	605	20,70%	-80,80	-82,66	-92,20	-5,70	-10,66	-15,90	
		1	118023704	137	4,69%	-90,10	-91,91	-98,10	-8,30	-10,01	-14,90	
	Ranura grande	1	118023694	1	0,03%	-93,10	-93,10	-93,10	-9,70	-9,70	-9,70	-88,51
		3	118023700	1359	57,05%	-83,60	-85,73	-95,50	-8,00	-9,70	-15,70	
		1	118023694	966	40,55%	-91,00	-92,55	-98,40	-8,00	-8,83	-16,00	
		3	118023690	43	1,81%	-84,80	-86,21	-88,20	-10,20	-12,10	-16,80	
		1	118023704	12	0,50%	-93,90	-94,79	-95,30	-6,50	-8,97	-12,70	
	Módulo de plástico pequeño	3	117914398	1	0,04%	-102,30	-102,30	-102,30	-10,70	-10,70	-10,70	-74,75
		3	118023700	2641	85,14%	-71,50	-73,75	-86,90	-3,80	-7,42	-15,70	
		1	118023694	430	13,86%	-79,90	-81,52	-88,80	-7,40	-8,31	-13,20	
		20	118023701	16	0,52%	-81,60	-84,64	-87,50	-8,20	-10,08	-12,50	
	Módulo de plástico grande	1	118023704	8	0,26%	-83,50	-84,80	-86,00	-10,50	-11,21	-12,10	-71,01
		3	118023700	2850	97,60%	-69,50	-70,93	-88,10	-3,50	-7,72	-15,60	
		1	118023694	58	1,99%	-79,90	-81,43	-90,10	-8,10	-8,97	-13,10	
20		118023701	3	0,10%	-82,10	-82,17	-82,20	-8,80	-9,83	-10,90		
3		118023690	1	0,03%	-76,60	-76,60	-76,60	-7,50	-7,50	-7,50		
		3	117914398	1	0,03%	-91,00	-91,00	-91,00	-14,30	-14,30	-14,30	
		3	118026762	1	0,03%	-98,80	-98,80	-98,80	-12,70	-12,70	-12,70	

Anexo V. Resultados de cobertura en instalaciones piloto

Banda	Frecuencia (MHz)
1	2100 (1920-2170)
3	1800 (1710-1885)
20	800 (791-862)

LTE (4G)		
Leyenda	RSRP	RSRQ
Excelente	> -80 dB	> -10 dB
Bueno	-80 a -90 dB	-10 a -15 dB
Pobre	-90 a -100 dB	-15 a -20 dB
Sin señal	< -100 dB	< -20 dB

UMTS (3G)		
Leyenda	RSCP	EC/IO
Excelente	> -60	> -6
Bueno	-60 a -75	-6 a -10
Justo	-75 a -85	-
Pobre	-85 a -95	-10 a -25
Muy pobre	-95 a -124	-

Instalación	Antena	SIM	Banda	Estación Base	Muestras	% Tiempo	RSRP (dB)			RSRQ (dB)			PROMEDIO
							Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	
Piloto 01	Circuito rectangular, Sin ranura	Electrónica	Sin conexión	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	-
	Circuito en L, Ranura mediana	Electrónica	3	117954570	4015	74,24%	-106,20	-109,18	-114,30	-11,50	-16,35	-20,00	-108,86
			20	117954591	742	13,72%	-103,50	-107,91	-110,90	-12,80	-16,67	-20,00	
			3	117954590	241	4,46%	-109,10	-110,82	-113,20	-14,90	-17,69	-20,00	
			20	117954571	238	4,40%	-103,80	-108,47	-111,10	-12,30	-17,82	-20,00	
			1	117954574	118	2,18%	-114,00	-115,77	-119,80	-17,90	-19,34	-20,00	
			3	117767188	26	0,48%	-113,50	-115,50	-117,20	-18,20	-19,78	-20,00	
	1	117954594	10	0,18%	-114,90	-116,01	-117,10	-17,90	-19,54	-20,00			
	Circuito en L, Ranura mediana	Multioperador	IMT 2000	255683927	3778	95,50%	-88,00	-93,40	-100,00	-4,50	-7,92	-14,50	-93,45
			IMT 2000	255680754	152	3,84%	-92,00	-94,68	-98,00	-6,50	-8,64	-13,50	
IMT 2000			255683927	25	0,63%	-90,00	-93,20	-96,00	-5,50	-7,68	-9,50		
IMT 2000			255680754	1	0,03%	-94,00	-94,00	-94,00	-7,00	-7,00	-7,00		
Piloto 02	Circuito rectangular, Sin ranura	Electrónica	3	117950474	7165	98,31%	-82,40	-87,03	-96,70	-3,40	-6,21	-14,60	-86,90
			20	117950475	119	1,63%	-81,50	-82,40	-83,50	-6,40	-7,61	-14,00	
Piloto 03	Circuito rectangular, Sin ranura	Electrónica	Sin conexión	-	-	100,00%	-	-	-	-	-	-	-
	Circuito rectangular, Sin ranura	Multioperador	Error	Error	3055	79,14%	-124,00	-124,00	-124,00	-25,00	-25,00	-25,00	-119,81
			WCDMA 900	21469796	690	17,84%	-99,00	-103,29	-113,20	-1,00	-17,41	-25,00	
			WCDMA 900	21469101	89	2,30%	-104,00	-107,51	-111,70	-14,50	-17,94	-21,50	
			IMT 2000	21469796	21	0,54%	-124,00	-124,00	-124,00	-20,00	-20,00	-20,00	
			20	250967672	4	0,10%	-109,60	-110,18	-111,40	-17,70	-18,95	-20,00	
	EGSM 900	43952	3	0,08%	-	-	-	-	-	-	-		
Circuito en L, Ranura mediana	Electrónica	3	117922570	19	100,00%	-110,50	-112,66	-116,60	-13,20	-16,94	-20,00	-112,66	
Mólex 212570-0150, Módulo de plástico pequeño	Electrónica	3	117922570	2211	92,86%	-85,00	-90,89	-121,00	-3,60	-8,91	-16,00	-90,92	
		20	117922571	169	7,10%	-88,00	-91,78	-94,00	-7,60	-11,43	-15,60		