



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA RECEPCIÓN DEL ESTÁNDAR DE RADIO
DIGITAL DRM (DIGITAL RADIO MONDIALE) EN ONDA
MEDIA EN INTERIORES**

Autor: Igor Fernandez Perez

Director: Dr. Pablo Angueira Buceta

Bilbao, Junio de 2011

© Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
- Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua (UPV/EHU)
- EHU Press (UPV/EHU)
ISBN: 978-84-9860-901-1

Aita ta Amari

ESKER ONAK

Eskerrik asko danori.

TSR-ko lankide ta proiektugile guztioi, eskeinitako laguntza, jakintza eta giroagatik.

Nire zuzendariari, laguntza ta askotan euki duen nireganako pazientziagatik.

Nire neskari, tesiaren bide luze osoan egunero hor egoteagatik.

Anaiari, familiari ta benetazko lagun guztiei, aisi tarteetan bizi izan ditugun momentu onengatik.

Nire txakurrari, gehienetan lo bazen ere, tesia idazterakoan nire alboan egoteagatik.

Ta azkenik, zuen galera dela eta askotan dena bertan behera uzteko gogak euki ditudan arren, badakit nitaz harro sentiarazten zintuztedala ikasketak aurrera ateratzen nituenean ta tesi hau bukatzea zuentzako garrantzitsua izango zela. Eskerrik asko beraz, tesi honen jatorri ta motibazioa zaretelako.

Egunero gogoan zaituztet.

RESUMEN

Los sistemas de radio digital estandarizados por los organismos internacionales para la banda MF o banda de Onda Media son los denominados DRM y HD Radio / IBOC. Estos sistemas digitales son muy sensibles a la variación del campo eléctrico, en el sentido de que el umbral entre la recepción correcta e incorrecta es muy abrupto y no gradual como ocurre en los sistemas analógicos.

Se han llevado a cabo numerosas campañas de medidas durante la última década en entornos rurales e incluso entornos urbanos para caracterizar con mayor precisión la propagación por onda de superficie en Onda Media en presencia de obstáculos en el terreno, llegándose a observar desvanecimientos importantes sobre todo en entornos urbanos.

Se presupone que muchos usuarios potenciales de los servicios de radio digital se situarían en el interior de edificios, por lo que es necesario estudiar o caracterizar la recepción de señales en dichos entornos, de forma que se puedan aportar herramientas más detalladas para el cálculo de coberturas en Onda Media en interiores.

En este sentido, el nivel de ruido radioeléctrico juega un papel tan importante como el nivel de señal y dado que en entornos urbanos se ha detectado un incremento considerable en los niveles de ruido en Onda Media, se precisan también datos que permitan caracterizar el ruido radioeléctrico actual presente en interiores en esta banda.

En esta tesis se han llevado a cabo extensas campañas de medidas en el interior de edificios con el objetivo de caracterizar estadísticamente la variabilidad espacial y temporal tanto de la señal como del ruido radioeléctrico en Onda Media en este tipo de entornos. El objetivo sería ofrecer las herramientas más precisas posibles para el cálculo o caracterización de la relación señal a ruido en el interior de edificios en Onda Media, de forma que los operadores puedan realizar una correcta planificación de red.

ABSTRACT

The digital radio systems standardized by international organizations in MW (Medium Wave) are DRM and HD Radio / IBOC. These digital systems are very sensible to field strength changes, since the threshold between correct and incorrect reception is very abrupt and not gradual as in analogue systems.

A lot of measurements campaigns have been carried out in rural and urban environments during last decade in order to characterize the ground wave propagation in MW more precisely in presence of obstacles in the terrain and important signal fadings have been observed in urban environments.

A significant amount of MW listeners may be placed indoors, so it is necessary to study or characterize signal reception in these environments, in order to be able to offer planning tools to calculate indoor coverage in MW.

Radio electric noise also plays an important role in this matter and since a remarkable increase in noise levels in MW in urban outdoor environments has been observed, indoor noise levels in MW need to be characterized too.

In this thesis indoor signal and noise spatial and time variability have been statistically characterized on the basis of extensive indoor measurements campaigns in MW in different buildings located in urban environments. The main objective is to offer precise tools in order to calculate or characterize signal to noise ratio in MW indoors. This way, broadcasters will be able to carry out correct indoor network planning in MW.

LABURPENA

Erakunde internazionalak MW (Medium Wave) bandarako estandarizaturiko irrati digitalerako sistemak DRM eta HD Radio / IBOC dira. Sistema hauetan eremu elektromagnetikoaren aldakortasunak garrantzi handia dauka, detekzio egokitik ez-egokira dagoen trantsizioa oso zorrotza baita eta ez graduala sistema analogikoetan gertatzen den moduan.

Azkeneko hamarkadan neurketa kanpaina asko burutu dira nekazal ingurune eta hiri guneeetan ere, lurrazal uhin bidezko propagazioa zehazkiago karakterizatzeko lursailean oztopoak daudenean eta ahuldura garrantzitsuak daudela ikusi da, batez ere hiri guneeetan.

Irrati digitalaren zerbitzuaren erabiltzaile potentzial asko eraikuntzen barruan egongo direla auresuposatzen da. Beraz, seinaleen jazotzea azertu edo karakterizatu beharra dago ingurune hoietan, MW bandan eraikuntzen barruko estalduren kalkulurako tresnak eskeini ahal izateko.

Zentzu honetan, zarata irratielektrikoaren mailak seinalearen mailak bezain besteko garrantzia dauka eta, hiri guneeetan zarata mailen gehikuntza nabarmena detektatu denez MW bandan, gaur egungo zarata irratielektrikoaren maila eraikuntzen barruan karakterizatu ahal izateko datuak ere beharrezkoak dira.

Tesi honetan neurketa kanpaina luzeak burutu dira eraikuntzen barruan, MW bandan seinale eta zarata irratielektrikoaren aldakortasun espaziala eta denborazkoa estatistikoki karakterizatzeko ingurune hauetan. Azkeneko helburua, MW bandako seinale zaratarekiko erlazioa karakterizatzeko ahalik eta tresnik zehatzenak eskeintzea da, operadoreek sare-planifikazio egokia burutu dezaten.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS	1
<hr/>	
1. ANTECEDENTES _____	3
2. OBJETO DE LA TESIS _____	6
3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO _____	7
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	9
<hr/>	
1. INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DRM _____	11
1.1 <i>El consorcio DRM</i>	11
1.2 <i>Descripción general del sistema</i>	11
1.3 <i>Arquitectura</i>	13
1.4 <i>Estado del arte del sistema DRM</i>	17
2. PROPAGACIÓN DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS EN ONDA MEDIA _____	23
2.1 <i>Propagación en la banda de Onda Media</i>	23
2.2 <i>Propagación por onda terrestre</i>	23
2.3 <i>Propagación por onda ionosférica</i>	25
2.4 <i>Modelos de propagación y métodos de predicción para la onda de superficie</i>	27
3. PROPAGACIÓN DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS EN INTERIORES _____	36
3.1 <i>Introducción</i>	36
3.2 <i>Estudio bibliográfico de pruebas empíricas de propagación en interiores</i>	38
4. RUIDO RADIOELÉCTRICO _____	46
5. CONCLUSIONES _____	50

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y CAMPAÑAS DE MEDIDAS **51**

1. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	53
2. METODOLOGÍA DE MEDIDA	57
3. REDES DE DIFUSIÓN	58
3.1 Red de difusión de la campaña de medidas en Madrid	58
3.2 Red de difusión de la campaña de medidas en Bilbao y alrededores	59
3.3 Red de difusión de la campaña de medidas en Vitoria-Gasteiz	60
4. SISTEMAS DE MEDIDAS	61
4.1 Equipamiento de medidas para el sistema DRM	61
4.2 Equipamiento de medidas para el sistema AM	63
4.3 Calibración de los sistemas de medidas	65
5. PLANIFICACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDAS	68
5.1 Criterios de planificación de las medidas	68
5.2 Resumen de la base de datos	68

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA RECEPCIÓN DE SEÑALES DE RADIODIFUSIÓN EN ONDA MEDIA EN INTERIORES **75**

1. DATOS EMPÍRICOS	77
2. ESTUDIO DE LA RECEPCIÓN DEL ESTÁNDAR DRM EN ONDA MEDIA EN INTERIORES	79
2.1 Estudio del nivel de señal DRM en Onda Media en interiores	79
2.2 Estudio de la cobertura del sistema DRM en Onda Media en interiores	81
3. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SEÑAL RADIODIFUNDIR EN ONDA MEDIA EN INTERIORES	85
3.1 Variabilidad con la distancia y frecuencia	85
3.2 Variabilidad con el tipo de estancia	87
3.3 Variabilidad con la altura o número de planta	88

3.4	<i>Variabilidad con el entorno próximo al edificio.....</i>	89
4.	PREDICCIÓN DEL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE LA SEÑAL EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	91
4.1	<i>Modelo empírico de predicción.....</i>	91
4.2	<i>Validación del modelo de predicción.....</i>	91
4.3	<i>Discusión de validez y aplicación del modelo de predicción.....</i>	92
5.	PÉRDIDAS POR PENETRACIÓN EN EDIFICIOS EN ONDA MEDIA _____	94
5.1	<i>Variabilidad espacial del campo eléctrico mediano recibido en Onda Media en exteriores.....</i>	94
5.2	<i>Cálculo de las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media</i>	96
6.	PÉRDIDAS DEL CAMPO ELÉCTRICO MEDIANO DE LA SEÑAL EN ONDA MEDIA EN INTERIORES CON RESPECTO AL VALOR RECOMENDADO EN LA ITU-R P.368 (<i>LITU: LOSSES RESPECT TO ITU</i>) _____	99
6.1	<i>LITU en interiores en Onda Media</i>	99
6.2	<i>LITU en exteriores en Onda Media.....</i>	101
6.3	<i>Comparativa entre LITU en exteriores e interiores en Onda Media</i>	102
7.	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR SE AJUSTA AL NIVEL DE CAMPO ELÉCTRICO MEDIANO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	104
8.	ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA SEÑAL RADIODIFUNDIRA EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	106
9.	CONCLUSIONES _____	108
 CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES		109
<hr/>		
1.	DATOS EMPÍRICOS _____	111
2.	ESTUDIO DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES EN LA CAMPAÑA DE MEDIDAS DE MADRID _____	112
3.	ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	113
3.1	<i>Variabilidad con el tipo de edificio.....</i>	113

3.2	<i>Variabilidad con el número de planta</i>	114
3.3	<i>Estudio de la dependencia de la frecuencia</i>	115
4.	PREDICCIÓN DEL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	118
4.1	<i>Modelo empírico de predicción</i>	118
4.2	<i>Validación del modelo de predicción</i>	119
5.	ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR SE AJUSTA AL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	120
6.	COMPARATIVA DE LOS NIVELES MEDIANOS DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES CON LOS NIVELES PRESENTES EN EL ENTORNO INMEDIATAMENTE EXTERIOR Y LOS RECOMENDADOS EN LA ITU-R P.372 _____	122
6.1	<i>Campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en exteriores</i>	122
6.2	<i>Comparativa entre los niveles medianos de campo eléctrico de ruido en Onda Media en interiores, exteriores y los recomendados en la ITU-R P.372</i>	126
7.	ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES _____	128
8.	CONCLUSIONES _____	134
 CAPÍTULO 6. APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS		135
<hr/>		
1.	APORTACIONES _____	137
1.1	<i>Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la señal en Onda Media en interiores</i> ..	137
1.2	<i>Estudio de la variabilidad espacial y temporal del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores</i>	138
1.3	<i>Planificación de red en Onda Media para cobertura en interiores</i>	139
2.	DIFUSIÓN DE RESULTADOS _____	143
2.1	<i>Organismos internacionales de regulación</i>	143
2.2	<i>Revistas internacionales</i>	144
2.3	<i>Congresos internacionales</i>	145

3. LÍNEAS FUTURAS _____	147
-------------------------	-----

ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDAS	149
--	------------

1. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN MADRID _____	151
---------------------------------------	-----

2. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN BILBAO Y ALREDEDORES _____	155
---	-----

3. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN VITORIA-GASTEIZ _____	163
--	-----

REFERENCIAS Y GLOSARIO	167
-------------------------------	------------

1. REFERENCIAS _____	169
----------------------	-----

2. GLOSARIO _____	175
-------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Arquitectura del sistema DRM: diagrama de bloques de la transmisión de la señal.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Curvas de predicción del nivel de campo eléctrico para trayectos homogéneos recomendadas por la ITU-R P.368-9. Ejemplo de curvas para una frecuencia fija y diferentes tipos de suelo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4. Curvas de predicción de nivel de campo eléctrico para trayectos homogéneos recomendadas por la ITU-R P.368-9. Ejemplo de curvas para un rango de frecuencias y tierra húmeda.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5. Predicción del nivel de campo eléctrico según el método de Millington en una discontinuidad tierra-mar.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6. Método de Millington: ejemplo de aplicación a un trayecto mixto de tres secciones.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7. Factor de ruido externo en la banda de 10 kHz a 100 MHz.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 8. Factor de ruido externo debido a ruido artificial.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 9. PSD de una señal de voz.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 10. PSD de una señal de voz modulada en AM.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 11. Estación transmisora en Onda Media de Pozuelo (Madrid).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 12. Esquema del sistema de transmisión DRM instalado en Pozuelo (Madrid).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema DRM con antena de varilla pasiva.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 14. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema DRM con antena de aro activa.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 15. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema AM con antena de varilla pasiva.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 16. Diagrama de bloques del sistema de monitorización para señales AM con antena pasiva con acoplamiento magnético.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 17. Emplazamiento del transmisor y los edificios en Madrid.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 18. Emplazamiento de los edificios y transmisores de Bilbao y alrededores.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 19. Emplazamiento de los edificios y transmisores de Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 20. Campo eléctrico mediano de la señal DRM en cada estancia de Madrid en función de la distancia.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 21. Nivel de campo mediano de la señal DRM en cada edificio de Madrid en función del número de planta.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 22. Evolución temporal MER y AudioQ en una localización de Madrid.....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 23. Evolución temporal MER y AudioQ en una localización de Madrid próxima a un ascensor.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 24. Predicción de cobertura en Madrid para diferentes potencias de emisión.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 25. Nivel de campo eléctrico mediano en las estancias de Bilbao para 990 y 1305 kHz.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 26. Nivel de campo eléctrico mediano en las estancias de Vitoria-Gasteiz para 1197 y 1602 kHz.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 27. Nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media y desviación estándar con las localizaciones en función del tipo de estancia interior en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 28. Nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media y desviación estándar con las localizaciones en función del número de planta en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 29. Nivel de campo eléctrico mediano en los edificios F, N y O.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 30. Entorno próximo de los edificios F, N y O y dirección de los transmisores.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 31. Comparación de las curvas de la recomendación ITU-R P.368-9 con las curvas de predicción en interiores.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 32. Nivel de campo eléctrico mediano en localizaciones exteriores de Bilbao para 990 y 1305 kHz.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 33. Nivel de campo eléctrico mediano en localizaciones exteriores de Vitoria-Gasteiz para 1197 y 1602 kHz.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 34. Campo mediano y desviación estándar con las localizaciones en las fachadas iluminadas y no iluminadas de la señal en exteriores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 35. Campo mediano de la señal en exteriores en función del número de planta y desviación estándar con las localizaciones en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 36. Predicción de las pérdidas con respecto a las curvas de la ITU-R P.368-9 (LITU) en interiores.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 37. Curvas predichas para interiores en Onda Media restando las pérdidas (LITU) a las curvas de la ITU-R P.368-9 con valores de $\sigma=0,016$ S/m y $\varepsilon=30$ para 600 kHz y 1600 kHz.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 38. Predicción de las pérdidas o LITU en exteriores con respecto a las curvas de la ITU-R P.368-9.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 39. Curvas de predicción de las pérdidas o LITU en exteriores e interiores con valores de $\sigma=0,005$ S/m para Bilbao y $\sigma=0,016$ S/m para Vitoria-Gasteiz, y $\varepsilon=30$ en ambos casos.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 40. Curvas de predicción de las pérdidas o LITU en exteriores e interiores con valores de $\sigma=0,1$ mS/m y $\varepsilon=30$ para Bilbao y Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 41. Niveles medianos de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones interiores en edificios de Bilbao para 675 kHz.....</i>	<i>113</i>

<i>Figura 42. Campo eléctrico mediano de ruido por plantas y frecuencia y desviación estándar con las localizaciones interiores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 43. Campo mediano de ruido y decilos superior e inferior con las localizaciones interiores en función de la frecuencia.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 44. Predicción del campo mediano de ruido en Onda Media en interiores.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 45. Niveles medianos de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones exteriores de edificios de Bilbao para 675 kHz.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 46. Campo eléctrico mediano de ruido por plantas y frecuencia y desviación estándar con las localizaciones exteriores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 47. Campo eléctrico mediano de ruido y decilos superior e inferior con las localizaciones exteriores en función de la frecuencia.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 48. Campo eléctrico mediano en Onda Media en interiores y exteriores en función de la frecuencia junto con las curvas de predicción.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 49. Campo eléctrico mediano en Onda Media en interiores y exteriores en función de la frecuencia suponiendo antena sin pérdidas junto con las curvas de predicción en el exterior de ciudades recogidas en la ITU-R P.372-9.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 50. Valores RMS con las localizaciones de las desviaciones estándar temporales de corta y larga duración de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 51. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en una localización próxima a un ascensor.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 52. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en otra localización próxima a un ascensor.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 53. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en otra localización no próxima a un ascensor.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 54. Desviación estándar temporal del ruido en función del campo eléctrico mediano del ruido en cada localización interior.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 55. C/N estimada en función de la distancia para una potencia de emisión de 1 kW y frecuencias de 600 kHz y 1600 kHz ($\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 56. Entorno del edificio MD1.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 57. Entorno del edificio MD2.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 58. Entorno del edificio MD3.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 59. Entorno del edificio MD4.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 60. Entorno del edificio MD5.....</i>	<i>153</i>

<i>Figura 61. Entorno del edificio MD6.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 62. Entorno del edificio MD7.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 63. Entorno del edificio A.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 64. Entorno del edificio B.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 65. Entorno del edificio C.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 66. Entorno del edificio D.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 67. Entorno del edificio E.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 68. Entorno del edificio F.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 69. Entorno del edificio G.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 70. Entorno del edificio H.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 71. Entorno del edificio I.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 72. Entorno del edificio J.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 73. Entorno del edificio K.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 74. Entorno del edificio L.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 75. Entorno del edificio M.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 76. Entorno del edificio N.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 77. Entorno del edificio O.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 78. Entorno del edificio P.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 79. Entorno del edificio Q.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 80. Entorno del edificio R.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 81. Entorno del edificio S.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 82. Entorno del edificio T.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 83. Entorno del edificio U.....</i>	<i>165</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Principales características de los modos OFDM definidos en el estándar DRM.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Atenuación de la señal DRM sufrida por obstáculos en 1260 kHz.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3. Pérdidas medias en Onda Media con respecto al valor de campo en calles anchas.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Valores del exponente de pérdidas y desviaciones estándar para diferentes frecuencias publicadas en [92].....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Pérdidas por penetración en edificios en diferentes frecuencias [106].....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6. Clasificación de entornos según Moltdar [108].....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7. Pérdidas por penetración medias (m) y desviaciones estándar (σ) en 900 MHz publicadas en [107].....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 8. Pérdidas por penetración en 0,2, 0,6 y 1,5 GHz publicadas en [112].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 9. Resumen bibliográfico de las pérdidas por penetración en bandas frecuenciales superiores.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 10. Valores de c y d para la fórmula (2.15) del factor de ruido artificial de la Figura 8.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 11. Desviaciones de los decilos del ruido artificial con las localizaciones y con el tiempo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 12. Configuración de transmisión del sistema DRM en Madrid.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13. Transmisiones AM analizadas en Bilbao y alrededores.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 14. Transmisiones AM analizadas en Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 15. Parámetros medidos en la señal DRM.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 16. Factores K de las antenas empleadas para el sistema AM.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Datos del medidor de campo ESPI3 de R&S.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 18. Ruido interno mediano y desviación estándar del medidor de campo ESPI3.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 19. Localizaciones de corta duración en Madrid.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 20. Localizaciones de corta duración en Bilbao y alrededores.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 21. Localizaciones de corta duración en Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 22. Horas diurnas en las localizaciones de larga duración de Bilbao y alrededores.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 23. Horas diurnas en las localizaciones de larga duración de Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>73</i>

<i>Tabla 24. Resumen de localizaciones de señal de corta duración en Madrid, Bilbao y Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 25. Resumen de localizaciones de señal de larga duración en Bilbao y Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 26. Diferencia entre el campo eléctrico mediano de señal DRM en exteriores e interiores en diferentes plantas.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 27. Valor RMS con las localizaciones de la desviación estándar temporal en los edificios de Madrid.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 28. MER promedio y porcentaje de localizaciones correctas en Madrid.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 29. Desviación estándar con las localizaciones en los edificios de Bilbao.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 30. Desviación estándar con las localizaciones en los edificios de Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 31. Pérdidas por penetración en edificios en los edificios A-B-C-D-E mediante un procedimiento similar al de la ITU-R.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 32. Pérdidas por penetración en los edificios A-B-C-D-E promediando las tres frecuencias.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 33. Pérdidas por penetración en edificios en el edificio P mediante un procedimiento similar al de la ITU-R.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 34. Pérdidas por penetración en el edificio P promediando las tres frecuencias.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 35. Estadísticos temporales de corta y larga duración de la señal en Onda Media en interiores.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 36. Estadísticos temporales de corta duración de la señal en Onda Media en exteriores.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 37. Resumen de localizaciones de corta duración para el estudio espacial y temporal a corto plazo del ruido radioeléctrico.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 38. Resumen de localizaciones de larga duración para el estudio temporal del ruido radioeléctrico a largo plazo.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 39. Estadísticos del campo eléctrico mediano de ruido en las localizaciones de cada uno de los edificios de Madrid.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 40. Desviación estándar con las localizaciones del ruido radioeléctrico mediano en interiores de los edificios de Bilbao.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 41. Desviación estándar con las localizaciones del ruido radioeléctrico mediano en interiores de los edificios de Vitoria-Gasteiz.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 42. Campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en interiores en función de la frecuencia.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 43. Figura de ruido mediana en interiores en función de la frecuencia.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 44. Estadísticos de variabilidad espacial del ruido radioeléctrico en interiores en función de la frecuencia.....</i>	<i>117</i>

<i>Tabla 45. Campo eléctrico mediano de ruido en exteriores en función de la frecuencia.</i>	124
<i>Tabla 46. Figura de ruido mediana en exteriores en función de la frecuencia.</i>	124
<i>Tabla 47. Estadísticos de variabilidad espacial de ruido en Onda Media en exteriores.</i>	124
<i>Tabla 48. Estadísticos de variabilidad temporal de corta y larga duración de ruido en Onda Media en interiores.</i>	128
<i>Tabla 49. Desviación estándar temporal en una localización próxima a un ascensor.</i>	130
<i>Tabla 50. Desviación estándar temporal en otra localización próxima a un ascensor.</i>	131
<i>Tabla 51. Desviación estándar temporal en otra localización no próxima a un ascensor.</i>	132
<i>Tabla 52. Estadísticos de variabilidad temporal de corta duración de ruido en Onda Media en exteriores.</i>	133
<i>Tabla 53. Campo eléctrico mediano de ruido radioeléctrico en interiores y exteriores en Onda Media.</i>	138
<i>Tabla 54. Valores RMS con las localizaciones de la desviación estándar temporal de corta y larga duración del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores.</i>	139
<i>Tabla 55. C/N (dB) estimada superada en el 50% de localizaciones interiores a 10 km de distancia para una potencia de emisión de 1 kW y una frecuencia de 600 kHz.</i>	141
<i>Tabla 56. C/N (dB) mínima para BER 10^{-4} y modo de robustez A de DRM.</i>	142

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS

Con los nuevos servicios de radiodifusión digital en Onda Media, la caracterización del nivel de señal en el interior de edificios se plantea como imprescindible. En esta banda de frecuencias, las condiciones de propagación son muy ventajosas y el hecho de tener la posibilidad de transmitir datos adicionales al propio audio con mejor calidad mediante los servicios digitales, hacen que esta banda de frecuencias haya adquirido un interés renovado.

Sin embargo, la cobertura en los servicios de radiodifusión digitales es mucho más sensible a las variaciones de campo eléctrico alrededor de su valor mediano, en comparación con los servicios de radio analógica. La propagación y variabilidad de la señal en esta banda únicamente han sido caracterizadas en entornos rurales y entornos urbanos exteriores, pero no en el interior de edificios, donde presumiblemente se situarían un gran número de receptores. Debido a ello, son necesarios estudios en profundidad de la variabilidad espacial y temporal del nivel de campo eléctrico tanto de la señal modulada como del ruido

radioeléctrico en el interior de edificios para poder realizar una planificación más precisa de los nuevos servicios de radiodifusión digital.

En este capítulo se presenta una justificación de la necesidad del estudio realizado en esta tesis y una descripción de los objetivos principales de la misma. Se finaliza el capítulo mostrando la organización de los capítulos que constituyen todo el documento de la tesis.

1. ANTECEDENTES

Los primeros servicios de radiodifusión en Onda Media se desarrollaron hace aproximadamente un siglo. En Onda Media se desarrolló un sistema basado en la modulación en amplitud o AM y debido a las bajas frecuencias empleadas y los modos de propagación en estas bandas, se obtenían amplias coberturas, presentando una gran ventaja para los radiodifusores.

Aunque hoy en día sigue habiendo un importante número de radiodifusores que emiten con la tecnología analógica AM, se podría decir que la radio FM, el DAB digital o los servicios de radio vía Internet han atraído a un número muy elevado de usuarios, por su mayor calidad y servicios adicionales, ya que la modulación AM es más sensible al ruido que la FM y las modulaciones digitales.

Sin embargo, las grandes áreas de cobertura que se alcanzan con la radiodifusión AM siguen siendo un importante motivo para que muchos radiodifusores sigan utilizando esas bandas con señales analógicas. Otro motivo importante podría ser el hecho de que los receptores analógicos basados en la detección por envolvente siguen siendo muy económicos, si bien no serían válidos para señales digitales.

Basándose en el argumento de que se consiguen amplias coberturas en las bandas de AM y con el objetivo de aumentar la calidad de la señal, en los últimos años han tenido auge nuevos sistemas de radiodifusión digital en las bandas inferiores a 30 MHz: DRM (Digital Radio Mondiale) o DRM30 y HD Radio System [1], [2], [3].

La aplicación de las técnicas digitales para la codificación de la señal, así como la modulación multiportadora, han revitalizado la banda MF (Medium Frequency) o de Onda Media, pues permiten aprovechar las extraordinarias condiciones de propagación y conseguir extensas áreas de cobertura, añadiendo a estas ventajas tradicionales las propias de un servicio digital: mayor calidad de audio, mayor robustez y la posibilidad de transmitir datos adicionales [4].

El sistema DRM ha sido aceptado por los principales organismos reguladores internacionales: en Octubre de 2002 por la ITU-R [5] y en Marzo de 2003 por la IEC [6]. El sistema HD Radio también es adoptado por la ITU-R [5] en 2002 (que denomina “*IBOC DSB System*” al sistema HD Radio para la banda AM).

Estos dos sistemas también han sido adoptados como estándares de radio digital terrestre por organismos nacionales y regionales de importante influencia, con el apoyo de radiodifusores y fabricantes del sector:

- En Europa, el European Telecommunications Standard Institute (ETSI) [7] adoptó el sistema DRM en 2001 como “*Technical Specification*”, y en Mayo de 2003 como “*ETSI Standard*”.
- En Estados Unidos, la Federal Communications Commission (FCC) propuso el sistema HD Radio para las bandas AM y FM en 2002 [8] y se aceptó definitivamente en 2007 [9]. Además, el National

Radio Systems Committee [10], organismo estandarizador respaldado por la National Association of Broadcasters y por la Consumer Electronics Association adoptó el sistema HD Radio para la banda FM en Noviembre de 2001 [11], y para la banda AM en Abril de 2002 [12].

Durante los últimos años se han llevado a cabo numerosas campañas de medidas con el objetivo de aportar datos más precisos para la planificación de red además de publicitar dichos sistemas. Por un lado se han llevado a cabo pruebas de campo del sistema DRM en varios países europeos [13]-[16], además de en otros países como México, India y Rusia [17]-[20]. Por otro lado, también ha habido pruebas experimentales del sistema HD Radio en países como Brasil e Indonesia [21].

Una de las primeras conclusiones del análisis de los datos de estas pruebas de campo fue que los métodos de predicción existentes para los modelos analógicos no eran válidos para los nuevos servicios digitales [16], [20], [22]-[24]. Haría falta ofrecer mayor precisión en el grado de servicio de los sistemas digitales, dado que la transición de una recepción correcta a incorrecta es más abrupta que en los sistemas analógicos. La variabilidad espacial observada es mayor que la tradicionalmente considerada en propagación por onda de superficie (uno de los modos de propagación más relevantes en Onda Media), ya que este modo de propagación ha sido considerado muy estable y sin variaciones significativas [25], [26]. También se han registrado desvanecimientos puntuales importantes [13], [15], [20], [23], [27] sobre todo en entornos exteriores urbanos, por lo que queda evidente la necesidad de actualizar o completar los estudios realizados con datos empíricos recogidos en el interior de edificios.

Por otro lado, el ruido radioeléctrico en esta banda de frecuencias tiene niveles superiores a los existentes en otras bandas, y es un factor que tradicionalmente se ha considerado decisivo en el cálculo de coberturas [25]. Campañas de medidas realizadas en España y México evidencian el notable incremento de la intensidad de ruido radioeléctrico en estas frecuencias durante los últimos años [28], demostrando la necesidad de actualizar los niveles recomendados por la ITU-R [29]. También se han detectado incrementos en los niveles de ruido en frecuencias algo superiores a las de Onda Media, en la banda de 26 MHz [30].

Por otro lado, hasta la fecha no se han caracterizado las pérdidas por penetración en edificios en la banda de Onda Media, en entornos urbanos. Este estudio resulta de crucial importancia a la hora de planificar una red de radio, ya que gran parte de los receptores de estos servicios se encuentran dentro de cualquier estancia dentro de un edificio. Se han venido realizando numerosos estudios de las pérdidas por penetración en edificios a lo largo de las últimas décadas pero siempre para bandas de frecuencias mucho más elevadas, debido a las emergentes exitosas aplicaciones en esas bandas. Sin embargo, la banda de Onda Media se ha quedado estancada en su servicio de radiodifusión analógica hasta la aparición de los citados nuevos servicios digitales, por lo que este estudio recobra un remarcado interés para poder realizar

una planificación adecuada. Por lo tanto, se tratará de caracterizar estadísticamente las variaciones espaciales de las pérdidas por penetración.

Otro estudio que se ha de llevar a cabo es el relacionado con la variabilidad temporal del nivel de campo eléctrico recibido. Los resultados de este estudio tienen aplicación en los modelos de propagación que se utilizan actualmente en sistemas de planificación radioeléctrica. Dichos modelos de propagación predicen el campo recibido por un receptor en un punto o en una zona y son una parte fundamental en las herramientas de planificación de redes radioeléctricas. La predicción consta habitualmente de dos etapas, la estimación del campo mediano recibido, y la variabilidad temporal alrededor de ese campo mediano. Aunque en ocasiones no se le da la importancia debida, estudios realizados demuestran que la estimación de la variabilidad temporal tiene tanta importancia como la propia predicción del campo mediano [31].

2. OBJETO DE LA TESIS

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar la recepción de señales de radiodifusión digital en el interior de edificios de núcleos urbanos en la banda de Onda Media, además de actualizar los niveles de ruido radioeléctrico en esa banda. Los objetivos parciales en vista a la consecución del objetivo principal son los siguientes:

- Estudio de la variación espacial del nivel de campo eléctrico de la señal y ruido radioeléctrico en Onda Media en el interior de edificios. Se caracterizará la influencia de la localización tridimensional del receptor dentro del edificio.
- Estudio de la variación temporal del nivel de campo eléctrico de señal y ruido radioeléctrico en Onda Media en el interior de edificios. Para que la recepción quede completamente caracterizada han de reflejarse las variaciones temporales de la señal y del ruido sobre sus valores medianos.
- Estudio de la variación del nivel de campo eléctrico de señal y ruido radioeléctrico con la frecuencia en el interior de edificios. Se tratará de describir el comportamiento de la señal y del ruido en diferentes frecuencias dentro de la banda comercial de Onda Media.
- Estudio de las pérdidas por penetración en edificios. Se caracterizarán estadísticamente las pérdidas por penetración de la señal en Onda Media en edificios de grandes núcleos urbanos. De esta forma se podrá hacer una planificación más adecuada de los nuevos servicios digitales para intentar ofrecer la cobertura deseada en el interior de edificios, donde presumiblemente se situarían numerosos receptores del servicio.
- Estudio de la relación señal a ruido en el interior de edificios en la banda de Onda Media. Será un factor clave determinar la relación señal a ruido para decidir la potencia de emisión de señal adecuada para dar cobertura a un determinado porcentaje de localizaciones interiores.

3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento se ha estructurado en seis capítulos:

En el “*Capítulo 1. Introducción y objeto de la tesis*” se justifica la necesidad del estudio realizado en esta tesis, mediante una introducción que permita al lector comprender la situación actual de los servicios de radio digital en la banda de Onda Media. Así mismo, se describen y se justifican los objetivos planteados en este estudio.

El “*Capítulo 2. Estado del arte*” describe brevemente la tecnología DRM en Onda Media, así como los estudios realizados hasta la fecha en cuanto al tipo de propagación en esta banda y diferentes estudios de propagación de ondas en el interior de edificios en otras bandas frecuenciales. También se describen los niveles de ruido radioeléctrico publicados hasta la fecha.

En el “*Capítulo 3. Metodología y campañas de medidas*” se describen las campañas de medidas que proporcionan los datos empíricos en los que se ha basado el estudio. También se describen la arquitectura de las diferentes redes de transmisión, el sistema de medidas y la metodología de medida.

El “*Capítulo 4. Estudio de la recepción de señales de radiodifusión en Onda Media en interiores*” describe los resultados del análisis global de recepción de señales de radiodifusión en Onda Media en interiores.

En el “*Capítulo 5. Estudio del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores*” se presentan los resultados detallados del análisis espacial y temporal del campo eléctrico del ruido en Onda Media en interiores.

El “*Capítulo 6. Aportaciones de la tesis y líneas futuras*” recopila las aportaciones más significativas de la tesis. También se proponen puntos de partida para la realización de nuevos estudios, a partir de los resultados obtenidos.

En la parte final del documento, en el capítulo “*Referencias y glosario*” se enumeran las citas bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la tesis, las cuales han sido referenciadas a lo largo del documento, y se incluye un breve glosario de acrónimos utilizados en el texto, relacionados con el estudio realizado. También se recoge una descripción detallada de los edificios y localizaciones analizadas a lo largo de las campañas de medidas en el “*Anexo I*”.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se resumen los trabajos científico-técnicos más relevantes para el posterior estudio o consecución de los objetivos de la tesis. En primer lugar se realiza una descripción técnica del sistema DRM (Digital Radio Mondiale) para las bandas inferiores a 30 MHz, junto con un resumen del estado del arte de los estudios del sistema realizados hasta la fecha.

Posteriormente, se describen los modelos de propagación por onda de superficie en entornos rurales, semiurbanos y urbanos. Se continúa describiendo la caracterización que se ha venido llevando a cabo de la propagación en el interior de edificios en diferentes bandas frecuenciales y se finaliza el capítulo describiendo los valores publicados de ruido radioeléctrico en Onda Media.

1. INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DRM

1.1 El consorcio DRM

El Consorcio DRM fue creado en 1998 con los propósitos de definir los requisitos, realizar el diseño y favorecer la introducción de un sistema de radiodifusión digital adaptado a las bandas de frecuencias inferiores a 30 MHz [32]. La idea de aprovechar la excelente propagación de las bandas de bajas frecuencias y las ventajas que ofrecen los sistemas digitales de radiodifusión, permite mejorar la calidad y la fiabilidad de los servicios, manteniendo coberturas de gran alcance.

Los objetivos específicos del consorcio DRM en la definición del nuevo sistema digital de radiodifusión fueron los siguientes:

- Mejora significativa en la calidad del audio y en la fiabilidad.
- Compatibilidad con la gestión actual y futura del espectro de estas bandas (frecuencias asignadas y anchos de banda).
- Facilidad de uso y funciones avanzadas en los receptores.
- Disponibilidad de receptores de bajo coste mediante una especificación del sistema abierta y no propietaria.
- Migración de emisiones analógicas a las digitales.
- Reutilización máxima de las actuales infraestructuras para la radiodifusión digital.

En un periodo de tiempo relativamente corto, los miembros del consorcio DRM desarrollaron, realizaron pruebas y estandarizaron un nuevo sistema digital de radiodifusión, y en Junio de 2003 comenzaron las primeras transmisiones experimentales. Desde entonces, el número de radiodifusores y de horas de emisión ha crecido de una forma importante (especialmente en HF) y los primeros receptores ya han sido desarrollados y probados.

1.2 Descripción general del sistema

El sistema DRM fue desarrollado para reemplazar los servicios analógicos de radio comercial AM, difundidos en las bandas LF, MF y HF [33]. Las señales de audio que se transmiten son comprimidas previamente en un flujo de datos reducido a través de la codificación Advanced Audio Coding (AAC) [34], la cual es una mejora de los algoritmos de compresión MPEG1 desarrollados por el Fraunhofer Institute para la producción y distribución de material audiovisual. La especificación del

sistema incluye la opción de utilizar otros dos codecs de audio (CELP y HVXC), y permite tanto la transmisión mediante redes de frecuencia única (SFN), como de redes multi-frecuencia (MFN). También existe la opción de añadir la codificación SBR (Spectral Band Replication) para aumentar la eficiencia de codificación en los tres codecs.

Al igual que en otros sistemas de radiodifusión digital (como por ejemplo el Eureka 147 DAB, o el sistema DVB-T), el sistema DRM utiliza las técnicas de codificación y modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). En este sistema se utilizan, dependiendo del modo utilizado, en torno a 200 subportadoras distribuidas en canales de 9 kHz o 10 kHz [1]. Los datos del servicio se insertan en cada una de las subportadoras mediante la modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

El sistema DRM tiene la capacidad de adaptar las características de la transmisión a los requerimientos del servicio, ya que el operador de red puede configurar varios de los parámetros de codificación y modulación. Gracias a esta flexibilidad de la configuración utilizada, es posible priorizar la calidad del servicio, consiguiendo una calidad de audio muy superior a la actual del servicio analógico, o por el contrario la robustez de la transmisión, superando las variaciones de las condiciones de propagación. Además, DRM permite incluir hasta cuatro servicios simultáneos en el mismo canal radioeléctrico, limitados únicamente por la capacidad de datos y los requisitos de calidad y robustez [5]. Las posibilidades abarcan desde la transmisión de un servicio de audio de alta calidad junto a un servicio de voz (por ejemplo, de noticias), hasta 4 servicios de voz, si bien ha de llegarse a un compromiso entre la calidad y el número de servicios que se quieran añadir, con el ancho de banda disponible según la canalización empleada.

En definitiva, el sistema DRM permite mejorar la eficiencia espectral considerablemente, dado que permite un mayor número de servicios de mayor calidad en relación al ancho de banda utilizado. Además, las redes SFN aumentan aún más esa eficiencia espectral.

A modo de resumen, el sistema DRM ha sido concebido para poder ofrecer los siguientes servicios y prestaciones:

- Diferentes grados de calidad de audio y de robustez.
- Diferentes modos de propagación y ámbitos de cobertura.
- Redes de frecuencia única (SFN).

- Conmutación automática de frecuencia (AFS), lo que posibilita que el receptor DRM sintonice la frecuencia que proporcione la mejor calidad de audio, del conjunto de frecuencias que es posible recibir en un lugar determinado y que emiten el mismo servicio.
- Datos asociados al programa (PAD) y servicios basados en datos adicionales. Estos datos adicionales pueden ejecutarse en el receptor o ser ofrecidos en un conector del receptor para que puedan ser utilizados por un dispositivo externo.
- Transmisión simulcast AM/DRM, lo cual consiste en la radiodifusión simultánea de un servicio DRM, junto con su formato analógico AM, para que los radiodifusores que deseen comenzar las emisiones digitales DRM, puedan mantener las emisiones analógicas en AM.

1.3 Arquitectura

1.3.1 Sistema de transmisión

La Figura 1 muestra un diagrama de bloques con los módulos implicados en la transmisión de una señal DRM [1], [5].

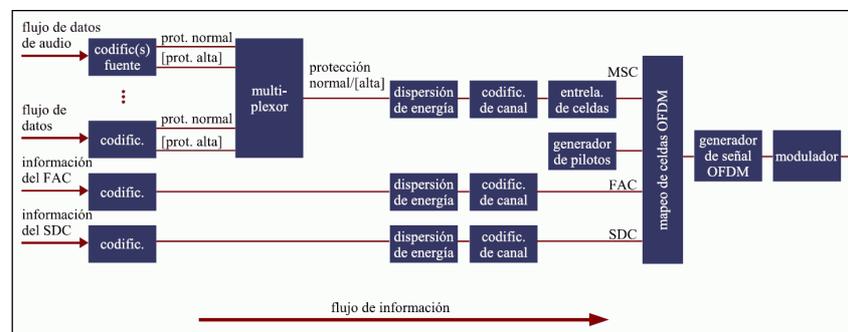


Figura 1. Arquitectura del sistema DRM: diagrama de bloques de la transmisión de la señal.

La generación de la señal comienza con los codificadores de fuente, los cuales, además de codificar los servicios de audio o datos, adaptan los flujos de datos de entrada según un formato de transmisión apropiado. Para el caso del codificador de audio, en esta parte se incluyen las técnicas de compresión de audio. La salida de estos codificadores fuente se puede dividir en dos partes a las que asignar diferentes niveles de protección en el codificador de canal (ver Figura 1). El audio codificado, junto con las señales de datos, son combinadas en un múltiplex, el cual constituye la información principal de servicio. Este múltiplex se denomina MSC (Main Service Channel).

El módulo de dispersión de energía se encarga de reducir la probabilidad de que los patrones sistemáticos en las secuencias de bits resulten en una regularidad no deseada en la señal transmitida. El codificador de canal se encarga de añadir información redundante, con el objetivo de conseguir una transmisión más robusta, y define el mapeo de la información de la modulación QAM.

El entrelazador de celdas dispersa las celdas QAM consecutivas en una secuencia de celdas distribuidas de una forma cuasi-aleatoria en tiempo y frecuencia. El objetivo de este entrelazador es ofrecer una transmisión robusta en canales dispersivos en tiempo y frecuencia. Si se produce un error que afecte a varias celdas consecutivas, cuando éstas son desentrelazadas por el receptor las celdas afectadas quedarán separadas y así el error será más fácil de corregir con la codificación de canal.

Las portadoras piloto permiten que el receptor obtenga la información del estado del canal. El receptor analizará estas portadoras piloto en módulo y fase, lo que le permitirá realizar una ecualización adaptada al estado del canal.

Junto con las celdas de datos y las portadoras piloto, se añaden dos flujos de datos que proporcionan información de control sobre la transmisión. De esta forma, la señal transmitida incluye dos tipos de información:

- Los canales de audio y datos, ya codificados, son combinados por el multiplexor de servicios para formar el MSC (Main Service Channel). Puede contener de 1 a 4 servicios de audio o datos. La tasa binaria disponible para el MSC viene determinada por el modo de transmisión utilizado.
- Datos para la identificación del servicio y la inserción de los datos de configuración de la transmisión, lo que permite al receptor aplicarlos en el proceso de recepción y decodificación de la señal. Estos datos se incluyen en el FAC (Fast Access Channel) y en el SDC (Service Description Channel), y no es multiplexada a nivel de servicios de audio y datos, sino que se combina con el MSC.

El múltiplex DRM está formado, por tanto, por tres canales de información (MSC, FAC y SDC) más la información de las portadoras piloto.

La última etapa de la transmisión la constituye la generación de la señal COFDM y la modulación (ver Figura 1). En primer lugar, una vez obtenidas las celdas correspondientes a datos, portadoras piloto e información de control, el mapeador de celdas les asocia unas posiciones determinadas en tiempo y frecuencia. El contenido del múltiplex completo es repartido en las portadoras ortogonales, cada una de ellas moduladas en QAM. Cada porción de información que se incluye en un momento determinado en las portadoras OFDM constituye un símbolo de información. Estos símbolos, a su vez, también se agrupan para formar las denominadas tramas de transmisión, que tienen una duración de 400 milisegundos.

Finalmente el modulador OFDM transforma todas las portadoras pertenecientes a un mismo símbolo de esta representación en frecuencia de la señal a una representación en tiempo. El símbolo OFDM se obtiene al añadirle a esta señal en tiempo un intervalo de guarda que la protege frente a los efectos del multitrayecto del canal de propagación.

1.3.2 Modos de transmisión DRM

Un modo de transmisión se define mediante tres parámetros: el ancho de banda del canal y parámetros relacionados con la eficiencia de transmisión, como son el orden de la constelación y el tipo de modulación OFDM.

Ancho de banda del canal

Las canalizaciones actuales para radiodifusión por debajo de 30 MHz son 9 kHz ó 10 kHz según la región terrestre [35]. El sistema DRM se ha diseñado teniendo en cuenta estas canalizaciones [36] y permite utilizar diferentes canalizaciones. El canal utilizado en la transmisión se define mediante un código de ocupación espectral, con los valores de 0 a 5. Las canalizaciones posibles, y los códigos correspondientes son los que se exponen a continuación:

- Anchos de banda nominales: 9 kHz o 10 kHz (códigos 2 ó 3, respectivamente).
- La mitad de los anchos de banda nominales, para permitir una transmisión simulcast con señales AM analógicas: 4,5 kHz ó 5 kHz (códigos 0 ó 1, respectivamente).
- El doble de los anchos de banda nominales, para una mayor capacidad de transmisión, siempre que las restricciones de planificación permitan esta facilidad: 18 kHz ó 20 kHz (códigos 4 ó 5, respectivamente).

Conviene destacar que la canalización empleada actualmente para la radiodifusión analógica en Onda Media en Europa es de 9 kHz.

Orden de la constelación

El operador puede seleccionar el orden de la constelación de las celdas, tomando uno de los valores de la terna (4-QAM, 16-QAM, 64-QAM). Se indican ordenados por una capacidad creciente de la tasa binaria, pero por contra, de mayor a menor robustez frente al ruido y las interferencias.

Modulación OFDM

Hay varios parámetros de la modulación OFDM que también son configurables: el número de símbolos por trama (N_s), la cantidad de portadoras piloto frente a portadoras de datos y la duración del intervalo de guarda [1], [5], [33].

La señal transmitida está formada por una sucesión de símbolos OFDM, cada uno de los cuales consta de una primera parte de intervalo de guarda (T_G) seguida de una segunda parte útil. De esta forma, la duración del símbolo (T_U) es la suma de ambos intervalos. La separación entre subportadoras consecutivas (f_U) es el inverso del tiempo total de símbolo.

Tener un tiempo de símbolo grande permite utilizar un intervalo de guarda grande sin sufrir una gran disminución en la tasa de transmisión. La utilización de este intervalo de guarda evita la interferencia entre símbolos (ISI: Inter-Symbol Interference), haciendo que la señal sea muy robusta frente al multitrayecto. La robustez se mantendrá siempre que la dispersión en tiempo del canal sea inferior al intervalo de guarda. De esta manera, las señales recibidas no sólo no se interfieren sino que pueden ser constructivas.

Se definen 4 combinaciones de los parámetros mencionados [1], [5], [33] las cuales dan lugar a los modos mostrados en la Tabla 1. La configuración de la primera fila está pensada para su uso en propagación por onda de superficie, mientras que las otras tres configuraciones son para propagación ionosférica (el último de ellos para NVIS: Near Vertical Incidence Skywave), diferenciándose principalmente en la robustez.

Tabla 1. Principales características de los modos OFDM definidos en el estándar DRM.

Modo OFDM	f_U (Hz)	T_G (ms)	N_s	Condiciones de propagación típicas	Ancho de banda nominal (kHz)			
					0 (4,5 kHz)	1 (5 kHz)	2 (9 kHz)	3 (10 kHz)
A	$41 + 2/3$	2,66	15	Canal Gaussiano	4,208	4,708	8,542	9,542
B	$46 + 7/8$	5,33	15	Canal Gaussiano con dispersión temporal	4,266	4,828	8,578	9,703
C	$68 + 2/11$	5,33	20	Canal con dispersión frecuencial y temporal	–	–	–	9,477
D	$107 + 1/7$	7,33	24	Canal con alta dispersión temporal y frecuencial	–	–	–	9,536

En resumen, la codificación de canal, el orden de la constelación y los parámetros que permiten configurar la modulación OFDM determinan la capacidad del sistema (la tasa binaria útil) y la robustez de la transmisión frente al ruido, multitrayecto y efecto Doppler.

Por último, desvanecimientos que pudieran aparecer en la señal recibida debidos al multitrayecto se cancelan en gran medida mediante el ecualizador de canal. Se añaden a la señal OFDM unas portadoras piloto cuyo valor y posición son conocidas por el receptor. Esto permite que el receptor evalúe la amplitud y fase de las portadoras recibidas, calcule el efecto del canal, y lo cancele.

1.4 Estado del arte del sistema DRM

1.4.1 Pruebas del sistema

Dentro del Consorcio DRM, el grupo de trabajo TC-SE (Technical Committee – System Evaluation) comenzó su andadura en mayo de 1998, con el objetivo de establecer los criterios de verificación, diseñar y llevar a cabo las pruebas requeridas en diversos aspectos del sistema DRM: transmisores, receptores, codificación y planificación de los servicios. En un principio su labor se centró en estudios de laboratorio y se realizó paralelamente a la de los grupos de desarrollo tecnológico para, una vez completada en su mayor parte la tarea de desarrollo, pasar a una fase de pruebas de campo. A continuación se expone un resumen de las pruebas más significativas realizadas en el desarrollo del sistema DRM. Se han realizado pruebas de campo en las bandas LF, MF y HF, y tanto mediante onda de superficie como onda ionosférica, incluyendo NVIS. Dado que uno de los objetivos de esta tesis se centra en la caracterización de la propagación por onda de superficie en Onda Media en interiores, esta recopilación se centra mayormente en las pruebas realizadas en este modo de propagación y esta banda de frecuencias.

Las primeras pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el Instituto Fraunhofer y concluyeron a principios de 1999 [37]. Se centraron en la obtención de gráficas de tasa de bits erróneos (BER) frente a relación señal a ruido por bit (E_b/N_o) para distintas configuraciones de transmisión y canales de propagación. También se evaluaron diferentes configuraciones de transmisión (modo OFDM, constelación QAM e índice de codificación más adecuados), que finalmente se contemplaron en el estándar [7].

Un segundo grupo de pruebas de laboratorio se realizaron a principios del año 2000, también por el Instituto Fraunhofer [38]. Se pretendía elaborar un informe acerca de las características del sistema para la ITU-R. Los estudios incluyeron, en la parte de transmisión, las configuraciones de transmisión óptimas para cada tipo de canal de propagación, y en la parte del receptor, el sistema de captura, procesado y toma de medidas.

Los resultados de las mencionadas pruebas de laboratorio permitieron establecer los valores umbrales de los parámetros de planificación (mínima intensidad de campo, relación C/N mínima y relaciones de protección en la transmisión de servicios DRM y AM en canales adyacentes), los cuales están recogidos en la recomendación ITU-R BS.1615 [39].

Las primeras emisiones en pruebas del sistema DRM se realizaron en 1999. En el año 2000 se inició un ambicioso proyecto denominado RADIATE (RADio DIGital Am TESts) [40], dentro del quinto Programa Marco de la Unión Europea, para validar el sistema DRM. Los objetivos técnicos planteados para este proyecto fueron [41]:

- Verificar que la radiodifusión digital en las bandas de AM es viable utilizando el sistema DRM.
- Confirmar que las características técnicas del sistema DRM funcionan en un rango amplio de condiciones de recepción (incluyendo simulcast, AFS y transmisión de datos).
- Verificar la mejora en calidad de audio y en fiabilidad de recepción.
- Mostrar que el sistema cumple los requisitos de la ITU [33], lo cual incluye la coexistencia con las transmisiones analógicas durante el periodo de transición.
- Demostrar que los transmisores actuales de AM pueden ser adaptados para transmitir la señal DRM, y proporcionar información a los fabricantes de equipamiento para que la próxima generación de transmisores sea compatible con DRM.

También bajo el quinto programa marco, se realizó otro proyecto denominado QOSAM (Quality Of Service in the digitised AM bands) [42], en el cual se monitorizó la calidad del sistema DRM.

Pruebas de campo relativas a la banda de Onda Media

Las pruebas de campo permiten verificar el funcionamiento real del sistema en diferentes condiciones de propagación y recepción. A continuación se recopilan las pruebas más significativas realizadas en Onda Media utilizando la propagación por onda de superficie, resaltando desde un principio que las pruebas llevadas a cabo en interiores son muy escasas.

En Marzo de 2002, se remitió a la ITU-R un informe sobre las primeras pruebas de campo realizadas por TDF en la banda MF para evaluar los diferentes modos de simulcast [43] propuestos en el estándar DRM. Estas medidas tuvieron como objetivo comprobar la validez de las relaciones de protección y comparar las coberturas alcanzadas por las emisiones analógica y digital.

Unos meses después (de Julio a Septiembre del mismo año), T-Systems International realizó pruebas en Onda Media utilizando propagación por onda de superficie en Alemania, dentro del proyecto RADIATE [44], [45]. Se hicieron medidas de recepción en movimiento en diversos entornos de recepción, desde entorno rural abierto hasta urbano muy denso. La calidad objetiva medida en las pruebas fue excelente en entorno rural dentro del área de cobertura, utilizando configuraciones poco robustas. En este entorno de recepción, los valores de señal a ruido e intensidad de campo mínima se correspondieron con los propuestos en el informe para la ITU-R. Sin embargo, los resultados muestran por vez primera la diferencia entre la recepción en entorno rural y la recepción en entorno urbano, encontrándose una peor calidad objetiva del servicio en entornos urbanos. Se apuntaron dos razones para justificar esta peor

calidad: un nivel de campo registrado más bajo y más variable, y la presencia de mayor ruido radioeléctrico.

En estas pruebas también se identificaron inconvenientes de la recepción propios del entorno rural, como son las líneas de tendido eléctrico, fuentes de ruido radioeléctrico, y obstáculos de gran envergadura como puentes y pasos elevados. También se demostró la validez del modo OFDM A para recibir la señal DRM en velocidades de hasta 120 km/h. Por último se señaló la necesidad de caracterizar la variación temporal del campo eléctrico en función del entorno de recepción, para poder caracterizar con mayor precisión la disponibilidad del servicio DRM.

Partiendo de los resultados de estas pruebas, a finales de 2002, también dentro del proyecto RADIATE, se realizaron pruebas de recepción en movimiento utilizando redes SFN con 2 y 3 transmisores.

En Febrero de 2003 se llevaron a cabo dos semanas de pruebas de transmisión DRM en Noruega [46] en la frecuencia central de 675 kHz, contando con 2 estaciones de transmisión y 2 de recepción, utilizando propagación por onda de superficie. El objetivo era comprobar la validez de varias configuraciones de transmisión de los modos OFDM A y B, en horario diurno y nocturno. La principal conclusión fue que la recepción nocturna se mostró mucho más inestable que la diurna puesto que en la primera aparecía una componente de onda ionosférica que provocaba desvanecimientos rápidos. Fue necesaria una configuración con buen nivel de protección (índice de codificación 0,5, modo OFDM B y entrelazado largo) para obtener valores de calidad objetiva aceptables en recepción nocturna.

La BBC [47] realizó una emisión de pruebas para evaluar la recepción en movimiento en la banda de Onda Media por onda de superficie diurna, en Octubre de 2003. El centro transmisor de las pruebas fue Orfordness (al sur de Gran Bretaña) y la recepción se realizó durante 2 días en el continente. Para estas pruebas, se dispuso de datos cartográficos muy precisos sobre el tipo de terreno, su conductividad y la conductividad del mar [48]. Las pruebas proporcionaron valores aceptables de calidad objetiva, y se obtuvo el umbral de intensidad de campo eléctrico para la configuración propuesta. También se comprobó que las predicciones resultaron ligeramente pesimistas.

A principios de 2004 Telenor realizó pruebas para determinar el valor mínimo de la intensidad de campo recibida en movimiento considerando celdas cuadradas de 1 km de lado. Se comprobó que la orografía irregular en la zona de recepción provoca grandes variaciones de la intensidad de campo eléctrico. Por esta razón, el paso de una cobertura del 50% al 99% de localizaciones requería un aumento considerable de la intensidad de campo para zonas con orografía irregular. Por esta razón, se sugirió completar los modelos de la ITU-R para la predicción de onda de superficie con modelos de elevación del terreno de 2 y 3 dimensiones, para caracterizar los obstáculos del terreno.

El radiodifusor Deutsche Welle, en colaboración con el fabricante de transmisores Harris, llevó a cabo en Mayo de 2004 pruebas de recepción en Onda Media y horario diurno en Tailandia [49]. Los resultados demostraron que la configuración utilizada no era suficientemente robusta para los niveles de ruido e interferencia existentes en muchos puntos del entorno urbano denso de Bangkok. Es importante resaltar que en los lugares en los que la señal DRM no pudo ser decodificada, tampoco fue posible escuchar con una calidad aceptable la emisión AM.

Un aspecto en el que los radiodifusores están muy interesados es la comparativa de coberturas de transmisiones DRM y AM desde el mismo centro transmisor. T-Systems estudió este aspecto en Septiembre de 2004, mediante nuevas pruebas de recepción en movimiento [50]. La potencia empleada para el sistema digital fue 4 dB inferior a la del analógico, consiguiéndose similar cobertura para ambos sistemas.

Desde la EBU se planteó la necesidad de realizar pruebas de campo en las bandas LF, MF y HF, para varias configuraciones de transmisión y canales de propagación [51]. También se señaló el interés por obtener valores mínimos de nivel de campo eléctrico que tuvieran en cuenta el ruido del entorno de recepción, los obstáculos y las pérdidas de implementación debidas al uso de receptores no profesionales y de antenas de recepción no optimizadas para las frecuencias de DRM.

En Noviembre de 2004 se realizaron en Macedonia nuevas pruebas en la banda de Onda Media por parte de Deutsche Welle. En estas pruebas, se obtuvieron fluctuaciones de la señal de hasta 10 dB debidas al ruido y de hasta 25 dB debidas a la obstaculización de accidentes topográficos. En estas situaciones se observaron frecuentes errores en la recepción.

Radio Television Hong Kong realizó una prueba en Golden Hill de transmisión simultánea DRM, compartiendo el canal AM existente, también en 2004 [52]. Los resultados mostraron de forma muy preliminar que la cobertura en interiores de DRM estaba limitada por la potencia de transmisor permitida para el servicio AM, y por las características de la propagación en la banda de Onda Media.

Un hito importante en la validación del sistema fue la realización con éxito de las primeras emisiones en modo simulcast, pues demostraron la viabilidad de este modo de transmisión en la etapa de transición a las emisiones digitales. Estas pruebas se realizaron en México de la mano de Radio Centro, miembro de la Cámara Nacional de la Industria de Radio y Televisión (CIRT), en Marzo de 2005 [53], [54]. El Grupo TSR de la UPV/EHU coordinó este proyecto, desde las etapas de planificación de medidas, hasta la elaboración de estudios e informes sobre los resultados.

En Agosto de 2006 se realizaron en Australia medidas de campo para evaluar el comportamiento del sistema DRM durante el día y la noche [55]. Se monitorizaron cuatro frecuencias: Radio National (1431

kHz), Racing Radio (1314 kHz), un canal de prueba DRM (1386 kHz) y un canal sin emisión para medidas de ruido local (1355 kHz). Los resultados demostraron, en primer lugar, que la potencia de la emisión DRM debe ser 3 dB inferior a la potencia analógica para conseguir el mismo área de cobertura, que el modo 64 QAM funciona bien durante el día y el modo 16 QAM debería usarse por la noche para una mejor protección, y que un ancho de banda de 18 kHz funcionaría únicamente durante el día debido a la interferencia por canal adyacente, mientras que un ancho de banda de 9 kHz debería usarse de noche.

El 23 de Abril de 2007, BBC Radio Devon comenzó sus emisiones DRM en modo de prueba. Esta emisión, que duró un año, reutilizó la frecuencia de Onda Media del área de Plymouth (855 kHz) para emitir Radio Devon como un servicio digital. La prueba contó con un centenar de voluntarios dotados con receptores DRM a los que se les pidió oír una serie de emisiones diarias y rellenar cuestionarios sobre la calidad percibida [56].

En Mayo de 2007, en Canberra (Australia), Broadcast Australia junto con el radiodifusor público Special Broadcasting Service probaron el modo Multichannel Simulcast (MCS). Para ello, la transmisión regular de AM se realizó en 1440 kHz, mientras que la transmisión en DRM se realizó en 1431 kHz.

También en Mayo de 2007, el Consorcio DRM, All India Radio (AIR) y Asian-Pacific Broadcasting Union (ABU) organizaron pruebas de DRM Single Channel Simulcast (SCS) y Multi-Channel Simulcast (MCS) en la banda de Onda Media [57]. También se realizaron transmisiones DRM en 18 kHz en la banda de Onda Media, transmisiones locales en la banda de 26 MHz, transmisiones NVIS (Near Vertical Incidence Skywave) y DRM en Onda Corta. El Grupo TSR de la UPV/EHU realizó la campaña de medidas de dichas pruebas.

1.4.2 Estandarización

En Marzo de 2003, la International Electrotechnical Commission publica el estándar del sistema DRM IEC 62272-1[6], con lo que se impulsa a nivel internacional la regulación de este sistema.

Dos meses después, en Mayo de 2003, el European Telecommunications Standards Institute elevó a la categoría de estándar la especificación técnica del sistema DRM [7]. Este documento incluye la descripción técnica del sistema, especificando las posibilidades de configuración tanto en la codificación fuente, como en la codificación de canal y en la modulación.

En Junio de 2003, la International Telecommunications Union elabora la Rec. ITU-R BS.1615 [39], donde se indican los valores umbrales de recepción para diferentes frecuencias y canales de propagación. En Onda Media y horario diurno, se consideró un canal de propagación por onda de superficie del tipo AWGN (Additive White Gaussian Noise) sin dispersión temporal ni frecuencial. Esta recomendación también incluye las relaciones de protección entre los servicios AM y DRM. Estos datos fueron extraídos

de los informes disponibles en esa fecha, basados en las medidas de laboratorio mencionadas en párrafos anteriores.

El European Telecommunications Standard Institute publicó en Enero de 2005 un documento técnico sobre los equipos de transmisión para la radiodifusión de los servicios DRM [58], incluyendo las especificaciones y los métodos de comprobación para los transmisores DRM. Ese mismo año, el ETSI publicó el estándar del interfaz RSCI (Receiver Status and Control Interface), creado por miembros del consorcio DRM con el objetivo de poder automatizar la tarea de configuración y evaluación de una señal DRM en un receptor profesional [59].

El Foro World DAB (actualmente Foro World DMB) y el consorcio DRM tratan de manera conjunta desde el año 2003 aspectos técnicos y comerciales de radio digital. La combinación de ambos estándares supone la posibilidad de proporcionar soluciones a medida en radio digital a nivel mundial, incluso trabajando en las mismas bandas. En Marzo de 2005 aprobaron extender el sistema DRM a las bandas I y II de VHF (hasta 120 MHz), lo cual abre las puertas para el uso del sistema DRM como sistema digital en la banda FM, con el nombre de DRM+.

En Marzo de 2006, el ETSI aprueba el sistema de señalización AM (AMSS) como parte del sistema DRM [60]. AMSS es un sistema que permite añadir cierta cantidad de información adicional a las transmisiones analógicas en las bandas por debajo de 30 MHz. Por su funcionalidad, sería el equivalente a RDS en la banda de FM, por lo que ha sido pensado para su utilización en la transición hacia una radiodifusión totalmente digital. Así, permitiría proporcionar nuevas características a los oyentes de radio analógica (por ejemplo, resintonización automática), de manera que pudieran probar algunas de las ventajas que presenta la radiodifusión digital. Además, permite a los receptores DRM equipados con decodificadores AM con AMSS encontrar transmisiones de DRM del mismo servicio en el mismo área, o cuando el receptor se mueve a un área distinta.

2. PROPAGACIÓN DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS EN ONDA MEDIA

2.1 Propagación en la banda de Onda Media

En la banda MF (300 kHz – 3 MHz) o banda de Onda Media tienen lugar dos modos de propagación: la propagación por onda de superficie y la propagación por onda ionosférica. En la propagación por onda de superficie, la onda se propaga en la discontinuidad tierra-aire debido a las corrientes inducidas por la antena transmisora en la superficie de la Tierra. Las antenas que habitualmente se utilizan son monopolos verticales con alturas de entre 20 y 200 m que radian la señal con polarización vertical.

En esta banda también tiene lugar la propagación ionosférica, debido a que las regiones D y E de la ionosfera reflejan las ondas radioeléctricas hacia la superficie terrestre. Esta reflexión únicamente tiene lugar para un rango de frecuencias determinado y cuando el grado de ionización de estas regiones es el adecuado, lo cual varía según los ciclos día-noche, los ciclos estacionales y los ciclos solares (de 11 años de duración) [26]. Debido a esta variabilidad, el alcance de las transmisiones depende fundamentalmente de la frecuencia, de la hora del día y de la dirección de apuntamiento de la antena transmisora. En Onda Media, la propagación ionosférica únicamente tiene lugar durante la noche. El alcance de la transmisión es mucho mayor que el de la onda de superficie, pudiendo llegar a ser de miles de kilómetros.

La onda de superficie suele ser predominante en los kilómetros más cercanos al transmisor, mientras que la onda ionosférica lo es a distancias lejanas del transmisor, en las que la amplitud de la onda de superficie es mucho menor [61], [62]. En la zona intermedia, el receptor recibe la señal a través de ambos tipos de propagación (onda ionosférica y onda de superficie), que al sumarse en recepción vectorialmente, pueden dar lugar a una combinación constructiva o interferente. Siendo la fase de la señal ionosférica muy variable en el tiempo, esta región siempre es problemática desde el punto de vista de la cobertura.

Las medidas que se han tomado y analizado en esta tesis fueron realizadas durante el día, para asegurar que el único modo de propagación recibido fuera la propagación por onda de superficie.

En ninguno de estos dos modos de propagación (onda de superficie o ionosférica) es posible calcular la atenuación por propagación como pérdidas en espacio libre, sino que debe ser calculada por modelos que tengan en cuenta estas características de propagación. Para la propagación por onda de superficie existen varios métodos para la predicción de cobertura, los cuales se describirán posteriormente.

2.2 Propagación por onda terrestre

El modelo de onda terrestre propone que la señal recibida en el receptor es la combinación de:

- Una onda de superficie que se propaga cercana a la superficie de la Tierra, en la discontinuidad tierra–aire, mediante difracción sobre la curvatura terrestre. La componente vertical se propaga sobre la superficie sin apenas pérdidas, mientras que la componente horizontal se atenúa por el efecto de la conductividad finita del suelo. La atenuación por absorción es tanto mayor cuanto menor sea la conductividad del suelo [61].
- La onda espacial, recibida en el receptor cuando se encuentra en visión directa con el transmisor, se compone a su vez de una onda directa y una onda reflejada en el suelo. Cuando la altura de las antenas es pequeña respecto a la longitud de onda, y tanto el transmisor como el receptor se encuentran cercanos a la superficie, la onda directa y la onda reflejada tienen igual amplitud y fase opuesta, por lo que se anulan en el receptor [63].

En consecuencia, si transmisor y receptor se encuentran cerca de la superficie terrestre (en términos de longitudes de onda), únicamente se considera la onda de superficie, debido a que los rayos directo y reflejado de la onda espacial se anulan [61]. Según este modelo, los aspectos que más influyen en la propagación de la onda, y en consecuencia, en el alcance de la transmisión, son la frecuencia utilizada (cuanto más alta es la frecuencia, menor es el alcance de la transmisión), y las características eléctricas del terreno (conductividad y permitividad) [64].

La difracción de la onda terrestre depende de la relación entre la longitud de onda y el radio de la Tierra, disminuyendo a medida que la longitud de onda decrece. Otro factor que también afecta a esta difracción es el hecho de que la conductividad del terreno no es infinita, lo que provoca que se produzca una absorción de energía por las corrientes inducidas en la tierra, produciéndose un flujo de energía continuo desde la onda que se propaga hacia la tierra.

La onda de superficie, por tanto, se propaga guiada por la superficie de la Tierra, de la misma forma que una onda electromagnética se propaga a lo largo de una línea de transmisión. Las cargas inducidas por el transmisor en la superficie viajan en forma de corriente. La superficie terrestre puede representarse como una capacidad C (cuya impedancia es $1/j\omega C$) en paralelo con una resistencia (R), que se oponen al paso de dicha corriente [65]. La resistencia simboliza la conductividad del terreno, y el condensador la constante dieléctrica del mismo.

En las frecuencias utilizadas en la radiodifusión de radio comercial AM, la superficie terrestre puede ser caracterizada como un circuito resistivo puro. Esto es debido a que a estas frecuencias se cumple que $R \ll 1/\omega C$, por lo que, en el circuito RC paralelo que simboliza la superficie conductora, casi toda la corriente fluye por la resistencia. En consecuencia, en este rango de frecuencias, el factor de atenuación depende básicamente de la conductividad de la superficie terrestre. Para frecuencias superiores a los 10

MHz, la impedancia del circuito RC es predominantemente capacitiva, por lo que en estos casos la atenuación depende fundamentalmente de la constante dieléctrica de la superficie y de la frecuencia [63].

Las corrientes que forman la onda de superficie penetran en el terreno cuando se propagan de forma similar al efecto pelicular observado en las líneas de transmisión [65], [66]. La profundidad de penetración depende de la frecuencia y de las propiedades eléctricas del terreno, y toma valores comprendidos entre una fracción de metro en la banda HF, hasta decenas de metros en las frecuencias más bajas de la banda de Onda Media. En este caso la propagación en las frecuencias más bajas depende en mucha menor medida de las condiciones de la superficie, y más de los materiales de las capas internas. DeMinco, en [65], expone cómo calcular la profundidad de penetración en función de los aspectos de propagación, y proporciona valores para varias configuraciones.

En resumen, se deben distinguir onda terrestre y onda de superficie, aunque en la banda de Onda Media se considera que en el receptor la onda espacial se anula y entonces onda terrestre y onda de superficie coinciden, siendo los parámetros que determinan la atenuación de la onda propagada la frecuencia y las características eléctricas del terreno (permitividad y, sobre todo, conductividad).

2.3 Propagación por onda ionosférica

La ionosfera es una capa de la atmósfera que se encuentra ionizada por la fotoionización que provoca la radiación solar. La propagación por onda ionosférica aprovecha las características radioeléctricas de la ionosfera para conseguir que la señal se transmita a grandes distancias.

El efecto de la ionosfera en la propagación de ondas depende fundamentalmente de la frecuencia de la señal transmitida. A frecuencias bajas, hasta 100 kHz, la ionosfera se puede considerar como una discontinuidad abrupta, y actúa prácticamente como una superficie reflectora perfecta. En estas frecuencias, la onda ionosférica se propaga como si estuviera confinada entre dos capas conductoras: la ionosfera y la superficie de la tierra [26], [63].

A frecuencias superiores, en la banda de Onda Media, la ionosfera se comporta como un dieléctrico de baja conductividad, con un índice de refracción que varía gradualmente. De esta forma, las ondas que alcanzan la ionosfera encuentran una región en la que el índice de refracción disminuye a medida que la concentración de electrones se incrementa con la altura y, como resultado, la trayectoria de la onda se curva a medida que la onda atraviesa la ionosfera, y vuelve refractada hacia la superficie terrestre. Aunque también puede suceder que las ondas atraviesen la capa de ionización, lo cual depende del grado de ionización de la ionosfera, del ángulo de incidencia sobre la ionosfera y la frecuencia [67]-[69]. En frecuencias superiores a 30 MHz raramente se dan las condiciones adecuadas para propagación por onda ionosférica.

Según se muestra en la Figura 2, la ionosfera se compone de capas con diferentes niveles de ionización que varían según el día y la noche y la época del año, aunque también se han observado variaciones con los ciclos solares [68], [69].

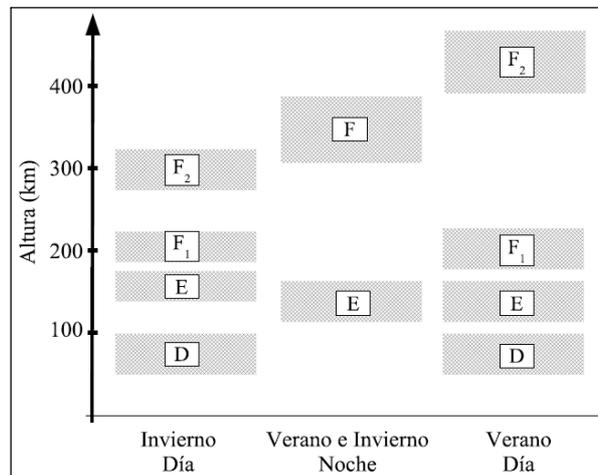


Figura 2. Variaciones de las capas de la ionosfera.

Cuando se utiliza la banda MF, durante el día la onda ionosférica es absorbida por la capa D de la ionosfera, que hace que la onda se atenúe considerablemente al atravesarla. Sin embargo, tras la puesta de sol, la capa D desaparece al no existir la fotoionización provocada por la luz solar, y la absorción es mucho menor, por lo que por las noches la onda ionosférica es la propagación predominante, proporcionando áreas de cobertura más extensas, que llegan a alcanzar miles de kilómetros.

La excelente propagación nocturna de la onda ionosférica produce interferencias dentro del área de cobertura propia de la onda de superficie, debido a que llega al receptor con una amplitud comparable, pero con un retardo importante. Este hecho limita considerablemente el área de cobertura de la onda de superficie en horario nocturno [25], [63], [65].

Por esta razón, la banda de Onda Media se utiliza principalmente para servicios de radiodifusión de ámbito geográfico nacional o regional, mediante la onda de superficie, durante las horas del día. En onda de superficie, el margen de cobertura, en horario diurno y sin interferencias, está limitado por la intensidad de ruido radioeléctrico [29], así como por la relación señal/ruido o S/N requerida.

Los métodos de modulación digital también pueden verse afectados por la presencia de señales retrasadas procedentes de la ionosfera, pero un esquema de modulación adecuado puede neutralizar o incluso aprovechar dicho efecto [25]. Este hecho se tiene en cuenta en los nuevos servicios de radio digital.

La ITU-R ha publicado varias recomendaciones que permiten estimar el alcance de la onda ionosférica [67], las variaciones de ésta [25], y la interferencia que produce sobre el área de cobertura de la onda de superficie [70]. Esta última referencia comenta aspectos sobre la planificación diurna y nocturna, y contiene recomendaciones para la mejora de la cobertura.

2.4 Modelos de propagación y métodos de predicción para la onda de superficie

Desde el primer modelo de propagación para la onda de superficie, diversos autores han desarrollado modelos cada vez más completos, y algunos de ellos han sido implementados en forma de algoritmos de predicción de nivel de campo. A continuación se describen los modelos y métodos de predicción más importantes en la estimación del nivel de campo eléctrico, generado por un transmisor para propagación por onda de superficie en la banda de Onda Media.

2.4.1 Modelo de Tierra plana

Sommerfeld desarrolló en 1909 el primer modelo de onda de superficie [71]. Obtuvo una solución para la función de atenuación de la propagación de la onda terrestre, cuando la señal es transmitida por un dipolo corto, y considerando la Tierra plana y con conductividad finita. Sommerfeld propuso descomponer la expresión del nivel de campo en una onda espacial y una onda de superficie, tal como se ha explicado anteriormente.

A partir de la teoría desarrollada por Sommerfeld, Norton obtuvo unas expresiones simplificadas de las componentes de nivel de campo para dichas condiciones de propagación [72], [73]. Esto le permitió obtener resultados principalmente en forma de gráficas y tablas, aunque también realizó algunas aproximaciones empíricas, lo cual resultó de gran utilidad en su época. Las expresiones de Norton tienen una precisión razonable cuando se trata de propagación en línea de visión directa [65].

2.4.2 Modelo de Tierra curvada

El modelo de tierra plana es válido cuando la distancia al transmisor no es grande. Para distancias mayores (cuando transmisor y receptor dejan de estar en línea de vista por el efecto de la curvatura de la Tierra), debe tenerse en cuenta el efecto de la difracción debido a la curvatura de la Tierra.

Modelo de Bremmer-Norton

Un modelo de propagación más realista es el denominado “Smooth-Earth Model”, desarrollado por Bremmer [74], que propone que la curvatura de Tierra introduce una disminución exponencial en el nivel

de campo a medida que la distancia al transmisor aumenta [63]. La distancia a partir de la cual se puede plantear este comportamiento se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{80}{\sqrt{f \text{ (MHz)}}} \text{ km} \quad (2.1)$$

Norton, en un trabajo posterior [75], obtuvo expresiones que permitían aplicar la teoría desarrollada por Bremmer en los algoritmos de planificación.

Modelo de Wait

Wait [76] propuso reformular la ecuación integral de Norton en forma de una serie de modos normales que se propagan por la superficie terrestre. Este modelo es más eficiente en la región obstaculizada por la curvatura terrestre, en contraposición a las expresiones de Norton, que responden mejor a la situación en la que el receptor se encuentra en visión directa con el transmisor [77].

2.4.3 Influencia de la atmósfera (método de predicción recomendado por la ITU-R para trayectos homogéneos)

Los estudios desarrollados por Sommerfeld, Norton, Bremmer y Wait no consideran la influencia de la atmósfera, y asumen que la onda que se propague por la atmósfera viajaría en línea recta [63]. Pero en realidad, la atmósfera tiene un índice de refracción que disminuye con la altura, generalmente de forma exponencial, aunque puede suponerse lineal cerca de la superficie.

La aplicación de esta consideración a los estudios de Sommerfeld, Norton, Wait y Bremmer supone aumentar artificialmente el radio de la Tierra, y se propone un “radio efectivo de la Tierra” que se debe utilizar cuando transmisor y receptor se encuentran cerca de la superficie y la frecuencia utilizada es inferior a 10 MHz [26], [78], [63].

Modelo de Rotheram

Rotheram [79]-[81] propuso incluir el comportamiento del “radio efectivo de la Tierra” mediante un factor multiplicativo que toma valores dentro del rango 1,2 – 1,25 en la banda de Onda Media [26], [63]. El método desarrollado por Rotheram además incorpora un índice de refracción que varía de forma exponencial con la altura.

Rotheram desarrolló tres métodos para predecir el nivel de campo eléctrico de la onda espacial y de la onda de superficie, que se propagan sobre un modelo de Tierra curvada y de conductividad homogénea, rodeada por una atmósfera uniforme con un índice de refracción exponencial [63]. Cada uno de los

métodos es válido en una región determinada, y todos ellos son válidos para un amplio rango de frecuencias. Son los siguientes [82]:

- Serie de residuos: utilizado para terminales cercanos a la superficie (con alturas inferiores a $\lambda^{2/3} \cdot a^{1/3}$) y para las distancias más lejanas, entendiéndolas como distancias superiores a $a^{2/3} \cdot \lambda^{1/3}$ km (donde a es el radio de la Tierra).
- Teoría de Tierra plana de Sommerfeld extendida: aplicable a distancias cercanas al transmisor (inferiores a $a^{2/3} \cdot \lambda^{1/3}$) y alturas de los terminales inferiores a $\lambda^{2/3} \cdot a^{1/3}$.
- Óptica geométrica (teoría de rayos): este método es aplicable en distancias dentro del horizonte, cuando las alturas de los terminales se encuentran por encima de las relativas a la aproximación de Sommerfeld ($\lambda^{2/3} \cdot a^{1/3}$). Se calcula la amplitud y la fase del rayo directo y del rayo reflejado, teniendo en cuenta la refracción de la atmósfera.

Estos métodos fueron implementados por Rotheram en el programa de predicción GRWAVE, utilizado por la ITU-R como método de predicción del nivel de campo de la propagación por onda de superficie, que se describe a continuación.

Método de predicción recomendado por la ITU-R para terreno homogéneo

Como se ha comentado en los párrafos anteriores, Rotheram implementó su modelo en un programa de predicción denominado GRWAVE, el cual fue utilizado por la ITU-R para elaborar curvas que permitan la rápida estimación del nivel de campo eléctrico en propagación por onda de superficie, que fueron publicadas en la recomendación ITU-R P.368-9 [64].

Estas curvas muestran el valor de nivel de campo en función de la distancia al transmisor, para una potencia de transmisor de 1 kW, transmitida por un monopolo vertical corto, un rango de frecuencias comprendido entre 10 kHz y 30 MHz y varios valores de conductividad y permitividad relativa del terreno [64]. La Figura 3 y la Figura 4 son dos ejemplos de las curvas incluidas en dicha recomendación, para varios tipos de suelo y frecuencias de transmisión. Se aprecia claramente que el alcance depende en gran medida del tipo de terreno (siendo mayor en zonas húmedas, debido a la mayor conductividad del terreno) y de la frecuencia (siendo menor el alcance cuanto mayor es la frecuencia).

Las predicciones incluidas en la recomendación ITU-R P.368-9 [65] consideran que los terminales están cerca de la superficie, por lo que no se utiliza la parte del método basada en la teoría de rayos de GRWAVE [63]. Las curvas de la Figura 3 y la Figura 4 muestran una línea a trazos que se corresponde con una relación inversa con la distancia ($1/D$). En regiones próximas al transmisor, el nivel de campo decae según dicha relación, en regiones intermedias el nivel de campo decrece según la relación $1/D^2$, y a

grandes distancias del transmisor, donde la curvatura de la Tierra se hace importante, lo hace exponencialmente [62], [65].

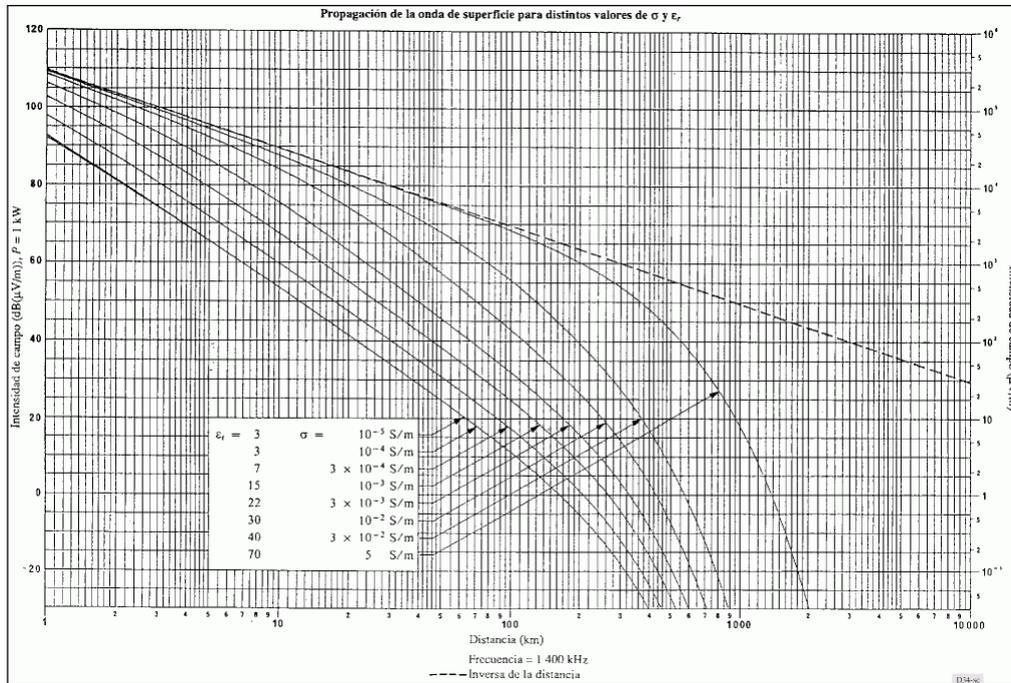


Figura 3. Curvas de predicción del nivel de campo eléctrico para trayectos homogéneos recomendadas por la ITU-R P.368-9. Ejemplo de curvas para una frecuencia fija y diferentes tipos de suelo.

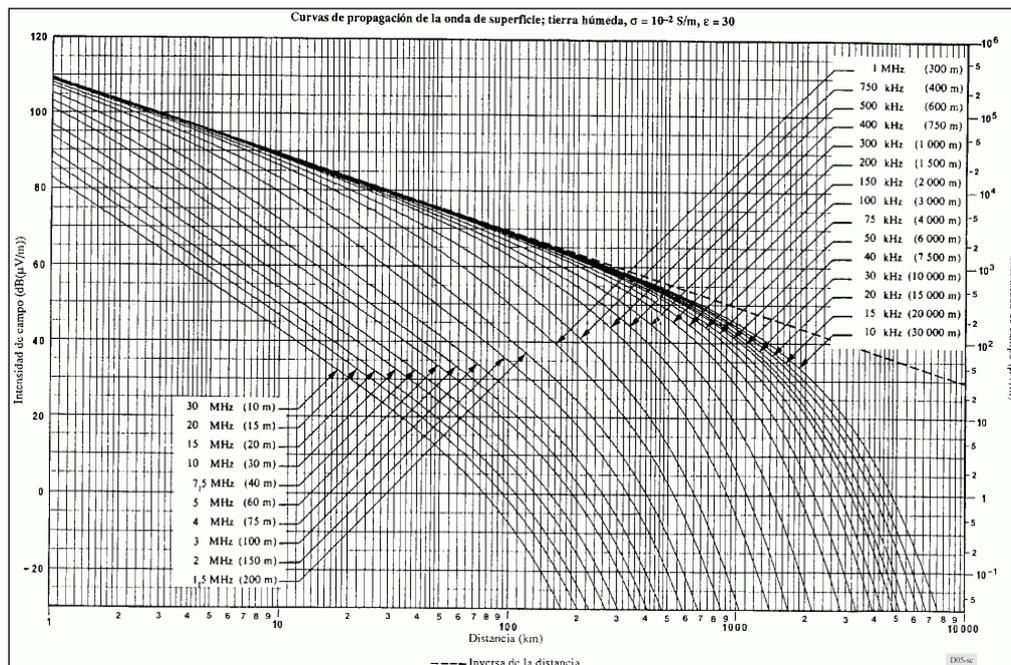


Figura 4. Curvas de predicción de nivel de campo eléctrico para trayectos homogéneos recomendadas por la ITU-R P.368-9. Ejemplo de curvas para un rango de frecuencias y tierra húmeda.

2.4.4 Trayectos con cambios de conductividad (método de predicción recomendado por la ITU-R para trayectos mixtos)

Todos los modelos descritos hasta ahora suponen terreno homogéneo, es decir, terreno en el que los valores de conductividad y permitividad permanecen constantes. Pero lo más habitual es que las características eléctricas del terreno varíen a lo largo del trayecto entre transmisor y receptor.

Para una situación en la que el trayecto está compuesto por tramos de diferente conductividad y permitividad, Eckersley sugirió que el nivel de campo podría ser calculado a partir de las curvas de predicción del programa GRWAVE [64], aplicando en cada tramo la curva correspondiente a sus valores de conductividad y permitividad [63]. Este método es conceptualmente correcto, pero no cumple el requisito de reciprocidad (si el transmisor y receptor intercambiasen su ubicación, el nivel del campo eléctrico obtenido debería ser igual).

Método de Millington

Millington [83], [84] presentó en 1949 un método sencillo, pero aparentemente eficaz, para solucionar este problema, que consistía en aplicar el método de Eckersley en los dos sentidos: del transmisor al receptor y del receptor al transmisor, y calcular el promedio (en dB) de ambos valores. El valor promedio fuerza que se cumpla el requisito de reciprocidad.

Aunque este método carecía de rigor matemático, aportaba una mezcla de teoría e intuición física, y era de fácil aplicación, frente al resto de métodos analíticos de la época, de muy difícil resolución e inapropiados para un uso práctico. Además, el trabajo de Millington fue realizado en unos años en los que las medidas de las variaciones del nivel de campo eléctrico en zonas con cambios de conductividad eran escasas [63].

Cuando se aplica el método de Millington a señales que se propagan desde una zona de conductividad elevada a una zona de menor valor de conductividad, en la discontinuidad aparece un descenso del nivel de campo eléctrico, y cuando la señal se aleja de la discontinuidad, el nivel de campo varía según lo determina el valor de la menor conductividad (ver Figura 5, [86]). Cuando el método se aplica en el caso contrario, el nivel de campo estimado experimenta un brusco ascenso cuando se pasa de la conductividad de menor valor a la de mayor valor. Millington explicó esta inesperada recuperación del nivel de campo según una redistribución de la energía de la señal desde la parte alta del frente de onda a la parte más baja [63], [83].

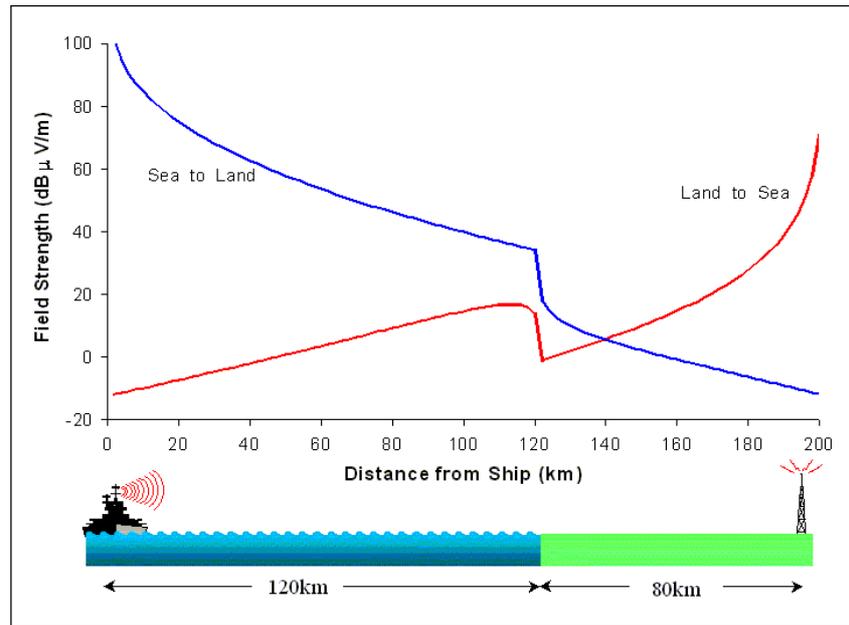


Figura 5. Predicción del nivel de campo eléctrico según el método de Millington en una discontinuidad tierra-mar.

En 1950, Millington e Isted [84] realizaron una serie de medidas para valorar esta recuperación de nivel de campo en una discontinuidad tierra-mar, a 3 MHz y a 75 MHz. Los resultados de las medidas presentaron una gran similitud con las predicciones.

Desde que fue propuesto, el método de Millington ha sido ampliamente utilizado, y es recomendado por la ITU-R [64] para la estimación de nivel de campo en onda de superficie en trayectos en los que la conductividad no se mantiene constante a lo largo del trayecto (trayectos mixtos).

Método de predicción recomendado por la ITU-R para trayectos mixtos

La recomendación ITU-R P.368-9 [64] recomienda utilizar el método de Millington en los trayectos en los que existen variaciones en las características eléctricas del terreno, indicando que “es el método más preciso disponible”. Para explicar el funcionamiento de este método, supongamos un trayecto formado por tres secciones (S_1, S_2, S_3) de longitudes (L_1, L_2, L_3), cuyos valores de conductividad y permitividad son ($\sigma_1, \epsilon_1; \sigma_2, \epsilon_2; \sigma_3, \epsilon_3$) tal como se indica en la Figura 6 [86].

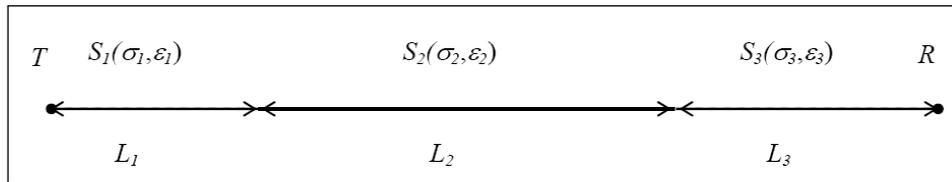


Figura 6. Método de Millington: ejemplo de aplicación a un trayecto mixto de tres secciones.

En el cálculo se utilizan las curvas correspondientes a cada tipo de terreno, como si todo el trayecto fuera homogéneo, desde el mismo origen T. De esta forma, mediante la curva correspondiente a la sección $S_1(\sigma_1, \epsilon_1)$, se determina el valor de la intensidad de campo $E_1(d_1)$ en $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$ a la distancia d_1 ; mediante la curva correspondiente a $S_2(\sigma_2, \epsilon_2)$ se determinan las intensidades de campo $E_2(L_1)$ y $E_2(L_1 + L_2)$; y con la curva correspondiente a la sección $S_3(\sigma_3, \epsilon_3)$ se determinan las intensidades de campo $E_3(L_1 + L_2)$ y $E_3(L_1 + L_2 + L_3)$. La intensidad de campo E_R en el receptor viene dada por la expresión:

$$E_R = E_1(L_1) - E_2(L_1) + E_2(L_1 + L_2) - E_3(L_1 + L_2) + E_3(L_1 + L_2 + L_3) \quad (2.2)$$

Después se aplica el mismo procedimiento en sentido inverso, tomando como origen de cálculo la ubicación del receptor. La intensidad de campo E_T en el receptor viene dada por la expresión:

$$E_T = E_3(L_3) - E_2(L_3) + E_2(L_3 + L_2) - E_1(L_3 + L_2) + E_1(L_3 + L_2 + L_1) \quad (2.3)$$

La intensidad de campo definitiva en el receptor según el método de Millington $E_M(R)$ viene dada por el promedio de los resultados anteriores, expresados en $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$:

$$E_M(R) = \frac{(E_R + E_T)}{2} (\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) \quad (2.4)$$

2.4.5 Influencia de la orografía del terreno y de los obstáculos urbanos

Si bien se ha demostrado en campañas de medidas realizadas en España en 2004 [86], [88] que el campo eléctrico mediano en localizaciones estáticas se ajusta bastante bien al método recomendado por la ITU-R P.368-9 [64] para terrenos homogéneos en entornos rurales y semiurbanos, se han realizado otros estudios de recepción o campañas en los que se ha observado la alta influencia de la orografía del terreno y la atenuación sufrida por diferentes elementos urbanos.

Por un lado, en [89] se presentan estadísticas de la atenuación sufrida por obstáculos en el terreno en entornos rurales en la frecuencia 1260 kHz con respecto a la predicción por onda de superficie de la recomendación ITU-R P.368-9 [64], que se resumen en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2. Atenuación de la señal DRM sufrida por obstáculos en 1260 kHz.

Altura del obstáculo	Distancia entre obstáculo y receptor			
	0 – 3 km	3 – 7 km	7 – 12 km	>12 km
$0,3\lambda - 0,75\lambda$	3 – 8 dB	< 5 dB	< 5 dB	< 4 dB
$0,75\lambda - 1,5\lambda$	5 – 11 dB	4 – 10 dB	-	-
$1,5\lambda - 2,5\lambda$	-	7 – 11 dB	5 – 9 dB	< 4 dB
$2,5\lambda - 4,0\lambda$	-	-	-	< 3 dB

Se observa que la atenuación sufrida depende de la distancia entre el obstáculo y el receptor, además de la altura o dimensión del obstáculo (que se da en función de la longitud de onda λ). A mayor altura del obstáculo, la atenuación de la señal es mayor, pero siempre que la distancia entre el obstáculo y el receptor sea inferior a aproximadamente 12 km, llegando incluso a valores de unos 11 dB de atenuación.

Por otro lado, en [90] se presentan también estadísticas de atenuación para entornos urbanos en las ciudades de Delhi, México D.F y Madrid. En este caso, la Tabla 3 resume las pérdidas con respecto al valor medio en una calle ancha o parque despejado con edificios colindantes pequeños, es decir, en lugares urbanos donde presumiblemente el valor del campo eléctrico se aproximaría al valor predicho para entornos rurales por la recomendación ITU-R P.368-9 [64]:

Tabla 3. Pérdidas medias en Onda Media con respecto al valor de campo en calles anchas.

Ciudad	Delhi	Mexico D.F.	Madrid
Frecuencia	666 kHz	1060 kHz	1260 kHz
Pérdida media en calle estrecha	4,2 dB	5,1 dB	9,2 dB
Desviación media en calle estrecha	0,6 dB	3,2 dB	0,3 dB
Pérdida media en calle estrecha	-	-	13,8 dB
Desviación media en calle estrecha	-	-	1,8 dB

Se presentan los valores medios de las pérdidas en calles de longitud media y calles estrechas independientemente (en ambos casos con respecto al campo en calles anchas y despejadas), junto con las desviaciones estándar con las diferentes localizaciones, llegando a observar pérdidas medias de hasta alrededor de 14 dB.

Se observan, en conclusión, pérdidas significativas en algunos casos rurales en los que los obstáculos sean de un tamaño considerable y se encuentren relativamente cerca del receptor, y en entornos urbanos exteriores en los que el grado de obstaculización o la densidad de edificios sea considerable.

Es lógico pensar, por lo tanto, que la atenuación sufrida al situar los receptores en el interior de edificios pueda ser relevante, por lo que resulta imprescindible realizar un estudio en profundidad para completar los estudios realizados hasta la fecha, prácticamente en su totalidad en exteriores.

3. PROPAGACIÓN DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS EN INTERIORES

3.1 Introducción

La propagación de ondas en el interior de edificios se rige por los mismos mecanismos que en el exterior: reflexión, difracción y dispersión [91]. Sin embargo, las condiciones son mucho más variables y no hay demasiados datos derivados de campañas de medidas reales, especialmente en la banda de Onda Media. La mayoría de los estudios se realizaron en frecuencias muy superiores a las de Onda Media, debido a los sistemas de comunicaciones inalámbricos como la telefonía móvil y comunicaciones a través de satélite.

En la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha, se puede decir que los estadísticos de la señal dentro de los edificios se pueden modelar mediante un proceso Log-normal para variaciones de gran escala o distancias grandes (mucho mayores que la longitud de onda) y procesos superimpuestos de pequeña escala [92] o distancias pequeñas (próximas a una longitud de onda), entre los que el más habitual suele ser del tipo Rayleigh aunque también se han observado otro tipo de distribuciones como las de tipo Rice, Weibull o Nakagami.

La señal recibida en el interior de edificios se ha venido expresando mediante la siguiente ecuación, siempre para frecuencias mucho más elevadas que las empleadas en Onda media [93]:

$$y(t) = L(t)R(t)e^{j\omega_c t + j\Phi(t)} \quad (2.5)$$

donde $\omega_c = 2\pi f_c$ y $\Phi(t)$ es una variable uniformemente distribuida entre 0 y 2π .

$R(t)$ representa las variaciones de pequeña escala y se ha venido caracterizando mediante una distribución tipo Rayleigh con una media o mediana estacionaria sobre distancias de pocas longitudes de onda.

$L(t)$, en cambio representa las variaciones de gran escala y varía de habitación a habitación dentro de un edificio, de edificio a edificio, etc. en frecuencias lo suficientemente elevadas como para que existan bastantes longitudes de onda entre las diferentes localizaciones. En ciertas ocasiones, se puede representar mediante la siguiente variable Gaussiana $U(t)$:

$$U(t) = 10 \log_{10} L^2(t) \quad (2.6)$$

En este caso se dice que las variaciones de gran escala representadas por $L(t)$ tienen una distribución Log-normal. Siendo $U(t)$ Gaussiana, su función de densidad de probabilidad sería la siguiente:

$$f_U(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.7)$$

donde la desviación estándar σ se da en dB. La media m varía con la distancia d entre el transmisor y la pequeña área de recepción considerada como:

$$m \propto 10 \log_{10}(d^n) \quad (2.8)$$

Por lo tanto, las pérdidas a gran escala se han venido caracterizando mediante lo que se denomina modelo de pérdidas del trayecto (PL, Path Loss) del logaritmo de la distancia, representado mediante la siguiente ecuación:

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R(d)} = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2.9)$$

donde el valor de n depende del tipo de edificio y su entorno y X_σ representa una variable aleatoria normal o Gaussiana en dB con una desviación estándar de σ dB. De esta forma, mediante la distancia de referencia d_0 , el exponente de pérdidas n y la desviación estándar σ , se podría caracterizar estadísticamente las pérdidas de trayecto para cualquier localización.

La distancia d_0 se calcula mediante la fórmula de pérdidas en el espacio libre a una distancia en la que se pueda considerar que nos encontremos en campo lejano con respecto a la antena transmisora. La distancia d_0 ha de ser mayor o igual que la distancia de Fraunhofer, que nos marca el inicio del campo lejano, dada por [91]:

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.10)$$

Sin embargo, esta fórmula es únicamente válida si se satisfacen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} d_f &\gg D \\ d_f &\gg \lambda \end{aligned} \quad (2.11)$$

donde D es la dimensión física de la antena.

En Onda Media no se satisface ninguna de las dos condiciones por lo que esta delimitación de la región de campo lejano no sería de aplicación.

En [94], sin embargo, se especifica que la región de campo lejano para frecuencias de Onda Media comienza a partir de la siguiente distancia:

$$d_f = 1,6\lambda \quad (2.12)$$

Por último, en [95] se cita que el límite de la zona de Fraunhofer o campo lejano es función de la frecuencia. La energía electromagnética atraviesa de forma gradual el límite entre ambas regiones, siendo difícil definir un punto concreto del espacio. Desde el punto de vista práctico, a la hora de realizar las medidas, se suele realizar la siguiente aproximación:

- Si la zona a validar se encuentra a una distancia mayor de tres longitudes de onda, se considerará dentro de la zona de campo lejano.
- Si la zona a validar se encuentra a una distancia menor de tres longitudes de onda, se considerará dentro de la zona de campo cercano.

Por lo tanto, a la frecuencia de 1 MHz y considerando el caso de [95] que es el más restrictivo, a partir de 900 metros se puede considerar que nos encontramos en campo lejano.

En campo lejano o zona de Fraunhofer la distribución angular de los campos es independiente de la distancia. El campo electromagnético radiado tiene un carácter de onda plana y los campos eléctricos y magnéticos son ortogonales entre sí, relacionándose de forma sencilla a través de la impedancia del medio:

$$E = H \cdot Z_0; Z_0 = 120 \cdot \pi \quad (2.13)$$

3.2 Estudio bibliográfico de pruebas empíricas de propagación en interiores

La ecuación (2.9) también ha sido empleada por numerosos investigadores para caracterizar diferentes canales de propagación ya sea en interiores o exteriores. Representa una distribución Log-normal que caracteriza el nivel de campo de numerosas localizaciones que se encuentran a la misma distancia del transmisor pero que tienen diferentes grados de obstaculización a lo largo del trayecto. Básicamente consiste en modelar las pérdidas del trayecto como una variable aleatoria Gaussiana aplicada sobre la pérdida media dependiente de la distancia al transmisor, en dB.

En una campaña de medidas realizada sobre 8 casas particulares en la banda de 800 MHz [93] se obtuvo un valor medio de 4,5 para el valor del exponente n , utilizando para su cálculo valores medianos de campo eléctrico en numerosas localizaciones de diferentes pisos de todos los edificios, incluso valores de campo eléctrico en el exterior de las viviendas. Se presentan en este estudio valores medianos de mediciones realizadas durante 20 segundos en pequeñas áreas para cada una de las 8 viviendas, y se representan gráficamente en función de la distancia al transmisor. También se realizan mediciones en mitad de las 4 calles que rodean a cada vivienda y se representan en el mismo gráfico, de forma que se puedan obtener rectas de aproximación minimizando el error cuadrático medio o MSE (Mean Square Error) y obtener así

el valor del exponente n que mejor se adapta a cada piso de cada vivienda y a cada entorno exterior y posteriormente se representan todos los casos en una única gráfica para obtener la mejor recta de ajuste de la que se obtiene el citado valor del exponente n de 4,5.

Se demostró también que las variaciones de gran escala podían caracterizarse mediante un proceso Log-normal, mientras que las variaciones en pequeñas áreas seguían una distribución tipo Rayleigh, que podían a su vez caracterizarse mediante el valor mediano del campo eléctrico en mediciones realizadas sobre pequeñas áreas. Lo mismo ocurría en edificios con paredes metálicas [96].

En otras medidas realizadas en 4 edificios en la frecuencia de 914 MHz [97] se obtuvo un valor del exponente para todas las mediciones de 3,14 y una desviación estándar de 16,3 dB.

La Tabla 4 muestra otros valores de estos parámetros para una serie de edificios y diferentes frecuencias [91]:

Tabla 4. Valores del exponente de pérdidas y desviaciones estándar para diferentes frecuencias publicadas en [91].

Edificio	Frecuencia (MHz)	n	σ (dB)
Almacenes minoristas	914	2,2	8,7
Almacenes verduras	914	1,8	5,2
Oficina, paredes gruesas	1500	3,0	7,0
Oficina, paredes finas	900	2,4	9,6
Oficina, paredes finas	1900	2,6	14,1
Fábrica con visión directa transmisor			
Textil/Química	1300	2,0	3,0
Textil/Química	4000	2,1	7,0
Papel/Cereales	1300	1,8	6,0
Siderurgia	1300	1,6	5,8
Casa Suburbana			
Interiores	900	3,0	7,0
Fábrica sin visión directa transmisor			
Textil/Química	4000	2,1	9,7
Siderurgia	1300	3,3	6,8

Se observó en algún caso, sin embargo, que la propagación se podía modelar con mayor precisión si se calculaba el exponente n en función del número de pisos que se atravesaban entre transmisor y receptor, así como el número de paredes de diferentes características atravesadas, como el entorno próximo al edificio. Se llega a conclusiones similares en cuanto a la distinción de diferentes parámetros o situaciones para el cálculo del exponente n en otras medidas realizadas en 900 MHz [98] y en torno a 2,5 y 5 GHz [99], [100].

Por lo tanto, cabe destacar que en todos los estudios citados, las desviaciones estándar disminuían al restringir los datos sobre los que se aplicaban las líneas de regresión para el cálculo del exponente n y la

desviación estándar a casos concretos como los siguientes: mismo piso, al atravesar un número determinado de pisos, edificios de la misma altura, mismos entornos, etc.

En cuanto al análisis de las variaciones de pequeña escala, el procedimiento más habitual suele ser tomar una serie de medidas en pequeñas áreas y calcular el valor medio de esas medidas, viendo posteriormente a qué distribución estadística se ajustan mejor las variaciones en esa pequeña zona. Por ejemplo, en [101] se observa cómo en aplicaciones de redes inalámbricas en interiores las variaciones de pequeña escala siguen una distribución de Rice cuando no hay obstrucción entre transmisor y receptor, mientras que cuando hay algún tipo de obstrucción, la distribución se aproxima a una de tipo Rayleigh.

En [102] se observó también que las variaciones de pequeña escala en edificios metálicos a 900 MHz seguían una distribución tipo Rayleigh.

Estas variaciones de pequeña escala se han analizado realizando medidas en movimiento en pequeñas áreas (del orden de la longitud de onda) ya que en esas frecuencias la mayoría de las aplicaciones son móviles. Sin embargo, en Onda Media la longitud de onda es elevada, en el sentido de que en una única longitud de onda probablemente se pase de un edificio a otro. Es por ello que las variaciones de pequeña escala también se han venido caracterizando como las variaciones de señal en localizaciones estáticas en pequeños periodos de tiempo. En una serie de campañas de medidas en la banda de Onda Media llevadas a cabo en exteriores para entornos rurales, semiurbanos y urbanos [103], se observó que considerando el método MLE (Maximum Likelihood Estimation) y el test Chi-Square de ajuste estadístico, en los entornos rural y semiurbano, la distribución Log-normal constituía un buen ajuste. En entorno urbano la distribución Weibull proporcionaba mejor ajuste para algo más de la mitad de los casos analizados mientras que el resto de los casos se describían mejor mediante una distribución Log-normal. En el caso de los entornos urbanos ninguna de las dos distribuciones proporcionaba un ajuste tan bueno como el que se obtenía en los entornos semiurbanos y rurales. En entornos urbanos, los obstáculos en el trayecto de propagación como construcciones y vehículos añadían factores de atenuación tan relevantes como la distancia al transmisor. También se observó que la desviación estándar en entornos urbanos era mucho mayor que en otros entornos.

Otro estudio habitual e interesante que se ha venido haciendo acerca de la propagación en interiores es el modelado de las pérdidas por penetración en edificios. En este escenario, el entorno inmediato de recepción puede contener numerosos obstáculos, de diferentes materiales que pueden variar en distancias mucho menores que en el exterior de edificios.

El concepto de pérdidas por penetración en edificios fue introducido por primera vez por Rice [104], para definir la diferencia entre la señal en un determinado piso del edificio y el nivel de señal mediano en las calles adyacentes al edificio. En este estudio se concluyó que las pérdidas por penetración seguían una

distribución Log-normal con una media de 24 dB y desviación estándar de 14 dB para 35 MHz y una media de 22 dB y desviación de 12 dB para 135 MHz. Así mismo, se llegaban a ver variaciones de hasta 20 dB en localizaciones no muy alejadas entre sí.

Las pérdidas por penetración dependen de numerosos factores entre los que se pueden citar, la frecuencia, el número y tamaño de ventanas, las condiciones de propagación en el trayecto, etc. Con todo ello, casi todos los modelos de predicción de señal en el interior de edificios han venido usando la técnica propuesta por Rice, inicialmente prediciendo el nivel mediano de señal en las calles adyacentes y posteriormente añadiendo las pérdidas por penetración.

La Tabla 5 muestra los valores medios de las pérdidas por penetración para tres frecuencias diferentes (441, 896,5 y 1400 MHz) para un edificio moderno de seis pisos [105], tomando como referencia el nivel de campo en las calles adyacentes al edificio al nivel del suelo. Las pérdidas por penetración disminuyen alrededor de 1,5 dB al pasar de 441 MHz a 896,5 MHz y otros 4,3 dB al pasar a 1400 MHz, resultados consistentes con las conclusiones de Rice [104].

Tabla 5. Pérdidas por penetración en edificios en diferentes frecuencias [105].

Planta	Pérdidas por penetración (dB)		
	441,0 MHz	896,5 MHz	1400,0 MHz
0	16,37	11,61	7,56
1	8,11	8,05	4,85
2	12,76	12,50	7,98
3	13,76	11,18	9,11
4	11,09	8,95	6,04
5	5,42	5,98	3,31
6	4,20	2,53	2,54

Las pérdidas entre diferentes pisos vienen determinadas por las dimensiones externas y materiales de construcción del edificio, así como del entorno inmediato. Incluso el número de ventanas y el tinte de las mismas (que atenúan la energía radioeléctrica) pueden tener influencia en estas pérdidas. En los pisos bajos se observa una mayor atenuación debido a la presencia de un mayor número de obstáculos y en pisos elevados, podría incluso existir un rayo directo entre transmisor y receptor por lo que las pérdidas por penetración serían menores.

La Universidad Técnica de Lisboa presentó resultados de una campaña de medidas llevada a cabo en 12 edificios de diferentes características para las bandas de frecuencias de 900 MHz [106]. Los edificios se clasificaron en 4 tipos:

- High-Integrated: edificios con más de 6 pisos y con edificios colindantes compartiendo alguna de las paredes.

- High-Isolated: edificios con más de 6 pisos y sin edificios colindantes compartiendo alguna de las paredes.
- Low-Integrated: edificios de hasta 6 pisos y con edificios colindantes compartiendo alguna de las paredes.
- Low-Isolated: edificios de hasta 6 pisos y sin edificios colindantes compartiendo alguna de las paredes.

En cuanto a los tipos de entorno empleados en [106], en [107] Molkdar propone otro tipo de clasificación más genérico basándose en una amplia bibliografía y resumida en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de entornos según Molkdar [107].

Número categoría	Descripción
1	Casas residenciales en áreas suburbanas
2	Casas residenciales en áreas urbanas
3	Edificios de oficinas en áreas suburbanas
4	Edificios de oficinas en áreas urbanas
5	Edificios de fábricas con maquinaria pesada
6	Otro tipo de fábricas, polideportivos, auditorios...
7	Entornos abiertos como aeropuertos, estaciones de tren...
8	Entornos subterráneos

En cuanto a la clasificación del tipo de estancia, en [106] las diferentes habitaciones u oficinas se clasificaron en 3 tipos:

- Indoor Light: habitaciones que tuviesen alguna ventana hacia el exterior.
- Indoor: habitaciones sin ventanas hacia el exterior pero con una sola pared hacia el exterior.
- Deep Indoor: habitaciones sin ventanas hacia el exterior y con al menos 2 paredes de separación hasta el exterior.

En otros estudios realizados, se distinguen únicamente habitaciones exteriores (tengan o no tengan ventanas) e interiores como se puede observar en la recomendación ITU-R P.679-3 para aplicaciones de satélite [108].

Volviendo al estudio realizado por la Universidad Técnica de Lisboa, cabe destacar que no se hace referencia al tamaño de las habitaciones ni al hecho de la orientación de las mismas con respecto al transmisor. Tampoco se hace mención al sistema de medidas ni al procedimiento de medidas.

Los resultados indican que las pérdidas por penetración en edificios en dB siguen una distribución Log-normal con una media de 5,7 dB y una desviación estándar de 11,1 dB. La siguiente Tabla 7 muestra los resultados más detallados teniendo en cuenta los diferentes edificios y habitaciones presentes en los mismos:

Tabla 7. Pérdidas por penetración medias (m) y desviaciones estándar (σ) en 900 MHz publicadas en [106].

	Deep Indoor		Indoor		Indoor Light		Media por tipo de edificio	
	m (dB)	σ (dB)	m (dB)	σ (dB)	m (dB)	σ (dB)	m (dB)	σ (dB)
High Integrated	8,8	8,9	7,2	9,3	4,5	9,4	5,6	9,5
High Isolated	5,8	11,5	2,0	11,7	1,2	10,1	2,0	10,8
Low Integrated	12,3	11,5	6,2	12,9	5,5	12,9	5,8	13,1
Low Isolated	12,3	12,2	9,0	9,0	8,3	11,2	9,1	11,2
Media por tipo de habitación	9,7	11,1	4,8	11,0	5,0	10,9	5,7	11,1

Se obtienen resultados similares en este estudio para las frecuencias de 1800 y 2100 MHz, con pérdidas medias algo superiores en ambos casos, en torno a los 7,5 dB.

En otro estudio sobre las pérdidas por penetración llevado a cabo en diferentes edificios de la ciudad de Londres para el sistema DAB (Digital Audio Broadcasting) [109] se observó que las pérdidas disminuían con la altura del piso. En este caso, no se tomaban valores medianos de nivel de campo en cada localización, sino valores medios.

También se desarrollaron medidas para DAB por la BBC en la frecuencia de 211 MHz [110] en las que se obtuvieron unas pérdidas por penetración medias del orden de 8 dB. En este estudio, se tomaron como niveles de referencia en el exterior, aquellos tomados en las calles con mejor disposición con respecto al transmisor. En este caso se tomó como valor representativo de las pérdidas por penetración aquellas que se daban en el peor caso, es decir, en la planta 0, calculadas como el valor medio de las pérdidas por penetración calculadas en 23 edificios. Las pérdidas por penetración en cada uno de ellos eran calculadas como la diferencia entre el valor mediano del nivel de campo eléctrico en diferentes localizaciones interiores y el valor mediano de diferentes localizaciones exteriores a nivel del suelo en la fachada iluminada.

En la recomendación ITU-R P.1812 de 2007 [111], sin embargo, las pérdidas por penetración se calculan como la diferencia entre el valor medio del nivel de campo (con respecto a las localizaciones) a una determinada altura en el exterior del edificio y el nivel medio del nivel de campo dentro del mismo edificio (con respecto a las localizaciones) a la misma altura. En la siguiente Tabla 8 se muestran los resultados de las pocas mediciones llevadas a cabo hasta la fecha mediante el citado procedimiento en 3 bandas frecuenciales:

Tabla 8. Pérdidas por penetración en 0,2, 0,6 y 1,5 GHz publicadas en [111].

Frecuencia	Valor mediano de las pérdidas por penetración (dB)	Desviación estándar de las pérdidas por penetración (dB)
0,2 GHz	9	3
0,6 GHz	11	6
1,5 GHz	11	6

Posteriormente, en los Radiocommunications Study Groups de la ITU se presentaron resultados y metodología de nuevas medidas de las pérdidas por penetración en edificios en la banda de UHF en torno a 800 MHz en 2008 [112]. Se tomaban medidas a una altura de 1,5 m en las habitaciones de 2 casas particulares en la ciudad de Brighton además de medidas de referencia en los exteriores de las viviendas, a diferentes alturas, de forma que se tuviese una referencia para cada altura de piso. Se presentan las probabilidades acumulativas del nivel de campo eléctrico en todas las mediciones y se presentan así mismo resultados de las pérdidas por penetración excedidas al 10%, 50% y 90% para cada estancia dentro de las viviendas y para cada uno de los 4 canales estudiados. Posteriormente se promedian los resultados de los 4 canales.

En otra campaña realizada en la frecuencia de 937 MHz [113] se realizaba una comparación entre el nivel de campo dentro de los edificios, en un punto situado en la parte central del edificio, y fuera de los mismos a la misma altura, así como con respecto a los niveles de campo a nivel de suelo en las calles adyacentes. Las pérdidas por penetración dependían de la altura, frecuencia, tipo de edificio y entorno inmediato. Las pérdidas que se observaban entre el nivel de campo dentro y fuera de los edificios a la misma altura variaban entre 10 y 25 dB. También se observó que con ventanas grandes las pérdidas eran mucho menores.

En [93], en cambio, las pérdidas por penetración se calculan como la diferencia entre la recta de aproximación del entorno exterior y la del piso en cuestión de cada edificio, aproximadamente en torno al centro del edificio. Este podría ser considerado un caso más representativo de las pérdidas por penetración, ya que se basa en una aproximación realizada con un mayor número de localizaciones.

En [114] las pérdidas por penetración se calculaban como la diferencia entre los valores medios de los valores medianos de diferentes recorridos en el interior del edificio y el valor medio de los valores medianos de diferentes recorridos en el exterior de los mismos. Se analizaron 10 edificios de similares características para las frecuencias de 900 y 1500 MHz, obteniendo unas pérdidas medias de 10,8 y 10,2 dB respectivamente.

Dado el poco consenso a la hora de calcular las pérdidas por penetración en edificios, la Radiocommunications Study Groups de la ITU propone en Mayo de 2008 [115] revisar la definición de

las pérdidas por penetración. Se propone definir las como “la diferencia entre el valor mediano con las localizaciones del nivel de señal en el exterior de la fachada iluminada y el nivel de señal dentro del edificio a la misma altura”.

En [116] se utiliza un procedimiento similar al propuesto en la ITU [115] utilizando el valor medio de las localizaciones en vez del valor mediano, para aplicaciones de DVB-H (Digital Video Broadcasting - Handheld) en la frecuencia de 600 MHz. Lo que ocurre es que la variabilidad de la señal en pocos metros es grande, por lo que se repite el procedimiento por zonas y se calcula el valor mediano de las pérdidas de todas las zonas para caracterizarlas.

En definitiva, no ha habido un consenso general a la hora de calcular las pérdidas por penetración en edificios en los diferentes estudios analizados en la bibliografía. La Tabla 9 resume los valores de las pérdidas por penetración de algunos de los estudios más relevantes descritos con anterioridad, si bien se sabe que la forma en las que se han calculado difiere de un estudio a otro. En algún caso, se han incluido únicamente las pérdidas en las plantas más bajas. Por último, también se han incluido las desviaciones estándar de las pérdidas por penetración en edificios y se puede apreciar, que en algunos casos se han obtenido valores muy elevados, indicando que la variabilidad espacial en interiores es considerable.

Tabla 9. Resumen bibliográfico de las pérdidas por penetración en bandas frecuenciales superiores.

Año	Lugar	Frecuencia (MHz)	Pérdidas penetración (dB)	Desviación estándar (dB)
1958	New York (USA)	35	24	14
		150	22	12
1988	Liverpool (UK)	441	16,4	-
		896,5	11,6	-
		1400	7,6	-
2006	Lisboa (Portugal)	900	5,7	11,1
		1800	7,6	12,0
		2100	7,3	12,5
1992	London (UK)	211	7,9	3
2007	-	200	9	3
		600	11	6
		1500	11	6
1983	Holmdel (USA)	815	15,2	7,6
1997	Schaumburg (USA)	900	10,8	5,8
		1500	10,2	5,6

4. RUIDO RADIOELÉCTRICO

El margen de cobertura en los servicios de radiodifusión, en horario diurno y sin interferencias, está limitado por la intensidad del ruido radioeléctrico, descargas atmosféricas y actividades humanas [29], además de por la relación señal a ruido requerida. Resulta por tanto de importancia conocer el comportamiento del ruido externo y estudiar su efecto en el funcionamiento del sistema DRM en Onda Media en interiores.

El ruido radioeléctrico externo a un sistema receptor de radiocomunicaciones está provocado por alguna de las siguientes causas [29]:

- Radiación procedente de descargas del rayo (ruido atmosférico debido al rayo).
- Radiación no intencionada procedente de maquinaria eléctrica, equipos eléctricos y electrónicos, líneas de transmisión de energía o sistemas de encendido de motores de combustión interna. Esto es lo que se conoce como ruido artificial (MMN–Man-Made Noise).
- Emisiones procedentes de hidrometeoros y de gases atmosféricos. Esto es lo que se conoce como ruido atmosférico.
- Obstáculos situados dentro del haz de la antena.
- Radiación procedente de fuentes radioeléctricas celestes. Esto es lo que se conoce como ruido galáctico.

Se define el factor de ruido externo, F_a , de un sistema de recepción de radiocomunicaciones a la entrada de la antena receptora (siendo esta un monopolo vertical corto) como:

$$F_a(dB) = E_n(dB\mu V/m) + 95,5 - 20 \cdot \log(f(MHz)) - 10 \cdot \log(b) \quad (2.14)$$

donde E_n es el campo eléctrico de ruido medido en la antena, f la frecuencia en MHz y b el ancho de banda del canal considerado en Hz.

La Figura 7 presenta los diferentes tipos de ruido externo contemplados por la recomendación ITU-R P.372-9 [29] y sus niveles para el rango de frecuencias de 10 kHz a 100 MHz.

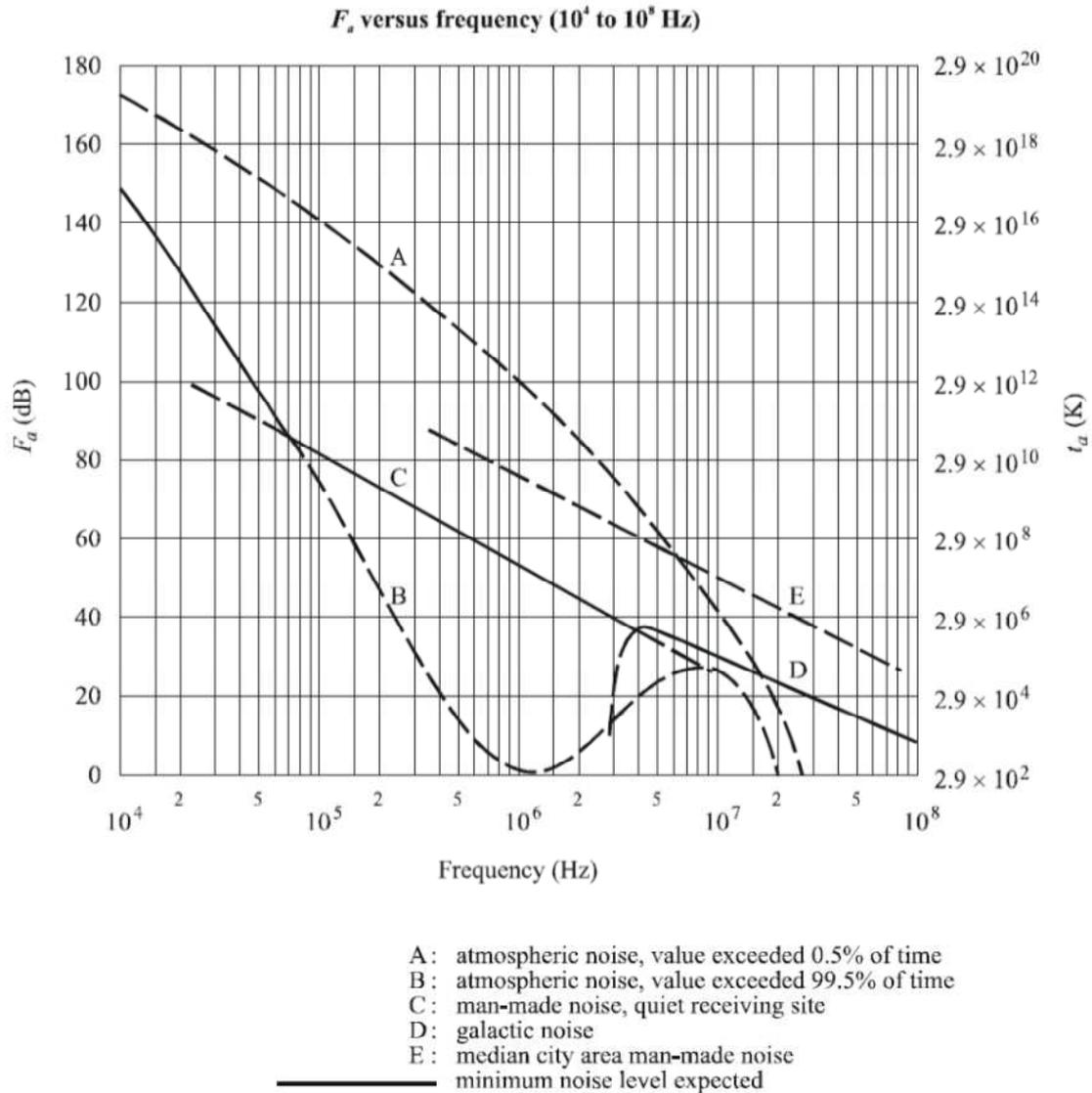


Figura 7. Factor de ruido externo en la banda de 10 kHz a 100 MHz.

En la banda de Onda Media, se observa que el tipo de ruido externo predominante es el ruido artificial. El ruido atmosférico presenta un factor de ruido muy pequeño en esta banda de frecuencias y el ruido galáctico sólo comienza a ser apreciable a partir de los 3 MHz.

En la Figura 8 se muestra el factor de ruido debido al ruido artificial en función de la frecuencia para un cierto número de entornos.

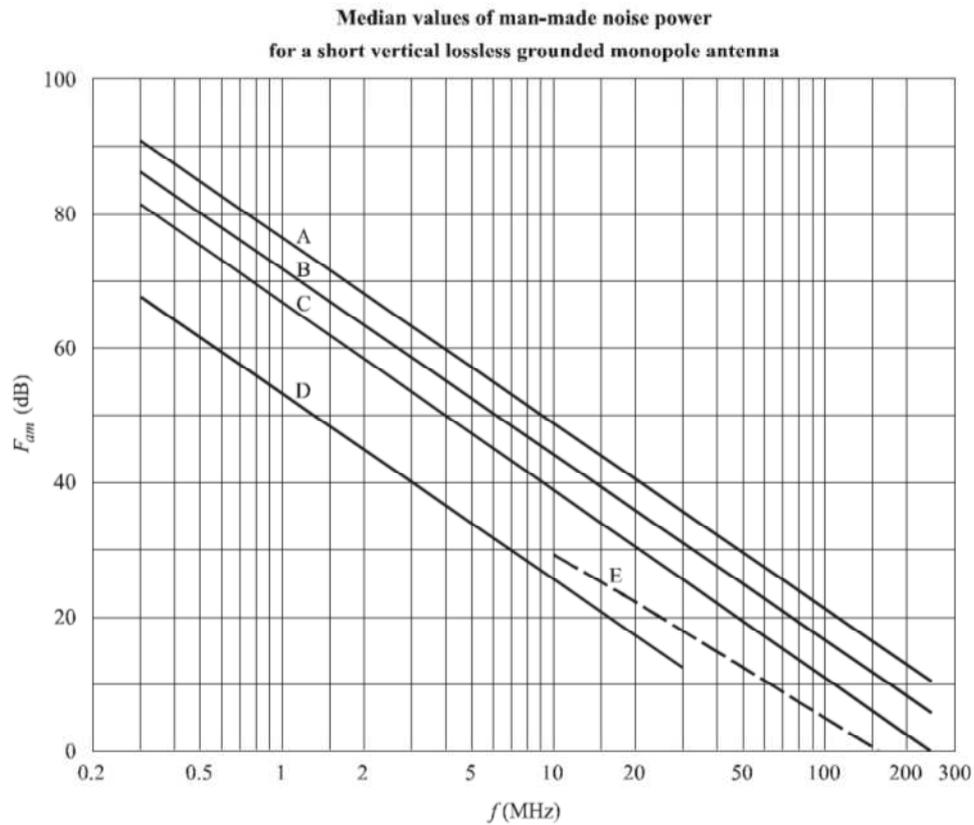


Figura 8. Factor de ruido externo debido a ruido artificial.

En todos los casos los resultados muestran una variación lineal con la frecuencia del valor mediano del factor de ruido artificial, F_{am} . Esta variación es de la siguiente forma:

$$F_{am}(dB) = c - d \cdot \log f(MHz) \quad (2.15)$$

La siguiente Tabla 10 reporta valores para los parámetros c y d en función del tipo de entorno (curvas de la Figura 8):

Tabla 10. Valores de c y d para la fórmula (2.15) del factor de ruido artificial de la Figura 8.

Tipo entorno	c	d
Ciudad (curva A)	76,8	27,7
Residencial (curva B)	72,5	27,7
Rural (curva C)	67,2	27,7
Rural tranquilo (curva D)	53,6	28,6
Ruido galáctico (curva E)	52,0	23,0

La ecuación (2.15) es válida en el rango de 0,3 a 250 MHz para todas las categorías del entorno excepto las de las curvas D y E. La curva D sólo es aplicable hasta 30 MHz y la curva E sólo es aplicable desde los 10 MHz.

El factor de ruido obtenido a partir de la ecuación (2.15) y de la Tabla 10 representa un valor mediano de la potencia de ruido, pero este valor de potencia varía en función del tiempo y del emplazamiento. La Tabla 11 muestra la desviación media de los decilos¹ superior e inferior con respecto al valor mediano (D_u y D_l) de la potencia de ruido según el tiempo y el emplazamiento para el rango de 0,3 a 250 MHz. Cabe suponer que estas variaciones no están correlacionadas y se puede asumir una distribución Log-normal centrada en el valor mediano [29].

Tabla 11. Desviaciones de los decilos del ruido artificial con las localizaciones y con el tiempo.

Entorno	Decilo	Variación con el tiempo (dB)	Variación con las localizaciones (dB)
Ciudad	D_u	11,0	8,4
	D_l	6,7	8,4
Residencial	D_u	10,6	5,8
	D_l	5,3	5,8
Rural	D_u	9,2	6,8
	D_l	4,6	6,8

Estos valores de potencia y desviaciones de ruido se midieron en el decenio de 1970 y han podido cambiar con el tiempo en función de las actividades que generan ruido artificial. En efecto, en campañas más recientes realizadas en exteriores en Madrid y México D.F. en 2004 y 2005 respectivamente [28], [117], se pudo comprobar que los niveles medianos de ruido externo eran al menos 10 dB superiores para Madrid y 40 dB superiores para México D.F. La variabilidad temporal y espacial, sin embargo, sí que coincidía con las de la recomendación ITU-R P.372-9 [29].

En otras medidas realizadas en frecuencias algo superiores, ya fuera de la banda de Onda Media, en la banda de 26 MHz [30], se observó también al menos un incremento de 3 dB en los niveles medianos de ruido artificial en entornos urbanos con respecto a los valores de la ITU-R P.372-9 [29].

¹ Un decilo es cualquiera de los 9 valores que dividen un conjunto ordenado de datos en 10 partes iguales, de forma que cada parte contiene un décimo del total de muestras

5. CONCLUSIONES

Una vez analizadas las características propias de la señal DRM y de su propagación en Onda Media así como los datos publicados del ruido radioeléctrico, y descritos los métodos de caracterización de la propagación en interiores y las pérdidas por penetración en edificios en otra gama de frecuencias más altas, se procede a continuación a enumerar o resumir las conclusiones más relevantes:

- El estándar digital DRM es un sistema con características ventajosas de propagación en Onda Media, al menos en entornos rurales y semiurbanos. Se han detectado desvanecimientos importantes en ciertas situaciones dentro de ciudades y queda por analizar su comportamiento en el interior de edificios, uno de los objetivos principales de esta tesis.
- Dado que a las bajas frecuencias de Onda Media la longitud de onda es muy elevada, es complicado diferenciar las pérdidas de gran y pequeña escala caracterizadas en otras frecuencias mucho más elevadas. Se estimará, por tanto, el campo eléctrico de la señal recibida en interiores en función del logaritmo de la distancia como se ha venido realizando para caracterizar las pérdidas de gran escala, pero sin poder diferenciar las pérdidas de gran y pequeña escala.
- Al estudio anterior habrá que añadirle un estudio de la variabilidad temporal de la señal recibida en interiores.
- En muchos estudios realizados en interiores, la variabilidad con las localizaciones ha sido siempre elevada, con desviaciones estándar superiores a los 10 dB.
- No existen datos de las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media y en los datos publicados para otras frecuencias más elevadas no ha habido consenso a la hora de establecer una metodología para su cálculo.
- Ha quedado demostrada la necesidad de realizar además nuevas campañas de medidas del ruido radioeléctrico para poder actualizar o completar los valores recogidos en la recomendación ITU-R P.372-9 [29] para interiores.
- Por último, en cuanto a la clasificación de entornos, se ha optado por centrar el estudio casi exclusivamente en casas residenciales y edificios de oficinas en entornos urbanos, que equivaldría a los entornos 2 y 4 de la clasificación realizada por Moltdar [107]. La razón de centrar la presente tesis en estos entornos no es otro que la presunción de que el mayor uso comercial del servicio fijo está siendo y será en este tipo de entornos.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y CAMPAÑAS DE MEDIDAS

En este capítulo se describe la metodología de estudio llevada a cabo para la consecución de los objetivos, además de las propias campañas de medidas cuyos resultados se han utilizado para caracterizar la recepción de señales y ruido en la banda de Onda Media en el interior de edificios de grandes núcleos urbanos.

En primer lugar, se realiza un estudio de necesidades para la consecución de los objetivos de la tesis. Se continúa presentando la metodología general de medidas y los parámetros de medida considerados, justificando la utilidad de los mismos para pasar a describir los sistemas de medidas empleados en las diferentes campañas de medidas y las redes de difusión. Se finaliza el capítulo describiendo las campañas de medidas en los edificios y entornos seleccionados.

1. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Tal y como se ha detallado en el “*Capítulo 2: Estado del arte*”, el estudio de recepción de señales en Onda Media en interiores se presenta como indispensable para completar los estudios exteriores realizados hasta la fecha. También se ha comprobado que los modelos de propagación existentes son insuficientes para caracterizar la recepción de señales en Onda Media en entornos urbanos, debido a los fuertes desvanecimientos de señal que se han podido detectar en muchos casos. Es por lo tanto previsible que en entornos urbanos interiores, los desvanecimientos de señal puedan ser importantes. Como consecuencia, es necesario realizar exhaustivas campañas de medidas en interiores con el objetivo de reunir datos empíricos suficientes para caracterizar la recepción de señales en interiores en Onda Media. Adicionalmente, observados los incrementos de nivel publicados en otros estudios llevados a cabo en exteriores en Onda Media, será necesario medir el ruido radioeléctrico en interiores.

Como se describirá en subsiguientes apartados, para la caracterización de la recepción del estándar DRM en Onda Media, se tuvo la ocasión de analizar experimentalmente una emisión realizada en un canal de 9 kHz centrado en 1260 kHz desde Pozuelo de Alarcón (Madrid) en una serie de edificios de la comunidad de Madrid. Debido a la limitación temporal de la emisión experimental, no se pudieron realizar mediciones en un número elevado de edificios y localizaciones pero, como se detallará posteriormente, los resultados servirían para obtener unas primeras conclusiones del comportamiento de la señal DRM en Onda Media en interiores. Dado que se tomaron mediciones también en un canal libre de 9 kHz en la frecuencia de 1287 kHz, se obtuvo también una primera aproximación de los niveles de ruido presentes en el interior de edificios en Onda Media.

Para completar el estudio, se requeriría entonces analizar un mayor número de edificios, en diferentes entornos, diferentes distancias con respecto al transmisor y, por último, diferentes frecuencias dentro de la banda de Onda Media comercial. Sin embargo, no se dispone de suficientes emisiones digitales DRM actualmente a nivel nacional como para analizar diferentes frecuencias de Onda Media, diferentes distancias, ni entornos diferentes por lo que se decidió analizar emisiones analógicas AM en las ciudades de Bilbao y Vitoria-Gasteiz. En estas localizaciones se tuvo la ocasión de tomar numerosas mediciones interiores de diferentes frecuencias en un número elevado de edificios y localizaciones como se detallará en un apartado posterior. Se decidió tomar también mediciones exteriores en los mismos edificios para estimar unas posibles pérdidas por penetración en Onda Media que, tal y como se ha descrito en el “*Capítulo 2: Estado del arte*”, siguen sin estar caracterizadas hasta la fecha.

Concretamente se realizó un estudio de recepción de las señales AM radiodifundidas en las frecuencias 639, 990 y 1305 kHz en Bilbao y alrededores y en 612, 1197 y 1602 kHz en Vitoria-Gasteiz.

En cuanto al estudio del ruido, se eligieron los siguientes canales libres de emisiones en las zonas de cobertura analizadas: 675, 1035 y 1242 kHz en Bilbao y alrededores y 630, 1242 (nuevamente) y 1620 kHz en Vitoria-Gasteiz.

Dado que la canalización de 9 kHz empleada para las señales moduladas en Onda Media en Europa es inferior al ancho de banda de coherencia en entornos urbanos (estimado en unos 53 kHz en [62]), se puede concluir que el canal es plano en frecuencia por lo que las señales digitales DRM y analógicas AM en Onda Media se comportarían presumiblemente de manera similar en cuanto a nivel de campo recibido.

Por otro lado, la potencia de una señal analógica modulada en amplitud viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{AM} = \frac{A_c^2}{2} (1 + m^2 \cdot P_x) = \frac{A_c^2}{2} + \frac{A_c^2}{2} m^2 \cdot P_x = P_{portadora} + P_{bandas laterales} \quad (3.1)$$

donde:

m : índice de modulación con valor máximo 1 (para que no haya sobremodulación).

A_c : amplitud de la portadora en Voltios (V).

P_x : potencia de la señal moduladora de audio con valor máximo 1W (para que no haya sobremodulación).

La densidad espectral de potencia o PSD (Power Spectral Density) de una típica señal de voz podría ser la representada en la Figura 9:

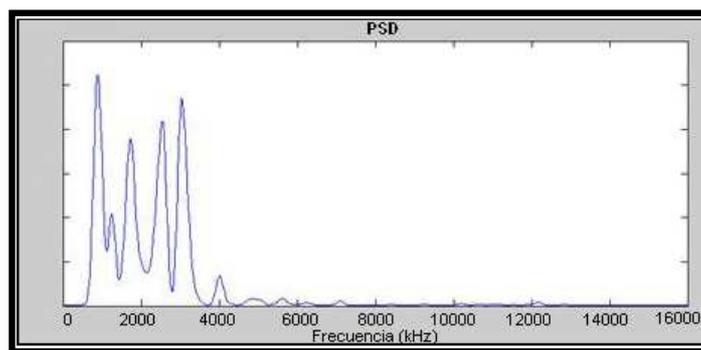


Figura 9. PSD de una señal de voz.

Y la PSD de la misma señal de audio modulada en amplitud en una portadora de 8 kHz a modo de ejemplo viene representada en la siguiente Figura 10:

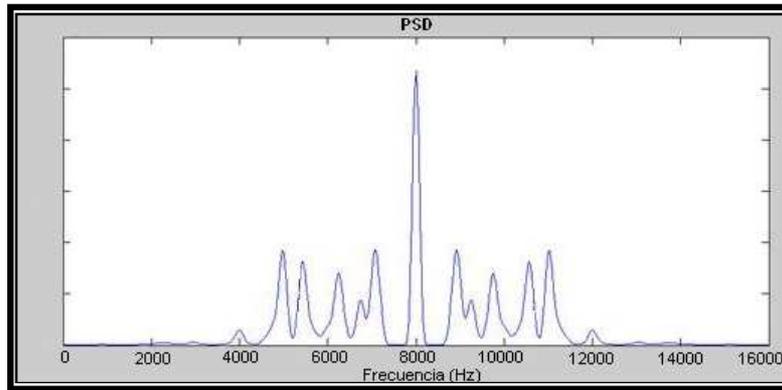


Figura 10. PSD de una señal de voz modulada en AM.

Las señales de voz, y en general las señales de audio, no tienen componentes de muy bajas frecuencias, por lo que la portadora de la señal AM correspondiente queda aislada de las bandas laterales en unas cuantas decenas de Hz. Con el objetivo de independizar las medidas de las variaciones propias de la señal de audio o moduladora (y por lo tanto, del valor de su potencia y del índice de modulación), se optará por medir únicamente la potencia de la portadora en cada uno de los casos analizados, ajustando el ancho de banda de resolución de los medidores de campo a 100 Hz alrededor de la portadora de cada emisión a analizar. De esta forma, se dispone además de, al menos, la mitad de la potencia de la señal modulada en esos 100 Hz (ya que como máximo $m=1$ y $P_x=1$ (ver ecuación (3.1)), en vez de tenerla distribuida uniformemente a lo largo del canal habitual de 9 kHz como ocurre en las señales digitales DRM. Por lo tanto, en caso de sufrir un supuesto desvanecimiento plano profundo, la señal digital quedaría antes enmascarada por el ruido que la portadora de una señal AM al realizar las mediciones, ya que el nivel de ruido en 100 Hz será siempre inferior al presente en todo el canal de 9 kHz. Es por ello que incluso nos supone una ventaja medir la portadora AM antes que una señal digital DRM.

Cabe comentar que en algún caso podría existir algún sonido creado por algún tipo de instrumento (que no la voz) que pudiese generar componentes frecuenciales muy bajas (de menos de 50 Hz) por lo que en determinados casos la potencia de la señal medida (portadora + sonido de baja frecuencia) se vería incrementada ligeramente (en 3 dB en el peor de los casos, poco probable, en el que la señal de audio únicamente estuviese constituida por esos sonidos de baja frecuencia y con toda la potencia disponible) que nos llevaría a concluir erróneamente que el nivel de señal presenta una ligera variabilidad temporal.

Para las medidas de ruido, sin embargo, habría que mantener el ancho de banda de resolución de 9 kHz, canalización empleada en las emisiones comerciales de AM y DRM en Europa para estimar el ruido completo que se espera detectar junto con la señal modulada.

El parámetro fundamental de estudio será el nivel de campo eléctrico de las señales DRM y AM además del nivel de campo eléctrico del ruido. En el caso de señales moduladas en DRM (campaña de medidas de Madrid), se optó por almacenar datos auxiliares como el porcentaje de tramas de audio correctamente decodificadas, las componentes en fase y cuadratura de la señal modulada, así como archivos RSCI [59] en los que se nos informa de diferentes estados de recepción, dada la posibilidad que ofrecía el sistema de medidas que se detallará posteriormente.

Por otro lado, para las campañas de medidas de señales AM, no se tenía control absoluto del nivel de potencia transmitido por los respectivos radiodifusores (aunque se garantizó por parte de los operadores que no debería variar significativamente). Por ello se optó por situar un sistema de monitorización de señales AM que almacenase continuamente el valor de señal recibido en el tejado de edificios lo suficientemente despejados, para tener registradas posibles variaciones de potencia de portadora emitida por los radiodifusores y en ese caso, añadir el factor de corrección necesario a las medidas realizadas en las diferentes estancias de los edificios. Se pudo comprobar, sin embargo, que el nivel de señal registrado en este caso se mantenía suficientemente estable como para poder corroborar que no hay cambios en la potencia emitida por los radiodifusores de las emisiones analizadas, como cabía esperar. En la campaña experimental de DRM de Madrid se tuvo, en cambio, control total de la potencia emitida por la estación transmisora y no hubo necesidad de instalar ninguna estación de monitorización.

Por último, con el objetivo de analizar la variabilidad temporal a largo plazo, se realizaron mediciones durante 48 horas aproximadamente en una serie de localizaciones interiores, como se describirá posteriormente.

2. METODOLOGÍA DE MEDIDA

La metodología fundamental de medida consistió en realizar mediciones RMS (Root Mean Square) de señal y ruido con un tiempo de integración de 400 milisegundos (duración de la trama de la señal DRM [1], [5]) en puntos estáticos durante un tiempo ininterrumpido de 4 minutos por frecuencia para las campañas de medidas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz. Se midió por lo tanto en cada localización realmente durante 24 minutos, dado que en cada una de ellas se realizaron mediciones de 4 minutos para cada una de las 3 frecuencias de señal y 3 de ruido, de forma consecutiva. En la campaña experimental de DRM de Madrid, sin embargo, se realizaron mediciones de 3 minutos para la frecuencia de la señal DRM y otros 3 minutos para el canal de ruido en cada una de las localizaciones, debido a limitaciones de tiempo, tal y como se ha venido realizando en otros estudios en frecuencias similares [18], [88], [103].

De esta forma, con el gran número de localizaciones analizadas en Bilbao y Vitoria-Gasteiz que se detallarán posteriormente, se tendrían numerosos datos empíricos para poder analizar la variabilidad espacial del nivel de campo de señal y ruido en Onda Media en el interior y exterior de edificios y también la variabilidad temporal, al menos a corto plazo.

Por otro lado, con el objetivo de poder realizar un análisis de la variabilidad temporal de la señal y del ruido a largo plazo, se realizaron también una serie de medidas en localizaciones de edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz durante un tiempo aproximado de 48 horas. Se decidió tomar muestras RMS con un tiempo de integración de 400 milisegundos de cada una de las 3 frecuencias de señal y 3 de ruido, esta vez alternativamente, creando un ciclo. Debido a los tiempos que requieren los equipos de medida que se describirán posteriormente para su configuración, cada ciclo en el que se tomaba una muestra por cada frecuencia no duraba 2400 milisegundos, sino que rondaba los 10 segundos, es decir, se tomaría una muestra de cada una de las frecuencias (tanto de señal como de ruido) cada 10 segundos.

Por motivos evidentes, el número de localizaciones en las que se midió durante 48 horas fue bastante inferior al número de localizaciones en las que se recogieron datos únicamente durante 4 minutos, como se detallará posteriormente.

Por último, conviene matizar que las medidas de corta duración realizadas en las tres campañas de medidas se realizaron en horario diurno, con el objetivo de evitar posibles interferencias ionosféricas de otros transmisores. De las localizaciones de larga duración, por tanto, se filtraron las muestras tomadas durante el horario nocturno.

3. REDES DE DIFUSIÓN

3.1 Red de difusión de la campaña de medidas en Madrid

El sistema de transmisión para las pruebas DRM realizadas en Madrid fue instalado en la estación transmisora de Pozuelo de Alarcón en Madrid (Figura 11).



Figura 11. Estación transmisora en Onda Media de Pozuelo (Madrid).

La instalación fue llevada a cabo en Junio de 2007. El objetivo del sistema de transmisión era el de permitir transmitir tanto MCS (Multi Channel Simulcast) como señales DRM monocast a través de una antena actualmente no usada. Para las medidas realizadas en interiores se transmitió una señal DRM monocast en la frecuencia de 1260 kHz.

Para llevar a cabo las pruebas de campo, Transradio proporcionó un transmisor TRAM 25, diferentes filtros, un dispositivo de sintonización de antena, un proveedor de contenidos de Fraunhofer, un sistema de sonido M-Audio Delta 1010 y un generador de señal DRM-DMOD2 de Transradio. El esquema de transmisión aparece reflejado en la Figura 12.

En la Tabla 12 se resumen los datos de localización del transmisor, operador, frecuencia y potencia transmitida:

Tabla 12. Configuración de transmisión del sistema DRM en Madrid.

Sistema de modulación	Operador	Coordenada XUTM	Coordenada YUTM	Altura antena (m)	Potencia (kW)	Frecuencia (kHz)
DRM	SER	3W4852	40N2570	96	12,5	1260

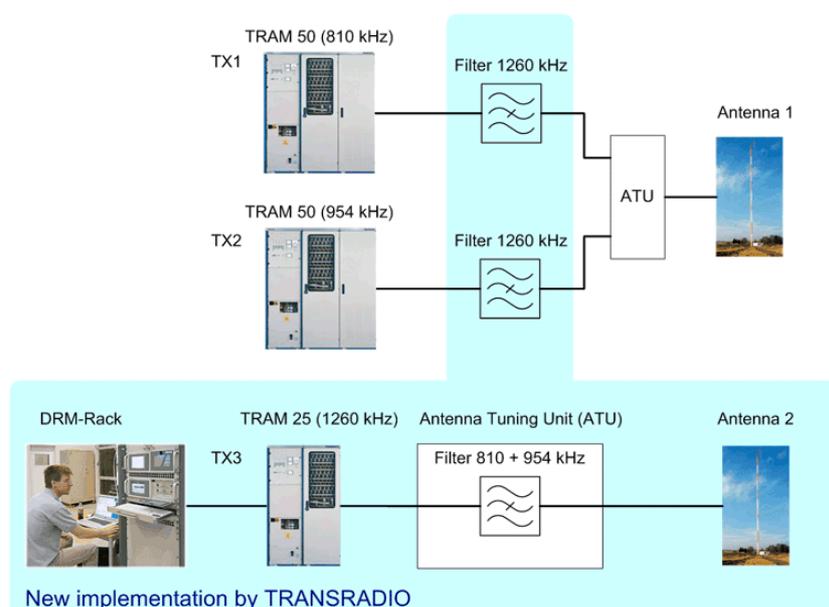


Figura 12. Esquema del sistema de transmisión DRM instalado en Pozuelo (Madrid).

En cuanto a la configuración específica OFDM utilizada, los parámetros utilizados fueron A/64/16/05/S con 9 kHz de ancho de banda. Concretando los términos, se utiliza una modulación 64QAM para el canal de datos MSC, una modulación 16QAM para el canal de descripción de datos SDC y las portadoras dentro del espectro se configuran según el modo A del estándar de DRM [7]. Este modo es el recomendado para señales que se propagan en Onda Media por un canal, en principio, muy estable. Además se utiliza una redundancia de código de 0,5 y entrelazado corto que proporciona una tasa binaria de 19,7 kbps, suficiente para emitir un canal de audio estéreo paramétrico.

3.2 Red de difusión de la campaña de medidas en Bilbao y alrededores

En la Tabla 13 se pueden observar los datos más relevantes de las transmisiones analizadas en Bilbao y alrededores:

Tabla 13. Transmisiones AM analizadas en Bilbao y alrededores.

Sistema de modulación	Operador	Coordenada XUTM	Coordenada YUTM	Altura antena (m)	Potencia (kW)	Frecuencia (kHz)
AM	R.1 Bilbao (RNE)	2W3504	43N1530	90	40	639
AM	R. Bilbao (SER)	2W5508	43N1649	60	25	990
AM	R.5 Bilbao (RNE)	2W5429	43N1613	60	6	1305

Conviene recordar que, en este caso, la potencia de emisión se refiere a la potencia de portadora (y no toda la potencia de la señal AM), que es la potencia que interesa medir, como se ha explicado anteriormente. En cuanto a los canales elegidos, se optó por esas tres frecuencias para cubrir de la forma más uniforme posible toda la banda comercial de Onda Media.

3.3 Red de difusión de la campaña de medidas en Vitoria-Gasteiz

En la Tabla 14 se pueden observar las emisiones de los centros transmisores de Estibaliz y Berrostegieta analizadas en edificios de Vitoria-Gasteiz:

Tabla 14. Transmisiones AM analizadas en Vitoria-Gasteiz.

Sistema de modulación	Operador	Coordenada XUTM	Coordenada YUTM	Altura antena (m)	Potencia (kW)	Frecuencia (kHz)
AM	R.1 Vitoria-Gasteiz (RNE)	2W4232	42N4834	90	10	612
AM	Radio Euskadi (EiTB)	2W3435	42N5076	82,5	10	1197
AM	R. Vitoria-Gasteiz (EiTB)	2W3435	42N5076	82,5	25	1602

Nuevamente, se optó por esas tres frecuencias para cubrir de la forma más uniforme posible toda la banda.

4. SISTEMAS DE MEDIDAS

Se emplearon dos sistemas de medidas diferentes, ya que a lo largo de las campañas de medidas se recogieron datos de sistemas de radiodifusión diferentes: por un lado, en Madrid se analizó el comportamiento del servicio digital DRM y en las restantes campañas, se analizó el comportamiento del sistema analógico actual en Onda Media (AM).

El sistema de medidas empleado para interiores en todas las campañas estaría instalado en un carro portátil que facilitase el movimiento a través de las diferentes estancias de los edificios.

En los siguientes apartados se describirán detalladamente los elementos hardware y software de los sistemas de medidas y se presentará un esquema de bloques de los mismos. También se hará una ligera descripción de las diferentes antenas empleadas.

4.1 Equipamiento de medidas para el sistema DRM

La composición y distribución de todos los equipos que componen el sistema de medidas para el sistema DRM [118] se representan esquemáticamente en la Figura 13 y Figura 14. La diferencia radica en la antena utilizada: una antena de varilla pasiva en el primer caso y una antena activa de aro en el segundo.

En ambos casos, el sistema de medidas se puede dividir en tres secciones: la sección de adquisición y distribución de señal, la sección de equipamiento de medida y la sección de control.

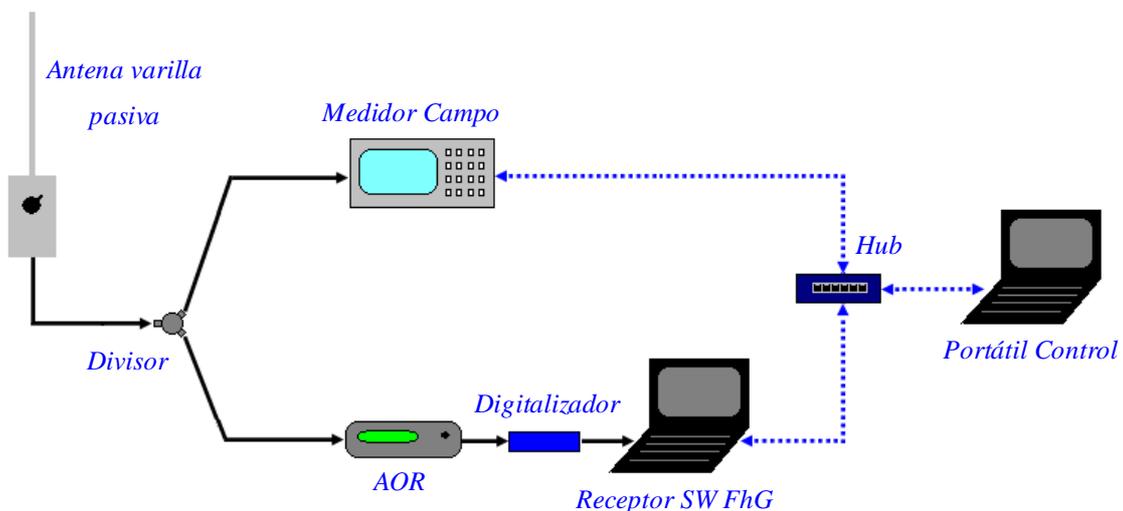


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema DRM con antena de varilla pasiva.

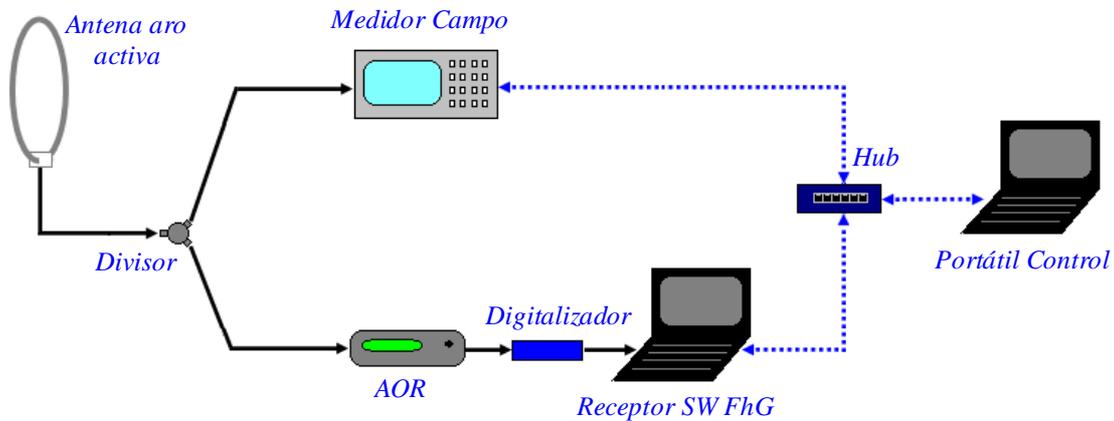


Figura 14. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema DRM con antena de aro activa.

El sistema de adquisición lo constituye la antena empleada para cada caso. Para medir señal DRM se empleó una antena de aro activa de Wellbrook Communications modelo ALA 100 [119]. Esta antena tiene la ventaja de disponer de acoplamiento magnético por lo que rechaza fuentes de ruido eléctrica y al ser activa, nos permite detectar señales de menos nivel que con una antena pasiva (el factor K de antena es de 20 dB/m), por lo que esta antena se empleó para medir niveles de señal modulada en DRM. Para medir niveles de ruido, en cambio, se optó por una antena omnidireccional de varilla pasiva de ETS Lindgren Modelo 3303 [120]. Esta antena se empleó para medir niveles de ruido ya que en las antenas activas es más complicado determinar el nivel de ruido interno de la propia antena.

La señal que dichas antenas recibían era distribuida adecuadamente hacia el front-end del receptor profesional DRM AOR7030 + Digitalizador Presonus Firefox + Receptor SW Fraunhofer [121] y al medidor de campo R&S ESPI3 [122] en modo receptor a través de un divisor de potencia que atenuaba la señal en 6 dB por cada una de las salidas.

El sistema de recepción estaba formado por los dos equipos principales anteriormente comentados. El medidor de R&S ESPI3 [122] era utilizado para realizar medidas de ruido y de campo eléctrico de la señal DRM con buena precisión. Por otro lado se usaba como receptor profesional de DRM un conjunto formado por un front-end de RF, el AOR7030, una tarjeta de sonido Presonus Firefox para digitalizar la señal y un demodulador software de Fraunhofer con lo que se podía realizar la captura de todos los parámetros requeridos de la señal DRM. Además almacenaba medidas de señales en frecuencia intermedia y audio de la señal demodulada.

El sistema de control se basaba en un ordenador portátil ejecutando un software de control diseñado específicamente por el grupo TSR (Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones) de la Universidad del País Vasco, sobre la plataforma GNU/Linux cuyas tareas eran configurar y controlar el resto del equipamiento y calcular algunos de los estadísticos de dichos parámetros durante las medidas.

El sistema de medidas capturaba un conjunto de parámetros de la señal DRM y de datos auxiliares y los almacenaba convenientemente en archivos de formato texto plano. Estos parámetros básicos eran almacenados para cada señal medida en intervalos de 3 minutos. Los estadísticos generados se almacenaban en un archivo de texto plano para cada una de las medidas realizadas. La Tabla 15 muestra los parámetros medidos por los diferentes módulos del sistema para la señal DRM.

Tabla 15. Parámetros medidos en la señal DRM.

Equipo	Tipo	Parámetro	Frecuencia muestreo
Receptor DRM	RF	Intensidad de Campo	400 milisegundos
		MER	
		Ensanchamiento por retardo	
		Ensanchamiento Doppler	
	FI	Señal IQ	
	Banda base	Distribución de las tramas de audio erróneas	
Medidor de campo	RF	Intensidad de campo eléctrico	400 milisegundos

Además de los parámetros básicos y los estadísticos calculados, la señal en frecuencia intermedia de entrada muestreada y el conjunto de parámetros de medida especificados en el estándar RSCI [59] de la señal DRM eran almacenados en ficheros binarios.

Para el ruido se realizaba exactamente lo mismo en un canal adyacente, aunque posteriormente sólo se emplearían los datos de nivel de campo eléctrico recibido.

4.2 Equipamiento de medidas para el sistema AM

La composición y distribución de todos los equipos que componen el sistema de medidas portátil para el sistema AM se presentan en la Figura 15:

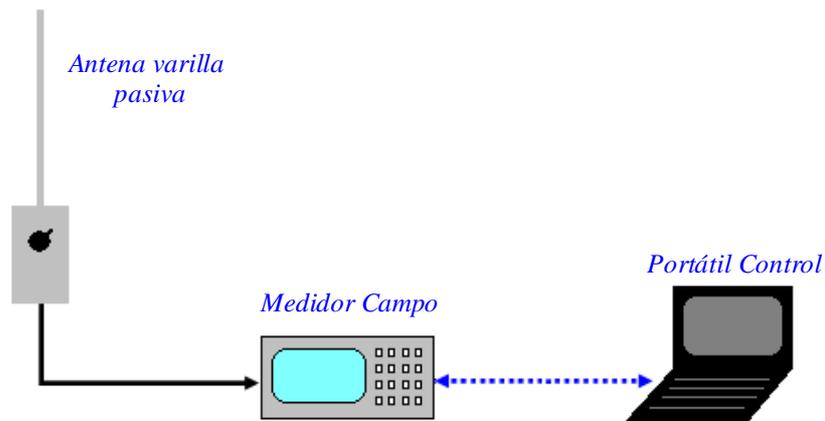


Figura 15. Diagrama de bloques del sistema de medidas para el sistema AM con antena de varilla pasiva.

En este caso, se redujo el número de elementos de medida, ya que el parámetro fundamental necesario para los estudios que se pretendían llevar a cabo era el nivel de campo de señal y niveles de ruido en las diferentes frecuencias analizadas. Por lo tanto, la señal recibida por las antenas se distribuía directamente al medidor de campo ESPI3 [122] en modo receptor sin utilizar un divisor. El motivo fundamental es que en este caso se están midiendo señales moduladas en AM y no se necesita un receptor profesional DRM para demodular y extraer los parámetros de ese tipo de señal digital. Además, es preferible no desaprovechar los 6 dB de atenuación que nos introduce el divisor. Por lo tanto, se diseñó un software de control nuevo basado en la herramienta VEE Pro de Agilent que nos permitiese este tipo de configuración sin la necesidad de detectar un receptor profesional de DRM y básicamente su misión sería la extracción y almacenamiento del nivel de campo eléctrico en todo caso, junto con la fecha y hora de captura de datos. Se decidió mantener la frecuencia de captura de 400 milisegundos (duración de la trama DRM) empleada en el sistema DRM, para posibles comparaciones.

En cuanto a la antena, dados los niveles de señal más elevados de las transmisiones AM analizadas y que únicamente se mide la portadora ajustando el ancho de banda de resolución a 100 Hz (limitando de esta forma el ruido recogido por el sistema), se opta por utilizar la antena pasiva de ETS Lindgren Modelo 3303 [120] perfectamente calibrada.

Por otro lado, en la Figura 16 se muestran los elementos de la estación de monitorización que se instaló en el tejado de uno de los edificios de la escuela de ingenieros de Bilbao para detectar posibles cambios en las potencias transmitidas, que consisten en una antena pasiva de RF Systems [123], un analizador de espectros Agilent N9320A [124] como medidor y un portátil de control.

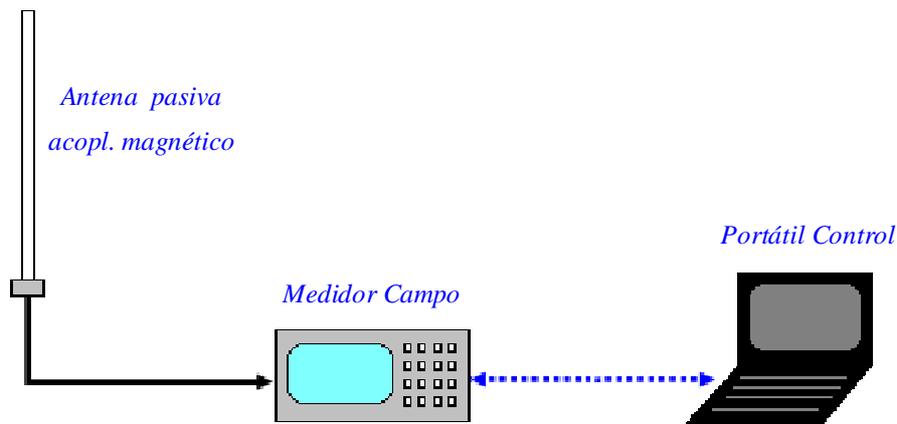


Figura 16. Diagrama de bloques del sistema de monitorización para señales AM con antena pasiva con acoplamiento magnético.

En cuanto a la elección del medidor de campo ESPI3 [122] para las medidas portátiles y el analizador de espectros Agilent N9320A [124] para la estación de monitorización, el motivo fundamental fue la posibilidad que ofrece el ESPI3 para la medida de señales pequeñas como puede ser el ruido. Se disponen de preamplificadores internos que posibilitan reducir el nivel de ruido interno del ESPI3 [122] en mucho más de 10 dB con respecto al ruido medido en las diferentes frecuencias de estudio, como se especifica en la recomendación ITU-R SM.1753 [125]. El analizador de espectros generaba mayor ruido interno que el ruido externo en algunas frecuencias, por lo que enmascararía el ruido externo a medir. Como en la estación de monitorización sólo se requiere medir portadoras AM (que concentran la mayor parte de la potencia en un ancho de banda muy reducido y el nivel de ruido en ese ancho de banda quedaría muy por debajo), se decidió emplear el ESPI3 [122] en las medidas portátiles que requerían mediciones de señal y ruido.

Por otro lado, para estas medidas de la estación de monitorización con el analizador de espectros Agilent N9320A [124], al no disponer de un receptor implementado como en el ESPI3, se midieron muestras RMS de las frecuencias de señal con la resolución temporal que nos permitía el medidor, una muestra de cada frecuencia cada 1 segundo, resolución suficiente ya que el objetivo era tener una referencia fiable del nivel de señal emitida a largo plazo, a lo largo de las campañas de medidas.

4.3 Calibración de los sistemas de medidas

Antes de comenzar con la campaña de medidas, se realizaron unos tests del sistema de medidas para comprobar la influencia de todos los equipos activos y de la red eléctrica. Una de las conclusiones más

importantes derivadas de estos tests fue que la red eléctrica no introducía ruido conducido al sistema de medidas.

Por otro lado, las fuentes de alimentación de la antena activa y de los portátiles tampoco añadían ruido de forma conducida. También se comprobó que las antenas no captaban ruido añadido por los sistemas de alimentación de los equipos portátiles ni la alimentación de la antena activa.

Cabe destacar que los valores del factor K de la antena pasiva magnética de RF Systems se obtuvieron por medio de comparación con respecto a la antena pasiva ETS Lindgren Modelo 3303 [120], ya que esta fue la antena recibida recientemente perfectamente calibrada con certificado de calibración a fecha de 20-03-2009 y no se disponían datos de calibración de la de RF Systems. Se presentan los valores en la Tabla 16.

Tabla 16. Factores K de las antenas empleadas para el sistema AM.

Frecuencia (kHz)	Factor K (dB/m)	
	Pasiva ETS Lindgren Modelo 3303	Pasiva RF Systems
639	47,4	35,7
756	46,1	35,4
900	44,6	33,5
990	43,9	32,6
1071	43,2	32,0
1305	41,8	30,8

Por último, en la Tabla 17 se recogen los datos más relevantes del medidor de campo ESPI3 [122].

Tabla 17. Datos del medidor de campo ESPI3 de R&S.

Frecuencia	Rango	De 9 kHz a 3 GHz
	Resolución	0,01 Hz
	Precisión	1×10^{-6}
Incertidumbre en la medida	Nivel de confianza de 95 %	
	Sin preselección/preamplificador	0,5 dB
	Con preselección/preamplificador	1,5 dB
Nivel de ruido interno	Modo receptor, atenuación 0 dB, terminación de 50 Ω	
	Sin preselección/preamplificador, a 1 MHz y ancho de banda de 9 kHz	< 17 dB μ v
	Sin preselección/preamplificador, de 30 MHz a 1 GHz y ancho de banda de 120 kHz	< 6 dB μ v
	Con preselección/preamplificador, a 1 MHz y ancho de banda de 9 kHz	< 7 dB μ v
	Con preselección/preamplificador, de 30 MHz a 1 GHz y ancho de banda de 120 kHz	< -4 dB μ v
Detector	Modo receptor	max./min. peak, quasi-peak, RMS, average, average con tiempo constante (CISPR average), RMS average (CISPR RMS)
Impedancia de entrada	50 Ω	

Unos de los datos más relevantes a la hora de realizar las mediciones con el medidor de campo es el nivel de ruido interno del propio medidor, ya que si este es comparable al nivel de señal o ruido externo que se quiere medir, las medidas realizadas podrían reportar datos falseados por el propio ruido interno del equipo. Si observamos la Tabla 17, se estima que el nivel de ruido interno del ESPI3 en un canal de 9 kHz a la frecuencia de 1 MHz es menor que 17 dB μ V para una configuración sin preamplificador, mientras que con preamplificador sería menor que 7 dB μ V.

En efecto, se realizaron medidas de ruido interno durante 4 minutos en cada uno de los canales de 9 kHz indicados en la Tabla 18 y se puede observar que los niveles medianos de ruido interno del ESPI3 son bastante menores a los máximos indicados en la Tabla 17, en torno a -1 dB μ V sin preamplificador y -16 dB μ V con preamplificador. De esta forma, se consiguió que en todas las localizaciones analizadas los niveles de señal y ruido estuviesen más de 10 dB por encima del ruido interno del equipo como se recomienda en la ITU-R SM.1753 [125].

Tabla 18. Ruido interno mediano y desviación estándar del medidor de campo ESPI3.

Preamplificador	ON		OFF	
	Ruido mediano (dB μ V)	Desv. est. (dB)	Ruido mediano (dB μ V)	Desv. est. (dB)
630	-16,1	0,1	-1,0	0,1
846	-16,4	0,1	-1,3	0,1
1035	-16,1	0,1	-0,5	0,1
1242	-15,5	0,1	0,5	0,1
1449	-16,4	0,1	-1,6	0,1

5. PLANIFICACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDAS

5.1 Criterios de planificación de las medidas

La ubicación de los puntos estáticos dentro de los edificios ha de ser tal que se cubran las diferentes posibilidades de recepción en 3 dimensiones en cada una de las plantas, así como en el exterior de las ventanas, en la medida de lo posible. Dada la imposibilidad de acceso al total de las plantas e estancias de los edificios, en algunos casos se han limitado las mediciones a las plantas más bajas en las que se presupone se obtendrán los peores casos de recepción o únicamente en los descansillos de todas las plantas, tal y como se ha venido haciendo en otros estudios descritos en el “*Capítulo 2: Estado del arte*”.

En un principio se han clasificado las estancias en cinco tipos, los cuales serán referenciados en los siguientes capítulos a la hora de extraer conclusiones:

- Estancias exteriores: localizaciones situadas en el exterior de los edificios, en la mayoría de los casos a nivel de suelo. En algunos edificios se pudo tomar mediciones exteriores a distintas alturas.
- Estancias Tipo 0: descansillos de escaleras verticales, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 1: descansillos largos horizontales (más típicos en edificios de oficinas, y normalmente situados en la zona central del edificio y sin ventanas).
- Estancias Tipo 2: habitaciones o estancias en la fachada iluminada del edificio, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 3: habitaciones o estancias en la fachada no iluminada del edificio, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 4: habitaciones o estancias sin ventanas en la parte central del edificio.

En cuanto a la elección de los edificios, se ha optado por aquellos en los que se tuviese la mayor facilidad posible de acceso a las diferentes plantas e estancias, y que a su vez sean representativos de las diferentes situaciones de recepción que pueda haber en grandes entornos urbanos como Madrid, Fuenlabrada, Vitoria-Gasteiz y Bilbao y grandes municipios colindantes.

5.2 Resumen de la base de datos

En las siguientes figuras se puede observar el emplazamiento de los edificios en los que se han tomado mediciones, además de la localización de los transmisores de cada una de las tres campañas de medidas:

- Campaña experimental de señal DRM y ruido en Madrid (Figura 17).

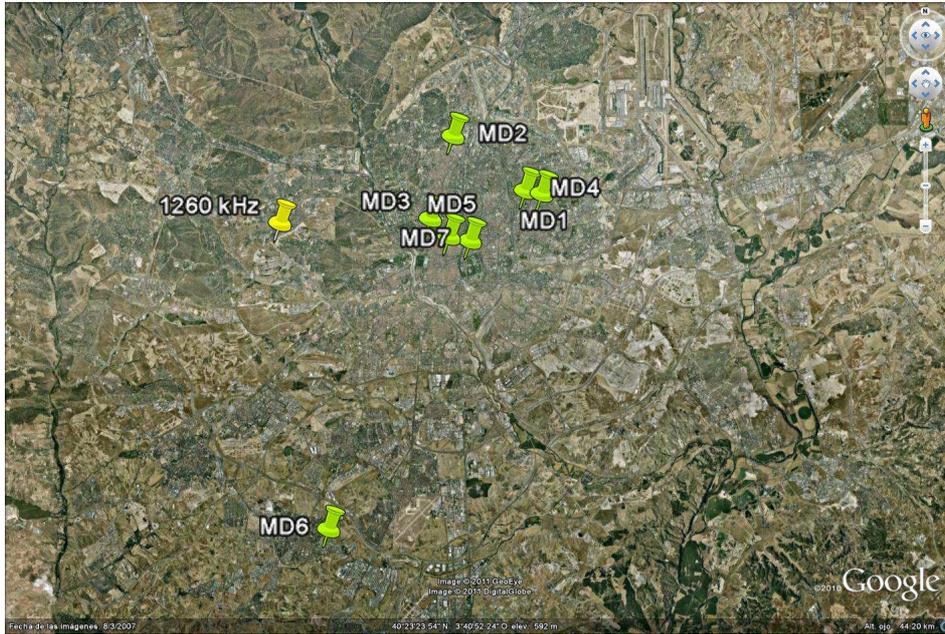


Figura 17. Emplazamiento del transmisor y los edificios en Madrid.

- Campaña de señales AM y ruido en Bilbao y alrededores (Figura 18).

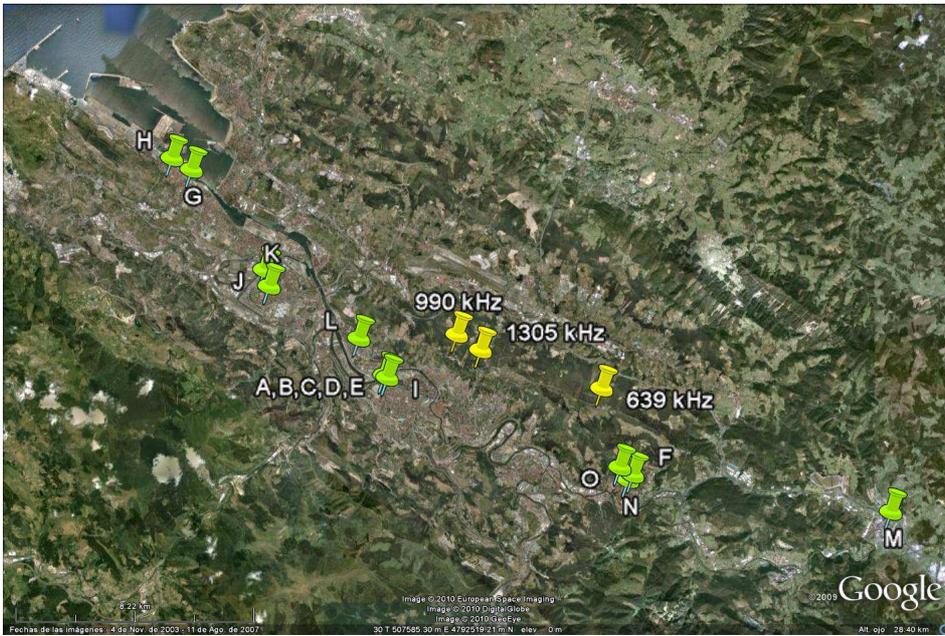


Figura 18. Emplazamiento de los edificios y transmisores de Bilbao y alrededores.

- Campaña de señales AM y ruido en Vitoria-Gasteiz (Figura 19).



Figura 19. Emplazamiento de los edificios y transmisores de Vitoria-Gasteiz.

En la Tabla 19 se resume el número de localizaciones de cada edificio de Madrid en las que se han tomado mediciones de 3 minutos para la señal DRM en la frecuencia 1260 kHz y otros 3 minutos para el ruido en el canal adyacente de 1287 kHz:

Tabla 19. Localizaciones de corta duración en Madrid.

Edificio	Tipo Edificio	Localidad	Localizaciones Exteriores	Estancias Tipo 0	Estancias Tipo 1	Estancias Tipo 2	Estancias Tipo 3	Estancias Tipo 4
MD1	Viviendas	Madrid	4	4	0	3	2	2
MD2	Viviendas	Madrid	2	4	0	1	1	1
MD3	Viviendas	Madrid	5	6	0	2	3	2
MD4	Viviendas	Madrid	2	6	0	0	0	1
MD5	Oficinas	Madrid	9	0	11	9	10	6
MD6	Fábrica	Fuenlabrada	2	0	3	3	2	2
MD7	Oficinas	Madrid	1	6	2	2	2	0
TOTAL MADRID	Oficinas, viviendas y fábricas	Comunidad de Madrid	25	26	16	20	20	14

La Tabla 20 resume el número de localizaciones de cada edificio de Bilbao y alrededores:

Tabla 20. Localizaciones de corta duración en Bilbao y alrededores.

Edificio	Tipo Edificio	Localidad	Localizaciones Exteriores	Estancias Tipo 0	Estancias Tipo 1	Estancias Tipo 2	Estancias Tipo 3	Estancias Tipo 4
A	Oficinas	Bilbao	36	0	25	5	10	0
B	Oficinas	Bilbao	20	5	20	15	5	0
C	Oficinas	Bilbao	15	5	6	8	8	0
D	Oficinas	Bilbao	15	5	10	10	8	0
E	Oficinas	Bilbao	5	5	5	5	0	0
F	Viviendas	Galdakao	2	7	0	2	2	1
G	Viviendas	Santurtzi	1	12	0	0	0	0
H	Viviendas	Santurtzi	1	5	0	0	1	1
I	Viviendas	Bilbao	1	8	0	1	0	0
J	Viviendas	Barakaldo	1	6	0	0	0	1
K	Viviendas	Barakaldo	2	9	0	0	1	0
L	Viviendas	Bilbao	2	12	0	0	0	0
M	Viviendas	Amorebieta	1	5	0	0	0	0
N	Viviendas	Galdakao	2	8	0	0	0	0
O	Viviendas	Galdakao	1	7	0	0	0	0
TOTAL BILBAO	Oficinas y viviendas	Gran Bilbao	105	99	66	46	35	3

Y la Tabla 21 por su parte resume las localizaciones de Vitoria-Gasteiz:

Tabla 21. Localizaciones de corta duración en Vitoria-Gasteiz.

Edificio	Tipo Edificio	Localidad	Localizaciones Exteriores	Estancias Tipo 0	Estancias Tipo 1	Estancias Tipo 2	Estancias Tipo 3	Estancias Tipo 4
P	Oficinas	Vitoria-Gasteiz	19	3	12	12/14	14/12	0
Q	Viviendas	Vitoria-Gasteiz	5	14	0	0/1	1/0	1
R	Viviendas	Vitoria-Gasteiz	13	8	0	8/0	0/8	0
S	Viviendas	Vitoria-Gasteiz	14	8	0	6/7	7/6	0
T	Viviendas	Vitoria-Gasteiz	2	7	0	1/0	0/1	1
U	Viviendas	Vitoria-Gasteiz	1	6	0	1/0	0/1	1
TOTAL VITORIA-GASTEIZ	Oficinas y viviendas	Vitoria-Gasteiz	54	46	12	28/22	22/28	3

Es importante recordar que en las localizaciones de Bilbao y alrededores (Bilbao, Galdakao, Barakaldo, Santurtzi y Amorebieta), se midieron 4 minutos consecutivos de cada una de las citadas frecuencias de señal (639, 990 y 1305 kHz), con un tiempo de integración de 400 milisegundos. Se llevó a cabo el mismo procedimiento para las frecuencias de ruido (675, 1035 y 1242 kHz), a excepción de en todas las localizaciones Tipo 0 de los edificios B, C, D y E y una localización del edificio K, donde no se tomaron

mediciones de ruido en ninguna frecuencia, por lo que habría 21 localizaciones menos para las frecuencias de ruido que para las frecuencias de señal, indicadas en la Tabla 20. En cambio, en Vitoria-Gasteiz, se tomaron mediciones durante 4 minutos consecutivos de cada una de las frecuencias de señal (612, 1197 y 1602 kHz) y ruido (630, 1242 y 1620 kHz) para todas las localizaciones.

En la campaña de medidas de Vitoria-Gasteiz, hay estancias que para el transmisor de 612 kHz son Tipo 2 y para los transmisores de 1197 y 1602 kHz, sin embargo, Tipo 3 y viceversa, por lo que, en la Tabla 21 se indica inicialmente el número de localizaciones para el transmisor de 612 kHz y tras una barra transversal, el número de localizaciones para los transmisores de 1197 y 1602 kHz. Por ejemplo, para el edificio P, habría 12 localizaciones Tipo 2 para 612 kHz y 14 localizaciones Tipo 2 para 1197 y 1602 kHz.

Por último, también se han realizado una serie de medidas de larga duración con el objetivo único de analizar la variabilidad temporal a largo plazo de señal y ruido (aproximadamente 48 horas en cada localización). Aunque estas mediciones se han realizado de forma independiente a las de corta duración, se ha aprovechado a realizarlas en algunos de los edificios analizados en dicha campaña. Conviene recordar que en estas medidas se realizaba un barrido continuo de las 3 frecuencias de señal y 3 frecuencias de ruido para cada caso (Bilbao y Vitoria-Gasteiz), tomando aproximadamente una muestra de cada una de las 6 frecuencias cada 10 segundos, sabiendo que cada una de estas muestras sería el valor RMS de la señal correspondiente integrada durante un tiempo de 400 milisegundos. De las mediciones se han filtrado las horas nocturnas para evitar posibles interferencias ionosféricas de forma que se disponen las horas diurnas indicadas en la Tabla 22 y Tabla 23 para cada una de las 16 localizaciones analizadas en Bilbao y alrededores y las 2 localizaciones analizadas en Vitoria-Gasteiz:

Tabla 22. Horas diurnas en las localizaciones de larga duración de Bilbao y alrededores.

Edificio	Tipo Edificio	Planta	Localidad	Número horas diurnas
A	Oficinas	0	Bilbao	18
B	Oficinas	3	Bilbao	18
B	Oficinas	3	Bilbao	19
F	Viendas	2	Galdakao	18
F	Viendas	2	Galdakao	19
F	Viendas	6	Galdakao	20
I	Viendas	7	Bilbao	14
J	Viendas	5	Barakaldo	22
K	Viendas	6	Barakaldo	16
L	Viendas	8	Bilbao	16
M	Viendas	2	Amorebieta	11
M	Viendas	5	Amorebieta	14
N	Viendas	2	Galdakao	20
N	Viendas	8	Galdakao	19
O	Viendas	0	Galdakao	12
O	Viendas	3	Galdakao	24
TOTAL BILBAO Y ALREDEDORES	Oficinas y viendas	-	Gran Bilbao	292

Tabla 23. Horas diurnas en las localizaciones de larga duración de Vitoria-Gasteiz.

Edificio	Tipo Edificio	Planta	Localidad	Número horas diurnas
R	Viendas	5	Vitoria-Gasteiz	18
S	Viendas	4	Vitoria-Gasteiz	15
TOTAL VITORIA-GASTEIZ	Oficinas y viviendas	-	Vitoria-Gasteiz	33

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA RECEPCIÓN DE SEÑALES DE RADIODIFUSIÓN EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este capítulo se estudia inicialmente el comportamiento de la señal digital DRM en Onda Media en interiores en la frecuencia de 1260 kHz.

Posteriormente se realiza un estudio de la variabilidad espacial y temporal de la señal en interiores, caracterizando la dependencia del nivel de campo eléctrico con diversos factores además de los habituales como la distancia y la frecuencia, a partir de mediciones de portadoras AM de diferentes transmisores y potencias de emisión, en un gran número de localizaciones interiores en Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

Para analizar la variabilidad espacial, cada localización vendrá representada por el valor de campo eléctrico mediano durante los 3 o 4 minutos (mediciones de corta duración de Madrid o Bilbao y Vitoria-Gasteiz) medidos para cada frecuencia. Además, se han normalizado todos los valores medianos de campo de señal para una potencia transmitida de 1kW para poder compararlos entre sí, y también con los valores recogidos en otras campañas y recomendaciones de la ITU-R.

Se presenta posteriormente un método de predicción del nivel de campo mediano de señales de radiodifusión en Onda Media en interiores en función de los parámetros más relevantes, deducidos del análisis de los resultados de las campañas de medidas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz con mediciones de corta duración.

A continuación se realiza un estudio comparativo del nivel mediano de campo eléctrico recibido en interiores y exteriores para estimar las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media y también las pérdidas con respecto a las curvas recomendadas por la ITU-R para propagación por onda de superficie.

Se estudia también la distribución de probabilidad teórica que mejor se ajusta a la variabilidad espacial del nivel mediano de campo eléctrico en el interior de los edificios.

Se finaliza el capítulo caracterizando la variabilidad temporal de la señal en base a parámetros estadísticos utilizando, además de las mediciones de corta duración de Bilbao y Vitoria-Gasteiz, las mediciones de larga duración para comparar la variabilidad temporal a corto y largo plazo.

1. DATOS EMPÍRICOS

Tal y como se ha descrito en el “*Capítulo 3: Metodología y campañas de medidas*”, se dispone de dos amplias campañas de medidas en Bilbao y Vitoria-Gasteiz, basadas en mediciones de niveles de campo de portadoras AM en el interior de un gran número de edificios para extraer conclusiones acerca de la variabilidad espacial y temporal de la señal radiodifundida en Onda Media en interiores. También se dispone de una serie de localizaciones exteriores con el objetivo de poder cuantificar las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media.

Por otro lado, se dispone de una serie de mediciones interiores y exteriores de señales digitales DRM en la comunidad de Madrid. Si bien el número de localizaciones es bastante menor al total de las otras dos campañas realizadas en Bilbao y Vitoria-Gasteiz, y dado que la campaña realizada en Madrid fue realizada con anterioridad, el análisis de los datos de esta campaña nos serviría para extraer unas primeras conclusiones acerca de la variabilidad espacial y temporal del campo eléctrico de la señal en interiores, además de una primera aproximación de las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media. También se emplearán los datos de esta campaña para validar los métodos de predicción del campo eléctrico de la señal que se desarrollarán a partir de la base de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

La Tabla 24 resume el número de edificios y localizaciones de corta duración (4 minutos por cada portadora AM y 3 minutos de la señal digital DRM) en las zonas de Bilbao (639, 990 y 1305 kHz), Vitoria-Gasteiz (612, 1197 y 1602 kHz) y Madrid (1260 kHz), en horario diurno.

Tabla 24. Resumen de localizaciones de señal de corta duración en Madrid, Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

Zona	Nº edificios	Localizaciones Exteriores	Estancias Tipo 0	Estancias Tipo 1	Estancias Tipo 2	Estancias Tipo 3	Estancias Tipo 4
MADRID	7	25	26	16	20	20	14
BILBAO Y ALREDEDORES	15	105	99	66	46	35	3
VITORIA-GASTEIZ	6	54	46	12	28/22	22/28	3

Conviene recordar la clasificación de tipo de estancia descrita con anterioridad:

- Estancias exteriores: localizaciones situadas en el exterior de los edificios, en la mayoría de los casos a nivel de suelo. En algunos edificios (A, B, C, D, E, P, R y S) se pudo tomar mediciones exteriores a distintas alturas.
- Estancias Tipo 0: descansillos de escaleras verticales, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 1: descansillos largos horizontales (más típicos en edificios de oficinas, y normalmente situados en la zona central del edificio y sin ventanas).

- Estancias Tipo 2: habitaciones o estancias en la fachada iluminada del edificio, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 3: habitaciones o estancias en la fachada no iluminada del edificio, con o sin ventanas.
- Estancias Tipo 4: habitaciones o estancias sin ventanas en la parte central del edificio.

Con el gran número de localizaciones de Bilbao y Vitoria-Gasteiz se tratará de analizar en el presente capítulo la variabilidad espacial de la señal modulada en interiores y la variabilidad temporal a corto plazo. Para analizar la variabilidad espacial, cada localización vendrá representada por el valor de campo eléctrico mediano durante los 4 minutos medidos para cada frecuencia. Posteriormente se analiza la variabilidad temporal en esos 4 minutos alrededor del valor mediano.

Con el objetivo de analizar la variación temporal de la señal a largo plazo, se tomaron mediciones de larga duración (48 horas aproximadamente) en una serie de edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz. Conviene recordar que de estas mediciones se filtraron las muestras tomadas en horario nocturno con el objetivo de evitar posibles interferencias ionosféricas. La siguiente Tabla 25 resume el número de horas diurnas disponibles para cada una de las frecuencias de señales de radiodifusión en Onda Media en las ciudades de Bilbao y Vitoria-Gasteiz:

Tabla 25. Resumen de localizaciones de señal de larga duración en Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

Zona	Nº edificios	Nº localizaciones	Número horas diurnas
BILBAO Y ALREDEDORES	10	16	292
VITORIA-GASTEIZ	2	2	33

Por último, conviene matizar que, todos los promedios, medianas, desviaciones estándar y valores RMS que se calculen se realizarán promediando los valores en cuestión en unidades logarítmicas (dB μ V/m o dB, según el caso).

2. ESTUDIO DE LA RECEPCIÓN DEL ESTÁNDAR DRM EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

2.1 Estudio del nivel de señal DRM en Onda Media en interiores

En la Figura 20 se representan los valores medianos del nivel de campo eléctrico de la señal DRM en cada una de las localizaciones de los 7 edificios analizados en Madrid (se indica en la parte superior el acrónimo del edificio para cada conjunto de valores), además de una curva de aproximación lineal con el logaritmo de la distancia:

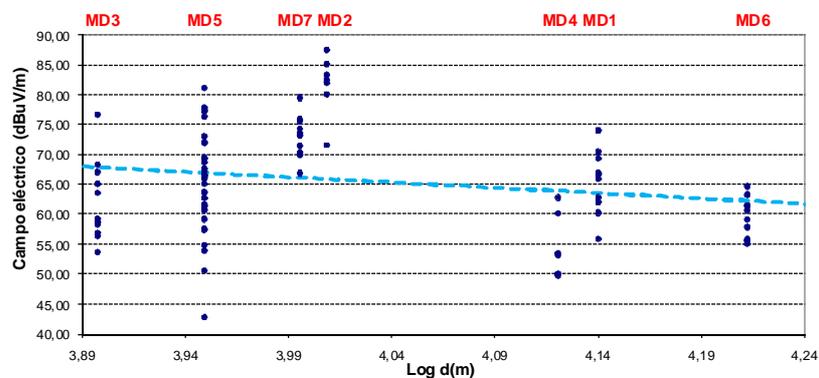


Figura 20. Campo eléctrico mediano de la señal DRM en cada estancia de Madrid en función de la distancia.

Se observa una tendencia a disminuir el campo eléctrico mediano con la distancia (aunque el rango de distancias no es muy elevado), como indica la curva de aproximación logarítmica representada también en la Figura 20 y obtenida por minimización del error cuadrático medio o MSE:

$$E_s (dB\mu V / m) = 137,6 - 17,9 \cdot \log(d(m))$$

$$\sigma_{error} = 8,8dB \quad (4.1)$$

Destaca sobre manera la alta variabilidad espacial de la señal, llegándose a observar una diferencia de hasta 40 dB entre el mayor y menor valor de campo eléctrico presente en el interior de uno de los edificios (MD5). Es por ello que la desviación estándar del error de la fórmula de regresión se sitúa en torno a 9 dB.

En cuanto a la variabilidad espacial de la señal con la altura, la Figura 21 muestra la evolución del campo eléctrico mediano de la señal DRM, promediando el valor mediano de las localizaciones de cada una de las plantas de cada uno de los edificios y añadiendo líneas de tendencia lineales.

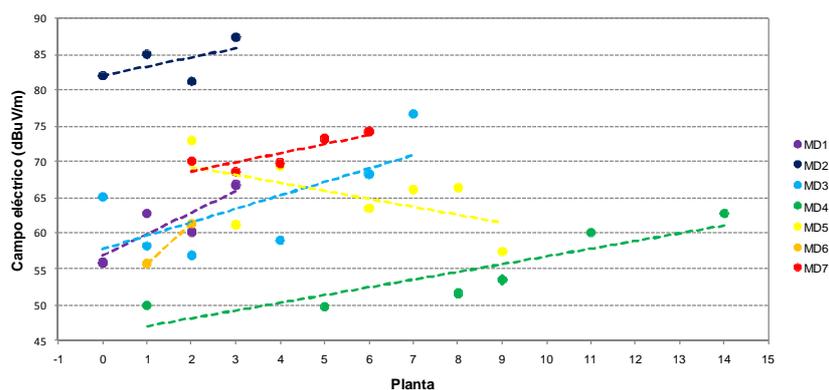


Figura 21. Nivel de campo mediano de la señal DRM en cada edificio de Madrid en función del número de planta.

Se observa que generalmente hay una tendencia a aumentar el campo eléctrico mediano con la altura o número de planta en todos los edificios salvo el MD5. Exceptuando este edificio la pendiente promedio de aumento del nivel de campo por planta es de 2,4 dB/planta.

No se ha llegado a una conclusión clara con respecto a la variabilidad espacial de la señal en el plano horizontal debido al escaso número de localizaciones y en cuanto a la comparativa con respecto al nivel de campo eléctrico en exteriores, la Tabla 26 muestra la diferencia del nivel de campo eléctrico mediano con las localizaciones de una misma planta en el exterior e interior de cada edificio, únicamente en las plantas en las que pudo tomarse mediciones.

Tabla 26. Diferencia entre el campo eléctrico mediano de señal DRM en exteriores e interiores en diferentes plantas.

Edificio		MD1	MD2	MD3	MD4	MD5	MD6	MD7
Planta	0	20,3 dB	4,7 dB	-0,1 dB	-11,2 dB		8,8 dB	
	2		2,0 dB			14,1 dB		
	3	6,7 dB				15,7 dB		
	4					16,3 dB		
	5					18,9 dB		
	6			-3,8 dB		5,3 dB		1,5 dB
	7					12,2 dB		
	8				26,2 dB	22,9 dB		
	Promedio todas plantas	13,5 dB	3,4 dB	-2,0 dB	7,5 dB	15,1 dB	8,8 dB	1,5 dB

Se observa que hay una variabilidad elevada de la diferencia del campo eléctrico mediano en exteriores e interiores de un edificio a otro e incluso de una planta de un mismo edificio a otra, por lo que se precisa una campaña de medidas más exhaustiva, ya que no se obtiene ninguna conclusión o se observa tendencia alguna. Incluso en algún edificio se obtienen pérdidas por penetración negativas, quizá debido a la elevada variabilidad espacial y que no se dispone de suficientes localizaciones para que el promediado sea

representativo. En cualquier caso, se han añadido las pérdidas por penetración al promediar todas las plantas en las que se realizaron mediciones en cada uno de los edificios y al promediar todos esos valores se obtiene un valor de 6,8 dB para caracterizar inicialmente las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media.

Por último, en cuanto a la variabilidad temporal, la Tabla 27 muestra el valor RMS de las desviaciones estándar temporales con todas las localizaciones de cada edificio y se puede observar que no es elevada, pudiendo considerarse casi despreciable, sobre todo comparándola con la variabilidad espacial.

Tabla 27. Valor RMS con las localizaciones de la desviación estándar temporal en los edificios de Madrid.

Edificio	MD1	MD2	MD3	MD4	MD5	MD6	MD7
Desviación estándar temporal (dB)	1,6	0,4	0,5	1,1	0,4	1,5	0,4

2.2 Estudio de la cobertura del sistema DRM en Onda Media en interiores

Una vez analizados los niveles de señal DRM en interiores a partir de la base de datos de la campaña realizada en Madrid, se pretende estudiar en el presente punto la fiabilidad del sistema o capacidad de cobertura con la potencia de emisión de 12,5 kW en la ciudad de Madrid.

Para la configuración de transmisión empleada, el umbral práctico de MER (Modulation Error Ratio) para una correcta recepción se sitúa en torno a 17,5 dB como se pudo comprobar en [18].

La Figura 22 muestra un caso real de evolución del parámetro MER en función del tiempo en una de las localizaciones del edificio MD5 y el parámetro AudioQ que nos indica si las tramas de audio han sido correctamente decodificadas (AudioQ=1) o no (AudioQ=0).

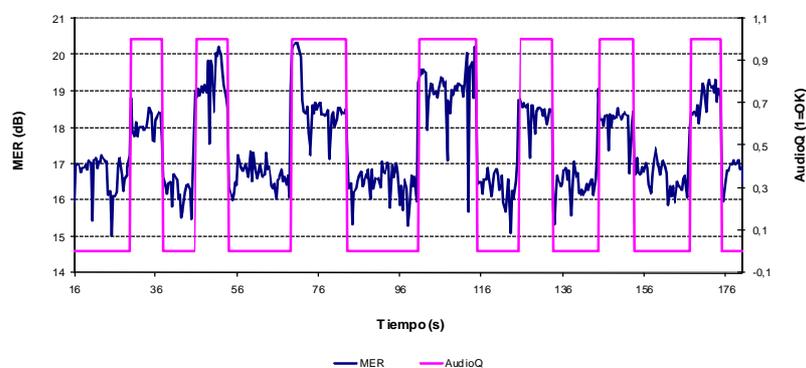


Figura 22. Evolución temporal MER y AudioQ en una localización de Madrid.

Se observa que en este ejemplo en concreto el valor de MER fluctúa en torno al umbral práctico de 17,5 dB y que el parámetro que mide la capacidad de decodificación de las tramas de audio correctamente (AudioQ), pasa a estado positivo cuando efectivamente el nivel de MER está aproximadamente por encima de ese umbral y que pasa a estado negativo cuando se sitúa por debajo, indicando que no se han decodificado correctamente las tramas de audio.

Por otro lado, se han detectado algunas fuentes de ruido impulsivo como los motores de los ascensores, que afectan, evidentemente, de forma directa y negativa en el MER y por lo tanto, en la capacidad del receptor de decodificar correctamente los datos. La Figura 23 muestra nuevamente la evolución del MER en otra localización del edificio MD5 próxima a un ascensor y pudo detectarse que las fluctuaciones negativas de MER ocurrían precisamente en los instantes en los que el ascensor entraba en funcionamiento y no eran debidas a bajadas del nivel de señal, sino a subidas de los niveles de ruido.

En este caso, estas bajadas de los niveles de MER son de hasta 10 dB y hacen que descienda por debajo del umbral y por lo tanto, se producen errores en la decodificación.

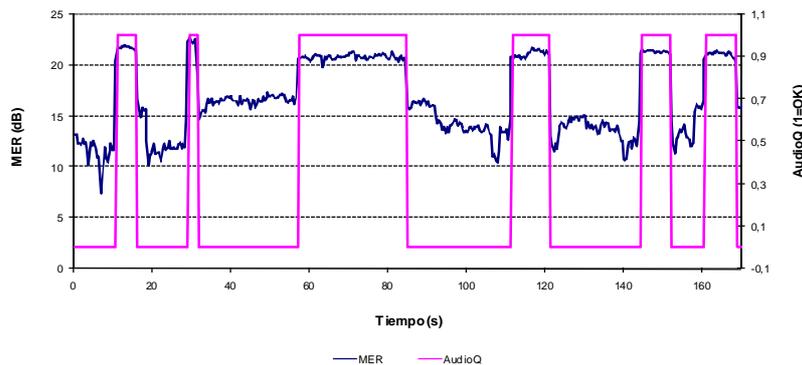


Figura 23. Evolución temporal MER y AudioQ en una localización de Madrid próxima a un ascensor.

La Tabla 28 resume los valores promedio de MER en cada uno de los edificios, además del porcentaje de localizaciones en las que se ha considerado que la recepción ha sido correcta, es decir, el porcentaje de localizaciones en las que se han decodificado correctamente las tramas de audio.

Tabla 28. MER promedio y porcentaje de localizaciones correctas en Madrid.

Edificio	MD1	MD2	MD3	MD4	MD5	MD6	MD7
MER promedio (dB)	25,0	27,2	20,4	5,1	15,3	21,2	20,9
Porcentaje localizaciones correctas (%)	80	100	56	0	25	64	62

Los datos concluyen que con la potencia de transmisión empleada de 12,5 kW no es posible alcanzar unos buenos datos de cobertura para la ciudad de Madrid y recepción portátil en interiores. Con el objeto de determinar la potencia necesaria para ofrecer una mejor cobertura, se han analizado los resultados de producir hipotéticos incrementos de potencia de transmisión para extrapolar cuáles son los efectos que tendría ello sobre la recepción. Se tomará como referencia el parámetro MER para realizar las extrapolaciones, es decir, al aumentar la potencia de emisión en N dB, se supondrá que el parámetro MER mejorará en esos N dB en cada una de las localizaciones y se considerará que la localización en cuestión pasará a ser correcta cuando se superen los 17,5 dB en ese parámetro, como ha quedado demostrado.

En la siguiente Figura 24 se pueden apreciar las diferentes predicciones de campo.

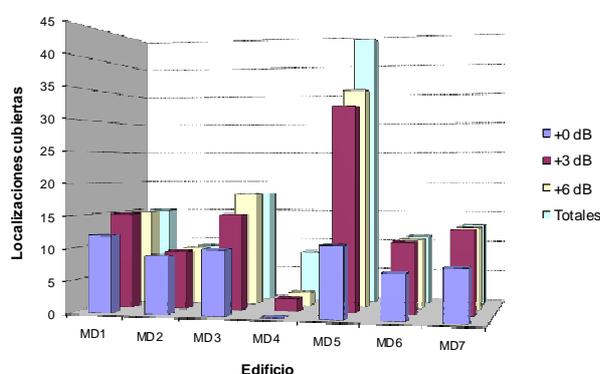


Figura 24. Predicción de cobertura en Madrid para diferentes potencias de emisión.

En primer plano aparecen, para cada uno de los edificios, las localizaciones correctamente decodificadas con la potencia realmente emitida de 12,5 kW. En segundo plano las que quedarían cubiertas aumentando en 3 dB la potencia de transmisión, es decir, 25 kW. En tercer plano el caso hipotético de un aumento de 6 dB (50 kW) y por último aparece en el fondo el número total de localizaciones en las que se han tomado mediciones en cada uno de los edificios, es decir, lo que se debería cubrir para alcanzar un 100% de cobertura.

Se puede observar cómo con la potencia real de transmisión (12,5 kW), solamente queda totalmente cubierto el edificio MD2. Sin embargo, con un hipotético aumento de 3 dB en la potencia de transmisión (25 kW), la cobertura aumenta considerablemente cubriendo con un 100% los edificios MD1, MD2, MD6 y MD7 y obteniendo buenas coberturas en los edificios MD3 y MD5 del 83% y 73% de las localizaciones respectivamente.

En el caso de un aumento de 6 dB en la potencia de transmisión, la cobertura mejoraría poco con respecto a la predicción anterior y quedaría únicamente totalmente cubierto el edificio MD3. El edificio MD4 y un

pequeño porcentaje del edificio MD5 no quedarían cubiertos aunque se siguiera aumentando la potencia de transmisión ya que las condiciones de propagación y los niveles de ruido radioeléctrico en esos edificios no permiten la recepción correcta de ningún tipo de señal ni analógica ni digital en Onda Media.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se puede concluir que la potencia óptima de transmisión para obtener una buena cobertura de recepción portátil en interiores en la ciudad de Madrid es de 25 kW. Con 12,5 kW de potencia se cubren el 48% de las localizaciones, con 25 kW el 82% y con 50 kW el 87% de las localizaciones. Sin embargo, dada la alta variabilidad espacial observada, queda evidenciada la necesidad de aumentar la base de datos con nuevas campañas de medidas para confirmar o afinar los resultados.

3. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA SEÑAL RADIODIFUNDIDA EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este punto se estudia la posible influencia de diferentes factores en el nivel mediano de campo eléctrico de la señal radiodifundida en Onda Media en interiores, en base al gran número de localizaciones de las campañas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz. Los dos parámetros estudiados inicialmente son la distancia y frecuencia, parámetros que afectan a la propagación de ondas radioeléctricas en todo el espectro radioeléctrico. Se estudia posteriormente la influencia de parámetros como el entorno próximo al edificio y el tipo de estancia interior y número de planta en el que se sitúe el receptor.

3.1 Variabilidad con la distancia y frecuencia

En la Figura 25 se han representado gráficamente los valores medianos de las localizaciones de corta duración de la base de datos de Bilbao para las frecuencias 990 y 1305 kHz (los transmisores se encuentran relativamente cerca el uno del otro). En la gráfica, encima de cada grupo de puntos se indica en color rojo la letra identificativa o acrónimo asignado a cada edificio al que pertenece ese grupo de puntos, aproximadamente.

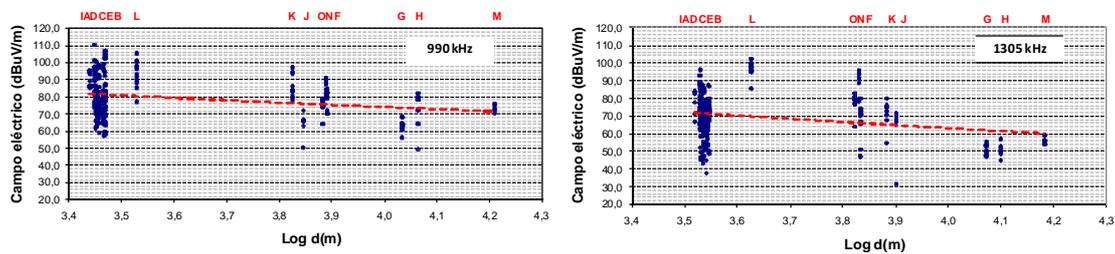


Figura 25. Nivel de campo eléctrico mediano en las estancias de Bilbao para 990 y 1305 kHz.

En un primer análisis, se deduce que el nivel mediano de campo eléctrico de las señales radiodifundidas en Onda Media en interiores decrece con la distancia al transmisor, como indican las líneas de tendencia con la distancia para las dos frecuencias. Si comparamos esas dos líneas de tendencia mutuamente, se puede comprobar que la línea para la frecuencia de 1305 kHz queda por debajo de la línea para 990 kHz, por lo que parece que el nivel mediano de campo eléctrico en interiores decrece también con la frecuencia de emisión.

Se obtienen unas conclusiones similares analizando las localizaciones de Vitoria-Gasteiz para las frecuencias 1197 y 1602 kHz (que comparten centro transmisor), como se puede observar en la Figura 26.

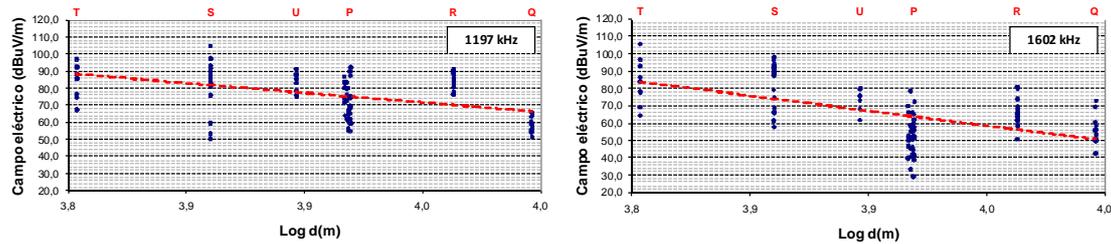


Figura 26. Nivel de campo eléctrico mediano en las estancias de Vitoria-Gasteiz para 1197 y 1602 kHz.

Por otro lado, resalta sobre manera la alta variabilidad espacial del nivel de campo eléctrico mediano recibido en interiores en la mayoría de los edificios, pero especialmente en aquellos donde se ha podido realizar un mayor número de mediciones, llegándose a observar diferencias de hasta 50 dB entre la localización con mayor y menor nivel mediano de campo eléctrico de la señal radiodifundida en un mismo edificio y de hasta 20 dB en estancias separadas unos pocos metros entre sí.

En efecto, la Tabla 29 y Tabla 30 muestran las desviaciones estándar con las localizaciones (σ) en el interior de cada uno de los edificios analizados y para cada una de las frecuencias de Bilbao y Vitoria-Gasteiz respectivamente, y se observa que en muchos edificios las desviaciones son muy elevadas.

Se concluye por lo tanto, que el campo eléctrico mediano de la señal en interiores disminuye con la distancia y la frecuencia en Onda Media y que la variabilidad espacial es muy elevada, al igual que ocurría en los primeros estudios realizados por Rice [104] y en otros realizados posteriormente [97], [114], [116] en frecuencias más elevadas, y resumidos en el “Capítulo 2: Estado del arte”.

Tabla 29. Desviación estándar con las localizaciones en los edificios de Bilbao.

Edificio	$\sigma_{639 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{990 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1305 \text{ kHz}}$ (dB)
A	11,2	10,3	12,3
B	10,4	13,2	9,5
C	13,6	10,7	11,4
D	9,7	8,7	9,3
E	7,0	10,3	12,4
F	1,3	5,2	10,9
G	1,5	3,2	2,8
H	7,9	11,7	3,7
I	2,5	4,2	6,4
J	3,8	6,7	14,3
K	2,5	6,8	6,8
L	5,8	7,8	4,2
M	1,0	2,1	2,0
N	4,9	3,9	6,7
O	1,5	4,8	6,2

Tabla 30. Desviación estándar con las localizaciones en los edificios de Vitoria-Gasteiz.

Edificio	$\sigma_{612 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1197 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1602 \text{ kHz}}$ (dB)
P	6,4	10,4	10,5
Q	5,8	4,5	8,2
R	8,7	5,2	7,8
S	7,6	14,1	13,6
T	10,4	9,7	13,2
U	3,1	6,1	6,1

3.2 Variabilidad con el tipo de estancia

En la Figura 27 se presentan los valores medianos y desviaciones estándar con los diferentes tipos de localizaciones para los edificios A, B, C, D y E por un lado (con el objetivo de promediar un gran número de localizaciones, ya que todos están prácticamente a la misma distancia de los transmisores), para el edificio P, el edificio R y por último para el edificio S, que son los edificios donde se tomó un mayor número de mediciones de una forma lo más uniforme posible. En los demás edificios de la base de datos el número de localizaciones fue más reducido y prácticamente todas las localizaciones fueron de Tipo 0.

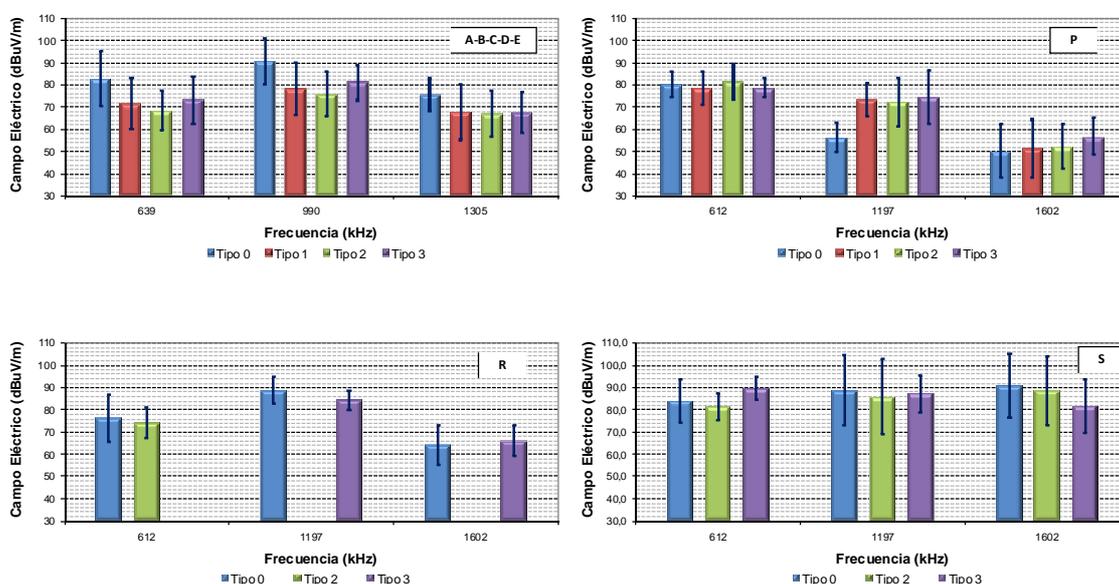


Figura 27. Nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media y desviación estándar con las localizaciones en función del tipo de estancia interior en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

En el conjunto de edificios A-B-C-D-E, se aprecia una diferencia notable entre el nivel mediano en las estancias Tipo 0 y las demás estancias quizá debido a que los descansillos verticales en estos edificios eran bastante más amplios que en otros. Los demás tipos de estancia disponibles en ese conjunto de edificios

parecen tener un comportamiento similar para todas las frecuencias. En los otros tres edificios analizados, no se aprecia que algún tipo de estancia se vea favorecida para la recepción de la señal, ni siquiera las Tipo 0. Lo que sí queda nuevamente reflejado en la mayoría de edificios y tipos de estancias es el elevado grado de dispersión en el nivel mediano de campo eléctrico, obteniéndose otra vez desviaciones estándar con las localizaciones muy elevadas. En conclusión, no se observa ninguna tendencia clara en el comportamiento o influencia que pueda ejercer el tipo de estancia en el nivel mediano de campo eléctrico de la señal radiodifundida en Onda Media en interiores, si bien en algunos casos en los que los descansillos verticales sean muy amplios la señal recibida es notablemente mayor.

3.3 Variabilidad con la altura o número de planta

En la Figura 28 se representan, por plantas, los valores medianos y desviaciones con las localizaciones de una misma planta de los edificios analizados en el punto anterior.

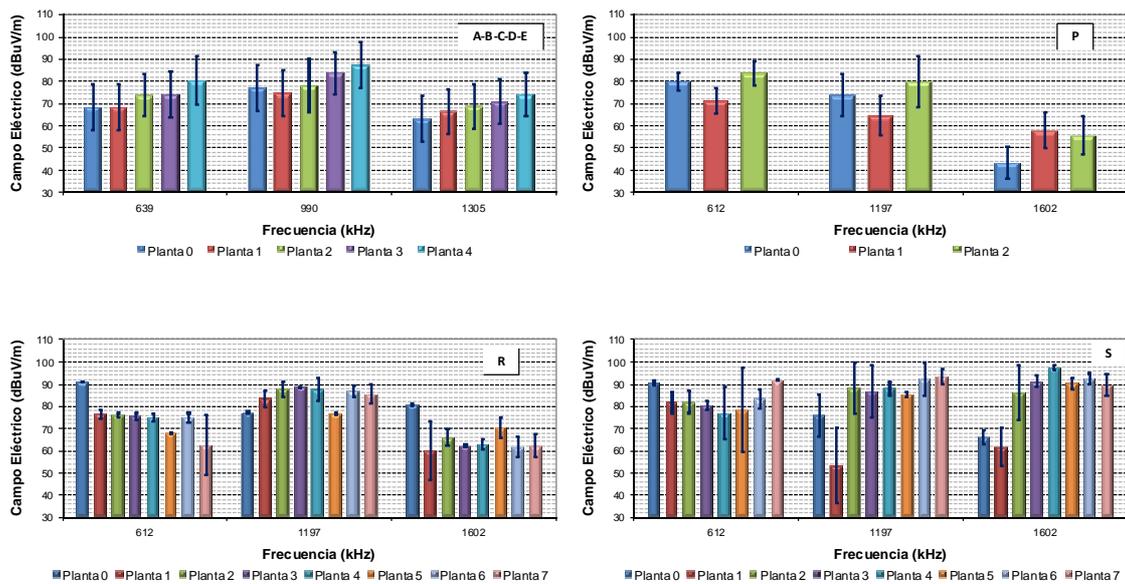


Figura 28. Nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media y desviación estándar con las localizaciones en función del número de planta en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

En el conjunto de edificios A-B-C-D-E se aprecia una tendencia a aumentar el campo eléctrico de la señal con el número de planta para todas las frecuencias analizadas pero no así en el resto de edificios, en los que la tendencia es variable. Sí se observa nuevamente una elevada variabilidad espacial en una misma planta de la mayoría de los edificios, con desviaciones estándar con las localizaciones superiores a los 10 dB en muchos casos.

3.4 Variabilidad con el entorno próximo al edificio

Dado que el campo eléctrico de la señal recibida disminuye con la frecuencia y la distancia, como se ha podido comprobar en apartados anteriores, este estudio implicaría tener edificios a la misma distancia y con diferentes entornos, para poder establecer una comparación entre ellos y observar si alguno de ellos presenta mayores niveles de campo por tener un entorno menos hostil.

Por ejemplo, analizando los edificios F, N y O que se sitúan muy próximos entre sí en la localidad de Galdakao próxima a Bilbao, se observa que para las frecuencias 990 y 1305 kHz, en el edificio N se recibe más nivel de señal que en los otros dos, como se observa en la Figura 29.

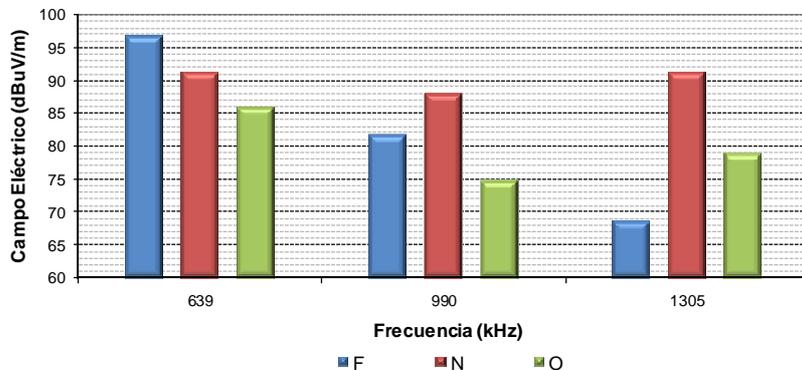


Figura 29. Nivel de campo eléctrico mediano en los edificios F, N y O.

Una posible explicación a lo que ocurre es que el entorno próximo de los edificios en dirección a los transmisores de las frecuencias 990 y 1305 kHz en el caso del edificio N consiste en un parque abierto, mientras que los edificios F y O tienen edificios de la misma altura (6 alturas) muy próximos, como se observa en la Figura 30, además de estar situados en un entorno urbano denso (gran densidad de edificios). Para 639 kHz, el entorno sería similar para los 3 edificios.

En la misma Figura 30 se representa mediante líneas de color rojo la dirección aproximada donde se encuentra cada uno de los transmisores y mediante un círculo rojo, el citado parque o zona abierta.

Sin embargo, los niveles medianos de campo en los otros dos edificios (F y O) son también muy variables entre sí aún estando en un entorno similar y dado que en los puntos anteriores se ha constatado que la variabilidad espacial es muy elevada incluso en una misma planta de un mismo edificio, tampoco se puede garantizar que la diferencia de los niveles de campo en los edificios F, N y O sea debida a la diferencia de entorno.



Figura 30. Entorno próximo de los edificios F, N y O y dirección de los transmisores.

4. PREDICCIÓN DEL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE LA SEÑAL EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

4.1 Modelo empírico de predicción

Una vez observada la dependencia de diversos factores en el nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media en interiores, en este apartado se pretende desarrollar un método de predicción del mismo, basado en regresiones lineales múltiples que minimicen el error cuadrático medio o MSE en función de los diferentes factores influyentes como la frecuencia, tipo de estancia, número de planta y tipo de entorno, además de la distancia al transmisor.

En primer lugar, la siguiente fórmula estima el nivel de campo eléctrico mediano de la señal en interiores en función de la distancia al transmisor y también la frecuencia, que como bien se ha visto influían de manera notable en el nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media en interiores:

$$\begin{aligned} E_s \text{ (dB}\mu\text{V / m)} &= 224,1 - 19,0 \cdot \log(d(m)) - 26,2 \cdot \log(f(\text{kHz})) \\ \sigma_{\text{error}} &= 12,2\text{dB} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dada la alta variabilidad de los niveles medianos de campo observada en los anteriores apartados, la desviación estándar del error cometido es muy elevada, situándose en torno a los 12 dB.

Añadiendo variables para el tipo de estancia y número de planta, no se reduce significativamente el error de predicción en las regresiones, si bien las fórmulas obtenidas indican que en promedio el nivel de campo eléctrico mediano en interiores aumenta con el número de planta y en los descansillos de escaleras verticales. Sin embargo, el error de predicción se reduce aproximadamente en 1 dB, por lo que no se considera práctica su inclusión en las fórmulas. Tampoco se disminuye el error al introducir una variable que tenga en cuenta el tipo de entorno próximo enfrentado al edificio en dirección al transmisor y el porcentaje de terreno urbano y rural recorrido en el trayecto entre el transmisor y el receptor.

4.2 Validación del modelo de predicción

Con el objetivo de validar el modelo empírico de predicción del campo eléctrico de la señal en Onda Media en interiores, se ha decidido aplicar la fórmula (4.2) a las medidas de la campaña de Madrid y a aproximadamente un 20% de las localizaciones de las campañas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz seleccionadas aleatoriamente (edificios C, E, G, J, N, Q y U) para tener un número de localizaciones representativo, y observar el error de predicción en cada una de las localizaciones comparando el valor predicho con el valor real de campo en cada una de ellas.

Como cabía esperar, dada la alta variabilidad espacial observada en interiores y que el error de predicción de la fórmula (4.2) es de unos 12 dB, hay una dispersión elevada en el error de predicción de todas las localizaciones analizadas (Madrid y 20% de Bilbao y Vitoria-Gasteiz), situándose la desviación estándar del error en 11,1 dB. Sin embargo, el valor absoluto del valor medio del error de predicción es de 2,5 dB, un valor que se puede considerar no muy elevado observada la alta variabilidad espacial en todas las campañas de medidas.

4.3 Discusión de validez y aplicación del modelo de predicción

Durante muchos años se han venido usando las curvas de propagación por onda de superficie en Onda Media reportadas en la recomendación ITU-R P.368-9 [64] que no computan las pérdidas ocasionadas al situar el receptor en entornos urbanos ni en el interior de edificios, y sin ningún tipo de irregularidades ni obstáculos. En la Figura 31 se muestra por un lado el campo eléctrico que se obtendría en condiciones de espacio libre en función de la distancia propuesta en la ITU-R P.368-9 [64] y los valores que se obtendrían por propagación por onda de superficie (con valores de conductividad $\sigma=0,005$ S/m y permitividad $\epsilon=30$ para Bilbao y $\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$ para Vitoria-Gasteiz según el atlas de conductividad de la ITU-R P.832-2 [127]) para las frecuencias representativas de 600 kHz y 1600 kHz. También se han añadido las curvas que se obtendrían de la aplicación de la fórmula (4.2) propuesta para interiores para las mismas frecuencias:

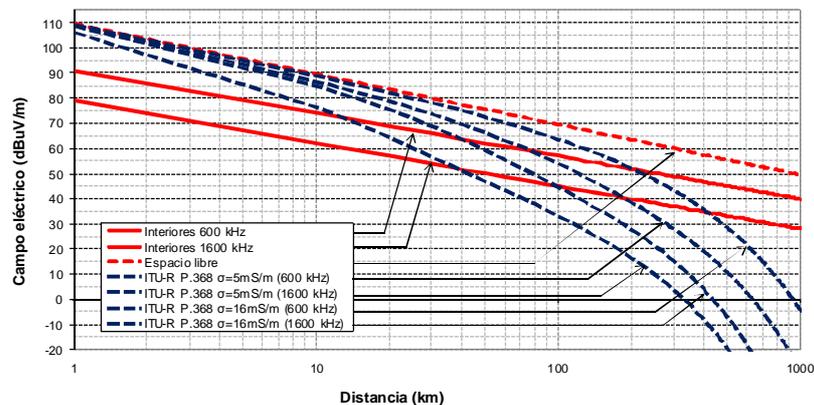


Figura 31. Comparación de las curvas de la recomendación ITU-R P.368-9 con las curvas de predicción en interiores.

Se observa por un lado que las curvas predichas para interiores mediante la fórmula (4.2) siguen una tendencia similar a las de onda de superficie con la distancia para cada una de las dos frecuencias representadas, pero únicamente hasta los 10 km aproximadamente. A partir de esa distancia las curvas de propagación por onda de superficie disminuyen más rápidamente con la distancia que las curvas predichas

para interiores, llegando incluso a predecirse valores de campo mucho más elevados que los indicados en la ITU-R [64] para distancias elevadas, por lo que las fórmulas de predicción de interiores dejarían de ser aplicables. Esta situación es debida a que la mayoría de los edificios de la base de datos se encuentran a menos de 10 km de los transmisores, habiendo algún edificio a una distancia de hasta 17 km como máximo, por lo que al no disponer de mediciones en distancias superiores las curvas de la fórmula (4.2) sólo se adaptan al comportamiento de la señal en Onda Media en interiores en distancias cortas. Además, la fórmula de predicción para interiores (4.2) no tiene en cuenta las características eléctricas del terreno, y como puede observarse en la Figura 31 únicamente para dos valores de conductividad, influyen notoriamente en el nivel de campo de la onda de superficie. Tampoco tiene en cuenta la dependencia variable con la distancia de las curvas de la ITU-R [64], que inicialmente dependen del inverso de la distancia, posteriormente del inverso del cuadrado de la distancia y finalmente prevalece una dependencia exponencial con la distancia.

Por lo tanto, se concluye que la fórmula de predicción (4.2) es aplicable únicamente a distancias cortas de hasta unos 10-15 km.

5. PÉRDIDAS POR PENETRACIÓN EN EDIFICIOS EN ONDA MEDIA

Se procede en este punto al estudio del nivel de campo eléctrico de la señal modulada en Onda Media en el exterior de edificios de grandes núcleos urbanos para realizar posteriormente una comparativa con respecto al nivel recibido en interiores y estimar las pérdidas por penetración en edificios. Conviene recordar nuevamente que el número de localizaciones exteriores se reduce a una a nivel de suelo en la fachada iluminada de la mayoría de los edificios. En los edificios A, B, C, D y E se pudieron realizar numerosas medidas exteriores en la mayoría de las plantas y en todo el perímetro, mientras que en los edificios P, R y S se pudieron realizar algunas medidas exteriores a diferentes alturas.

5.1 Variabilidad espacial del campo eléctrico mediano recibido en Onda Media en exteriores

La Figura 32 muestra el valor mediano del campo eléctrico en las localizaciones exteriores de los edificios de Bilbao y alrededores para las frecuencias de 990 y 1305 kHz, identificando los edificios a los que corresponde cada grupo de localizaciones y diferenciando las localizaciones que se encuentran en las fachadas iluminadas de las que se encuentran en las fachadas no iluminadas.

Se puede apreciar que existe una tendencia a la disminución del nivel de señal con la distancia y la frecuencia comparando los niveles de señal para cada una de las dos frecuencias representadas. También se observa, al igual que ocurrió con las localizaciones interiores, que existe un alto grado de dispersión o variabilidad espacial, sobre todo en los edificios donde más mediciones se han realizado. No se observa, sin embargo, una clara diferencia entre los niveles de campo eléctrico en las localizaciones situadas en las fachadas iluminadas con respecto a los niveles presentes en las fachadas no iluminadas, por lo que no parece que este aspecto pueda tener influencia en el nivel de señal recibido en exteriores en Onda Media.

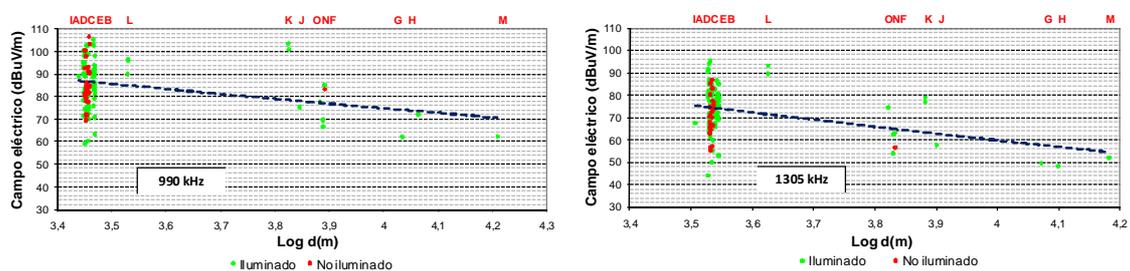


Figura 32. Nivel de campo eléctrico mediano en localizaciones exteriores de Bilbao para 990 y 1305 kHz.

Se llega a las mismas conclusiones para las frecuencias 1197 y 1602 kHz en la ciudad de Vitoria-Gasteiz como se puede observar en la Figura 33, si bien el rango de distancias es más reducido.

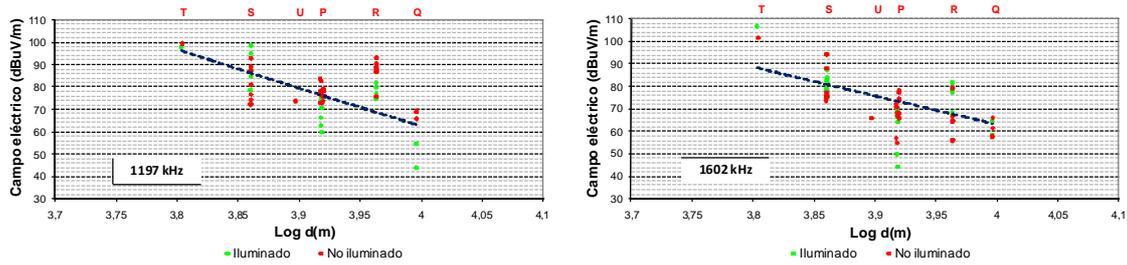


Figura 33. Nivel de campo eléctrico mediano en localizaciones exteriores de Vitoria-Gasteiz para 1197 y 1602 kHz.

La Figura 34 muestra los valores medianos con las localizaciones de los edificios de la escuela de ingenieros de Bilbao (A-B-C-D-E), y los edificios P, R y S que, como se ha comentado, son los edificios donde más localizaciones exteriores se pudieron tomar, diferenciando las localizaciones de las fachadas iluminadas de las localizaciones de las fachadas no iluminadas. También se han añadido las desviaciones estándar con las localizaciones para cada caso.

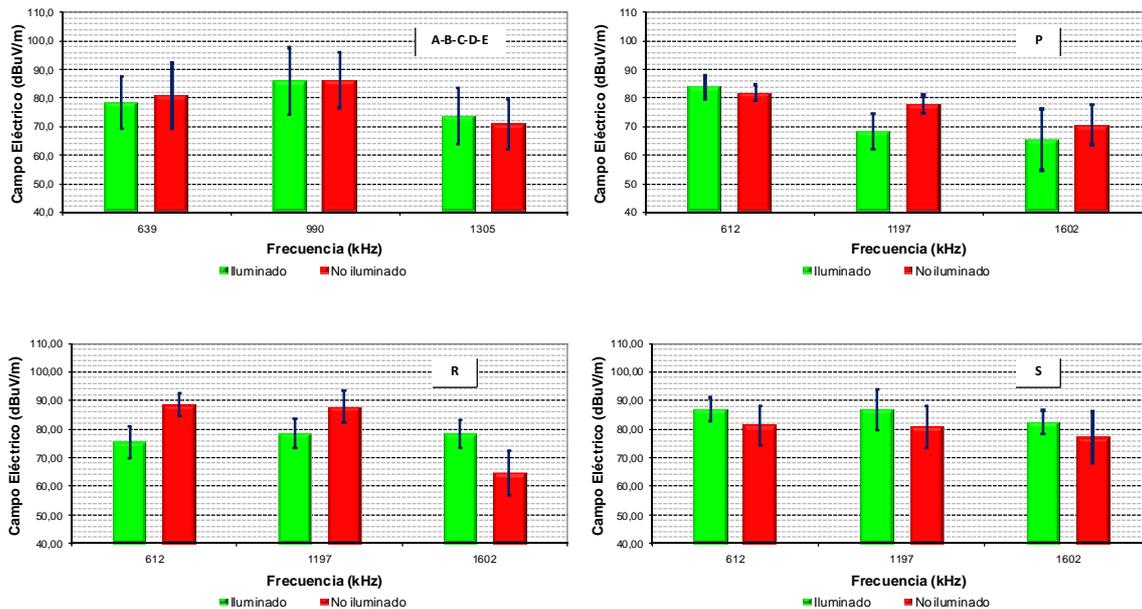


Figura 34. Campo mediano y desviación estándar con las localizaciones en las fachadas iluminadas y no iluminadas de la señal exteriores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

Se puede observar que en algún caso, los niveles de campo medianos son muy similares en las localizaciones iluminadas y no iluminadas. Sin embargo, observados todos los edificios y frecuencias no se puede concluir que los niveles sean similares o mayores en un caso que en otro. Sí se puede concluir, en cambio, que la variabilidad espacial es muy elevada, al igual que ocurría en interiores.

Por otro lado, en la Figura 35 se muestran los valores medianos de campo para cada uno de los edificios anteriores, promediando las localizaciones por plantas.

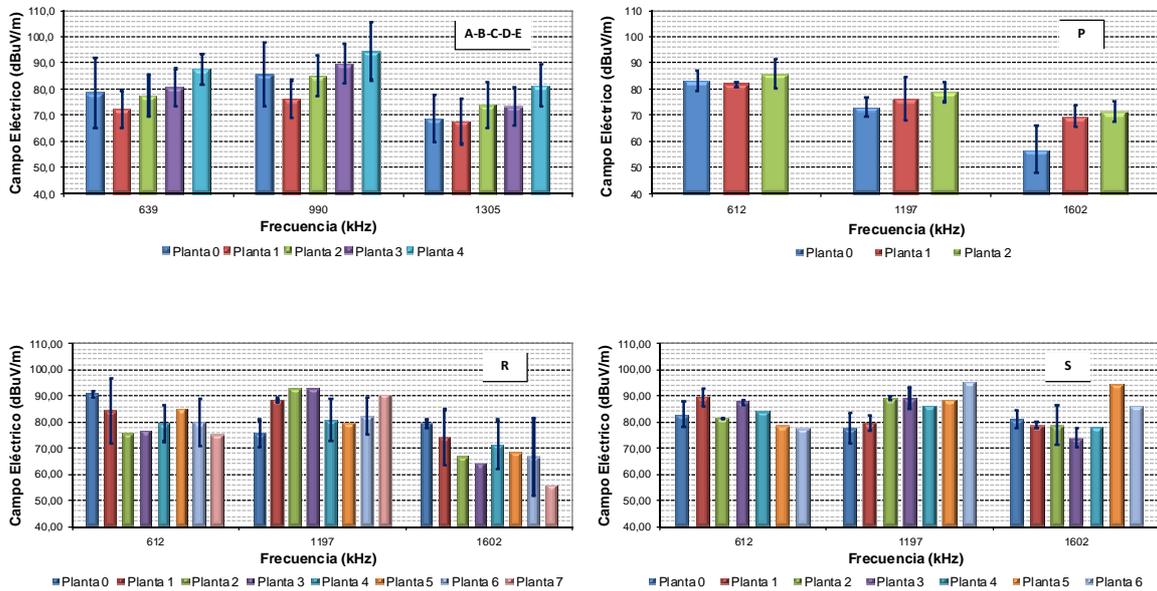


Figura 35. Campo mediano de la señal en exteriores en función del número de planta y desviación estándar con las localizaciones en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

Se observa que en muchos casos, la tendencia del nivel mediano de campo eléctrico de la señal en exteriores es a aumentar con el número de planta, si bien no ocurre en todos los edificios y frecuencias analizadas. Nuevamente, la desviación estándar con las localizaciones es generalmente elevada.

5.2 Cálculo de las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media

Tal y como se ha resumido en el “*Capítulo 2: Estado del arte*”, no ha habido un consenso general entre los autores de diferentes artículos referenciados a la hora de calcular las pérdidas por penetración o *BPL* (Building Penetration Losses). Sin embargo, desde la ITU-R se aconseja calcularlas como la diferencia entre el valor mediano con las localizaciones en la fachada iluminada de los edificios y el valor mediano con las localizaciones en el interior de los mismos, por plantas [115].

Por otro lado, en el estudio llevado a cabo en la presente tesis se ha observado que en Onda Media no hay diferencia significativa entre las localizaciones exteriores situadas en la parte iluminada y no iluminada de los edificios. También se ha detectado una alta variabilidad con las localizaciones tanto en interiores como en exteriores y por último, los únicos edificios en los que se han tomado numerosas localizaciones son los edificios A, B, C, D y E (estando todos ellos comunicados físicamente y por lo tanto, a una distancia

prácticamente igual con respecto a los transmisores y en el mismo entorno urbano) y el edificio P. En los edificios R y S se pudieron realizar mediciones interiores y exteriores en todas las plantas pero en muchos casos, sólo se dispone de una localización exterior por planta, por lo que no se ha considerado que el estudio de las pérdidas por penetración en estos edificios pueda ser representativo.

Se ha decidido por tanto, en vista de la alta variabilidad con las localizaciones y que no hay diferencia entre las localizaciones en la parte iluminada y no iluminada de los edificios, calcular las pérdidas por penetración en los edificios A, B, C, D y E conjuntamente, promediando todas las localizaciones exteriores de los cinco edificios por plantas por un lado y todas las localizaciones interiores de todos los edificios por plantas por el otro, con el objetivo de calcular la diferencia entre los valores medianos exteriores e interiores por plantas con el mayor número de localizaciones posible. Se realiza el mismo procedimiento también para el edificio P.

La Tabla 31 muestra los resultados de las pérdidas por penetración en esos edificios según este procedimiento, denotado como BPL_{ITU} a pesar de que el valor mediano en exteriores se calcula tanto con las localizaciones iluminadas y no iluminadas y no solamente con las iluminadas como se recomendaba en la ITU-R, para cada una de las frecuencias.

Tabla 31. Pérdidas por penetración en edificios en los edificios A-B-C-D-E mediante un procedimiento similar al de la ITU-R.

Frec. (kHz)	639					990					1305					
	Planta	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
$BPL_{ITU}(dB)$		12,9	3,7	2,0	4,6	6,7	9,3	4,3	8,3	8,3	6,9	7,5	2,7	7,2	0,0	4,7

Se observa que las pérdidas por penetración según este procedimiento no tienen ninguna dependencia clara con la planta y frecuencia, si bien las mayores pérdidas se obtienen en la planta 0. Si promediamos los valores obtenidos de las tres frecuencias por plantas y agrupando todas las plantas a la vez, se obtienen los valores de la Tabla 32, concluyendo que el valor medio representativo de las pérdidas por penetración en estos edificios sería de 5,9 dB.

Tabla 32. Pérdidas por penetración en los edificios A-B-C-D-E promediando las tres frecuencias.

Planta	$BPL_{ITU}(dB)$
0	9,9
1	3,6
2	5,8
3	4,6
4	6,1
Todas	5,9

Realizando el mismo estudio para el edificio P, se obtienen las mismas conclusiones observadas la Tabla 33 y Tabla 34, por lo que el valor medio representativo de las pérdidas por penetración para el edificio P sería de 7,5 dB, valor ligeramente superior al obtenido para el conjunto de edificios A-B-C-D-E de 5,9 dB.

Tabla 33. Pérdidas por penetración en edificios en el edificio P mediante un procedimiento similar al de la ITU-R.

Frec. (kHz)	612			1197			1602		
Planta	0	1	2	0	1	2	0	1	2
$BPL_{ITU}(dB)$	3,3	10,7	2,4	-0,7	11,6	-1,1	13,5	11,7	15,7

Tabla 34. Pérdidas por penetración en el edificio P promediando las tres frecuencias.

Planta	$BPL_{ITU}(dB)$
0	5,4
1	11,3
2	5,7
Todas	7,5

Se propone por lo tanto estimar las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media como el valor promedio de las pérdidas obtenidas en los dos casos analizados, es decir, en un valor de 6,7 dB.

6. PÉRDIDAS DEL CAMPO ELÉCTRICO MEDIANO DE LA SEÑAL EN ONDA MEDIA EN INTERIORES CON RESPECTO AL VALOR RECOMENDADO EN LA ITU-R P.368 (*LITU: LOSSES RESPECT TO ITU*)

Con el objetivo de correlar los valores predichos para interiores con la dependencia de la distancia de las curvas de la ITU-R [64] y de esa forma tratar de establecer un modelo empírico de predicción del campo eléctrico para cualquier distancia, se propone ahora estudiar las pérdidas del nivel de campo en cada una de las localizaciones interiores y exteriores respecto al valor de campo que se hubiese obtenido según la ITU-R [64] en ausencia de las ciudades y los edificios. A esas pérdidas se les denominará *LITU* (*Losses respect to ITU*) a lo largo de la tesis.

6.1 *LITU* en interiores en Onda Media

Utilizando los valores de campo eléctrico de la ITU-R [64] como referencia (con valores de conductividad $\sigma=0,005$ S/m y permitividad $\epsilon=30$ para Bilbao y $\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$ para Vitoria-Gasteiz) y calculando la diferencia entre esos valores y los que se obtienen realmente en cada una de las localizaciones interiores, se obtienen las siguientes fórmulas de regresión para estimar las *LITU*:

$$\begin{aligned} LITU(dB) &= -42,1 + 20,5 \cdot \log(f(kHz)) \\ \sigma_{error} &= 11,8dB \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dado que el error de estimación no se reduce significativamente al computar el número de planta y tipo de estancia en las regresiones, al igual que ocurría anteriormente con el modelo de predicción del campo eléctrico de la señal, se ha decidido no añadir esas variables en una nueva fórmula de predicción.

Las pérdidas con respecto a las curvas de la ITU-R [64] para onda de superficie aumentan por tanto con la frecuencia (de unos 15 dB para 600 kHz a unos 24 dB para 1600 kHz), como se observa en la Figura 36 en la que se ha utilizado la fórmula de estimación (4.3) de las denominadas *LITU*.

También se presentan en la misma gráfica las curvas que se obtendrían de forma separada con los datos de Bilbao ($\sigma=0,005$ S/m) por un lado y con los datos de Vitoria-Gasteiz ($\sigma=0,016$ S/m) por el otro, con el objetivo de estudiar la posible influencia de la conductividad media del terreno colindante a las ciudades en las pérdidas por penetración conjuntas en las ciudades y edificios (*LITU*). Se observa que las *LITU* son algo superiores para Bilbao que para Vitoria-Gasteiz (aproximadamente 1,5 dB superiores para 600 kHz y aumenta la diferencia con la frecuencia hasta los 6 dB para 1600 kHz). La curva de la ecuación (4.3) obtenida conjuntamente de la base de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz queda aproximadamente en la mitad de las otras dos curvas. Parece, por lo tanto, que las *LITU* disminuyen con el aumento de la conductividad del terreno colindante. Sin embargo, vista la alta variabilidad de todos los datos y fórmulas

de regresión y que sólo se disponen datos de dos conductividades diferentes, se considera más práctico el uso de la curva conjunta de la ecuación (4.3), dejando para posteriores estudios el análisis detallado de la influencia de la conductividad del terreno en las *LITU*.

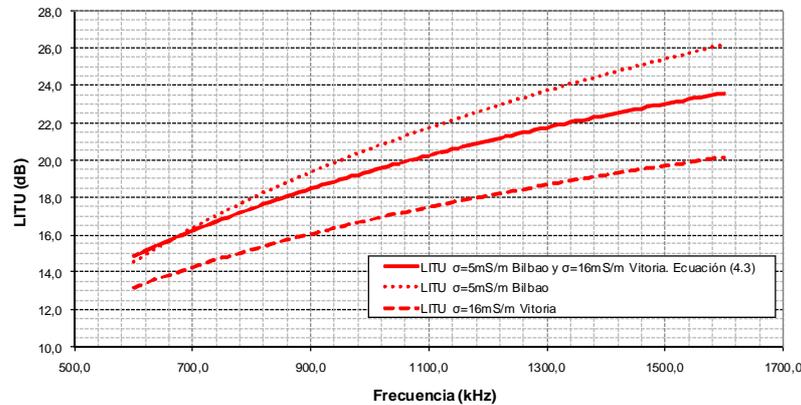


Figura 36. Predicción de las pérdidas con respecto a las curvas de la ITU-R P.368-9 (*LITU*) en interiores.

Con el objetivo de validar la fórmula de predicción (4.3), se ha calculado el error de predicción empleando la citada fórmula con las localizaciones de Madrid (con valores de conductividad de $\sigma=0,016$ S/m y permitividad $\epsilon=6$ como se concluyó en un reciente estudio doctoral [86]) y el 20% de las localizaciones de Bilbao y Vitoria-Gasteiz empleadas anteriormente, y se ha computado nuevamente el error de predicción para cada una de las localizaciones. En este caso, el valor absoluto del valor medio del error de predicción es de 0,2 dB, por lo que en promedio, la fórmula (4.3) reporta unos buenos resultados de predicción. La variabilidad del error de predicción es inevitablemente elevada, con una desviación estándar de 11 dB.

Se propone por tanto, y a modo de conclusión, estimar el nivel de campo eléctrico en interiores restando al valor predicho en la ITU-R [64] las pérdidas o *LITU* de la ecuación (4.3) para la frecuencia en cuestión. De esta forma, las curvas predichas para el campo en interiores mantendrían la evolución con la distancia que mantenían las curvas originales de propagación por onda de superficie y computarían las pérdidas medias, dependientes de la frecuencia, al situar el receptor en el interior de edificios de grandes núcleos urbanos, como se muestra en la Figura 37 para dos frecuencias representativas de Onda Media con valores de $\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$ a modo de ejemplo.

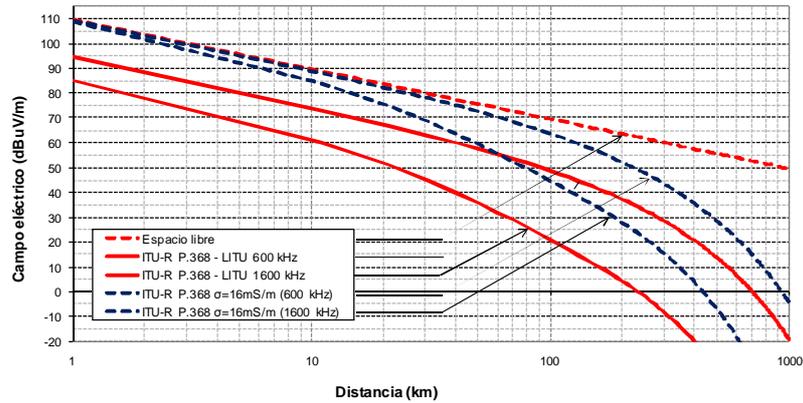


Figura 37. Curvas predichas para interiores en Onda Media restando las pérdidas (*LITU*) a las curvas de la ITU-R P.368-9 con valores de $\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$ para 600 kHz y 1600 kHz.

6.2 *LITU* en exteriores en Onda Media

Aplicando el mismo procedimiento para las localizaciones exteriores de las bases de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz, se obtiene la siguiente fórmula de predicción para las *LITU* en exteriores, en la que tampoco se ha añadido una variable para el número de planta y tipo de estancia porque, al igual que en interiores, el error de estimación no se reduce significativamente:

$$LITU(dB) = -46,1 + 19,7 \cdot \log(f(kHz))$$

$$\sigma_{error} = 10,6dB \tag{4.4}$$

Las pérdidas con respecto a las curvas de la ITU-R [64] en exteriores aumentan con la frecuencia con un factor muy similar al de interiores (ecuación (4.3)). Sin embargo, como cabía esperar, las pérdidas son algo menores, de unos 9 dB para 600 kHz a unos 17 dB para 1600 kHz, como se observa en la Figura 38:

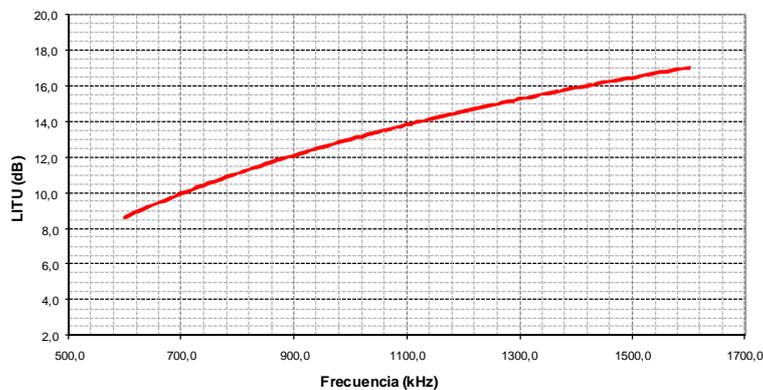


Figura 38. Predicción de las pérdidas o *LITU* en exteriores con respecto a las curvas de la ITU-R P.368-9.

6.3 Comparativa entre *LITU* en exteriores e interiores en Onda Media

Comparando las curvas de la Figura 36 y Figura 38 en las que se representan las pérdidas con respecto a las curvas recogidas en la recomendación ITU-R P.368-9 [64] o *LITU* en interiores y exteriores respectivamente, se observa en la Figura 39 que la diferencia entre las dos curvas es aproximadamente de 6-7 dB para toda la banda de Onda Media (6,4 dB para 600 kHz y 6,9 dB para 1600 kHz).

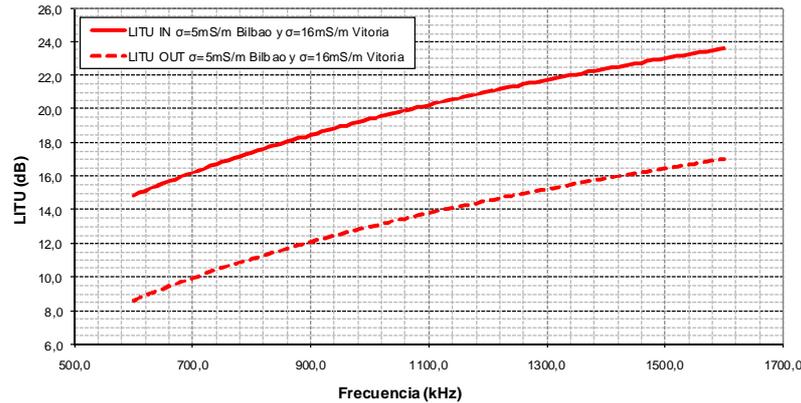


Figura 39. Curvas de predicción de las pérdidas o *LITU* en exteriores e interiores con valores de $\sigma=0,005$ S/m para Bilbao y $\sigma=0,016$ S/m para Vitoria-Gasteiz, y $\epsilon=30$ en ambos casos.

Este valor de entre 6 y 7 dB podría ser considerado también como representativo de las pérdidas por penetración medias (de forma similar a como se calcularon en [93]) y se observa además, que este valor se aproxima bastante al valor de 6,7 dB obtenido en el punto anterior de las pérdidas por penetración en toda la banda de Onda media.

Por último, dado que las predicciones de las *LITU* en exteriores e interiores se han realizado tomando como referencia los valores de conductividad propuestos en [127], donde no se tiene en cuenta la pérdida de conductividad en terreno urbano (ya que el objetivo era computar las pérdidas al situar el receptor en el interior de edificios con respecto a una situación ideal en la que no existiesen ni edificios ni ciudades), en la Figura 40 se representan las *LITU* para interiores y exteriores, tomando esta vez como referencia tanto para las medidas de Bilbao como para las de Vitoria-Gasteiz, una conductividad menor de valor $\sigma=0,1$ mS/m y una permitividad de $\epsilon=30$. Se observa en este caso que las *LITU* tanto en exteriores como en interiores disminuyen unos 10 dB pero que mantienen la tendencia con la frecuencia que se mantenía anteriormente, es decir, la diferencia entre las dos curvas sigue manteniéndose entre 6 y 7 dB para toda la banda de Onda Media comercial.

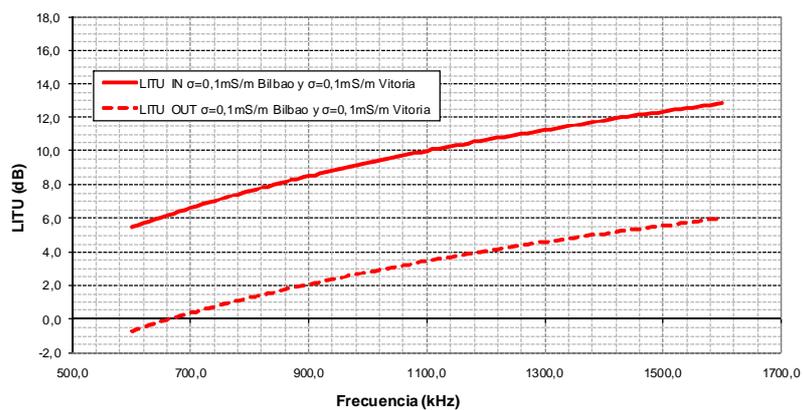


Figura 40. Curvas de predicción de las pérdidas o *LITU* en exteriores e interiores con valores de $\sigma=0,1$ mS/m y $\epsilon=30$ para Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

7. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR SE AJUSTA AL NIVEL DE CAMPO ELÉCTRICO MEDIANO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este apartado se estudia el posible ajuste de los datos a distribuciones de probabilidad típicamente utilizadas para el modelado de señales radioeléctricas en diferentes bandas de frecuencia y para diferentes modos de propagación, como son la distribución normal o Gaussiana, Log-normal, Rice, Rayleigh, Weibull y Nakagami [86], [87]. El objetivo no es otro que el poder estimar valores de campo superados en un porcentaje de localizaciones diferente al 50%.

Con el objetivo de contar con el mayor número de muestras para la inferencia estadística, se ha decidido agrupar todas las localizaciones de todos los edificios y todas las frecuencias. Para ello, habría que eliminar la dependencia del campo eléctrico con la potencia emitida, distancia al transmisor, frecuencia y características eléctricas del terreno. Para eliminar la dependencia con la potencia transmitida, se han normalizado todos los valores de campo con respecto a 1kW, al igual que para el análisis de los anteriores apartados. Con el objetivo de eliminar la dependencia con la distancia y las características eléctricas del terreno, se ha decidido analizar las *LITU* definidas en el apartado anterior (que mantienen la variabilidad espacial del propio campo eléctrico mediano en interiores pero eliminan la dependencia de la distancia y características eléctricas del terreno) y por último, con el objetivo de independizar los valores de las *LITU* con la frecuencia (que como se ha analizado aumentan con la frecuencia de emisión), se han normalizado los valores con respecto al valor mediano de las *LITU* obtenido para cada una de las frecuencias analizadas. De esta forma, se dispondría de toda la base de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz para la inferencia estadística conjunta de la variabilidad espacial en interiores en toda la banda de Onda Media.

Aplicando el método de estimación MLE (Maximum Likelihood Estimate) [86], los mayores valores de la función logarítmica de verosimilitud se obtienen para la distribución Log-normal, por lo que se puede decir que esta es la distribución que proporciona un mejor ajuste de los datos.

Aplicando posteriormente el test chi cuadrado [86] para comprobar la bondad del ajuste, se pudo comprobar que la distribución Log-Normal era la única de las distribuciones propuestas que superaba el test con una desviación estándar $\sigma=1,359$, por lo que se propone la distribución Log-normal como la distribución a emplear para caracterizar la variabilidad espacial de la señal modulada en Onda Media en interiores, que tiene la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(E_s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{E_s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(E_s) - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4.5)$$

Conviene matizar que los parámetros m y σ son la media y desviación estándar con las localizaciones de los logaritmos neperianos del campo eléctrico [87].

Por lo tanto, para calcular el parámetro m , habría que calcular inicialmente el valor de campo promedio como se ha propuesto en el apartado anterior, restando las pérdidas o $LITU$ de la ecuación (4.3) a los valores de campo de la ITU-R [65] de propagación por onda de superficie:

$$E_s (dB\mu V / m) = E_s^{ITU-R \text{ P.368}} (dB\mu V / m) - LITU (dB) \quad (4.6)$$

Posteriormente habría que realizar el siguiente ajuste de unidades:

$$m = \ln(10^{E_s (dB\mu V / m) / 20}) \quad (4.7)$$

Por último, para el uso práctico de la distribución Log-normal y normal se aconseja emplear la distribución normal estándar, definiendo una nueva variable Z cuya media sea 0 y varianza 1, de forma que se pueda utilizar de forma tabular para el cálculo de diferentes probabilidades [128]:

$$Z = \frac{\ln(x) - m}{\sigma} \quad (4.8)$$

De esta forma, se podría acudir a las tablas de la distribución normal estándar [128] para el cálculo del valor mediano de campo eléctrico de señal en Onda Media superado por ejemplo en el 90% de las localizaciones:

$$P(Z > z_0) = 1 - P(Z < z_0) = 0,9 \Rightarrow P(Z < z_0) = 0,1 \Rightarrow z_0 = -1,28 \quad (4.9)$$

$$-1,28 = \frac{\ln(E_s)_{90\%loc.} - m}{1,359} \Rightarrow \ln(E_s)_{90\%loc.} = -1,359 \cdot 1,28 + m \quad (4.10)$$

Pasándolo finalmente a unidades prácticas de $dB\mu V/m$, el valor de campo mediano estimado superado en el 90% de las localizaciones sería:

$$E_s (dB\mu V / m)_{90\%loc.} = 20 \cdot \log(e^{\ln(E_s)_{90\%loc.}}) \quad (4.11)$$

8. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA SEÑAL RADIODIFUNDIDA EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

Se analiza en este punto la variabilidad temporal de la señal en Onda Media en el interior de edificios de grandes núcleos urbanos y posteriormente se realiza una comparación con los resultados obtenidos en el entorno inmediatamente exterior. El estudio se enfoca en un análisis basado en el cálculo de estadísticos como la desviación típica y diferentes percentiles que muestren la variabilidad temporal a partir de los datos muestrales.

Se dispone de todas las localizaciones interiores y exteriores de 4 minutos de duración utilizadas para el estudio espacial anterior, además de las localizaciones interiores de larga duración detalladas en el “Capítulo 3: Metodología y campañas de medidas”.

Como se comentó anteriormente, de las localizaciones de larga duración, se han dividido los archivos de 48 horas en archivos de una hora de duración (filtrando las horas nocturnas para evitar incluir posibles interferencias ionosféricas).

En la Tabla 35 se recogen los valores RMS con las localizaciones de la desviación estándar temporal (σ) en interiores, clasificando los resultados en función de la duración de la medida realizada y la frecuencia. En la tabla también se presentan los valores RMS con las localizaciones de la diferencia del percentil 90 temporal y percentil 50 o mediana temporal (D_u), así como los valores RMS con las localizaciones de la diferencia del percentil 50 temporal y percentil 10 (D_l), para cada una de las 6 frecuencias analizadas.

Tabla 35. Estadísticos temporales de corta y larga duración de la señal en Onda Media en interiores.

Duración	Parámetro	Frecuencia (kHz)					
		612	639	990	1197	1305	1602
4 minutos	σ (dB)	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8	0,6
	D_l (dB)	1,2	1,0	1,2	1,3	1,1	0,8
	D_u (dB)	0,8	1,1	1,1	0,7	1,0	0,5
1 hora	σ (dB)	0,4	0,5	0,7	1,0	0,5	0,4
	D_l (dB)	0,5	0,8	0,9	1,0	0,6	0,5
	D_u (dB)	0,5	0,8	0,9	0,8	0,5	0,4

Los valores obtenidos reflejan que hay una variabilidad temporal pequeña de la señal modulada en interiores para todas las frecuencias analizadas, tanto a corto como a largo plazo, sobre todo comparándola con la variabilidad espacial.

En vista de estos resultados, se ha decidido no realizar un estudio de inferencia estadística temporal, ya que no aportaría resultados significativos ni prácticos.

En cuanto a la variabilidad temporal en exteriores, la Tabla 36 muestra los valores de los estadísticos temporales, únicamente a corto plazo, ya que no se realizaron mediciones exteriores a largo plazo, observando también que la variabilidad temporal podría ignorarse.

Tabla 36. Estadísticos temporales de corta duración de la señal en Onda Media en exteriores.

Duración	Parámetro	Frecuencia (kHz)					
		612	639	990	1197	1305	1602
4 minutos	σ (dB)	0,5	0,7	0,9	0,7	0,8	0,5
	D_i (dB)	0,6	1,2	1,3	1,0	1,0	0,9
	D_u (dB)	0,5	1,0	1,1	1,0	1,0	0,5

9. CONCLUSIONES

El estudio de recepción del nivel de campo de señales de radiodifusión en Onda Media en interiores y exteriores nos ha aportado las siguientes conclusiones:

- El campo eléctrico de la señal modulada en Onda Media en interiores decrece con la distancia y con la frecuencia, como se ha demostrado mediante la fórmula de regresión obtenida. Aumenta sin embargo, en algún caso, con el número de planta y en estancias con gran longitud vertical.
- La variabilidad espacial es muy elevada, con valores de la desviación estándar con las localizaciones de hasta 12 dB en un mismo edificio por lo que no es posible afinar el error de predicción entre ± 6 dB en el 80% de las localizaciones como se recomienda en la ITU-R SM.1753 [126] para las herramientas de predicción. La variabilidad espacial es elevada incluso en localizaciones distanciadas unos pocos metros entre sí, encontrando diferencias de nivel de hasta 20 dB, a priori en unas mismas condiciones de recepción.
- Se ha demostrado que el campo eléctrico de la señal en Onda Media en interiores sigue una distribución Log-normal con desviación estándar de 1,359 (desviación estándar con las localizaciones de los logaritmos neperianos del campo eléctrico en interiores).
- Se han estimado las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media en un valor medio de 6,7 dB.
- También se han calculado las pérdidas conjuntas por penetración en entornos urbanos densos y en edificios al mismo tiempo. En esta tesis a estas pérdidas se les ha denominado *LITU* (Losses respect to ITU) y se ha comprobado que varían entre 15 dB para 600 kHz y 24 dB para 1600 kHz, nuevamente con una alta variabilidad cuantificada con una desviación estándar de unos 12 dB.
- La variabilidad temporal de la señal en Onda Media puede obviarse, dado que las desviaciones estándar temporales a corto y largo plazo se sitúan en torno a 1 dB para toda la banda, tanto en interiores como en exteriores y la incertidumbre de los equipos de medida es de hasta 1,5 dB.

CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este capítulo se analiza inicialmente el nivel de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores en los edificios de la campaña de Madrid, con el objetivo de extraer unas primeras conclusiones acerca de la variabilidad espacial y temporal del mismo.

Posteriormente se realiza un estudio exhaustivo de la variabilidad espacial y temporal del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores de edificios de grandes núcleos urbanos, cuantificando la influencia de diferentes factores como la frecuencia, el tipo de edificio y el número de planta, a partir del gran número de localizaciones interiores de las campañas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

Se establece también una comparativa de los niveles de ruido presentes en el entorno inmediatamente exterior de los edificios con respecto a los niveles en interiores y se comparan ambos con los niveles publicados en la ITU-R P.372-9 [29].

Al igual que en el estudio de las señales de radiodifusión en Onda Media, se presenta un método de predicción del nivel de ruido mediano en Onda Media en interiores y exteriores, además de un análisis estadístico de la variabilidad espacial y temporal del mismo.

Por último, conviene recordar que para el análisis de la variabilidad espacial se emplean los valores medianos de campo eléctrico de las localizaciones de corta duración. Posteriormente se estudia la variabilidad temporal, para lo cual se emplearán las localizaciones de corta duración además de las de larga duración para contrastar los resultados.

1. DATOS EMPÍRICOS

En la Tabla 37 se resume el número de localizaciones interiores y exteriores de corta duración de Bilbao y Vitoria-Gasteiz con las que se llevará a cabo el estudio de variabilidad espacial del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores y una comparación con los niveles medianos de ruido en el entorno inmediatamente exterior de los edificios. También se dispone de un número reducido de mediciones interiores y exteriores de la comunidad de Madrid en un canal libre de 9 kHz en la frecuencia de 1287 kHz, tomadas con anterioridad a las campañas exhaustivas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz. Estos datos serán empleados para extraer unas primeras conclusiones acerca de los niveles de ruido radioeléctrico presentes en interiores y exteriores en Onda Media y para validar los métodos de predicción que se desarrollarán a partir de la base de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz.

Tabla 37. Resumen de localizaciones de corta duración para el estudio espacial y temporal a corto plazo del ruido radioeléctrico.

Zona	Nº edificios	Localizaciones Exteriores	Estancias Tipo 0	Estancias Tipo 1	Estancias Tipo 2	Estancias Tipo 3	Estancias Tipo 4
MADRID	7	25	26	16	20	20	14
BILBAO Y ALREDEDORES	15	105	78	66	46	35	3
VITORIA-GASTEIZ	6	54	46	12	28/22	22/28	3

Al igual que con las señales de radiodifusión en Onda Media, para analizar la variabilidad espacial, cada localización vendrá representada por el valor de campo eléctrico mediano durante los 4 minutos medidos para cada frecuencia (3 minutos en Madrid). Posteriormente se analiza la variabilidad temporal en esos 4 minutos alrededor del valor mediano (3 minutos en Madrid).

Conviene matizar que, nuevamente, todos los promedios, medianas, desviaciones estándar y valores RMS que se calculen se realizarán promediando los valores en cuestión en unidades logarítmicas (dB μ V/m o dB, según el caso).

Por último, y también al igual que con las señales de radiodifusión, con el objetivo de analizar la variabilidad temporal de ruido a largo plazo, se tomaron mediciones de larga duración (48 horas aproximadamente) en una serie de edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz en las que se filtraron las horas nocturnas para evitar posibles interferencias ionosféricas, que se resumen en la Tabla 38.

Tabla 38. Resumen de localizaciones de larga duración para el estudio temporal del ruido radioeléctrico a largo plazo.

Zona	Nº edificios	Nº localizaciones	Número horas diurnas
BILBAO Y ALREDEDORES	10	16	292
VITORIA-GASTEIZ	2	2	33

2. ESTUDIO DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES EN LA CAMPAÑA DE MEDIDAS DE MADRID

La Tabla 39 muestra en su primera fila los valores medianos de campo eléctrico de ruido radioeléctrico en cada uno de los edificios de Madrid en el canal libre de 9 kHz centrado en 1287 kHz, promediando los valores medianos de cada una de sus localizaciones. Se observa que hay una alta variabilidad de los niveles medianos de ruido de un edificio a otro y, aunque generalmente el campo eléctrico mediano de ruido es mayor en edificios de oficinas (edificios MD5, MD6 y MD7), se encuentra algún caso particular de viviendas particulares como el edificio MD4 en el que el nivel de ruido mediano también es similar al nivel presente en los edificios de oficinas.

Tabla 39. Estadísticos del campo eléctrico mediano de ruido en las localizaciones de cada uno de los edificios de Madrid.

Edificio	MD1	MD2	MD3	MD4	MD5	MD6	MD7
Campo mediano (dB μ V/m)	42,3	51,1	51,5	61,6	64,2	56,2	63,3
Localización con mayor campo mediano (dB μ V/m)	50,3	63,2	65,7	94,5	82,2	60,6	72,0
Localización con menor campo mediano (dB μ V/m)	38,2	45,3	38,1	57,0	38,7	50,7	52,8

Por otro lado, cabe destacar que los niveles de ruido radioeléctrico presentados en todos los edificios son mucho más elevados que los publicados en la recomendación ITU-R P.372-9 para entornos urbanos exteriores [29], en donde se recoge que esos niveles estarían cercanos a los 20 dB μ V/m en Onda Media. En efecto, los niveles medianos de ruido presentados en cada uno de los edificios se encuentran entre 22 y 44 dB por encima de los valores recogidos en la ITU-R para entornos urbanos exteriores.

Si nos centramos en cada uno de los edificios individualmente, en la Tabla 39 se observa que nos encontramos también con una alta variabilidad del nivel mediano de campo eléctrico de ruido de una localización a otra dentro de un mismo edificio, habiendo diferencias de hasta 43,5 dB entre la localización con menor nivel y la localización con mayor nivel mediano de ruido (edificio MD5).

En cuanto a la variabilidad temporal, el valor RMS de las desviaciones estándar temporales de todas las localizaciones de la base de datos de Madrid es de 2,1 dB, ligeramente mayor que la desviación observada para las señales de radiodifusión pero que podría resultar nuevamente insignificante al compararla con la elevada variabilidad espacial.

3. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este punto se pretende realizar un estudio de los factores que influyen en la variabilidad espacial del campo eléctrico de ruido en interiores en Onda Media, a partir del gran número de localizaciones y diversas frecuencias disponibles en las bases de datos de Bilbao (675, 1035 y 1242 kHz) y Vitoria-Gasteiz (630, 1242 y 1620 kHz). Dado que se pudo comprobar que la distancia al transmisor y el tipo de estancia no tenían influencia alguna en el nivel mediano de ruido radioeléctrico para ninguna de las frecuencias analizadas, el estudio se enfocará principalmente en analizar la influencia del tipo de edificio (viviendas u oficinas), el número de planta y la frecuencia dentro de la banda de Onda Media.

3.1 Variabilidad con el tipo de edificio

En la Figura 41, se representan los valores medianos de campo eléctrico de ruido y desviación estándar con las localizaciones para cada uno de los edificios analizados en la campaña de Bilbao y para el canal libre de 9 kHz centrado en 675 kHz, a modo de ejemplo representativo, ya que para las restantes frecuencias de ruido analizadas las conclusiones respecto a este análisis fueron muy similares. También se han representado los valores medianos de ruido promediando las localizaciones de todos los edificios a la vez y agrupando los pisos particulares o viviendas por un lado y las oficinas por otro.

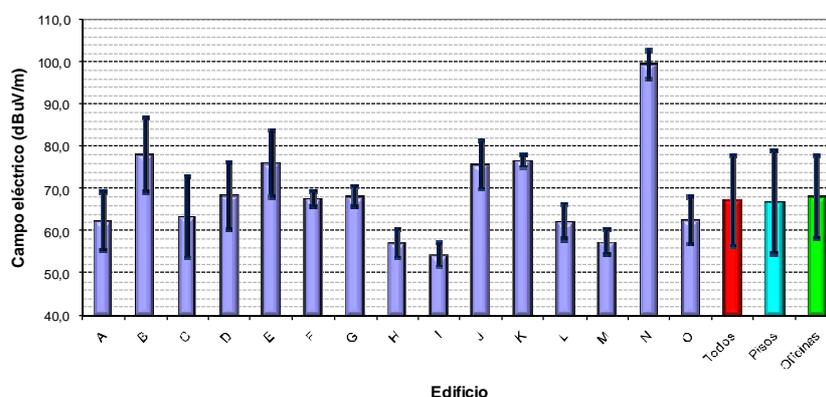


Figura 41. Niveles medianos de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones interiores en edificios de Bilbao para 675 kHz.

Se observa que los niveles medianos de ruido en interiores varían significativamente de un edificio a otro, observándose generalmente una alta desviación estándar con las localizaciones en la mayoría de los edificios. También se observa que los niveles medianos de ruido en los edificios de oficinas son, en promedio, ligeramente superiores a los niveles de ruido en las viviendas particulares, siendo este hecho

algo previsible, por el simple hecho de que el número de equipos electrónicos que pueda haber funcionando en un edificio de oficinas será presumiblemente mayor, al menos durante el horario diurno analizado en esta tesis. Por otro lado, al igual que ocurría con los edificios de Madrid, hay una notable variabilidad espacial tanto dentro de cada uno de los edificios, como de un edificio a otro, por lo que también hay edificios de viviendas particulares en los que los niveles medianos de ruido pueden ser muy elevados, como el edificio de viviendas N (ver Figura 41).

La Tabla 40 y Tabla 41 muestran que las desviaciones estándar (σ) con las localizaciones del ruido radioeléctrico en Onda Media son generalmente elevadas en la mayoría de edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz, pero especialmente en los edificios donde más mediciones se pudieron realizar.

Tabla 40. Desviación estándar con las localizaciones del ruido radioeléctrico mediano en interiores de los edificios de Bilbao.

Edificio	$\sigma_{675 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1035 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1242 \text{ kHz}}$ (dB)
A	6,9	9,0	8,7
B	8,6	9,8	9,8
C	9,5	9,8	10,3
D	7,9	7,0	8,1
E	7,8	7,8	6,8
F	1,9	2,8	5,7
G	2,5	1,3	2,0
H	3,3	8,7	5,6
I	2,7	6,6	2,2
J	5,6	5,6	5,5
K	1,3	3,8	3,0
L	4,1	3,2	5,0
M	2,9	4,5	5,4
N	3,3	3,8	2,8
O	5,5	10,7	2,6

Tabla 41. Desviación estándar con las localizaciones del ruido radioeléctrico mediano en interiores de los edificios de Vitoria-Gasteiz.

Edificio	$\sigma_{630 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1242 \text{ kHz}}$ (dB)	$\sigma_{1620 \text{ kHz}}$ (dB)
P	7,1	11,6	7,8
Q	10,3	5,8	4,1
R	3,5	6,1	5,3
S	5,0	6,5	8,0
T	6,1	6,4	3,0
U	3,0	6,4	1,4

3.2 Variabilidad con el número de planta

En la Figura 42 se presentan los valores medianos del campo eléctrico de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones por plantas, en el conjunto de edificios de la escuela de ingenieros de Bilbao

(edificios A, B, C, D y E), en el edificio P, edificio R y por último, en el edificio S, que son los edificios donde el número de localizaciones fue superior a los demás. Dado que en el resto de edificios únicamente se tomó generalmente una medición por planta, se ha decidido basar este estudio en los citados edificios para poder promediar un número significativo de valores por planta.

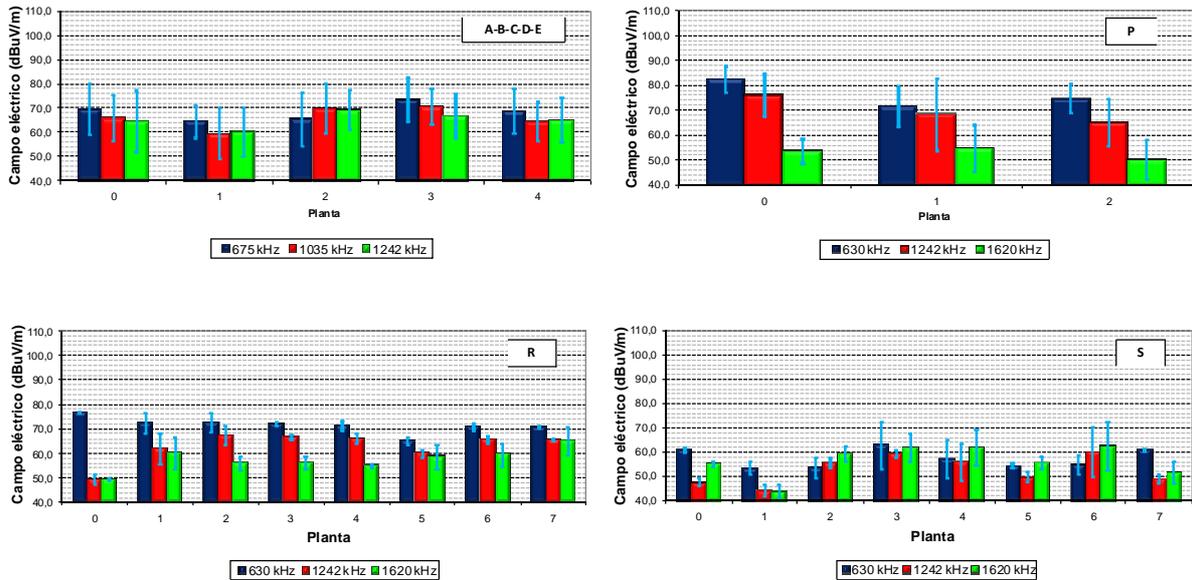


Figura 42. Campo eléctrico mediano de ruido por plantas y frecuencia y desviación estándar con las localizaciones interiores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

No se aprecia ninguna tendencia clara con el número de planta para ninguna de las frecuencias y edificios por lo que posiblemente se puede descartar que el ruido tenga su origen en centros transmisores de Onda Media. Lo que sí queda claro nuevamente es que incluso en una misma planta la variabilidad espacial con las localizaciones es elevada en general, sobre todo en los edificios A-B-C-D-E y P, que es donde se tomaron el mayor número de mediciones y se observan desviaciones estándar con las localizaciones de entorno a 10 dB en una misma planta para todas las frecuencias analizadas. También se observa, por otro lado, que generalmente el nivel mediano de ruido disminuye con la frecuencia.

3.3 Estudio de la dependencia de la frecuencia

En la Tabla 42 se muestra el valor mediano del campo eléctrico de ruido, promediando en este caso todas las localizaciones de corta duración de las bases de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz conjuntamente, diferenciando únicamente la frecuencia.

Se observa una clara tendencia a disminuir el campo eléctrico mediano de ruido radioeléctrico con la frecuencia, por lo que la dependencia frecuencial será un factor a tener en cuenta en la predicción del ruido radioeléctrico mediano en Onda Media en interiores.

Tabla 42. Campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en interiores en función de la frecuencia.

Frecuencia (kHz)	Campo mediano (dB μ V/m)
630	70,8
675	67,1
1035	64,5
1242	62,7
1620	53,4

Si bien el presente estudio se basa más en niveles de campo eléctrico de ruido, en muchas ocasiones se utiliza otro parámetro para cuantificar el ruido radioeléctrico, como es la figura de ruido, calculada mediante la siguiente fórmula según la recomendación ITU-R P.372-9 [29]:

$$F_a(\text{dB}) = E_n(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) + 95,5 - 20 \cdot \log(f(\text{MHz})) - 10 \cdot \log(b) \quad (5.1)$$

donde E_n es el campo eléctrico de ruido medido en la antena, f la frecuencia en MHz y b el ancho de banda del canal considerado en Hz (9000 Hz).

La Tabla 43 recoge los valores medianos de las figuras de ruido en función de la frecuencia analizada, añadiendo a su vez el rango de valores recogido en la ITU-R P.372-9 [29] para un conjunto amplio de entornos. Se aprecia un notable incremento en la figura de ruido mediana con respecto a los valores recogidos en la ITU-R [29], basados en medidas realizadas hace más de 30 años, para un conjunto de localizaciones exteriores.

La Tabla 44 presenta, por otro lado, los valores de la desviación estándar con las localizaciones (σ) y la diferencia de los decilos superior e inferior con las localizaciones con respecto al valor mediano (D_u y D_b , respectivamente) para cada una de las frecuencias analizadas, mostrando la alta variabilidad espacial presente en toda la banda de Onda Media comercial.

Tabla 43. Figura de ruido mediana en interiores en función de la frecuencia.

Frecuencia (kHz)	F _a mediana (dB)	F _a en ITU-R P.372-9 (dB)
630	130,9	63,5 - 73,1
675	126,5	
1035	120,1	
1242	119,8	
1620	105,2	

Tabla 44. Estadísticos de variabilidad espacial del ruido radioeléctrico en interiores en función de la frecuencia.

Frecuencia (kHz)	Parámetro	Interiores	ITU-R P.372-9
630	σ (dB)	10,4	2,3 – 7,1
	D_i (dB)	17,3	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	12,9	5,8 – 8,4
675	σ (dB)	10,6	2,3 – 7,1
	D_i (dB)	11,1	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	15,0	5,8 – 8,4
1035	σ (dB)	9,7	2,3 – 7,1
	D_i (dB)	9,6	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	13,8	5,8 – 8,4
1242	σ (dB)	10,2	2,3 – 7,1
	D_i (dB)	12,3	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	15,6	5,8 – 8,4
1620	σ (dB)	7,3	2,3 – 7,1
	D_i (dB)	8,6	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	10,7	5,8 – 8,4

La Figura 43 muestra los valores medianos del campo eléctrico de ruido en función de la frecuencia, promediando todos los edificios conjuntamente, además de la variabilidad con las localizaciones mediante los decilos superior e inferior, para poder apreciar gráficamente lo concluido en el presente punto.

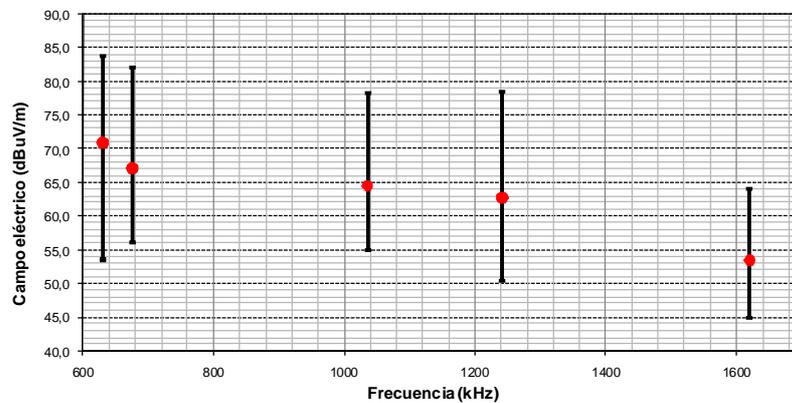


Figura 43. Campo mediano de ruido y decilos superior e inferior con las localizaciones interiores en función de la frecuencia.

En conclusión, se ha observado una clara tendencia de disminución de los niveles medianos de ruido con la frecuencia y un notable incremento en los niveles medianos de ruido con respecto a los valores aportados por la ITU-R [29], además de una alta variabilidad con las localizaciones.

4. PREDICCIÓN DEL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

4.1 Modelo empírico de predicción

Una vez analizados los factores influyentes en el nivel de campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en interiores y en su variabilidad espacial, se propone en este punto obtener una fórmula de predicción del campo mediano de ruido, basada en regresiones lineales que minimicen el error cuadrático medio, inicialmente con la única variable de la frecuencia en unidades logarítmicas:

$$\begin{aligned} E_n \text{ (dB}\mu\text{V/m)} &= 149,5 - 28,2 \cdot \log(f(\text{kHz})) \\ \sigma_{error} &= 10,2\text{dB} \end{aligned} \quad (5.2)$$

De la misma manera, la figura de ruido predicha sería:

$$\begin{aligned} F_a(\text{dB}) &= 265,4 - 48,2 \cdot \log(f(\text{kHz})) \\ \sigma_{error} &= 10,2\text{dB} \end{aligned} \quad (5.3)$$

La desviación estándar del error cometido en ambos casos es de 10,2 dB, valor elevado dada la alta variabilidad con las localizaciones observada en apartados anteriores.

Se ha observado, por otro lado, que el ruido era generalmente superior en los edificios de oficinas por lo que se podría incluir esa variable para obtener nuevas fórmulas de regresión múltiples para el campo mediano de ruido radioeléctrico y figura de ruido mediana en Onda Media en interiores. Sin embargo, y aunque en promedio el campo eléctrico de ruido es 3,8 dB superior en oficinas, el error de estimación permanece prácticamente igual que en las primeras fórmulas de predicción, elevado en ambos casos, por lo que quizá no sea práctico diferenciar entre edificios de oficinas y viviendas a la hora de realizar la predicción del ruido radioeléctrico mediano y podríamos utilizar directamente la fórmula (5.2) basada únicamente en la variable de la frecuencia.

La Figura 44 representa la fórmula de predicción (5.2) del campo mediano de ruido radioeléctrico en Onda media en interiores, apreciando su clara tendencia a disminución con la frecuencia, de unos 71 dB μ V/m para 600 kHz a unos 59 dB μ V/m para 1600 kHz. También se han representado los valores de la curva recogida en la ITU-R [29] para ciudades, que siguen las siguientes fórmulas para la figura de ruido y el campo eléctrico respectivamente:

$$\begin{aligned} F_a &= 76,8 - 27,7 \cdot \log(f(\text{MHz})) \\ E_n &= 20,8 - 7,7 \cdot \log(f(\text{MHz})) \end{aligned} \quad (5.4)$$

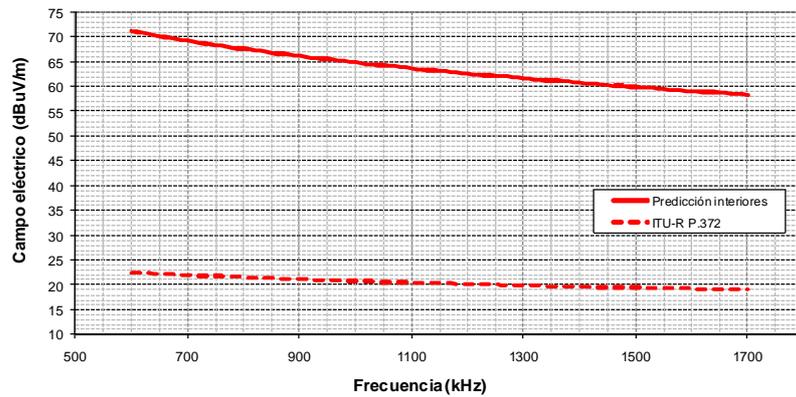


Figura 44. Predicción del campo mediano de ruido en Onda Media en interiores.

Se aprecia que el incremento en los niveles de ruido en Onda media en interiores es muy significativo.

4.2 Validación del modelo de predicción

Al igual que se hizo con la predicción de la señal de radiodifusión, con el objetivo de validar el modelo empírico de predicción del campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en interiores, se ha decidido aplicar la fórmula (5.2) a las medidas de ruido de la campaña de Madrid y a aproximadamente un 20% de las localizaciones de las campañas de Bilbao y Vitoria-Gasteiz (edificios C, E, G, J, N, Q y U, al igual que con la señal) y calcular el error de predicción en cada una de las localizaciones comparando el valor predicho con el valor real de campo mediano de ruido en cada una de ellas.

Nuevamente, dada la alta variabilidad espacial observada también para el ruido en interiores, la desviación estándar del error cometido en las localizaciones de Madrid y los citados edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz es de 11,7 dB. Sin embargo, el valor absoluto del valor medio del error de predicción es de un valor tan reducido como 1,8 dB.

5. ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE MEJOR SE AJUSTA AL NIVEL MEDIANO DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

En este caso, dado que el ruido radioeléctrico no depende de la distancia, se ha optado por agrupar en este estudio todas las localizaciones interiores de la base de datos como se hizo en el estudio de inferencia estadística de la señal de radiodifusión, normalizando los valores de campo únicamente con respecto al valor mediano obtenido para cada una de las cinco frecuencias analizadas, que como sabemos es un factor que influye notoriamente en el nivel mediano del ruido radioeléctrico.

Al igual que con la señal radiodifundida, la distribución Log-normal es la que consigue el mayor valor de la función logarítmica de verosimilitud y es la única que supera el test chi cuadrado, por lo que se propone la distribución Log-normal como la distribución a emplear para caracterizar la variabilidad espacial del campo mediano de ruido en Onda Media en interiores con una desviación estándar de $\sigma=1,120$, mediante la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(E_n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{E_n} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(E_n)-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5.5)$$

Conviene recordar nuevamente que los parámetros m y σ son la media y desviación estándar con las localizaciones de los logaritmos neperianos del campo eléctrico de ruido [87].

Por lo tanto, para calcular el parámetro m , habría que calcular inicialmente el valor medio o mediano de campo eléctrico de ruido mediante la fórmula de predicción (5.2) y a continuación habría que realizar el siguiente ajuste de unidades:

$$m = \ln(10^{E_n(dB\mu V/m)/20}) \quad (5.6)$$

Por último, se define una nueva variable Z cuya media sea 0 y varianza 1, de forma que se pueda utilizar de forma tabular la distribución normal estándar para el cálculo de diferentes probabilidades [128]:

$$Z = \frac{\ln(E_n) - m}{\sigma} \quad (5.7)$$

De esta forma, se podría acudir a las tablas de la distribución normal estándar [128] para el cálculo del valor mediano de campo eléctrico de ruido en Onda Media en interiores no superado por ejemplo en el 90% de las localizaciones:

$$P(Z < z_0) = 0,9 \Rightarrow z_0 = 1,28 \quad (5.8)$$

$$1,28 = \frac{\ln(E_n)_{90\%loc.} - m}{1,120} \Rightarrow \ln(E_n)_{90\%loc.} = 1,120 \cdot 1,28 + m \quad (5.9)$$

Pasándolo finalmente a unidades prácticas de dB μ V/m, el valor mediano de campo eléctrico de ruido en Onda Media no superado en el 90% de las localizaciones interiores sería:

$$E_n (dB\mu V / m)_{90\%loc.} = 20 \cdot \log(e^{\ln(E_n)_{90\%loc.}}) \quad (5.10)$$

6. COMPARATIVA DE LOS NIVELES MEDIANOS DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUIDO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES CON LOS NIVELES PRESENTES EN EL ENTORNO INMEDIATAMENTE EXTERIOR Y LOS RECOMENDADOS EN LA ITU-R P.372

6.1 Campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en exteriores

6.1.1 Variabilidad espacial del campo eléctrico mediano de ruido en Onda Media en exteriores

Conviene destacar nuevamente que, para este estudio, el número de localizaciones exteriores para la mayoría de edificios se reduce a una o dos a nivel de suelo, a excepción de los edificios A, B, C, D y E donde se pudieron realizar numerosas medidas exteriores a diferentes alturas a través de las ventanas, y los edificios P, R y S donde se pudieron tomar algunas mediciones exteriores a diferentes alturas.

La Figura 45 muestra los valores medianos de campo eléctrico de ruido y desviación estándar con las localizaciones para cada uno de los edificios analizados en la campaña de Bilbao y para el canal libre de 9 kHz centrado en 675 kHz, nuevamente a modo de ejemplo representativo, ya que para las restantes frecuencias de ruido analizadas las conclusiones respecto a este análisis fueron muy similares. También se han representado los valores medianos de ruido promediando las localizaciones de todos los edificios a la vez y agrupando los pisos particulares o viviendas por un lado y las oficinas por otro.

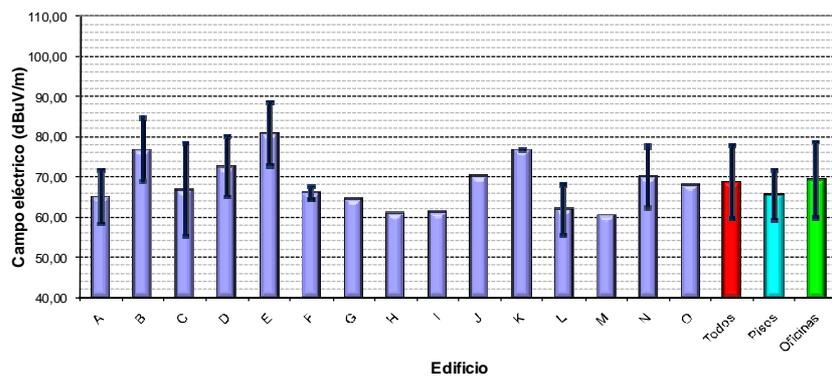


Figura 45. Niveles medianos de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones exteriores de edificios de Bilbao para 675 kHz.

Dado que el número de localizaciones es más reducido que en interiores, hay edificios en los que no se puede aportar una desviación estándar con las localizaciones. Sin embargo, en edificios donde se dispone de más localizaciones, se aprecia de nuevo la alta variabilidad espacial tanto de un edificio a otro como

dentro de un mismo edificio. También se observa que la diferencia entre los niveles medianos de ruido en los edificios de oficinas y los edificios de viviendas particulares se hace algo mayor que en interiores.

En la Figura 46 se presentan los valores medianos del campo eléctrico de ruido y desviaciones estándar con las localizaciones exteriores por plantas, en el conjunto de edificios de la escuela de ingenieros de Bilbao (edificios A, B, C, D y E), en el edificio P, edificio R y por último, en el edificio S, edificios donde se pudo realizar un mayor número de mediciones.

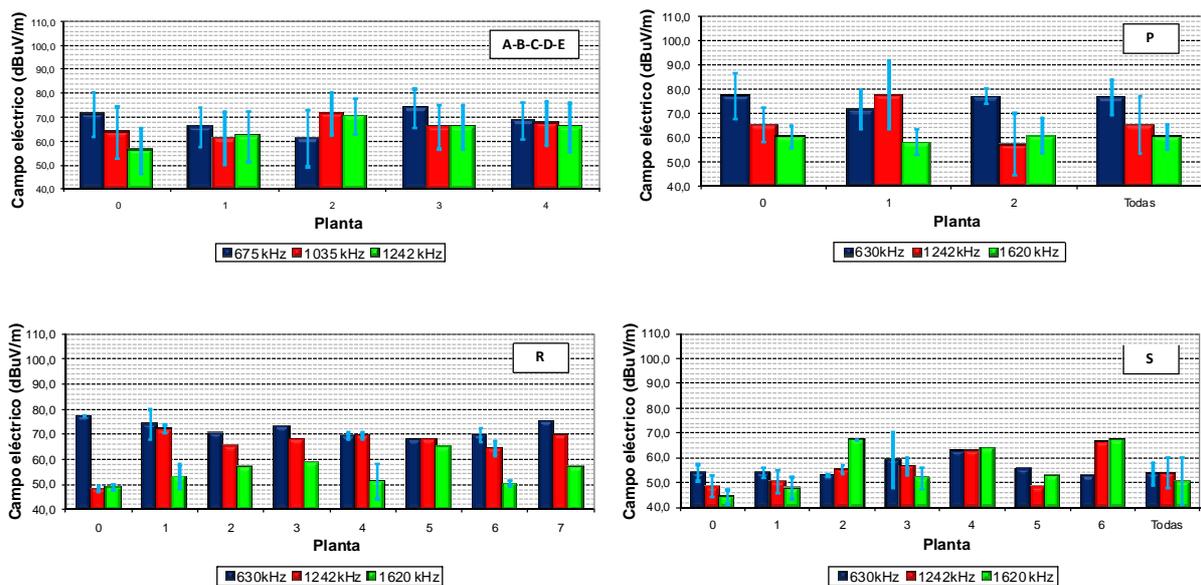


Figura 46. Campo eléctrico mediano de ruido por plantas y frecuencia y desviación estándar con las localizaciones exteriores en los edificios A-B-C-D-E, P, R y S.

Al igual que con el ruido en interiores, no se aprecia tendencia alguna con el número de planta para ninguna de las frecuencias y edificios y se vuelve a observar una alta variabilidad incluso en la misma planta de un edificio (al menos en los edificios con un gran número de localizaciones).

En la Tabla 45 se recogen los valores medianos de campo eléctrico de ruido para cada una de las frecuencias analizadas, promediando esta vez todos los edificios de Bilbao y Vitoria-Gasteiz, apreciando nuevamente una tendencia a disminución del campo eléctrico mediano de ruido con la frecuencia.

La Tabla 46 recoge los valores de las figuras de ruido medianas junto con los valores recogidos en la ITU-R [29], apreciando nuevamente un gran incremento en los niveles medianos.

Tabla 45. Campo eléctrico mediano de ruido en exteriores en función de la frecuencia.

Frecuencia (kHz)	Campo mediano (dB μ V/m)
630	68,9
675	68,6
1035	64,8
1242	62,3
1620	54,7

Tabla 46. Figura de ruido mediana en exteriores en función de la frecuencia.

Frecuencia (kHz)	F _a mediana (dB)	Fa en ITU-R P.372-9 (dB)
630	128,9	63,5 – 73,1
675	127,9	
1035	120,5	
1242	116,4	
1620	106,5	

En cuanto a la variabilidad con las localizaciones, se obtienen también valores elevados comparados con los recogidos en la misma recomendación, como se puede apreciar en la Tabla 47.

Tabla 47. Estadísticos de variabilidad espacial de ruido en Onda Media en exteriores.

Frecuencia (kHz)	Parámetro	Exteriores	ITU-R P.372-9
630	σ (dB)	8,9	2,3 – 7,1
	D_l (dB)	15,9	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	10,6	5,8 – 8,4
675	σ (dB)	9,0	2,3 – 7,1
	D_l (dB)	10,0	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	12,3	5,8 – 8,4
1035	σ (dB)	9,7	2,3 – 7,1
	D_l (dB)	9,1	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	15,5	5,8 – 8,4
1242	σ (dB)	10,7	2,3 – 7,1
	D_l (dB)	13,9	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	14,9	5,8 – 8,4
1620	σ (dB)	7,9	2,3 – 7,1
	D_l (dB)	11,6	5,8 – 8,4
	D_u (dB)	9,8	5,8 – 8,4

En conclusión, se ha observado una clara tendencia de disminución de los niveles medianos de ruido en exteriores con la frecuencia y un notable incremento en los niveles medianos de ruido con respecto a los

valores aportados por la ITU-R [29], además de una alta variabilidad con las localizaciones, al igual que en interiores.

La Figura 47 muestra los valores medianos del campo eléctrico de ruido en función de la frecuencia, promediando todos los edificios conjuntamente, además de la variabilidad con las localizaciones mediante los decilos superior e inferior.

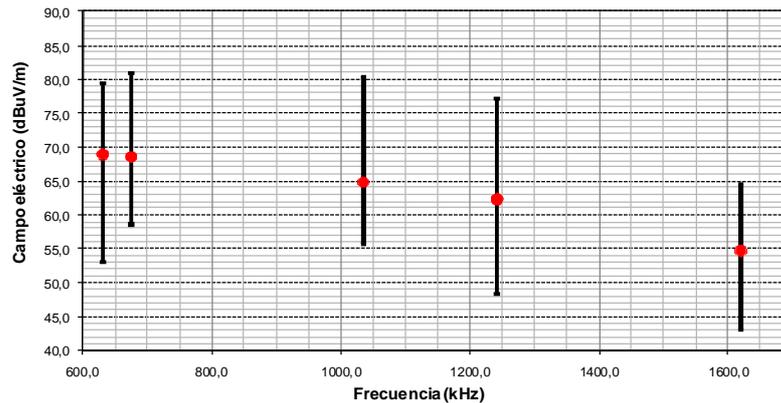


Figura 47. Campo eléctrico mediano de ruido y decilos superior e inferior con las localizaciones exteriores en función de la frecuencia.

6.1.2 Predicción del nivel mediano de campo eléctrico de ruido en Onda Media en exteriores

Mediante regresiones lineales se obtienen las siguientes fórmulas de predicción para el campo eléctrico de ruido en Onda Media en exteriores y la figura de ruido en función del logaritmo de la frecuencia:

$$E_n(dB\mu V/m) = 154,2 - 29,9 \cdot \log(f(kHz))$$

$$\sigma_{error} = 10,0dB \quad (5.11)$$

$$F_a(dB) = 270,2 - 47,2 \cdot \log(f(kHz))$$

$$\sigma_{error} = 10,0dB \quad (5.12)$$

Se vuelve a obtener un elevado valor de la desviación estándar del error de predicción (10 dB), dada la alta variabilidad espacial observada anteriormente. Tampoco en este caso se considera práctico el incluir una variable que diferencie entre edificios de oficinas y viviendas particulares ya que, a pesar de que la diferencia del nivel de campo mediano entre estos tipos de edificios es incluso mayor que la obtenida en interiores, no hay una reducción significativa en el error de predicción.

Por último, empleando el mismo procedimiento de validación empleado anteriormente para la señal de radiodifusión en interiores y exteriores y el ruido en interiores, la desviación estándar del error cometido al aplicar la fórmula de predicción (5.11) a las localizaciones exteriores de Madrid y los edificios E, C, G, J, N, Q y U de Bilbao y Vitoria-Gasteiz es de 12,3 dB y el valor absoluto del valor medio del error de predicción es de 1,3 dB.

6.2 Comparativa entre los niveles medianos de campo eléctrico de ruido en Onda Media en interiores, exteriores y los recomendados en la ITU-R P.372

En la Figura 48 se representan los valores medianos de campo eléctrico de ruido en Onda Media en exteriores e interiores, junto con las curvas de predicción aportadas en los apartados anteriores, observando que no hay una diferencia importante entre los niveles de ruido en interiores y exteriores.

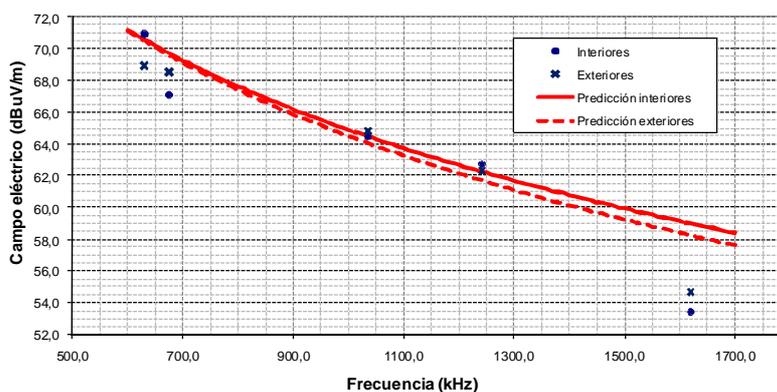


Figura 48. Campo eléctrico mediano en Onda Media en interiores y exteriores en función de la frecuencia junto con las curvas de predicción.

Por último, la Figura 49 muestra nuevamente los valores de campo eléctrico de ruido de la curva recogida en la ITU-R [29] para ciudades (fórmula (5.4)). Se han añadido también los valores medianos de campo de las campañas de esta tesis para cada una de las frecuencias suponiendo que la antena de recepción no tuviera pérdidas y estuviera perfectamente adaptada (factor K de antena de 0 dB/m) como se ha presentado en otros estudios recientes para frecuencias superiores, a partir de 121 MHz [129].

En este caso los valores de campo sí que se aproximarían a los de la ITU-R P.372-9 [29], si bien sabemos que los resultados no son reales, ya que la antena empleada presenta un factor K de antena superior a 40 dB/m en Onda Media.

En efecto, las antenas típicas de recepción para Onda Media como las empleadas en esta tesis no están adaptadas al receptor y tienen un coeficiente de reflexión muy grande, por lo que se comportan

prácticamente como circuitos abiertos. Los factores K de estas antenas son grandes de forma que la transferencia de energía del campo eléctrico exterior en la antena al receptor es muy pequeña. Por lo tanto, no se puede aplicar el criterio empleado en [129] de suponer que las antenas no tienen pérdidas, si bien se ha decidido presentar los datos que se obtendrían en la Figura 49, de forma que se pueda tener una referencia comparativa con la metodología empleada en esos estudios.

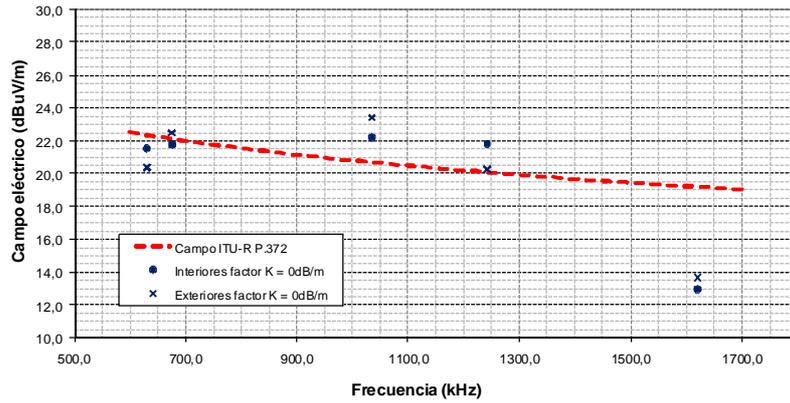


Figura 49. Campo eléctrico mediano en Onda Media en interiores y exteriores en función de la frecuencia suponiendo antena sin pérdidas junto con las curvas de predicción en el exterior de ciudades recogidas en la ITU-R P.372-9.

7. ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL RUIDO RADIOELÉCTRICO EN ONDA MEDIA EN INTERIORES

Este estudio se enfoca, al igual que con la señal modulada, en un único análisis basado en el cálculo de estadísticos como la desviación típica y diferentes percentiles que muestren la variabilidad temporal a partir de los datos muestrales. Presumiblemente un estudio de inferencia estadística carece de sentido, debido al carácter impulsivo de algunas fuentes de ruido detectadas en muchas localizaciones, como los ascensores, cuyo efecto se analiza individualmente al final del apartado.

Se dispone de todas las localizaciones interiores y exteriores de 4 minutos de duración utilizadas para el estudio espacial anterior, además de las localizaciones interiores de larga duración para poder comparar la variabilidad temporal a corto y largo plazo en interiores.

En la Tabla 48 se representan los valores RMS con las localizaciones interiores de las desviaciones estándar temporales de corta y larga duración (σ), sin diferenciar el tipo de edificio ya que no se ha encontrado ninguna diferencia significativa. También se presentan los valores RMS con las localizaciones de la diferencia del percentil 90 temporal y percentil 50 o mediana temporal (D_u), así como los valores RMS con las localizaciones de la diferencia del percentil 50 temporal y percentil 10 (D_l), para cada una de las 5 frecuencias analizadas.

Tabla 48. Estadísticos de variabilidad temporal de corta y larga duración de ruido en Onda Media en interiores.

Frec. (kHz)	Parámetro	4 minutos	1 hora	ITU-R P.372-9
630	σ (dB)	1,3	3,2	-
	D_l (dB)	1,0	5,1	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,9	3,0	9,2 – 11,0
675	σ (dB)	1,2	1,8	-
	D_l (dB)	1,3	1,0	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,4	3,1	9,2 – 11,0
1035	σ (dB)	1,3	2,1	-
	D_l (dB)	1,3	2,0	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,4	4,6	9,2 – 11,0
1242	σ (dB)	1,3	1,2	-
	D_l (dB)	1,5	2,4	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,7	3,2	9,2 – 11,0
1620	σ (dB)	2,1	0,8	-
	D_l (dB)	0,9	0,6	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	3,6	0,7	9,2 – 11,0

En todos los casos, los resultados obtenidos reflejan una variabilidad temporal muy inferior a la recogida en la recomendación ITU-R P.372-9 [29] y, aún siendo mayor que la variabilidad temporal de la señal

radiodifundida, podría nuevamente ser despreciable al compararla con la alta variabilidad espacial estudiada anteriormente. También se aprecia que los valores de los estadísticos obtenidos de las mediciones de 1 hora son algo superiores a los resultados obtenidos de las mediciones de 4 minutos, exceptuando la frecuencia más alta de 1620 kHz, donde se obtiene una desviación estándar temporal mayor en los archivos de 4 minutos, como también se aprecia en la representación gráfica de las desviaciones estándar en la Figura 50.

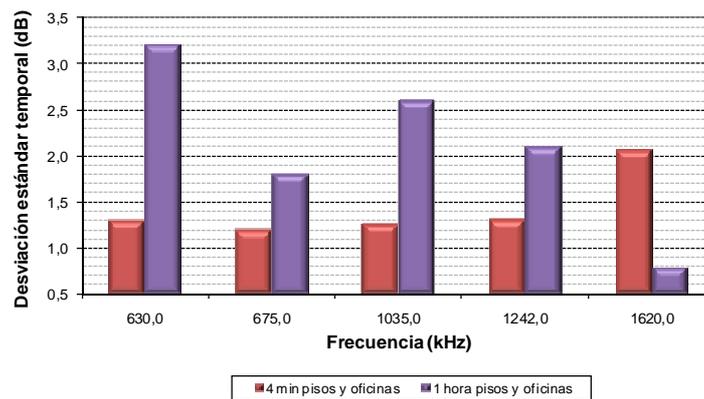


Figura 50. Valores RMS con las localizaciones de las desviaciones estándar temporales de corta y larga duración de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores.

Por otro lado, como se ha comentado con anterioridad, los valores de ruido medianos de la ITU-R [29] son mucho menores a los presentados en esta tesis. Quizá esa es la causa de obtener en principio una variabilidad temporal más pequeña: que los niveles medianos actuales de ruido radioeléctrico son muy elevados y posiblemente “enmascaran” diferentes fuentes de ruido impulsivas, cuyos niveles de pico pueden estar debajo de esos niveles medianos, disminuyendo en consecuencia la variabilidad temporal en una determinada localización.

En efecto, la Figura 51 muestra la evolución temporal del campo eléctrico del ruido para las frecuencias 630, 1242 y 1620 kHz, durante 4 minutos medidos en una localización de la planta 0 del edificio Q, próxima a un ascensor. Se observa que para las frecuencias 1242 y 1620 kHz, existen picos de ruido impulsivo que aumentan el nivel de campo de ruido a niveles de entre 55 dB μ V/m y 65 dB μ V/m, coincidiendo los mismos con los instantes en los que el motor del ascensor entraba en funcionamiento. Para la frecuencia 630 kHz no se aprecia su efecto, debido a que el nivel de ruido cuando el ascensor no está en funcionamiento ya es mucho más elevado, en torno a 77 dB μ V/m, por lo que los picos de ruido del ascensor son muy pequeños y por lo tanto inapreciables. Cabe recordar que las medidas de 4 minutos se hicieron consecutivamente por frecuencia, es decir, primero se midieron 4 minutos de la frecuencia 630 kHz, después otros 4 minutos de la frecuencia 1242 kHz y por último, 4 minutos de la frecuencia 1620

kHz. Es por ello que los picos de ruido no coinciden temporalmente para las tres frecuencias, ya que no son los mismos 4 minutos de medición en ningún caso, pero se pudo comprobar in situ, que los picos de ruido ocurrían siempre debido al accionamiento del ascensor.

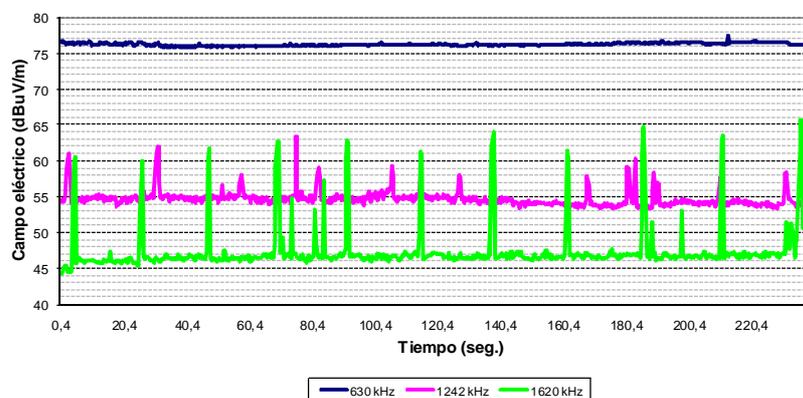


Figura 51. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en una localización próxima a un ascensor.

En la Tabla 49 se observa que la desviación estándar temporal en esa localización para la frecuencia 1620 kHz es de 3,3 dB, debido a los picos de ruido impulsivo del ascensor, que para esta frecuencia son más notables debido a que el nivel de ruido cuando el ascensor no está funcionando, es el menor de las tres frecuencias analizadas.

Tabla 49. Desviación estándar temporal en una localización próxima a un ascensor.

Frecuencia (kHz)	σ (dB)
630	0,2
1242	1,1
1620	3,3

En la Figura 52, se muestra lo mismo que en la anterior, para otra localización del mismo edificio, también próxima al ascensor, pero en la planta 5. El nivel de ruido cuando el ascensor no está en funcionamiento es menor que el caso anterior para la frecuencia 630 kHz, por lo que, en este caso, los picos de ruido del ascensor se aprecian en las tres frecuencias, obteniendo en consecuencia valores mayores de la desviación estándar temporal para las tres frecuencias, como se muestra en la Tabla 50.

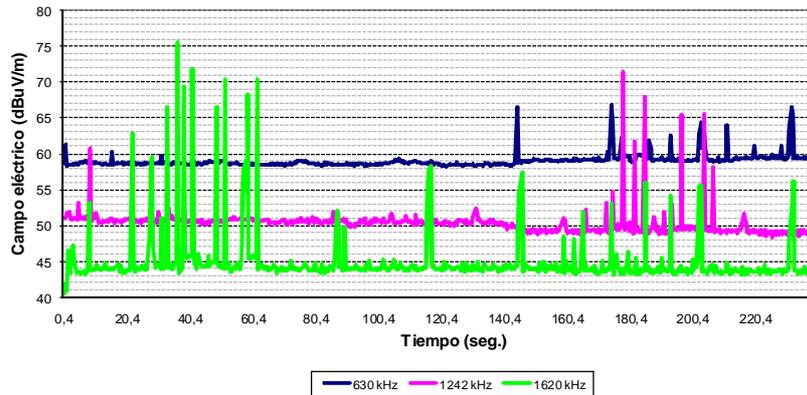


Figura 52. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en otra localización próxima a un ascensor.

Tabla 50. Desviación estándar temporal en otra localización próxima a un ascensor.

Frecuencia (kHz)	σ (dB)
630	1,0
1242	1,8
1620	3,3

Estos mayores valores de la desviación estándar temporal, sin embargo, no son excesivamente superiores a los valores RMS de toda la base de datos recogidos en la Tabla 48. Por lo tanto, los ascensores son una fuente de ruido que pudo ser detectada visualmente, pero presumiblemente hay otras fuentes de ruido que no pudieron ser detectadas y aumentan la variabilidad temporal en otras localizaciones que no estén próximas a los ascensores. Por ejemplo, en la Figura 53, se muestra la evolución temporal del campo eléctrico del ruido para las frecuencias 675, 1035 y 1242 kHz, para una localización de la planta 4 del edificio C, no próxima a ningún ascensor. Se observa que la frecuencia más baja de 675 kHz es bastante estable en el tiempo. Sin embargo, la frecuencia 1035 kHz sufre un incremento lento del nivel de ruido y por último, el canal 1242 kHz presenta una alta variabilidad temporal como se muestra en la Tabla 51, debido a alguna fuente de ruido desconocida, no siendo en este caso un ascensor ya que se comprobó que el ascensor más próximo a esa localización estaba a unos 20 metros y sin entrar en ningún momento en funcionamiento.

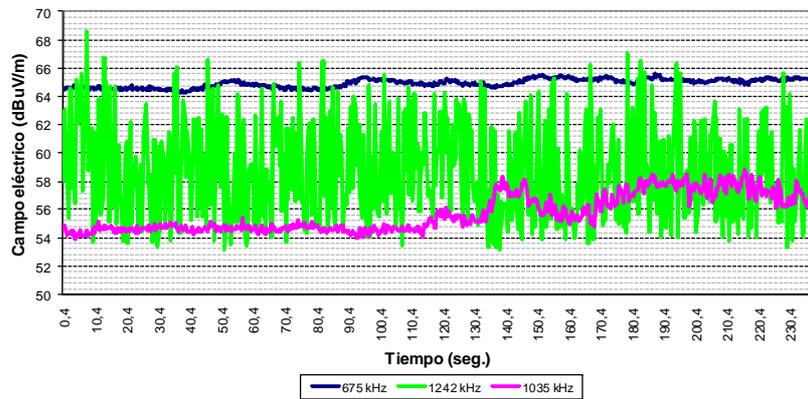


Figura 53. Evolución temporal del campo eléctrico del ruido en otra localización no próxima a un ascensor.

Tabla 51. Desviación estándar temporal en otra localización no próxima a un ascensor.

Frecuencia (kHz)	σ (dB)
675	0,3
1035	1,3
1242	3,4

La siguiente Figura 54 muestra la citada tendencia a disminuir la desviación estándar temporal a medida que aumenta el valor mediano del campo eléctrico, representado en el eje horizontal para cada una de las localizaciones interiores de corta duración de las bases de datos de Bilbao y Vitoria-Gasteiz (se ha añadido una línea de tendencia logarítmica para observar claramente esta tendencia):

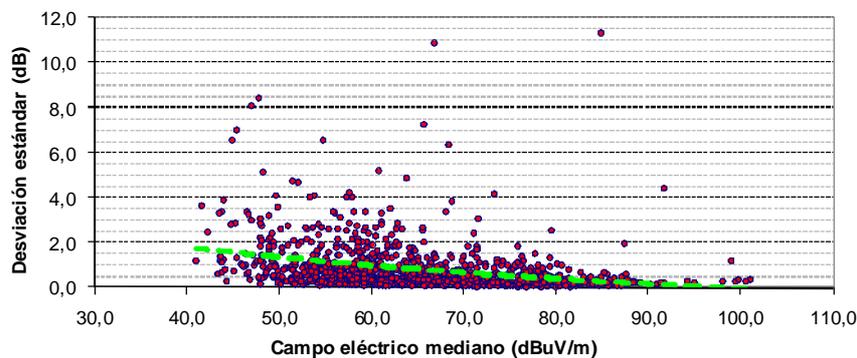


Figura 54. Desviación estándar temporal del ruido en función del campo eléctrico mediano del ruido en cada localización interior.

Por último, la Tabla 52 muestra los estadísticos de variabilidad temporal para las localizaciones de corta duración tomadas en el exterior de los edificios.

Tabla 52. Estadísticos de variabilidad temporal de corta duración de ruido en Onda Media en exteriores.

Frec. (kHz)	Parámetro	Exteriores	ITU-R P.372-9
630	σ (dB)	1,8	-
	D_l (dB)	0,6	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	2,6	9,2 – 11,0
675	σ (dB)	1,0	-
	D_l (dB)	1,9	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,4	9,2 – 11,0
1035	σ (dB)	1,2	-
	D_l (dB)	2,0	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	1,7	9,2 – 11,0
1242	σ (dB)	1,5	-
	D_l (dB)	1,6	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	2,4	9,2 – 11,0
1620	σ (dB)	2,3	-
	D_l (dB)	1,4	4,6 – 6,7
	D_u (dB)	4,0	9,2 – 11,0

Se observa que la variabilidad temporal a corto plazo en exteriores es, al igual que en interiores, despreciable al compararla con la elevada variabilidad espacial.

8. CONCLUSIONES

El estudio llevado a cabo del nivel de ruido radioeléctrico en Onda Media nos aporta las siguientes conclusiones:

- Como primera conclusión, respecto al análisis espacial del nivel mediano del ruido radioeléctrico, cabe señalar que los niveles medianos de campo eléctrico de ruido en el interior y exterior de edificios en grandes núcleos urbanos son muy similares, ambos mucho más elevados que los recogidos en la recomendación ITU-R P.372-9 [29] y disminuyen con la frecuencia, de unos 71 dB μ V/m para 600 kHz a unos 59 dB μ V/m para 1600 kHz.
- Se observa a su vez una elevada variabilidad con las localizaciones, con una desviación estándar de entorno a 10 dB.
- El nivel de ruido en oficinas suele ser mayor al presente en viviendas particulares, si bien el error de predicción de las fórmulas de regresión aportadas no disminuye significativamente.
- El campo eléctrico mediano de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores sigue una distribución Log-normal con una desviación estándar de los logaritmos neperianos de los valores de campo de 1,120.
- En todos los casos, la variabilidad temporal es mucho menor que la recogida en la ITU-R [29] y que la propia variabilidad espacial, si bien la variabilidad temporal del ruido es algo mayor que la de las señales de radiodifusión en Onda Media en interiores.
- Se han podido detectar fuentes impulsivas de ruido como los ascensores, en aquellos casos y frecuencias en las que el nivel mediano de ruido no era muy elevado, ya que en los casos en los que el ruido mediano ya era suficientemente elevado, los picos de ruido impulsivos quedaban enmascarados. Este es uno de los motivos de que la variabilidad temporal observada sea mucho menor que la recogida en la ITU-R [29], ya que muchas fuentes de ruido impulsivas que podrían aumentar la variabilidad temporal quedan enmascaradas por los altos niveles de ruido medianos presentes. Se ha podido observar que la desviación estándar temporal disminuye con el aumento del campo mediano de ruido.

CAPÍTULO 6. APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se resumen las aportaciones más relevantes obtenidas de la tesis además de las publicaciones que se han generado. Se concluye enumerando las posibles líneas futuras que den continuidad al trabajo presentado en esta tesis.

1. APORTACIONES

En esta tesis se ha caracterizado la recepción estática y diurna de señales de radiodifusión y ruido radioeléctrico en Onda Media en el interior de edificios de grandes núcleos urbanos.

Los resultados se han obtenido de tres campañas de medidas de campo llevadas a cabo en Madrid para señales digitales DRM y en Bilbao y Vitoria-Gasteiz para señales analógicas AM. En ambos tipos de señales radiodifundidas (AM analógica y DRM digital) se prevé un comportamiento en cuanto a campo eléctrico recibido en teoría idéntico, dado que el canal puede considerarse plano en frecuencia.

Las aportaciones realizadas se pueden dividir en dos grupos:

- Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la señal recibida en Onda Media en interiores.
- Estudio de la variabilidad espacial y temporal del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores.

En los siguientes subapartados se detallan estas dos aportaciones además de una tercera derivada de la consecución de las anteriores:

1.1 Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la señal en Onda Media en interiores

Se ha caracterizado el campo eléctrico de la señal en Onda Media en interiores y se ha podido observar que decrece con la distancia y con la frecuencia, como indica una de las fórmulas de regresión obtenidas normalizando la potencia de emisión a 1 kW:

$$\begin{aligned} E_s \text{ (dB}\mu\text{V/m)} &= 224,1 - 19,0 \cdot \log(d(m)) - 26,2 \cdot \log(f(\text{kHz})) \\ \sigma_{\text{error}} &= 12,2\text{dB} \end{aligned} \quad (6.1)$$

La variabilidad espacial es muy elevada, situándose la desviación estándar con las localizaciones o el error de la fórmula de predicción en torno a los 12 dB.

Sin embargo, esta fórmula de regresión (6.1) sólo sería aplicable en distancias cortas, por lo que es preferible cuantificar las pérdidas con respecto a las curvas de propagación por onda de superficie de la recomendación ITU-R P.368-9 [65] o *LITU* mediante la siguiente fórmula de regresión:

$$\begin{aligned} LITU(\text{dB}) &= -42,1 + 20,5 \cdot \log(f(\text{kHz})) \\ \sigma_{\text{error}} &= 11,8\text{dB} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Estas pérdidas cuantificarían las pérdidas conjuntas por penetración en entornos urbanos densos y en edificios al mismo tiempo, es decir, las pérdidas con respecto al caso ideal de tierra perfectamente esférica y sin obstáculos caracterizado por las curvas recogidas en la recomendación ITU-R P.368-9 [64].

Posteriormente, se calcularía el valor de campo en interiores restándole las pérdidas calculadas mediante la fórmula anterior (6.2) al valor predicho por las curvas de propagación por onda de superficie de la recomendación ITU-R P.368-9 [64]:

$$E_s(\text{dB}\mu\text{V} / \text{m}) = E_s^{\text{ITU-R P.368}} + 42,1 - 20,5 \cdot \log(f(\text{kHz})) \quad (6.3)$$

También se ha comprobado que el nivel de campo eléctrico mediano de la señal en Onda Media en interiores aumenta en ocasiones con el número de planta y en estancias con gran longitud vertical, pero el error de estimación no se reduce significativamente.

El campo eléctrico de la señal modulada en Onda Media en el interior de un determinado edificio sigue una distribución Log-normal con desviación estándar de valor 1,359.

Por otro lado, se han estimado las pérdidas por penetración en edificios en Onda Media en 6,7 dB.

Por último, se ha comprobado que la variabilidad temporal de la señal en Onda Media puede obviarse, dado que las desviaciones estándar temporales a corto (4 minutos) y largo plazo (1 hora) se sitúan en torno a 1 dB para toda la banda.

1.2 Estudio de la variabilidad espacial y temporal del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores

Como primera conclusión del análisis espacial del nivel mediano del ruido radioeléctrico en Onda Media, cabe señalar que los niveles medianos de campo eléctrico de ruido en el interior y exterior de edificios de grandes núcleos urbanos son muy similares, mucho más elevados que los recogidos en la recomendación ITU-R P.372-9 [29] (que se sitúan en torno a 20 dB μ V/m en Onda Media) y disminuyen con la frecuencia, como muestran los valores de la siguiente Tabla 53:

Tabla 53. Campo eléctrico mediano de ruido radioeléctrico en interiores y exteriores en Onda Media.

Frecuencia (kHz)	Campo mediano en interiores (dB μ V/m)	Campo mediano en exteriores (dB μ V/m)
630	70,8	68,9
675	67,1	68,6
1035	64,5	64,8
1242	62,7	62,3
1620	53,4	54,7

Se observa a su vez una elevada variabilidad espacial, con una desviación estándar con las localizaciones de en torno a 10 dB.

El campo eléctrico de ruido en Onda Media en interiores sigue una distribución Log-normal con desviación estándar de 1,120.

Como indica la siguiente fórmula de predicción del nivel de ruido radioeléctrico en interiores, el campo eléctrico del ruido radioeléctrico en interiores disminuye con la frecuencia:

$$\begin{aligned} E_n(dB\mu V / m) &= 149,5 - 28,2 \cdot \log(f(kHz)) \\ \sigma_{error} &= 10,2dB \end{aligned} \quad (6.4)$$

El nivel de ruido en oficinas suele ser mayor al presente en viviendas particulares pero no se reduce significativamente el error de estimación al incluir una variable que lo compute.

En cuanto a la variabilidad temporal, se ha comprobado que el ruido a largo plazo varía algo más que a corto plazo como se recoge en la Tabla 54 donde se presentan los valores RMS con las localizaciones de las desviaciones estándar temporales. La variabilidad temporal es mucho menor que la variabilidad espacial, si bien es algo más elevada que la variabilidad temporal de la señal radiodifundida en Onda Media, en algunos casos debido a fuentes de ruido de carácter impulsivo como los motores de los ascensores.

Tabla 54. Valores RMS con las localizaciones de la desviación estándar temporal de corta y larga duración del ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores.

Frecuencia (kHz)	4 minutos	1 hora
630	1,3	3,2
675	1,2	1,8
1035	1,3	2,1
1242	1,3	1,2
1620	2,1	0,8

1.3 Planificación de red en Onda Media para cobertura en interiores

Una vez caracterizados los niveles medianos de señal y ruido en Onda Media en el interior de edificios, se podrían combinar las fórmulas de regresión de ambos para obtener una predicción de la relación señal a ruido o C/N (Carrier to Noise ratio), clave para una correcta planificación de red. La siguiente fórmula se obtiene de restar la fórmula de regresión del ruido (6.4) a la fórmula de regresión de la señal (6.3):

$$(C / N)(dB) = E_s^{ITU-R P.368}(dB\mu V / m) - 107,4 + 7,7 \cdot \log(f(kHz)) \quad (6.5)$$

La Figura 55 representa la fórmula anterior para las frecuencias representativas de 600 kHz y 1600 kHz, para una conductividad de $\sigma=0,016$ S/m y permitividad $\epsilon=30$:

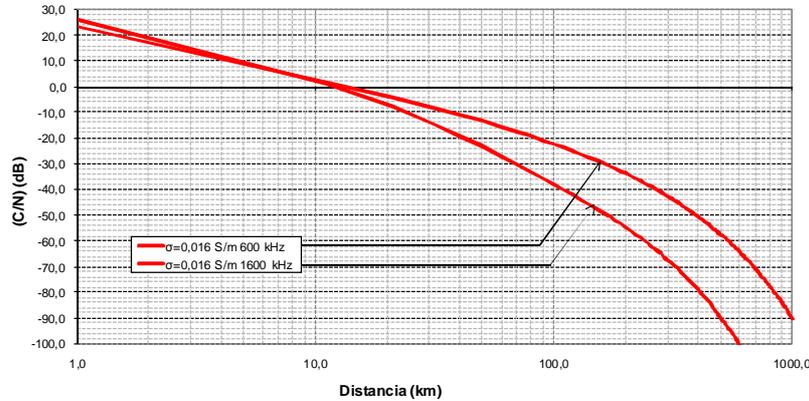


Figura 55. C/N estimada en función de la distancia para una potencia de emisión de 1 kW y frecuencias de 600 kHz y 1600 kHz ($\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$).

Se observa que para distancias cortas (hasta 10 km), las dos frecuencias (600 kHz y 1600 kHz) se comportan prácticamente igual en cuanto al valor de C/N , por lo que no habría ninguna ventaja en emplear una en concreto con respecto a cualquier otra en la banda de Onda Media comercial. Sin embargo, a partir de los 10 km aproximadamente la diferencia de C/N entre frecuencias bajas y frecuencias altas empieza a crecer, resultando claramente beneficiadas las frecuencias más bajas. Evidentemente, las características del suelo (conductividad y permitividad) también influirían en la C/N , debido a la herencia de las curvas de propagación por onda de superficie que ha quedado reflejada en la fórmula de predicción de la C/N (6.5).

Por otro lado, asumiendo que las distribuciones del campo eléctrico de la señal radiodifundida C y el ruido N en interiores pueden considerarse Log-normales con desviaciones típicas de 1,359 y 1,120 respectivamente, como se estudió en capítulos anteriores, es obvio que la siguiente variable aleatoria es Gaussiana, por ser resta de dos variables Gaussianas independientes:

$$\ln(C/N) = \ln(C) - \ln(N) \quad (6.6)$$

Toda variable aleatoria normal o Gaussiana queda caracterizada estadísticamente mediante la media y la varianza:

$$\begin{aligned} E\{\ln(C/N)\} &= E\{\ln(C)\} - E\{\ln(N)\} \\ \sigma_{\ln(C/N)}^2 &= E\{\ln^2(C/N)\} - E^2\{\ln(C/N)\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

La media podría calcularse directamente de la fórmula de predicción (6.5) para la (C/N) (dB), únicamente realizando la siguiente transformación:

$$E\{\ln(C/N)\} = \ln(10^{(C/N)(dB)/20}) \quad (6.8)$$

La varianza, sin embargo, requiere del siguiente desarrollo, al estar involucradas dos variables independientes:

$$\begin{aligned} \sigma_{\ln(C/N)}^2 &= E\{\ln^2(C) + \ln^2(N) - 2\ln(C) \cdot \ln(N)\} - E^2\{\ln(C)\} - E^2\{\ln(N)\} + 2E\{\ln(C)\} \cdot E\{\ln(N)\} = \\ &= E\{\ln^2(C)\} - E^2\{\ln(C)\} + E\{\ln^2(N)\} - E^2\{\ln(N)\} = \sigma_{\ln(C)}^2 + \sigma_{\ln(N)}^2 = 1,359^2 + 1,120^2 = 3,101 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Por lo tanto, la desviación estándar:

$$\sigma_{\ln(C/N)} = \sqrt{\sigma_{\ln(C)}^2 + \sigma_{\ln(N)}^2} = 1,761 \quad (6.10)$$

Una vez caracterizada estadísticamente la variable Gaussiana $\ln(C/N)$, habría que definir una nueva variable Z cuya media sea 0 y varianza 1 (distribución normal estándar) como se indica a continuación, de forma que se pueda utilizar de forma tabular para el cálculo de diferentes probabilidades (al igual que se hizo con la señal y el ruido en capítulos anteriores):

$$Z = \frac{\ln(C/N) - E\{\ln(C/N)\}}{\sigma_{\ln(C/N)}} \quad (6.11)$$

De esta forma, se podría acudir a las tablas de la distribución normal estándar para el cálculo del valor de la relación señal a ruido superada en el porcentaje de localizaciones deseado.

La Tabla 55 resume a modo de ejemplo los valores que se conseguirían para la (C/N) (dB) superada en el 50% de localizaciones para una frecuencia de 600 kHz y distancia de 10 km, con valores de $\sigma=0,016$ S/m y $\epsilon=30$, para una potencia transmitida de 1 kW:

Tabla 55. C/N (dB) estimada superada en el 50% de localizaciones interiores a 10 km de distancia para una potencia de emisión de 1 kW y una frecuencia de 600 kHz.

Distancia al transmisor (m)	Frecuencia (kHz)	C/N (dB) estimada	$E\{\ln(C/N)\}$
10000	600	1,9	0,22

Por último, en el estándar DRM, se recogen valores mínimos teóricos de C/N en función del esquema empleado en transmisión para obtener una tasa de errores de bit o BER de 10^{-4} , resumidos en la Tabla 56. Por lo tanto, siguiendo con el ejemplo anterior, si se quisiera dar cobertura en interiores al menos en el

50% de las localizaciones de un edificio que se encuentre a 10 km del transmisor a la frecuencia de 600 kHz empleando un esquema de modulación 16-QAM y nivel de protección 0 (modo más robusto), habría que aumentar la potencia de emisión en 8,6-1,9=6,7 dB, es decir, habría que transmitir con 4,7 kW de potencia. En cambio, si para las mismas circunstancias se quisiera emplear un esquema de modulación 64-QAM y nivel de protección 3 (modo menos robusto), habría que aumentar la potencia de emisión en 18,7-1,9=16,8 dB, es decir, habría que transmitir con una potencia de 47,9 kW.

Tabla 56. C/N (dB) mínima para BER 10^{-4} y modo de robustez A de DRM.

Esquema de Modulación	Nivel de protección	Code Rate medio	C/N (dB)
16-QAM	0	0,5	8,6
	1	0,62	10,7
64-QAM	0	0,5	14,1
	1	0,6	15,3
	2	0,71	17,1
	3	0,78	18,7

Si se quisiera calcular la C/N superada en un porcentaje de localizaciones diferente, realizaríamos inicialmente el cálculo de las ecuaciones (6.5) y (6.8) para obtener el valor de $E\{\ln(C/N)\}$. Posteriormente acudiríamos a las tablas de la desviación normal estándar para asignarle a Z de la ecuación (6.11) el valor que requiera el número de localizaciones que se desee cubrir y de ahí despejaríamos el valor de $\ln(C/N)$ superado en el porcentaje de localizaciones deseado. Finalmente se realizaría el siguiente cambio de unidades para aportar unidades prácticas de dB:

$$(C/N)(dB)_{\% \text{ loc.}} = 20 \log(e^{\ln(C/N)_{\% \text{ loc.}}}) \quad (6.12)$$

2. DIFUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se exponen los organismos de regulación, las revistas y los congresos internacionales en los que se ha presentado parte del trabajo realizado en esta tesis.

2.1 Organismos internacionales de regulación

Organismo: **International Telecommunication Union - Radiocommunications, (ITU-R).**

Título: “Report ITU-R BS.2144: Planning parameters and coverage for Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting at frequencies below 30 MHz”.

Tipo de participación: Report ITU-R. 2009.

Resumen: Este documento consiste en una guía para los radiodifusores que explica cómo y por qué ha de realizarse una migración de los servicios analógicos a los digitales en frecuencias por debajo de 30 MHz. También podría considerarse un documento técnico de referencia para la planificación del servicio DRM ya que ofrece nueva información basada en diferentes experiencias prácticas y campañas de medidas realizadas. Una de esas campañas se ha realizado como parte del trabajo de esta tesis en el interior de edificios de Madrid y se obtuvieron diferentes conclusiones acerca del comportamiento del sistema DRM en Onda Media en interiores, entre las cuales destaca la alta variabilidad espacial observada tanto de la señal como del ruido, además de los elevados niveles de ruido detectados.

Organismo: **European Broadcasting Union.**

Título: “DRM field trials – for urban coverage planning in Spain”.

Tipo de participación: EBU Technical Study Groups. S/DIP: DRM Implementation and Planning. 2008.

Resumen: Se aportan resultados del comportamiento de la señal DRM en interiores a partir de una prueba experimental llevada a cabo en Madrid en la frecuencia de 1260 kHz. Se concluye en base a los resultados obtenidos que la potencia de emisión ha de incrementarse hasta unos 25-35 kW para ofrecer una cobertura adecuada en la ciudad de Madrid.

2.2 Revistas internacionales

Revista: **IET (The Institution of Engineering and Technology) Electronics Letters.**

Título: “Indoor noise measurements in the Medium Wave band”.

Autores: I. Fernandez, P. Angueira, I. Landa, A. Arrinda, D. Guerra, U. Gil.

Estado: Aceptado y publicado 5 Agosto 2010.

Resumen: Artículo en el que se describen los niveles actuales de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores. Se detallan los valores promedios, además de una fórmula de predicción en función de la frecuencia y el tipo de edificio basada en regresiones lineales. Se realiza un estudio de variabilidad espacial y temporal junto con una comparativa con respecto a los valores publicados en la recomendación ITU-R P.372-9. Una de las conclusiones más relevantes es el aumento significativo de los niveles absolutos de ruido radioeléctrico en Onda Media en interiores, comparándolos con los niveles recogidos en la recomendación ITU-R P-372-9. También se ha podido detectar un aumento significativo en la variabilidad espacial del ruido, mientras que la variabilidad temporal podría considerarse despreciable.

Revista: **IEEE Transactions on Broadcasting.**

Título: “Indoor Reception of Digital Radio Standards in the Medium Wave Band in Urban Environments”.

Autores: I. Fernandez, P. Angueira, I. Peña, D. Guerra and U. Gil.

Estado: En revisión.

Resumen: Artículo en el que se analiza la variabilidad espacial y temporal del campo eléctrico de la señal radiodifundida en Onda Media en interiores, además de un método de predicción del mismo tomando como referencia la recomendación ITU-R P.368-9. Se aporta también una herramienta de predicción de la relación portadora/ruido o C/N superada en el porcentaje de localizaciones deseado para una determinada distancia, frecuencia y características eléctricas del terreno. Las pérdidas de la señal con respecto a las predicciones de la recomendación ITU-R P.368-9 aumentan con la frecuencia, de unos 15 dB para 600 kHz a unos 24 dB para 1600 kHz. Por otro lado, se ha podido comprobar que la señal en Onda Media en interiores sigue una distribución Log-normal con una desviación estándar de 1,359.

2.3 Congresos internacionales

Congreso: **2009 LAPC Loughborough Antennas & Propagation Conference.**

Título: “Urban Indoor Signal and Noise Measurements in the Medium Wave Band”.

Autores: I. Fernandez, P. Angueira, I. Landa, A. Arrinda, J.L. Ordiales, D. De la Vega, M. Velez.

Publicación: Proceedings del congreso (disponible en IEEE Xplore).

Tipo de participación: Póster.

Fecha: Noviembre 2009.

Resumen: En este póster y en su correspondiente artículo para los libros de actas del congreso, se realiza una comparativa, entre los valores de C/N en el exterior e interior de una serie de edificios. Se pudo observar que los valores de C/N eran entre 6 y 7,5 dB superiores en exteriores debido a la atenuación que experimenta la señal al penetrar en los edificios, ya que los niveles de ruido eran similares en interiores y exteriores.

Congreso: **2010 4th EuCAP European Conference on Antennas and Propagation.**

Título: “Urban Indoor Signal Level Characterization in the Medium Wave Band”.

Autores: I. Fernandez, P. Angueira, D. De la Vega, D. Guerra, A. Abaigar.

Publicación: Proceedings del congreso (disponible en IEEE Xplore).

Tipo de participación: Póster.

Fecha: Abril 2010.

Resumen: En este póster y en su correspondiente artículo para los libros de actas del congreso, se describen las pérdidas por penetración en edificios en la banda de Onda Media destacando sobre manera la alta variabilidad espacial de la señal.

Congreso: **2010 4th EuCAP European Conference on Antennas and Propagation.**

Título: “Urban Indoor Noise Level Characterization in the Medium Wave Band”.

Autores: I. Fernandez, P. Angueira, A. Arrinda, J.L. Ordiales, F.L. Soria.

Publicación: Proceedings del congreso (disponible en IEEE Xplore).

Tipo de participación: Póster.

Fecha: Abril 2010.

Resumen: En este póster y en su correspondiente artículo para los libros de actas del congreso, se publican los estadísticos del ruido radioeléctrico en Onda Media en el interior de 5 edificios de oficinas en la ciudad de Bilbao. Se concluye que los niveles de ruido en Onda Media en interiores son muy superiores a los publicados en la recomendación ITU-R P.372. La variabilidad espacial es elevada, con desviaciones estándar con las localizaciones de en torno a 10 dB, mientras que la variabilidad temporal podría considerarse despreciable.

3. LÍNEAS FUTURAS

En primer lugar, se debería completar el trabajo realizado en esta tesis con un estudio similar en horario nocturno. La interferencia ionosférica nocturna puede jugar un papel muy determinante en el nivel de ruido en un determinado canal, el cual ya de por sí es mucho más elevado de lo esperado. Es por ello que se deberían realizar campañas de medidas nocturnas para publicar nuevos valores de ruido radioeléctrico en Onda Media.

Por otro lado, se debería realizar un estudio del nivel de señal recibido en interiores cuando la distancia al transmisor es mayor que 20 km y diferentes características eléctricas del suelo, con el objetivo de validar o, en su caso, completar las predicciones realizadas en esta tesis.

También es necesario, tal como solicita la ITU-R, obtener mapas de conductividad más detallados y precisos. Todos los métodos de predicción dependen de la exactitud de los datos de conductividad del terreno, y valores erróneos pueden producir grandes variaciones que hagan fracasar a cualquier método. Se trata de una tarea compleja, pero clave para la correcta predicción de coberturas en Onda Media.

También se podría realizar un estudio del nivel de señal en interiores cuando el receptor no se encuentre en una situación estática sino en movimiento, para posibles aplicaciones portátiles.

Otro estudio que se debería llevar a cabo es el de la caracterización de la recepción de señales radiodifundidas en Onda Media por diferentes transmisores sincronizados en redes de frecuencia única o redes SFN. Es necesario conocer cómo influye la recepción de varias señales constructivas (no interferentes) que llegan al receptor con un retardo relativo en la variabilidad espacial del nivel de campo eléctrico y en la estabilidad de la señal recibida.

Los edificios en los que se han tomado mediciones para el estudio llevado a cabo en esta tesis estaban localizados en áreas urbanas densas con el objetivo de caracterizar la recepción en los peores escenarios posibles y donde más potenciales usuarios del servicio se pueden encontrar. Se podría realizar un estudio similar en áreas urbanas menos densas o áreas suburbanas para contrastar los resultados.

Por otro lado, en esta tesis se ha analizado la contribución conjunta de todas las posibles fuentes de ruido que pueda haber en interiores en Onda Media. Se podría realizar un estudio separado de posibles fuentes de ruido en Onda media en base a medidas a realizar en cámaras anecoicas que nos permitan aislar las fuentes de ruido a analizar de todas las demás posibles fuentes ruido radioeléctrico.

Por último, se deberían realizar estudios de recepción de señales en interiores con propagación ionosférica en la banda HF y actualizar también los niveles de ruido en interiores en esa banda.

ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE MEDIDAS

Las tres campañas de medidas se realizaron en edificios urbanos de las ciudades de Bilbao, Vitoria-Gasteiz y Madrid, además de grandes núcleos urbanos como Fuenlabrada, Santurtzi, Barakaldo, Galdakao y Amorebieta.

Se describen en este punto las características más relevantes de cada uno de los edificios y sus entornos, además del tipo de medidas que se realizaron en cada uno de ellos.

1. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN MADRID

Edificio MD1: Se encuentra en la calle Sol Naciente al este de Madrid a 13,8 km de distancia del transmisor. Se trata de un entorno urbano con calles estrechas y edificios de 3 alturas (Figura 56). La mayor parte de las medidas interiores se han realizado en la planta 3 de un edificio de 3 alturas. También se han tomado medidas en los descansillos de todas las plantas y dos medidas exteriores a nivel de suelo y otras dos en la planta 3.



Figura 56. Entorno del edificio MD1.

Edificio MD2: Se encuentra en la Calle Clavellinas al norte de Madrid a 10,2 km de distancia del transmisor. Se trata de un entorno urbano con calles estrechas y edificios de 3 alturas muy parecido al anterior (Figura 57). La mayor parte de las medidas han sido realizadas en la planta 2 de un edificio de 3 alturas, además de en los descansillos de todas las plantas. Se ha tomado una medida exterior a nivel de suelo y otra en la planta 2.



Figura 57. Entorno del edificio MD2.

Edificio MD3: Se encuentra en la calle Princesa en el centro de Madrid a 7,9 km del transmisor. Se trata de un entorno urbano con calles anchas y edificios de 6 y 7 alturas (Figura 58). La mayor parte de las medidas se han realizado en la planta 6 de un edificio de 7 alturas, además de en los descansillos de todas las plantas. Se han tomado dos medidas exteriores a nivel de suelo y tres en la planta 6.



Figura 58. Entorno del edificio MD3.

Edificio MD4: Se encuentra en la calle Badajoz al este de Madrid a una distancia del transmisor de 13,2 km. Se trata de un entorno urbano con calles anchas y edificios de aproximadamente 10 alturas (Figura 59). La mayor parte de las medidas se han realizado en los descansillos de las escaleras de la mayoría de las plantas. Se ha tomado además una medida exterior en la planta 0 y otra en la planta 8.



Figura 59. Entorno del edificio MD4.

Edificio MD5: Es un edificio público situado en la Gran Vía en el centro de Madrid y sede de la cadena SER a 8,9 km del transmisor. Se trata de un entorno urbano ruidoso con edificios de aproximadamente 10 alturas y calles anchas (Figura 60). La mayor parte de las medidas se han realizado en las plantas 7 y 8 de un edificio de 9 plantas. Se han realizado medidas también en los descansillos de las escaleras de todas las plantas y una o dos mediciones exteriores en cada una de ellas.



Figura 60. Entorno del edificio MD5.

Edificio MD6: Se encuentra en la calle Batalla de Brunete en un polígono industrial de Fuenlabrada al sur de Madrid en el que se encuentra la sede de VIMESA. Está situado a 16,9 km del transmisor y se trata de un entorno industrial con naves de dos plantas y calles anchas (Figura 61). Todas las medidas se han realizado en las dos plantas que componen la nave industrial además de dos mediciones exteriores a nivel de suelo.



Figura 61. Entorno del edificio MD6.

Edificio MD7: Es un edificio público situado en la calle Montalbán junto al parque del Retiro de Madrid. Está situado a 9,9 km del transmisor y se trata de un entorno urbano con calles anchas y edificios de 6 alturas (Figura 62). La mayor parte de las medidas se han realizado en la planta 6 de un edificio de 7 alturas. Se ha realizado una medición en los descansillos de la mayoría de las plantas y una medición exterior en la planta 6.

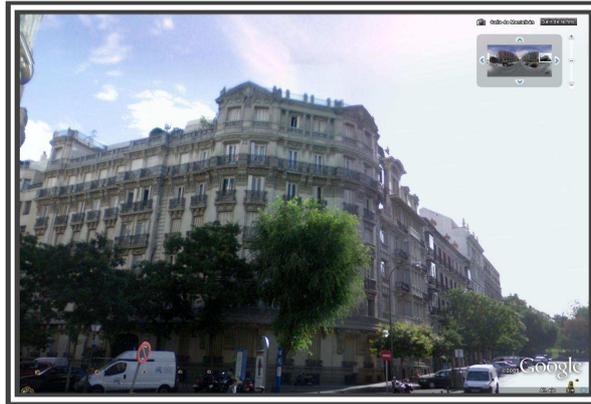


Figura 62. Entorno del edificio MD7.

2. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN BILBAO Y ALREDEDORES

Edificio A: Es un edificio de la escuela de ingenieros de Bilbao situado en la calle Alameda Urquijo. Es un edificio de hormigón de 5 alturas (Figura 63) y se han tomado mediciones de corta duración más o menos uniformemente a lo largo de todas las plantas de todo el edificio en interiores y exteriores. También se ha tomado una medida de larga duración en una estancia de la planta 0. El edificio se encuentra a unos 7,5 km del transmisor de 639 kHz, a 2,8 km del de 990 kHz y a 3,4 km del de 1305 kHz.



Figura 63. Entorno del edificio A.

Edificio B: Es un edificio de la escuela de ingenieros de Bilbao situado en la calle Juan de Zunzunegi. Es un edificio de hormigón de 5 alturas (Figura 64) y se han tomado mediciones de corta duración más o menos uniformemente a lo largo de todo el edificio en interiores y exteriores. También se han tomado dos medidas de larga duración en dos estancias de la planta 3. El edificio se encuentra a unos 7,6 km del transmisor de 639 kHz, a 2,9 km del de 990 kHz y a 3,5 km del de 1305 kHz.

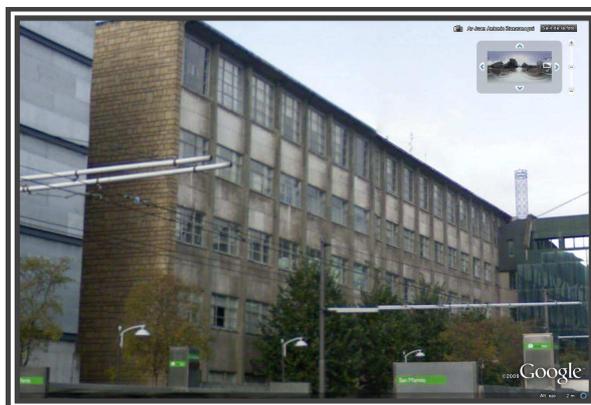


Figura 64. Entorno del edificio B.

Edificio C: Es un edificio de la escuela de ingenieros de Bilbao situado en la calle Juan de Zunzunegi de Bilbao. Es un edificio de hormigón de 5 alturas (Figura 65) y se han tomado mediciones de corta duración más o menos uniformemente a lo largo de todo el edificio en interiores y exteriores. El edificio se encuentra a unos 7,5 km del transmisor de 639 kHz, a 2,8 km del de 990 kHz y a 3,4 km del de 1305 kHz.



Figura 65. Entorno del edificio C.

Edificio D: Es un edificio de la escuela de ingenieros de Bilbao situado en la calle Luis Briñas y tiene la peculiaridad de tener las ventanas con cristales tintados (Figura 66). Es un edificio de hormigón de 5 alturas y se han tomado mediciones de corta duración más o menos uniformemente a lo largo de todo el edificio en interiores y exteriores. El edificio se encuentra a unos 7,5 km del transmisor de 639 kHz, a 2,8 km del de 990 kHz y a 3,4 km del de 1305 kHz.



Figura 66. Entorno del edificio D.

Edificio E: Es un edificio de la escuela de ingenieros de Bilbao situado en la calle Juan de Zunzunegi. Es un edificio de 5 alturas recubierto de paneles metálicos (Figura 67) y se han tomado mediciones de corta

duración más o menos uniformemente a lo largo de todo el edificio en interiores y exteriores. El edificio se encuentra a unos 7,6 km del transmisor de 639 kHz, a 2,9 km del de 990 kHz y a 3,5 km del de 1305 kHz.

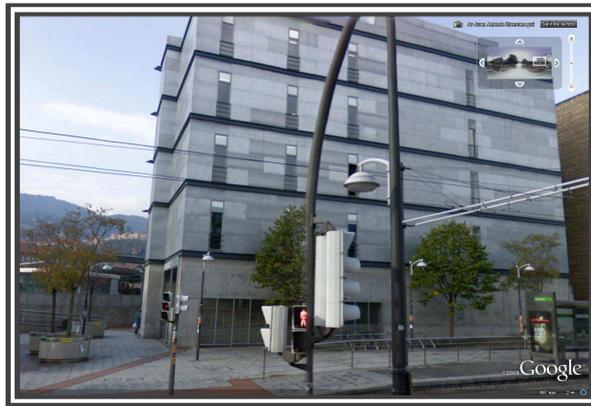


Figura 67. Entorno del edificio E.

Edificio F: Es un edificio de viviendas situado en la calle Bernar Etxepare de Galdakao (Figura 68). Es un edificio de 7 alturas y la mayoría de las mediciones de corta duración se han tomado en los descansillos de escaleras de todas las plantas, aunque también se ha tomado alguna medición de otro tipo en estancias de la planta 2. En cuanto a las mediciones de larga duración se han tomado dos en la planta 2 y una más en la planta 6. También se han realizado dos mediciones exteriores de corta duración en la planta 0. El edificio se encuentra a unos 3,2 km del transmisor de 639 kHz, a 7,8 km del de 990 kHz y a 6,8 km del de 1305 kHz.



Figura 68. Entorno del edificio F.

Edificio G: Es un edificio de viviendas situado en la calle Coscojales de Santurtzi (Figura 69). Es un edificio de 6 alturas y todas las mediciones (de corta duración) se han tomado en los descansillos de escaleras de todas las plantas, además de un punto en el exterior del edificio. El edificio se encuentra a unos 16,1 km del transmisor de 639 kHz, a 10,8 km del de 990 kHz y a 11,8 km del de 1305 kHz.



Figura 69. Entorno del edificio G.

Edificio H: Es un edificio de viviendas situado en la calle Doctor Fleming de Santurtzi (Figura 70). Es un edificio de 6 alturas y la mayoría de las mediciones (de corta duración) se han tomado en los descansillos de escaleras de todas las plantas, además de un punto en el exterior del edificio. El edificio se encuentra a unos 16,9 km del transmisor de 639 kHz, a 11,6 km del de 990 kHz y a 12,6 km del de 1305 kHz.



Figura 70. Entorno del edificio H.

Edificio I: Es un edificio de viviendas situado en la calle Alameda Urquijo de Bilbao (Figura 71). Es un edificio de 7 alturas y prácticamente todas las mediciones de corta duración se han tomado en los

descansillos de escaleras de todas las plantas, a excepción de un punto en el exterior del edificio a nivel de suelo y una localización Tipo 2 en la planta 6. También se ha tomado una medición de larga duración en una estancia de la planta 7. El edificio se encuentra a unos 7,4 km del transmisor de 639 kHz, a 2,8 km del de 990 kHz y 3,3 km del de 1305 kHz.



Figura 71. Entorno del edificio I.

Edificio J: Es un edificio situado en la calle Camino de la Ribera en Barakaldo (Figura 72). Se trata de un piso de 7 plantas en el que la mayoría de las mediciones interiores de corta duración se han realizado en los descansillos, además de una medición de 48 horas en una estancia de la planta 5. También se ha realizado una medición exterior a nivel de suelo. El edificio se encuentra a 11,6 km del transmisor de 639 kHz, a 6,7 km del transmisor de 990 kHz y a 7,9 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 72. Entorno del edificio J.

Edificio K: Es un edificio situado entre las calles Arteagabeitia y Gaudi en Barakaldo (Figura 73). Se trata de un piso de 7 plantas en el que se han realizado mediciones de corta duración en exteriores en la planta 0

y las interiores mayormente en los descansillos, además de una medición de 48 horas en una estancia de la planta 6. El edificio se encuentra a 11,3 km del transmisor de 639 kHz, a 6,3 km del transmisor de 990 kHz y a 7,4 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 73. Entorno del edificio K.

Edificio L: Es un edificio situado en la calle Pintor Etxenagusia, Bilbao (Figura 74). Se trata de un piso de 12 plantas en el que se han realizado dos medidas de corta duración en el exterior del edificio en la planta 0 y todas las interiores en los descansillos. Se ha realizado además una medición de 48 horas en la 8ª planta. El edificio se encuentra a 7,9 km del transmisor de 639 kHz, a 3 km del transmisor de 990 kHz y a 4,2 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 74. Entorno del edificio L.

Edificio M: Es un edificio situado en la calle Zezilia Gallartzagaitia, Amorebieta (Figura 75). Se trata de un piso de 6 plantas en el que se ha realizado una medida de corta duración en exteriores en la planta 0 y todas las interiores en los descansillos. Se han realizado también dos mediciones de 48 horas, una en la 2ª

planta y otra en la 5ª planta. El edificio se encuentra a 11,5 km del transmisor de 639 kHz, a 16,5 km del transmisor de 990 kHz y a 15,2 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 75. Entorno del edificio M.

Edificio N: Es un edificio situado en la calle Euskadi, Galdakao (Figura 76). Se trata de un piso de 8 plantas en el que se han realizado dos medidas de corta duración en exteriores en la planta 0, todas las interiores en los descansillos y dos mediciones de 48 horas, una en la 2ª planta y otra en la 8ª planta. El edificio se encuentra a 3,7 km del transmisor de 639 kHz, a 5,8 km del transmisor de 990 kHz y a 6,6 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 76. Entorno del edificio N.

Edificio O: Es un edificio situado en la calle Lehendakari Agirre, Galdakao (Figura 77). Se trata de un piso de 7 plantas en el que se ha realizado una medida de corta duración en exteriores en la planta 0, todas las interiores en los descansillos y dos mediciones de 48 horas, una en la planta 0 y otra en la planta 3. El

edificio se encuentra a 3,6 km del transmisor de 639 kHz, a 5,7 km del transmisor de 990 kHz y a 6,5 km del transmisor de 1305 kHz.



Figura 77. Entorno del edificio O.

3. CAMPAÑA DE MEDIDAS EN VITORIA-GASTEIZ

Edificio P: Es un edificio situado entre la calle Juan Ibáñez de Santo Domingo y la calle Nieves Cano (Figura 78). Se trata de un edificio de 2 plantas en el que se han realizado medidas de corta duración uniformemente a lo largo de todo el exterior e interior del mismo. El edificio se encuentra a 4 km del transmisor de 612 kHz y a 8 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 78. Entorno del edificio P.

Edificio Q: Es un edificio situado en la calle Loreto de Arriola (Figura 79). Se trata de un edificio de 6 plantas en el que se han realizado medidas de corta duración en exteriores en la planta 0 y medidas interiores en los descansillos de todas las plantas, a excepción de dos localizaciones en el interior de una vivienda en la planta 1. El edificio se encuentra a 5 km del transmisor de 612 kHz y a 9,6 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 79. Entorno del edificio Q.

Edificio R: Es un edificio situado en la calle Alfonso XI (Figura 80). Se trata de un edificio de 7 plantas en el que se han realizado medidas de corta duración en el interior y exterior del edificio en todas las plantas del mismo en la medida de lo posible, además de una medición de 48 horas en el 5º piso. El edificio se encuentra a 6,1 km del transmisor de 612 kHz y a 8,8 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 80. Entorno del edificio R.

Edificio S: Es un edificio situado en la calle Amizkarra (Figura 81). Se trata de un edificio de 7 plantas en el que se han realizado medidas de corta duración en el interior y exterior del edificio en todas las plantas del mismo en la medida de lo posible, además de una medición de 48 horas en el 4º piso. El edificio se encuentra a 5,7 km del transmisor de 612 kHz y a 7 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 81. Entorno del edificio S.

Edificio T: Es un edificio situado en la calle Batasun Enparantza (Figura 82). Se trata de un edificio de 6 plantas en el que se han realizado dos medidas exteriores a nivel de suelo y la mayoría de las mediciones

interiores en los descansillos. El edificio se encuentra a 6,3 km del transmisor de 612 kHz y a 6,4 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 82. Entorno del edificio T.

Edificio U: Es un edificio situado entre las calles Ramón Ortiz de Zarate y calle de la Florida (Figura 83). Se trata de un edificio de 5 plantas en el que se ha realizado una medida exterior a nivel de suelo y la mayoría de las mediciones interiores en los descansillos. El edificio se encuentra a 4,6 km del transmisor de 612 kHz y a 8 km de los transmisores de 1197 kHz y 1602 kHz.



Figura 83. Entorno del edificio U.

REFERENCIAS Y GLOSARIO

En este último capítulo se enumeran las citas bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la tesis, las cuales han sido referenciadas a lo largo del documento, y se incluye un breve glosario de acrónimos utilizados en el texto, relacionados con la tecnología estudiada.

1. REFERENCIAS

- [1] Digital Radio Mondiale, “A Broadcaster’s Guide”, Junio 2010. Disponible en www.drm.org.
- [2] World Broadcasting Unions Technical Committee, “Digital Radio Guide”, Nov. 2006.
- [3] NRSC5-A, In-band/on channel Digital Radio Broadcasting Standard, Sept. 2005.
- [4] J. Stott, “DRM – Key Technical Features”, EBU Technical Review N° 286, Marzo 2001.
- [5] International Telecommunication Union, “Rec. ITU-R BS.1514-1. System for digital sound broadcasting in the broadcasting bands below 30 MHz”, Oct. 2002.
- [6] International Electrotechnical Commission, “Digital Radio Mondiale (DRM) – Part1: System Specification,” IEC 62272-1, Mar. 2003.
- [7] European Telecommunication Standard Institute, “Digital Radio Mondiale (DRM): System specification”, ETSI ES 201 980 v2.2.1, Oct. 2005
- [8] Federal Communications Commission “Digital Audio Broadcasting Systems and Their Impact on the Terrestrial Radio Broadcast Service. First Report and Order”, MM Docket No. 99-325; FCC 02-286, 17 FCC Rcd 19990, Octubre 2002
- [9] Federal Communications Commission, “Digital Audio Broadcasting Systems and Their Impact on the Terrestrial Radio Broadcast Service. Final rule”, 47 CFR Part 73, MM Docket No. 99-325; FCC 07-33, Agosto 2007.
- [10] National Radio Systems Committee, “DAB Subcommittee Evaluation of the iBiquity Digital Corporation IBOC System Part 2 – AM IBOC”, Abril 2002.
- [11] National Radio Systems Committee, “FM NRSC Report (Parte 1 – FM IBOC)”, Nov. 2001.
- [12] National Radio Systems Committee, “AM NRSC Report (Parte 2 – AM IBOC)”, Abril 2002.
- [13] F. Held and A. Giefer, “Macedonian DRM tests on medium-wave,” DRM Document TC SE300, documento interno del Consorcio DRM, Noviembre 2004.
- [14] Grupo de Tratamiento de Señal y Radiocomunicaciones de la UPV/EHU, “DRM: Digital Radio Mondiale. Estudio de la recepción en diferentes entornos”, 2004 (disponible en www.rtve.es/drm/jornada.htm).
- [15] International Telecommunication Union, “Document 6E/175-E. Digital Radio Mondiale DRM daytime MW tests”, Marzo 2005.
- [16] International Telecommunication Union, “Document 6/353-E. DRM daytime MW tests for frequencies below 1 MHz”, Abril 2007.
- [17] International Telecommunication Union, “Document 6E/403-E Digital Radio Mondiale (DRM): MW simulcast tests in México D.F.”, Oct. 2005.
- [18] U. Gil, D. Guerra, J. Morgade, G. Prieto, D. de la Vega, A. Arrinda and J.L. Ordiales, “Mobile Reception Analysis of Simulcast (AM DRM) Services in the Medium Wave Band,” 2007 IEEE International Symposium on Multimedia Systems and Broadcasting, Marzo 2007.
- [19] Asian-Pacific Broadcasting Union Technical Department “Preliminary Report: Showcase on Digital Radio Technologies in Delhi”, May 2007.
- [20] International Telecommunication Union, “Document 3J/123-E. Distribution of Signal Levels of a MF Ground Wave in Zone of Service” Sept. 2006.
- [21] Página web oficial de HD Radio, <http://www.hdradio.com>, Marzo 2011.
- [22] International Telecommunication Union, “Document 3J/169-E. Statistical changes of a signal level in a city and its vicinities in ranges LF-MF” Marzo 2007.
- [23] International Telecommunication Union, “Document 6E/390-E. DRM Medium Wave Reception Tests in Vietnam”, Agosto 2006.
- [24] International Telecommunication Union, “Document 6E/54-E. Digital broadcasting at frequencies below 30 MHz. MF and HF field-tests report summary. Final system performance report for IST-RADIATE 1999-20113 for ITU” Febr. 2004.

- [25] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Rec. UIT-R P.1321. Factores de propagación que afectan a los sistemas con técnicas de modulación digital en ondas kilométricas y hectométricas”, Octubre 2009.
- [26] B. Hall, M.P.M., Barclay, L.W., “Radiowave Propagation,” IEE Electromagnetic Waves Series 30, Ed. Peter Peregrinus, 1989.
- [27] D. de la Vega, U. Gil, P. Angueira, “Field strength variation in the proximity of big structures at MF band and ground-wave propagation,” DRM Consortium - Technical Committee - Monitoring Group, Tech. Rep. TC_MN019, Sept. 2007.
- [28] G. Prieto, M. Vélez, A. Arrinda, U. Gil, D. Guerra, D. de la Vega, “External Noise Measurements in the Medium Wave Band” IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 53, Nº 2, pp. 553-559, Junio 2007.
- [29] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Rec. UIT-R P. 372-9. Ruido radioeléctrico”, 2007.
- [30] I. Peña et al., “Planning factors for digital local broadcasting in the 26 MHz band”, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 57, Nº 1, pp. 24-36, March 2011.
- [31] D. Parsons, “The Mobile Radio Propagation Channel. Second Edition”, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0-471-98857-X.
- [32] Official DRM Web Site <http://www.drm.org>, Noviembre 2007.
- [33] International Telecommunication Union, “Service requirements for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz,” ITU-R Rec. BS.1348, Febr. 2001.
- [34] M. Dietz and S. Meltzer, “CT-aacPlus – a state-of-the-art audio coding system”, European Broadcasting Union (EBU), Technical Review, trev-291, Julio 2002.
- [35] International Telecommunications Union, “Rec. ITU-R BS.639. Necessary bandwidth of emission in LF, MF and HF broadcasting”, Julio 1986.
- [36] International Telecommunications Union, “Rec. ITU-R BS.1349. Implementation of digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers using terrestrial transmitters in the LF, MF and HF bands”, Febr. 1998.
- [37] D. Schill, “Labtest Report of DRM System Evaluation Tests,” DRM Consortium - Technical Committee - System Evaluation Group, Tech. Rep. TC_SE029, Feb. 15, 1999.
- [38] H. Schlegel, “DRM Laboratory Measurements II Report,” DRM Consortium - Technical Committee - System Evaluation Group, Tech. Rep. TC_SE075, Aug. 16, 2000
- [39] International Telecommunications Union, “Rec. ITU-R BS.1615. Planning parameters for digital sound broadcasting for frequencies below 30 MHz”, 2003.
- [40] “RADio DIGital Am TEsts (RADIATE),” Fifth Framework Programme, Apr. 2002, iST-1999-20113 (<http://www.ist-radiate.com>).
- [41] J. Briggs, “DRM - a summary of the field trials,” European Broadcasting Union (EBU), Technical Review trev-296, Oct. 2003.
- [42] “Quality of Service in the Digitised AM bands (QOSAM),” Fifth Framework Programme, June 2004, iST-2001-33307 (<http://www.ist-qosam.com/start.htm>).
- [43] International Telecommunications Union, “ITU 6E 183E First Simulcast Field Tests in MW”, (DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE142), Marzo 2002.
- [44] A. Schäfer, “SFN/Mobile test progress MW”, DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE159. Julio 2002.
- [45] G. Zimmerman, “SFN test report Berlin”, DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE196, Octubre 2002.
- [46] Skog B., “Medium Wave Tests Norway”, DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE204, Marzo 2003.
- [47] O. Haffenden, “Mobile reception on MF band”, DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE235, Septiembre 2003.

- [48] J. Heaton, "MF Groundwave Prediction and Measurements", DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE240, Octubre 2003.
- [49] A. Giefer, "Bangkok field trials", DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE294, Octubre 2004.
- [50] G. Zimmerman, "Comparison between AM and DRM coverage", DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE286, Septiembre 2004.
- [51] D. Bochent, "Planning parameters in LF and MF", DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE280, Julio 2004.
- [52] Página web oficial de la Oficina de la Autoridad de Telecomunicaciones de Hong Kong, www.ofta.gov.hk/en, Noviembre 2007.
- [53] D. Guerra, "Mexico MW Simulcast test results", DRM Technical Committee – System Evaluation TC-SE356, Mayo 2006.
- [54] University of the Basque Country (UPV/EHU), "MW Simulcast Mexico", DRM Technical Committee TC_174, Junio 2006.
- [55] Página web de las pruebas de DRM en Australia, www.drmtrial.com.au, Noviembre 2007.
- [56] O. Haffenden and A. Murphy, "Report on MW trials Plymouth", DRM Technical Committee TC_200, Marzo 2007.
- [57] P. Angueira, "India Field Trial Report", DRM Technical Committee TC_204, Junio 2007.
- [58] European Telecommunications Standard Institute, "Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods", ETSI EN 302 245-1 v1.1.1, Enero 2005.
- [59] European Telecommunications Standards Institute, "Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCDI)", ETSI TS 102 349 v1.1.1, Jan. 2005.
- [60] European Telecommunications Standard Institute, "Digital Radio Mondiale (DRM); AM signalling system (AMSS)", ETSI TS 102 386, Marzo 2006.
- [61] J. M. Hernando Rábanos, "Transmisión por radio", Ed. Centro de estudios Ramón Areces, S. A., 2003.
- [62] M. Sierra Castañer, J.L. Besada, L. de Haro, "Radiación y Propagación", Servicio de Publicaciones de la ETSI Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, Julio 2004.
- [63] L. W. Barclay, "Propagation of Radiowaves – 2nd Edition", The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [64] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Rec. UIT-R P.368-9. Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 KHz y 30 MHz", Febrero 2007.
- [65] N. DeMinco, "Propagation Prediction Techniques and Antenna Modelling (150 to 1705 kHz) for intelligent Transportation Systems (ITS) Broadcast Applications," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 42, Nº 4, pp. 9-34, August 2000.
- [66] J. H. Causebrook, "BBC RD 1977/25. Ground-wave propagation at medium frequency in built-up areas", BBC Research Reports, Julio 1977.
- [67] International Telecommunications Union, "Rec. ITU-R P.1147. Predictions of sky-wave field strength at frequencies between 150 and 1700 kHz", 1999.
- [68] P. Knight, "LF and MF propagation: a study sky-wave field-strength variation," BBC Research Department, Report 1977/12, 1977.
- [69] P. Knight, "MF Propagation: the behaviour of the normal ionosphere during the night and at sunrise," BBC Research Department, Report 1983/5, 1983.
- [70] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Rec. UIT-R BS.598-1. Factores que influyen en los límites de la zona de cobertura en radiodifusión sonora con modulación en amplitud en la banda 6 (ondas hectométricas)", 1990.
- [71] A. Sommerfeld, "Propagation of waves in wireless telegraphy", Ann. D. Phys. 28, pp. 665-736, Marzo 1909.

- [72] K.A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part I", Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol. 24, pp. 1367-1387, Oct. 1936.
- [73] K.A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part II", Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol. 25, pp 1203-1236, Sept. 1937.
- [74] B. van der Pol and H. Bremmer, "The diffraction of electromagnetic waves from an electrical point source round a finitely conducting sphere, with applications to radiotelegraphy and the theory of the rainbow. Part II," Philosophical Magazine 24 (164), pp 825-864, 1937.
- [75] K. A. Norton, "The calculation of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical-Earth", Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Vol. 29, No.12, December 1941, pp. 623-639.
- [76] J. R. Wait, "Electromagnetic Waves in Stratified Media," Oxford, Pergamon, 1962
- [77] L. Sevgi, "A mixed-path groundwave field-strength prediction virtual tool for digital radio broadcast systems in Medium and Short Wave bands," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 48, N° 4, Agosto 2006.
- [78] G. D. Monteath, "BBC RD 1978/7. Computation of groundwave attenuation over irregular and inhomogeneous ground at low and medium frequencies," BBC Research Reports, Marzo 1978.
- [79] A. S. Rotheram, "Ground-wave propagation. Part 1. Theory for short distances", IEE Proceedings F, Vol. 128, pp. 275-284, 1981.
- [80] A. S. Rotheram, "Ground-wave propagation. Part 2. Theory for medium and long distances and reference propagation curves", IEE Proceedings F, Vol. 128, pp. 285-295, 1981.
- [81] A. S. Rotheram, "Ground-wave propagation", Marconi Rev., Vol. 45, pp. 18-48, 1982.
- [82] S. Rotheram, J.D. Milsom, R.N. Herring, J.M. Pielou, and K.S. Gill, "Ground-wave propagation over irregular surfaces," Proceedings of the Fourth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 85), April 1985.
- [83] G. Millington, "Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth Earth", Proceedings IEE Part IV, Vol. 96, pp. 225-268, Marzo 1949.
- [84] G. Millington and G. A. Isted, "Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth: Part 2. Experimental evidence and practical implementation", Proceedings. IEE Vol. 97, pp. 209-221, 1950.
- [85] "GRAPPLE – GRoundwAve Propagation Predictions for the Littoral Environment", QinetiQ (www.cpar.qinetiq.com/grapple.html).
- [86] D. Guerra, Tesis Doctoral "Estudio de parámetros para la planificación de redes DRM en la banda de Onda Media diurna", Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Septiembre 2006.
- [87] International Telecommunications Union ITU-R Recommendation P.1057-2, "*Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling*", 2007.
- [88] D. Guerra, G. Prieto, I. Fernández, J. M. Matías, P. Angueira, and J.L. Ordiales, "Medium Wave DRM Field Test Results in Urban and Rural Environments", IEEE Transactions Broadcasting, Vol. 51, pp. 431-438, Dec. 2005.
- [89] D. de la Vega, S. López, D. Guerra, G. Prieto, M. M. Vélez and P. Angueira, "Analysis of the Attenuation Caused by the Influence of Orography in the Medium Wave Band," Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference, April 2007.
- [90] U. Gil, I. Peña, D. Guerra, D. De la Vega, A. Arrinda and P. Angueira, "Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments," Proceedings of the 4th EuCAP European Conference on Antennas and Propagation, April 2010.
- [91] T. S. Rappaport, "Wireless Communications. Principles and Practices. Second edition", Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 2002.
- [92] D. Parsons, "The Mobile Radio Propagation Channel", Pentech Press Publishers – London, 1992.

- [93] Cox D.C., Murray R.R. and Norris A.W., “800 MHz attenuation measured in and around suburban houses” AT & T Teh. J., 63, pp. 921-954, August 1984.
- [94] V. Trainotti, W.G. Fano, L.A. Dorado, “Ingeniería electromagnética”, Nueva librería, 2005.
- [95] “Informe sobre la exposición del público en general a las emisiones radioeléctricas de estaciones de radiocomunicación Año 2005”, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información
- [96] Cox, D.C., Murray, R.R., and Norris, A.W., “Measurements of 800 MHz Radio Transmission into Buildings with Metallic Walls,” Bell Systems Technical Journal, Vol. 62, No. 9, pp. 2695-2717, November 1983.
- [97] Seidel, S. Y., and Rappaport T.S., “914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 40, No. 2, pp. 207-217, February 1992.
- [98] Pechač, P. - Klepal, M. - Mazánek, M., “Indoor Propagation Modelling in Multi-Storey Buildings in Prague”, *Millenium Conference on Antennas and Propagation - AP 2000*. European Space Agency, vol. 2, p. 369-373, 2000.
- [99] D. Dobkin, “Indoor Propagation and Wavelength”, WJ Communications, Oct. 2002.
- [100] International Telecommunication Union, “Document 3K/139-E. Enhancement of UWB Path Loss Model parameter in Indoor environment” Sept. 2006.
- [101] R. A. Valenzuela, D. Chizhik, J. Ling, “Measured and predicted correlation between local average power and small scale fading in indoor wireless communication channels”, 48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998.
- [102] Hoffman H.H. and Cox D.C., “Attenuation of 900 MHz radio waves propagating into a metal building”, IEEE Trans., AP-30, No. 4, pp. 808-811, 1982.
- [103] D. Guerra, U. Gil, D. de la Vega, G. Prieto, A. Arrinda, J.L. Ordiales and P. Angueira, “Medium Wave Digital Radio Mondiale (DRM) Field Strength Time Variation in Different Reception Environments”, IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 53, N° 1, pp. 483-491, Dec. 2006.
- [104] L. P. Rice, “Radio Transmission into Buildings at 35 and 150 mc”, The Bell System Technical Journal, January 1959.
- [105] Turkmani A.M.D., Parsons J.D. and Lewis D.G., “Measurement of Building Penetration Loss on Radio Signals at 441, 900 and 1400 MHz”, J. IERE, 58, No. 6, pp. S169-S174 (1988)
- [106] L. Ferreira, M. Kuipers, C. Rodrigues, L. M. Correia, “Characterization of Signal Penetration into Buildings for GSM and UMTS”, 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems, 2006.
- [107] D. Molkdar, “Review on radio propagation into and within buildings”, IEE Proceedings-H, Vol. 138, No. 1, Feb. 1991.
- [108] Recommendation ITU-R P.679-3, “Propagation Data Required for the Design of Broadcasting-Satellite Systems”, 2001.
- [109] S.Mason, “Indoor Reception of DAB – Consequences for Planning and Implementation”, EBU Technical Review, July 2004.
- [110] J. A. Green, B.A., “Building Penetration Loss Measurements for DAB Signals at 211 MHz”, BBC Research Department Report, 1992.
- [111] International Telecommunications Union, “Rec. ITU-R P.1812. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands”, 2007.
- [112] International Telecommunication Union, “Document 3J/37-E. Building Penetration Loss: Measurements and Comments on Definition and Modelling” May 2008.
- [113] Durante, J.M., “Building Penetration Loss at 900 MHz,” IEEE Vehicular Technology Conference, 1973.
- [114] A. Davidson, C. Hill, “Measurement of Building Penetration into Medium Buildings at 900 and 1500 MHz”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 46, No. 1, February 1997.

- [115] International Telecommunication Union, “Document 3J/28-E. Progress Towards an Improved Building-entry Loss Model with Special Reference to Recommendation ITU-R P.1812” May 2008.
- [116] W. Joseph, E. Tanghe, D. Pareit, L. Martens, “Building penetration measurements for indoor coverage prediction of DVB-H systems”, IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007.
- [117] G. Prieto, M. M. Vélez, A. Arrinda P. Angueira, D. Guerra, and D. de la Vega, “Minimum C/N requirements for DRM reception based on field trials,” IEEE Communication Letters, Vol. 9, Nº 10, pp. 877–879, Oct. 2005.
- [118] G. Prieto, D. Guerra, J. M. Matías, M. M. Velez, A. Arrinda, U. Gil, D. de la Vega, “Digital-Radio-Mondiale (DRM) Measurement-System Design and Measurement Methodology for Fixed and Mobile Reception,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 3, pp. 565 – 570, Marzo 2008.
- [119] Wellbrook Communications, “Active Loop Antena ALA100”, www.wellbrook.uk.com”, 2004.
- [120] ETS-Lindgren, "*Model 3303 Rod Antenna (Model 3305 E-Field Shielding Effectiveness Test Kit) Manual*", ETS Lindgren an ESCO Technologies Company, EMC Test Systems, REV B-PN 399047, 2007.
- [121] Fraunhofer IIS. Fraunhofer DRM Software Radio, “User Manual Version 4.0”. 2007
- [122] Septiembre 2005.R&S, "Operating Manual", Rohde & Schwarz, EMI Test Receiver ESPI3, 2004.
- [123] RF-Systems, "Magnetic Transfer Antenna", www.rf-systems.nl, 1998.
- [124] Agilent Technologies. Spectrum Analyzer N9320A, “User’s Guide”. www.agilent.com, 2008
- [125] International Telecommunications Union ITU-R Recommendation SM.1753, “Methods for measurements of radio noise”, April 2010.
- [126] International Telecommunications Union ITU-R Recommendation SM.1447, “Monitoring of the Radio Coverage of Land Mobile Networks to Verify Compliance with a Given License”, 2000.
- [127] International Telecommunications Union ITU-R Recommendation P.832-2, “World Atlas of Ground Conductivities”, 1999
- [128] R. Walpole, R.H. Myers, S.L. Myers and K. Ye, “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias”, Perason Prentice Hall, 8ª Edición, 2007.
- [129] International Telecommunication Union, “Document 3L/68-E. Outdoor Noise Data in VHF/UHF Bands Measured in Japan Proposed for Noise Databank” November 2010.

2. GLOSARIO

AAC	Advanced Audio Coding
ABU	Asian-Pacific Broadcasting Union
AFS	Alternative Frequency Swithcing
AIR	All India Radio
AM	Amplitud Modulada
AMSS	AM Signalling System
BER	Bit Error Rate
CELP	Code-Excited Linear Predictive
CIRT	Cámara Nacional de la Industria de Radio y Televisión (México)
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DRM	Digital Radio Mondiale
DVB	Digital Video Broadcasting
EBU	European Broadcasting Union
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FAC	Fast Access Channel
FCC	Federal Communications Commission
FM	Frecuencia Modulada
HF	High Frequency
HVXC	Harmonic Vector eXCitation
IBOC	In-Band On-Channel
IEC	International Electrotechnical Commission
ISI	Inter-Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LF	Low Frequency
MCS	Multi Channel Simulcast
MF	Medium Frequency
MFN	Multi Frequency Network
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MPEG	Moving Pictures Expert Group
MSC	Main Service Channel
MSE	Mean Square Error
NRSC	National Radio Systems Committee
NVIS	Near Vertical Incidence Skywave
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAD	Program Associated Data
PDF	Probability Distribution Function
PSD	Power Spectral Density
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RDS	Radio Data System
RMS	Root Mean Square
SBR	Spectral Band Replication
SDC	Service Description Channel
SFN	Single Frequency Network
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency

