



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESTUDIO DEL EFECTO DE FACTORES EXTERNOS SOBRE LAS REDES WLAN Y DISEÑO DE UN ALGORITMO COGNITIVO ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE

por

DIANA BRI MOLINERO

Directores:

PROF. DR. JAIME LLORET MAURI (UPV)

PROF. DR. FRANCISCO RAMOS PASCUAL (UPV)

Junio, 2015

DEDICATORIA

Esta tesis doctoral se la dedico a mi familia y a mi amor Miguel. Gracias por toda la comprensión y apoyo que me habéis brindado siempre y, en especial, durante el tiempo de elaboración de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho este punto para agradecer y destacar a todas aquellas personas y organismos que, de un modo u otro, han ayudado a la realización de esta tesis doctoral. Mi especial agradecimiento va dirigido:

- Al profesor Jaime Lloret, por darme la oportunidad de empezar en el mundo de la investigación en su grupo de investigación. Gracias, además, por tu supervisión y consejos a lo largo de la fase de elaboración de esta tesis.
- Al profesor Francisco Ramos, por su apoyo para la obtención de la beca FPI-UPV, gracias a la cual ha sido posible la realización de esta tesis doctoral de forma remunerada. Gracias, además, por tu supervisión y consejos a lo largo de la fase de elaboración de esta tesis.
- A los miembros evaluadores y del tribunal, por sus completas y detalladas revisiones y comentarios, que han sido de gran ayuda para la mejora de esta tesis doctoral. Gracias, también, por su aceptación y participación en la fase de evaluación de esta tesis.
- A las empresas e instituciones que han brindado soporte en determinados puntos y aspectos de esta tesis doctoral. Al ASIC (Área de Sistemas de la Información y las Comunicaciones), por su disposición continua a la facilitación de datos y parámetros de red, a la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) por facilitar todas aquellas variables meteorológicas disponibles que se solicitaron, este agradecimiento es extensible a la empresa Borja Ópticos Gandia, que gestiona y mantiene la estación meteorológica METEOGANDIA y, finalmente, a la empresa Azimut Electronics, por permitir instalar una parte del montaje de unas de las investigaciones presentadas en esta tesis doctoral.
- A los integrantes del grupo de investigación en el que se ha llevado a cabo esta tesis y a mis compañeros y amigos de mi etapa académica, gracias por todos los momentos compartidos.
- A mis padres, Albert y Loles; a Sara, mi hermana; a mi abuela Lolita y a los que apenas conocí; al resto de mi familia; a mi novio Miguel y a mis amigos, gracias por formar parte de mí. Sois lo más maravilloso de mi vida y los que me ayudáis cada día a sentirme inmensamente feliz.

ABSTRACT

Nowadays there are many works which analyze and seek to improve the performance of Wireless Local Area Networks (WLANs) from different perspectives. A great deal of them is focused on design aspects, such as frequency distribution or channel assignment. Therefore, as these features have already been widely studied, my efforts have been directed to study other conditions that also could affect their performance and that have not been analyzed in depth yet. The main goal of this Ph.D. dissertation has been to perform a detailed study that researches the weather's impact on the performance of WLANs IEEE 802.11b/g. Two different WLAN scenarios have been analyzed to validate the results and to find precise relations. From conclusions of these previous analysis, the second objective has been to design a cognitive protocol that based on weather conditions and network performance parameters, allows networks to adjust their transmission features in order to overcome such impact.

In order to conduct this study, firstly it was necessary to study which statistical methods could be used to extract the level of correlation between performance parameters of networks and weather conditions running at the same time. Secondly, I had to know which performance parameters the outdoor WLAN of Universitat Politècnica de València (UPV) could provide, and select them according to my objective. Then, I defined the period of time in which these parameters were gathered periodically. The next step was to select and collect the weather conditions from a close weather station during the same period of time. Finally, I had to perform a detailed pre-processing to put all of the volume of data in order and data were statistically analyzed. Results were successful; however there were several problems due to the variability derived from a real WLAN scenario. Therefore, an experimental setup was required in order to check the obtained results. It entailed to design and to develop an outdoor point-to-multipoint IEEE 802.11b/g link and to analyze again the weather's impact. Multiple points were considered in order to take into account different distances in the performed evaluation and to examine the behavior of different modulation schemes working under the same weather conditions. From these results, a cognitive algorithm was designed in order to reduce the weather's impact on IEEE 802.11b/g networks. One key aspect was to ensure it was energy efficient. This protocol was simulated and the obtained results were satisfactory in terms of both energy efficiency and network performance.

To conclude, other external factor to WLANs studied in this Ph.D thesis has been the specific absorption rate. It deals with a current public health worry because it is used to measure the body tissue exposure to electromagnetic fields. Obviously, signal absorption by human bodies affects to the performance of WLANs and so, this parameter should be also taken into account when deploying efficient networks. For this reason, this study has been also included in this thesis.

RESUMEN

Hoy en día existen muchos trabajos que analizan e intentan mejorar el rendimiento de las redes de área local inalámbricas desde diferentes perspectivas. Gran parte de estos trabajos se centran en aspectos de diseño, como son la distribución de frecuencias o la asignación de canales. Por lo tanto, como estos aspectos ya han sido ampliamente estudiados, los esfuerzos de esta tesis se han dirigido a estudiar otros factores que también podrían afectar a su rendimiento y que no han sido analizadas en profundidad todavía. El objetivo principal de esta tesis doctoral ha sido realizar un estudio detallado que analice el impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g. Para realizar este estudio, se han analizado dos escenarios reales con el fin de verificar los resultados y encontrar relaciones precisas. A partir de las conclusiones de estos análisis previos, el segundo objetivo ha sido diseñar un algoritmo cognitivo que, en base a las condiciones meteorológicas y a los parámetros de rendimiento de red, permita a las redes ajustar sus características de transmisión con el fin de superar tal impacto.

Con el fin de llevar a cabo este estudio, primero fue necesario estudiar qué métodos estadísticos podían ser utilizados para extraer el nivel de correlación entre los parámetros de rendimiento de las redes y las condiciones meteorológicas del entorno. En segundo lugar, se tuvo que analizar qué parámetros de rendimiento de red se podían extraer de la red exterior de la UPV y seleccionarlos de acuerdo con el objetivo perseguido. A continuación, se definió el periodo de tiempo durante el cual se almacenarían los parámetros seleccionados de forma periódica. El siguiente paso fue seleccionar y almacenar las condiciones meteorológicas de una estación cercana durante el mismo periodo de tiempo. Finalmente, se realizó un pre-procesado detallado con el fin de poner en orden todo el volumen de datos y se analizaron estadísticamente. Los resultados fueron exitosos, sin embargo aparecieron varios problemas por el hecho de estudiar una red real muy variable. Por lo tanto, se tuvo que desarrollar un escenario experimental con el fin de verificar los resultados. Para ello se diseñó y desarrolló un enlace exterior IEEE 802.11b/g punto a multipunto, y se analizó de nuevo el impacto de las condiciones meteorológicas. Se consideró un enlace multipunto para analizar también cómo influía el impacto del tiempo según la distancia y los diferentes esquemas de modulación. A partir de los resultados, se diseñó un algoritmo cognitivo energéticamente eficiente con el fin de reducir el impacto de los fenómenos meteorológicos en las redes IEEE 802.11b/g. Dicho algoritmo ha sido simulado y los resultados obtenidos han sido satisfactorios, tanto en términos de eficiencia energética como de rendimiento de la red.

Para concluir, otro factor externo que se ha estudiado en esta tesis ha sido la tasa de absorción específica. Este parámetro está relacionado con una de las grandes preocupaciones actuales en cuanto a salud pública, ya que se utiliza para medir la exposición de los tejidos del cuerpo humano a los campos electromagnéticos. Obviamente, la absorción de señal por parte del cuerpo humano afecta a las redes y, por lo tanto, este parámetro se debería tener en cuenta a la hora de diseñar redes eficientes. Por esta razón se ha incluido en esta tesis doctoral.

RESUM

Actualment hi ha molts treballs que analitzen i intenten millorar el rendiment de les xarxes d'àrea local sense fils des de diferents perspectives. Gran part d'aquests treballs es focalitzen en aspectes de disseny, com són la distribució de freqüències o l'assignació de canals. Per tant, com aquests aspectes ja han sigut àmpliament estudiats, els esforços d'aquesta tesi doctoral s'han dirigit a estudiar altres factors que també podrien afectar al seu rendiment i que encara no han sigut analitzats amb profunditat. L'objectiu principal d'aquesta tesi doctoral ha sigut realitzar un estudi minuciós per analitzar l'impacte de les condicions meteorològiques sobre el rendiment de les xarxes IEEE 802.11b/g. Per a realitzar aquest estudi s'han analitzat dos escenaris reals per tal de verificar els resultats i trobar relacions precises. A partir de les conclusions d'aquests anàlisis previ, el següent objectiu ha sigut dissenyar un algoritme cognitiu que, en base a les condicions meteorològiques i als paràmetres de rendiment de la xarxa, permeti a les xarxes ajustar les seues característiques de transmissió per tal de superar tal impacte.

Per tal de dur a terme aquest estudi, primer va ser necessari estudiar quins mètodes estadístics podien ser utilitzats per extraure el nivell de correlació entre els paràmetres de rendiment de les xarxes i les condicions meteorològiques de l'entorn. En segon lloc, es va haver d'analitzar quins paràmetres de rendiment es podien extraure de la xarxa exterior de la UPV i es van seleccionar d'acord a l'objectiu plantejat. A continuació, es va definir el període temporal al llarg del qual s'emmagatzemarien els paràmetres seleccionats de manera periòdica. El següent pas va ser seleccionar i emmagatzemar les condicions meteorològiques d'una estació propera durant el mateix període de temps. Finalment, es va realitzar un pre-processament per tal de posar en ordre tot el volum de dades i es van analitzar estadísticament. Els resultats van ser exitosos, però van aparèixer diversos problemes pel fet d'estudiar una xarxa real molt variable. Per tant, es va haver de desenvolupar un escenari experimental amb l'objectiu de verificar els resultats. Per aquesta raó es va dissenyar i implementar un enllaç exterior IEEE 802.11b/g punt a multipunt, i es va analitzar de nou l'impacte de les condicions meteorològiques. Es va considerar un enllaç multipunt per tal de d'analitzar també com influïa el impacte del temps segons la distància i els diferents esquemes de modulació. A partir d'aquests resultats, es va dissenyar un algoritme cognitiu energèticament eficient per tal de reduir l'impacte dels fenòmens meteorològics sobre les xarxes IEEE 802.11b/g. Aquest algoritme va ser simulat i els resultats obtinguts van ser satisfactoris, tant en termes d'eficiència energètica com de rendiment de la xarxa. va comprovar que la proposta aporta millores.

Per concloure, un altre factor extern que s'ha estudiat en aquesta tesi doctoral ha sigut la taxa d'absorció específica. Aquest paràmetre està relacionat amb una de les preocupacions actuals pel que fa a la salut pública, ja que s'utilitza per a mesurar l'exposició dels teixits del cos humà als camps electromagnètics. Òbviament, aquesta absorció de la senyal afecta el rendiment de les xarxes i, per això, aquest paràmetre s'hauria de tenir en compte a l'hora d'implementar futures xarxes sense fils eficients. Per aquesta raó s'ha inclòs en aquesta tesi doctoral.

TABLA DE CONTENIDOS

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Abstract	vii
Resumen	viii
Resum	ix
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tablas.....	xix
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Redes de Área Local Inalámbricas.....	1
1.2 Objetivos y Plan de Trabajo	8
1.3 Trabajos Previos.....	11
1.4 Contribuciones Principales	12
1.5 Estructura de la Tesis	15
Capítulo 2 Estado del Arte	17
2.1 Introducción	17
2.2 Impacto de los Condiciones Meteorológicos en las Redes IEEE 802.11b/g.....	19
2.3 Redes Cognitivas Energéticamente Eficientes	22
2.4 SAR: Tasa de Absorción Específica.....	28
2.5 Conclusión	30

Capítulo 3 Medición del Impacto de las Condiciones Meteorológicas en la Red Inalámbrica de la UPV	31
3.1 Introducción	31
3.2 Banco de Pruebas: Red Inalámbrica Exterior de la UPV	32
3.3 Evaluación del Rendimiento de la Red.....	32
3.3.1 Recogida de Datos	38
3.3.2 Pre-Procesado de Datos	40
3.4 Condiciones Meteorológicas	44
3.4.1 Recogida de Datos	44
3.4.2 Pre-Procesado de Datos	45
3.5 Análisis Estadístico: Resultados.....	47
3.6 Conclusión	51
Capítulo 4 Medición del Impacto de las Condiciones Meteorológicas en un Enlace Punto a Multipunto IEEE 802.11b/g.....	55
4.1 Introducción	55
4.2 Banco de Pruebas: Escenario Experimental de un Enlace Punto a Multipunto	60
4.3 Toma de Medidas	63
4.4 Análisis Estadísticos	65
4.4.1 Resultados (I): Estudio de Correlación Base	65
4.4.2 Resultados (II): Estudio de Correlación Agrupado.....	74
4.4.3 Resultados (III): Estudio de Regresión	86
4.5 Conclusión	91
Capítulo 5 Algoritmo Cognitivo Energéticamente Eficiente para Minimizar el Impacto de las Condiciones Meteorológicas en los Enlaces IEEE 802.11b/g	93
5.1 Introducción	93

5.2	Redes Cognitivas.....	95
5.2.1	Redes Cognitivas vs. Diseños Cross-layer vs. Diseños Radio Cognitivos.....	97
5.3	Análisis Matemático sobre el Consumo de Energía.....	99
5.3.1	Tasa de Error de Trama en IEEE 802.11b/g.....	99
5.3.2	Modelo sobre el Consumo de Energía en el Estándar IEEE 802.11b/g.....	102
5.4	Propuesta de Algoritmo Cognitivo Energéticamente Eficiente.....	105
5.5	Simulación del Algoritmo Cognitivo Propuesto	109
5.5.1	Banco de Pruebas	109
5.5.2	Resultados.....	110
5.6	Conclusión	114
Capítulo 6 Tasa de Absorción Específica del Cuerpo Humano.....		117
6.1	Introducción	117
6.2	El Cuerpo Humano y los Efectos de las Ondas Electromagnéticas ..	120
6.2.1	La Composición del Cuerpo Humano	120
6.2.1.1	Nivel Atómico	120
6.2.1.2	Nivel Molecular.....	121
6.2.1.3	Nivel Celular	121
6.2.1.4	Nivel Hístico	121
6.2.1.5	Nivel Global.....	121
6.2.2	Efectos Electromagnéticos sobre el Cuerpo Humano	122
6.3	Consideraciones Analíticas	125
6.4	Análisis y Recogida de Datos.....	127
6.4.1	Banco de Pruebas 1	128

6.4.2	Banco de pruebas 2	131
6.5	Conclusión	144
Capítulo 7	Conclusion and Future Work	147
7.1	Introduction	147
7.2	Contributions.....	148
7.3	Future Work	150
Glosario	152
Bibliografía	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Formato PPDU	33
Figura 3-2. Formato genérico MPDU	34
Figura 3-3. Formato trama RTS	37
Figura 3-4. Formato tramas CTS y ACK	37
Figura 3-5. Muestra del registro de log de los puntos de acceso	38
Figura 3-6. Datos del log pre-procesados	40
Figura 3-7. Número medio de asociaciones, desasociaciones y autenticaciones fallidas	41
Figura 3-8. Número medio de reintentos máximos de conexión y roamings	41
Figura 3-9. Contadores SNMP	42
Figura 3-10. Contadores SNMP pre-procesados	42
Figura 3-11. Relación entre el nº de usuarios de la red, la temperatura media y el nº de tramas	43
Figura 3-12. Relación entre el nº de usuarios de la red, la temperatura media y el nº de tramas dividido por el número de usuarios	43
Figura 3-13. Evolución del número medio de usuarios en la red	44
Figura 3-14. Número de clientes por tasa de datos disponible	44
Figura 3-15. Estación meteorológica situada en el campus de Vera de la UPV ...	45
Figura 3-16. Variables meteorológicas pre-procesadas en media	45
Figura 3-17. Evolución temporal media de la temperatura, velocidad del viento y humedad	46

Figura 3-18. Evolución de la radiación solar directa, difusa y global de las 5 a las 20 horas.....	46
Figura 4-1. Escenario real del enlace punto a multipunto IEEE 802.11b/g desplegado.....	60
Figura 4-2. Diseño de la topología de red.....	61
Figura 4-3. Enlace punto a multipunto desplegado	62
Figura 4-4. Distribución del equipamiento utilizado	62
Figura 4-5. Zonas de Fresnel en el enlace de corto alcance.....	63
Figura 4-6. Zonas de Fresnel en el enlace de largo alcance.....	63
Figura 4-7. Formato paquete ICMP	64
Figura 4-8. Coeficientes de correlación entre los parámetros de rendimiento y las condiciones meteorológicas	68
Figura 4-9. Condiciones meteorológicas mensuales.....	70
Figura 4-10. Asignación visual basada en ± 1 desviación estándar de la media ...	76
Figura 4-11. Distribución de frecuencia de las condiciones meteorológicas agrupadas en enero	77
Figura 4-12. Distribución de frecuencia de las condiciones meteorológicas agrupadas en julio.....	78
Figura 4-13. Modelo de ajuste que representa el número de tramas duplicadas a partir de las condiciones meteorológicas.....	89
Figura 4-14. Modelo de ajuste que representa el número de reintentos máximos de transmisión a partir de las condiciones meteorológicas	90
Figura 4-15. Modelo de ajuste que representa el número de tramas ACK perdidas a partir de las condiciones meteorológicas.....	91
Figura 5-1. Fases que conforman la máquina de aprendizaje de las redes cognitivas	97
Figura 5-2. FER para cada tasa de datos del estándar IEEE 802.11b/g	102
Figura 5-3. Energía consumida frente a la FER a nivel MAC para las tasas de datos.....	105

Figura 5-4. Agentes KPs involucrados en el algoritmo propuesto	106
Figura 5-5. Módulo cognitivo	107
Figura 5-6. Esquema detallado del módulo cognitivo propuesto energéticamente eficiente	108
Figura 5-7. Tráfico generado para cada tasa de datos con un tamaño de paquete de 1024 bytes.....	111
Figura 5-8. Datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para cada tasa de datos.....	111
Figura 5-9. Promedio de datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para cada tasa de datos	112
Figura 5-10. Variación del tamaño de paquete de los datos frente al tráfico de control introducido por una estación IEEE 802.11b/g para cada tasa de datos..	112
Figura 5-11. SNR frente a los datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para la tasa de 36 Mbps en una estación inalámbrica	113
Figura 5-12. Comparación de los datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión a 36 Mbps	114
Figura 5-13. Comparación de la energía requerida a 36 Mbps	114
Figura 6-1. Plano del edificio donde está la biblioteca	128
Figura 6-2. Nivel de señal sin gente en la sala	129
Figura 6-3. Nivel de señal con 11 personas en la sala	130
Figura 6-4. Nivel de señal con 34 personas en la sala	130
Figura 6-5. Cámara anecoica del campus de Gandia de la UPV	131
Figura 6-6. Diagrama del patrón de radiación de las antenas HGA7T	132
Figura 6-7. Regiones de campo para una antena omnidireccional	134
Figura 6-8. Esquema de las mediciones tomadas en la camara anecoica	135
Figura 6-9. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 cm. de la antena ...	136
Figura 6-10. RSSI medio en la primera posición	136

Figura 6-11. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 cm. de la antena obstaculizando la visión directa	137
Figura 6-12. RSSI medio en la segunda posición	138
Figura 6-13. Evolución del RSSI para la posición situada a 12 cm. de la antena	139
Figura 6-14. RSSI medio en la tercera posición	139
Figura 6-15. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 m. de la antena ...	140
Figura 6-16. RSSI medio en la cuarta posición	140
Figura 6-17. Evolución del RSSI para la posición situada a 10 cm. del ordenador portátil.....	141
Figura 6-18. RSSI medio en la quinta posición	141

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1. Parámetros de rendimiento considerados	40
Tabla 3-2. Coeficientes de correlación resultantes de las tramas de red.....	49
Tabla 3-3. Coeficientes de correlación resultantes de las tasas de datos	50
Tabla 4-1. Especificaciones técnicas físicas.....	58
Tabla 4-2. Parámetros de rendimiento considerados	65
Tabla 4-3. Promedio de los coeficientes de correlación y tasa de variación entre los enlaces de corto y largo alcance (I)	74
Tabla 4-4. Promedio de los coeficientes de correlación y tasa de variación entre los enlaces de corto y largo alcance (II)	74
Tabla 4-5. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la temperatura en enero.....	80
Tabla 4-6. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la humedad en enero	82
Tabla 4-7. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y el punto de rocío en enero	83
Tabla 4-8. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la presión atmosférica en enero.....	84
Tabla 4-9. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la velocidad del viento en enero	85
Tabla 5-1. Comparación entre las redes cognitivas, la radio cognitiva y el cross-layer.....	99
Tabla 5-2. Especificaciones físicas de las redes IEEE 802.11b/g.....	100
Tabla 5-3. Notación matemática	103
Tabla 6-1. Comparación entre las limitaciones de la ETSI y de la FCC.....	118

Tabla 6-2. Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos entre 0 y 300 GHz.....	119
Tabla 6-3. Composición atómica del cuerpo humano	121
Tabla 6-4. Composición molecular del cuerpo humano	121
Tabla 6-5. Calentamiento del cuerpo humano frente a las diferentes ondas EM	124
Tabla 6-6. Medidas estadísticas de la biblioteca	129
Tabla 6-7. Cálculo del SAR para las medidas anteriores	131
Tabla 6-8. Regiones de campo para el banco de pruebas 2.....	134
Tabla 6-9. Cálculo del SAR para la segunda ubicación	142
Tabla 6-10. Cálculo del SAR para la tercera ubicación	143
Tabla 6-11. Cálculo del SAR para la cuarta ubicación	143
Tabla 6-12. Cálculo del SAR para el quinto lugar.....	144

INTRODUCCIÓN

1.1 Redes de Área Local Inalámbricas

Las redes de área local inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.11 [1], son la tecnología más popular hasta la fecha en redes de área local. Por lo tanto, uno de los intereses más importantes en los grupos de trabajo dedicados a su estudio, es la mejora constante de su rendimiento.

En 1997, el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [2] publicó el primer estándar para redes de datos inalámbricas conocido como IEEE 802.11. Ésta ha ido actualizándose hasta llegar a la última versión en el año 2012 [1], que incluye todas las variantes definidas hasta la fecha. Esta recomendación, define la subcapa MAC y la capa física (en inglés: Physical Layer o PHY) de las redes inalámbricas.

La gran utilización de las tecnologías inalámbricas en el ámbito de las redes, se debe principalmente a su facilidad de despliegue por la ausencia de cables, por ejemplo en lugares de difícil acceso o donde el cableado no es adecuado (parajes naturales, montañas, etc.), y gracias a su bajo coste de instalación. Otras ventajas de las redes inalámbricas frente a las cableadas son [3]:

- Las ondas inalámbricas pueden atravesar paredes, por lo tanto pueden abarcar diferentes ubicaciones aunque se transmitan desde un único punto.
- Su instalación es fácil y rápida.
- Los costes de los dispositivos IEEE 802.11 y su mantenimiento son relativamente bajos.
- Pueden ser implementadas en cualquier lugar, tanto interior como exterior.
- Permite cambios rápidos en la topología física de la red y, por lo tanto, son altamente escalables.

Por todo esto, actualmente las redes de área local inalámbricas IEEE 802.11 se utilizan en un infinito número de aplicaciones. En primer lugar, para el acceso a Internet, tanto en el ámbito doméstico como en cualquier lugar público

(cafeterías, tiendas, lugares de recreo, etc.). También son muy utilizadas en el ámbito empresarial, para compartir recursos, acceder a servidores de todo tipo, o para conectar distintas sedes alejadas geográficamente, entre otros. Otra aplicación muy importante son las redes de sensores, que aunque muchas utilizan su propio estándar Zigbee, otras basan su funcionamiento en el estándar IEEE 802.11. También, son usadas para establecer conexiones ad-hoc entre dispositivos, por ejemplo entre cámaras de vídeo para aplicaciones de video vigilancia. Éstas son algunas de las muchas aplicaciones actuales de las redes de área local inalámbricas IEEE 802.11. Por amenizar la lectura de esta memoria de tesis, de aquí en adelante en algunas ocasiones me referiré a ellas como WLANs, acrónimo proveniente de sus siglas en inglés Wireless Local Area Networks.

Las diferencias principales entre las distintas variantes del estándar [4] (IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, etc.) son: el rango de frecuencias utilizado, las velocidades de transmisión, sus radios de cobertura y los esquemas de codificación y modulación utilizados. Por ejemplo, la variante 802.11a estandariza la operación de las WLANs en la banda de 5 GHz, con tasas de datos de hasta 54 Mbps. Es ideal para entornos de alta interferencia ya que esta banda no está tan saturada como la otra banda utilizada de 2.4 GHz. Muchos dispositivos, como los teléfono inalámbricos, los hornos de microondas, dispositivos Bluetooth, etc. operan también en la banda de 2.4 GHz. Sin embargo, sus altos requerimientos de potencia, hacen que esta variante no sea totalmente adecuada para dispositivos inalámbricos con baterías limitadas. Además, debido a utilizar bandas de frecuencias diferentes, es incompatible con las variantes IEEE 802.11b y 802.11g, que junto con la IEEE 802.11n, son las más desplegadas actualmente.

La variante 802.11b [5] estandariza la operación de las WLAN en la banda de 2.4 GHz, con velocidades de transmisión de hasta 11 Mbps. Así que es ideal para aplicaciones que no requieren grandes anchos de banda, así como para dispositivos con restricciones de potencia. Esta variante puede trabajar conjuntamente con la IEEE 802.11g y, de hecho, tal combinación se considera una variante por ella misma (IEEE 802.11b/g), convirtiéndose en la de mayor difusión y despliegue por todo el mundo gracias a su magnífica relación precio/rendimiento. La variante 802.11g permite llegar a velocidades de hasta 54 Mbps y son compatibles gracias a utilizar la misma banda de 2.4 GHz. Es adecuada para aplicaciones que requieran mayor ancho de banda, sin embargo al emplear la misma canalización y banda que la IEEE 802.11b, comparte sus limitaciones. Tal como se ha comentado anteriormente, uno de sus principales problemas es que la banda de 2.4 GHz está muy congestionada y, por lo tanto, hay muchas fuentes de interferencia.

IEEE 802.11n [6] es una propuesta de modificación al estándar IEEE 802.11 para mejorar significativamente el rendimiento de la red más allá de los estándares anteriores, tales como 802.11b y 802.11g, con un incremento significativo en la velocidad máxima de transmisión de 54 Mbps a un máximo de 600 Mbps. Actualmente la capa física soporta una velocidad de 300Mbps, con el uso de dos flujos espaciales en un canal de 40 MHz. Finalmente, las últimas variantes estandarizadas, la IEEE 802.11ac y la IEEE 802.11ad [7], utilizan tanto la banda de 2.4 como la de 5 GHz en el caso de la variante 802.11ac y la banda de los 60GHz en la variante 802.11ad, por lo que además de tener mayor capacidad, cada una de estas variantes están pensadas para utilidades finales diferentes.

El estándar IEEE 802.11 [1] define concretamente la capa física y la capa MAC (Medium Access Control), que son las que presentan las principales diferencias con otros estándares IEEE, como puede ser el estándar IEEE 802.3 (Ethernet) o el IEEE 802.15.4 (Zigbee). La subcapa LLC (Logical Link Control), situada sobre la capa MAC, es la encargada de ocultar las diferencias entre ellos para que sean invisibles a la capa de red.

Las diferentes variantes IEEE 802.11 difieren principalmente en la capa física, que se divide en dos subcapas:

- La subcapa PLCP (PHY Layer Convergence Protocol), que se encarga de realizar el sensado de portadora (CCA - Clear Channel Assessment) para la capa MAC y de mapear las PDUs (Protocol Data Units) de nivel MAC en SDUs (Service Data Units) PLCP, adaptadas para la otra subcapa PMD (PHY Medium Dependent).
- La subcapa PMD, que gestiona las características particulares del medio inalámbrico y define los métodos para transmitir y recibir datos, como son la modulación y el tipo de codificación.

En la recomendación IEEE 802.11b [8], la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2.4 GHz se divide en 14 canales solapados, de 22 MHz cada uno y espaciados 5 MHz, para permitir la coexistencia de varios sistemas en la misma área. En Europa, sólo está permitida la utilización de 13 de estos canales. El primer canal está centrado en 2412 GHz y el último en 2472 GHz. Tal solapamiento, limita a tres los canales disponibles no superpuestos. Sin embargo, ésta fue una de las primeras variantes implementadas a gran escala. Las tasas de datos disponibles en la variante IEEE 802.11b son 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. La tecnología de transmisión utilizada en esta variante es el espectro ensanchado por secuencia directa (en inglés: Direct Sequence Spread Spectrum o DSSS). Esta tecnología especifica una secuencia de 11 bits para el chipping – llamada secuencia Barker – para codificar todos los datos enviados a través del aire. Cada secuencia de 11 bits, representa un solo bit de datos (1 o 0), y se convierte en una forma de onda llamada símbolo que puede ser enviada a través del aire. Solo los receptores a los que el emisor haya enviado previamente la secuencia podrán recomponer la señal original. Además, al sustituir cada bit de datos a transmitir, por una secuencia de 11 bits equivalente, aunque parte de la señal de transmisión se vea afectada por interferencias, el receptor aún puede reconstruir fácilmente la información a partir de la señal recibida. Los símbolos generados puede ser transmitidos con una tasa de símbolo de 1MSps (1 millón de símbolos por segundo) usando la técnica de modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying). En el caso de 2 Mbps, se usa una modulación más sofisticada llamada QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), que permite doblar la tasa de datos mejorando la eficiencia en el uso del ancho de banda. Para incrementar la tasa de datos a 5.5 y 11 Mbps, se desarrollaron técnicas de codificación avanzadas. En concreto, para la variante IEEE 802.11b se especifica la modulación CCK (Complementary Code Keying), que consiste en un conjunto de 64 palabras código de 8 bits. Como conjunto, estas palabras código tienen propiedades matemáticas únicas que les permiten distinguirse perfectamente entre ellas en el receptor, incluso en entornos con un ruido importante e interferencias multicamino. La

tasa de 5.5 Mbps usa la modulación CCK para codificar 4 bits por portadora, mientras que la tasa de 11 Mbps codifica 8 bits por portadora. Ambas velocidades usan la técnica de modulación QPSK y la señal a 1375 MSps (millones de símbolos por segundo).

Aunque DSSS se ha impuesto en las implementaciones, la especificación original incluía otras dos posibilidades para la capa física: los infrarrojos y el espectro ensanchado por salto de frecuencia (en inglés: Frequency Hopping Spread Spectrum o FHSS) en la banda de 2.4 GHz. A continuación, se amplió con la variante IEEE 802.11a [9] y la técnica de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (en inglés: Orthogonal Frequency Division Multiplexing u OFDM). Esta variante trabaja hasta 54 Mbps en las bandas U-NII de 5.15 a 5.25, de 5.25 a 5.35 y de 5.725 a 5.825 GHz. En la técnica OFDM, el emisor utiliza a la vez varias frecuencias portadoras, dividiendo la transmisión entre cada una de ellas. En IEEE 802.11a, se utilizan 64 portadoras, 48 de las cuales se utilizan para enviar la información, 4 para sincronización y 12 están reservadas para otros usos. Cada portadora está separada 0.3125 MHz de la siguiente, ocupando un ancho de banda total de 20 MHz. Cada uno de los canales puede ser modulado con BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM, permitiendo 8 velocidades diferentes de trabajo: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps.

La variante IEEE 802.11g [10], consigue también tasas de datos de hasta 54 Mbps pero en la misma banda de 2.4 GHz. Esto permite que los dispositivos sean compatibles con la variante IEEE 802.11b, y puedan trabajar conjuntamente. La variante IEEE 802.11g utiliza OFDM y los mismos canales que la recomendación IEEE 802.11b.

En el año 2009, se aprobó la variante IEEE 802.11n [11]. Se desarrolló con el objetivo de alcanzar mayores velocidades de transmisión, y mejorar las prestaciones de las variantes anteriores. En IEEE 802.11n, hay dos técnicas básicas para mejorar los regímenes de transmisión: la técnica MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) y canales de 40 MHz. La técnica MIMO permite enviar y recibir por múltiples antenas de manera simultánea. Otra de las grandes ventajas de este estándar es el uso de las bandas de 2.4 y 5 GHz simultáneamente.

Una de las características que aporta gran versatilidad a todas las variantes del estándar IEEE 802.11, es la posibilidad de adaptar la tasa de datos de forma dinámica durante la operación de la transmisión [12]. De esta forma siempre se intenta transmitir a la velocidad más óptima posible, según las condiciones de carga y de ruido del canal. Sin embargo, el estándar no define cómo implementar esta característica en los dispositivos, deja libertad a los fabricantes para que la implementen como consideren oportuno. En el Capítulo 4 se explican en detalle las dos técnicas actuales de implementación.

Por lo que respecta a la capa MAC, sus principales funciones son: la entrega fiable de datos, asegurar que el control de acceso es justo, y ofrecer protección de los datos. Además, asegura la sincronización de las estaciones mediante la generación de un tipo de tramas (beacons) que lo permiten, y se encarga de gestionar la energía, al permitir que las estaciones entren en un estado de reposo, conocido con el término inglés 'sleep'. Esta capa también permite la fragmentación de los datos y facilita la privacidad de los mismos.

En el estándar, la capa MAC se resume con el protocolo de acceso al medio CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [13]. Es común en todas las variantes del estándar. Como su nombre indica, se trata del protocolo utilizado para que los dispositivos IEEE 802.11 escuchen el medio antes de transmitir, evitando así colisiones entre transmisiones simultáneas. Sin embargo, esto no resuelve el problema de las colisiones en todos los casos, ya que ciertas topologías de red suponen ciertos problemas, como son el del terminal oculto o expuesto, que se verá a continuación como se han intentado resolver.

El estándar define dos funciones de coordinación para la capa MAC [14]: la de datos asíncronos (en inglés: Distribution Coordination Function o DCF), y otra opcional de restricción temporal (en inglés: Point Coordination Function o PCF). La función DCF tiene que estar implementada obligatoriamente en todos los dispositivos inalámbricos que quieran cumplir con el estándar IEEE 802.11, y es aplicable tanto a redes distribuidas (ad-hoc) como a redes en modo infraestructura.

Las prioridades de acceso al medio están definidas a través de diferentes intervalos de tiempo entre transmisiones de tramas consecutivas. De esta manera, se define:

- SIFS (Short Inter Frame Space): como el intervalo de espera más corto y, por lo tanto, ofrece la mayor prioridad para la trama de reconocimiento de recepción (en inglés: Acknowledgement o ACK) o la trama que permite la transmisión (en inglés: Clear To Send o CTS).
- PIFS (PCF Inter Frame Space): como el siguiente intervalo de tiempo más corto después del SIFS, y ofrece una prioridad media para el servicio con restricciones temporales.
- DIFS (DCF Inter Frame Space): como el intervalo más largo y, por lo tanto, ofrece la prioridad más baja para el servicio asíncrono de datos.
- EIFS (Extended Inter Frame Space): como un tiempo variable y sólo es utilizado cuando hay errores de transmisión.

La función DCF es la utilizada por el protocolo CSMA/CA. Por lo tanto, tal como se ha dicho anteriormente, se basa en que las estaciones que tienen datos para enviar, empiezan realizando un escucha de portadora para detectar si el medio está libre o no para transmitir. Si el medio permanece libre durante un intervalo DIFS, la estación puede transmitir. El receptor de los datos, si los ha recibido sin errores, responde con una trama ACK después de esperar un tiempo SIFS. En caso de que haya errores de transmisión y, por lo tanto, el emisor no reciba la trama ACK, el emisor retransmite automáticamente los paquetes de datos hasta que se logre una transmisión correcta, o hasta que se alcance el número máximo de reintentos. En cambio, si durante el periodo DIFS, el medio está ocupado, la estación tiene que esperar por un intervalo DIFS libre, seguido de un periodo aleatorio de back-off (múltiplo del tamaño de un slot de tiempo). Si otra estación ocupa el medio durante este periodo de back-off, el temporizador se detiene y la estación debe volver a comenzar con la espera de un intervalo DIFS.

Cuando se transmite un paquete por primera vez, hay que elegir un intervalo de back-off en el rango $[0, CW]$, donde CW (Content Window) es la ventana

de contención, inicialmente con valor igual a 15. Se realiza la cuenta atrás desde el valor elegido en cuanto el medio esté libre durante un tiempo DIFS, pero la cuenta atrás se suspende si el medio es ocupado durante ese tiempo. Sin embargo, si la cuenta llegue a 0 sin que el medio sea ocupado, se realiza la transmisión. En caso de que se produzca una colisión, hay que duplicar el tamaño de la ventana de contención, hasta un valor máximo de 1024.

Como se ha comentado anteriormente, algunas topologías de red implican ciertos problemas en las redes y conllevan colisiones, a pesar de que las estaciones escuchen el medio antes de transmitir. Entre ellos se encuentra el problema del terminal oculto, que hace referencia a la imposibilidad de que un terminal detecte que el medio inalámbrico está ocupado por otro, porque éste se encuentra fuera de su rango de cobertura y, por lo tanto, no se escuchan mutuamente. En este caso, se producen colisiones frecuentes que se traducen en una degradación de las prestaciones de la red. Para mitigar este problema, el grupo que se dedica al desarrollo del estándar IEEE 802.11 [4], incorporó al estándar una técnica conocida como Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS). Hay un umbral de activación de este mecanismo (RTS Threshold) que se define en el dispositivo final, y que viene determinado por el tamaño del paquete. De tal manera que, para los paquetes cuyo tamaño superen dicho umbral, se activa el mecanismo, pero para paquetes de tamaño inferior no. Así, se evita sobrecargar la red con estas tramas de control en el caso de que los paquetes sean pequeños y, por lo tanto, su probabilidad de colisión es menor y, en tal caso, su retransmisión no es tan costosa en términos de uso de recursos radio.

Cuando se activa este mecanismo, el acceso al medio cambia ligeramente. Ahora, si el medio se encuentra libre durante DIFS, la estación transmite una trama RTS al destino. El receptor, si realmente está listo para recibir, confirma la recepción de esta trama, con una trama CTS después de un tiempo SIFS. El emisor puede entonces iniciar la transmisión del paquete de datos que quiere transmitir, recibiendo posteriormente un ACK del receptor para confirmar su correcta recepción. Las demás estaciones pueden saber el tiempo reservado para la transmisión del paquete, ya que es indicado en las tramas RTS y CTS. Este valor es almacenado internamente por cada estación en un registro propio, denominado NAV (Network Allocation Vector), y saben que durante ese tiempo el canal estará ocupado.

Sin embargo, el uso de las tramas RTS/CTS para frenar los problemas asociados con los terminales ocultos, provoca un nuevo problema: el del terminal expuesto. Este problema se traduce en que un terminal se inhibe de transmitir, porque escucha la transmisión de otro terminal operando en la misma frecuencia, pero que está conectado a un punto de acceso diferente. En este caso, este hecho se traduce en un problema de desempeño del protocolo ya que, pudiendo transmitir porque están utilizando canales distintos, no lo hace.

Además de la información de ocupación de canal presente en el NAV, todos los terminales realizan la función básica de detección de portadora para evitar transmitir cuando el canal está ocupado. De esta manera, en el IEEE 802.11 la detección de portadora se hace simultáneamente a nivel físico (physical carrier sensing) y en el nivel MAC (virtual carrier sensing).

La detección física de la portadora permite detectar actividad en el canal a través de la potencia relativa de la señal de otras fuentes. En relación a la detección virtual de portadora, esta se hace enviando la duración del MPDU en las tramas RTS/CTS y en las tramas de datos. En particular, es el campo de duración de estas tramas el que indica el tiempo en microsegundos (μs) necesario para completar la transmisión de una trama. Las estaciones que pertenecen a la misma red, utilizan la información en el campo de duración para ajustar su NAV. El canal se considera ocupado si cualquiera de estos mecanismos lo indica.

En el modo infraestructura, la función DCF puede trabajar conjuntamente con la función PCF [15], ya que en estas redes un punto de acceso es el encargado de canalizar el tráfico y gestionar el acceso al medio de los terminales de la red. Se trata de una función de acceso al medio opcional, y se basa en un punto de coordinación (en inglés: Point Coordinator o PC) que reside en un punto de acceso, y controla la transferencia de tramas durante los periodos de tiempo conocidos como periodos libres de contienda (en inglés: Contention Free Period o CFP). El punto de acceso encargado de gestionar el acceso al medio de los terminales, lo hace mediante el envío de paquetes de POLL (del inglés polling que significa encuesta o interrogación). De tal manera que, durante los periodos de tiempo en los que se ejecuta la función PCF, los únicos terminales que tienen permiso para transmitir son aquellos que reciben un paquete POLL, o que reciben datos y tienen que enviar una trama de reconocimiento ACK. En ambos casos, el tiempo de acceso al medio es el intervalo SIFS. Un nodo que recibe un POLL puede enviar información al punto de acceso, o a cualquier terminal de la red estableciendo un enlace punto a punto.

Finalmente, para concluir los aspectos más importantes de la capa MAC, hay que añadir que en este nivel se pueden transmitir tres tipos de tramas: de control, de gestión y de datos.

Las tramas de gestión se encargan de establecer la comunicación entre una estación y un punto de acceso. También son conocidas como MMPDUs (en inglés: MAC Management Protocol Data Units). Estas tramas proporcionan servicios tales como autenticación, asociación y reasociación. El cuerpo de estas tramas de gestión nunca se retransmite a través de un punto de acceso, de hecho, empiezan y terminan en la capa MAC, así que nunca llegan al servicio de distribución del sistema de la subcapa MAC LLC. Las diferentes tramas de gestión son: trama de solicitud de asociación, de respuesta de asociación, de solicitud de reasociación, de respuesta de reasociación, de desasociación, de solicitud de prueba, de respuesta de prueba, beacon o baliza, de autenticación, de desautenticación, y tramas de indicación de tráfico (en inglés: Traffic Indication Map o TIM) o de tráfico pendiente en el punto de acceso. Todas ellas se verán en detalle en el Capítulo 3.

En cambio, las tramas de control, tal como se ha visto a lo largo de esta sección, se utilizan para reducir las colisiones en el caso del problema del terminal oculto, y para confirmar la correcta recepción de las tramas de datos en el receptor. Son las tramas RTS, CTS and ACK. Por último, las tramas de datos son las encargadas de transportar la información útil que se quiere transmitir desde las capas superiores.

Con la descripción de las capas física y MAC de las redes IEEE 802.11, se han visto los mecanismos internos específicos para llevar a cabo la transmisión de

datos en este tipo de redes. Pero ¿qué ocurre realmente cuando se implementan en entornos reales? Pues que obviamente, al transmitir los datos de forma inalámbrica, estos sufren diversos problemas de propagación que, según su naturaleza, pueden suponer desde imperceptibles a importantes decaimientos en su rendimiento.

La motivación de esta tesis es analizar el impacto de dos factores concretos en el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g: las condiciones meteorológicas en un entorno al aire libre, y la tasa de absorción de los cuerpos humanos en un entorno cerrado. Una vez analizado tal impacto en diferentes escenarios reales, se pretende diseñar un algoritmo cognitivo que permita ajustar las características de transmisión a las condiciones del entorno en el que se encuentre la red.

1.2 Objetivos y Plan de Trabajo

En esta sección se enumeran los objetivos principales de esta tesis y posteriormente se relacionan de forma cronológica, las actividades principales y las sub-tareas llevadas a cabo para alcanzar dichos objetivos¹. Los objetivos de esta tesis son:

- Estudiar el impacto del tiempo en un escenario real WLAN IEEE 802.11b/g,
- Analizar el impacto de los fenómenos meteorológicos en un radioenlace punto a multipunto IEEE 802.11b/g,
- Diseñar un algoritmo cognitivo que tenga en cuenta los anteriores análisis, así como las necesidades de los usuarios finales para mejorar el rendimiento de estas redes, y
- Estudiar la tasa de absorción de las ondas radioeléctricas por parte del cuerpo.

Para alcanzar los objetivos previamente descritos, el proceso seguido se resume en las siguientes tareas:

1. Establecer un acuerdo con el área de sistemas de información y comunicaciones (ASIC) de la UPV para obtener los datos de la red inalámbrica exterior del Campus de Vera.
 - a. Analizar y escoger los parámetros extraíbles de rendimiento de red a partir de la información facilitada por el ASIC.
 - b. Almacenar los parámetros de rendimiento de red durante el periodo de tiempo acordado.
 - c. Analizar los datos detalladamente, con el objetivo de detectar y eliminar datos anómalos, derivados de una captura de datos en un entorno cambiante y desde dispositivos reales.

¹ Cabe destacar que tanto las actividades 1 y 2, como la 6 y la 7, se desarrollaron de forma simultánea por la naturaleza de las mismas. En cuanto a la actividad 11, se sitúa al final de la lista por estar referida a un tema totalmente distinto al resto, aunque se realizó después de la actividad 4.

- d. Pre-procesar los datos en crudo que se obtuvieron, de tal manera que la frecuencia de muestreo fuese igual a la de las condiciones meteorológicas.
 2. Establecer un acuerdo con la agencia estatal de meteorología (AEMET) para recoger las condiciones meteorológicas de la estación meteorológica ubicada en el Campus de Vera de la UPV.
 - a. Analizar y escoger las condiciones meteorológicas disponibles en la estación del Campus de Vera.
 - b. Almacenar las condiciones meteorológicas durante el periodo de tiempo acordado.
 - c. Analizar los datos detalladamente, con el objetivo de detectar y eliminar datos anómalos, derivados de una captura de datos en un entorno cambiante y desde un dispositivo real.
 - d. Pre-procesar los datos en crudo que se obtuvieron, de tal manera que la frecuencia de muestreo fuese igual a la de los parámetros de red.
 3. Estudiar qué tipo de análisis estadístico se puede aplicar sobre los datos.
 - a. Realizar un análisis de las distribuciones de todos los datos almacenados y estudiar los diferentes tipos de análisis estadísticos que se pueden aplicar.
 - b. Seleccionar el análisis estadístico idóneo con el objetivo de determinar su relación estadística.
 - c. Seleccionar el software estadístico que nos permita llevar a cabo dicho análisis y obtener los resultados que se persiguen.
 4. Llevar a cabo el análisis estadístico seleccionado.
 - a. Analizar detalladamente los resultados y extraer los más relevantes.
 - b. Recoger por escrito las conclusiones obtenidas y analizar la fiabilidad de los resultados.
 - c. Analizar los problemas e inconvenientes surgidos de la toma de datos en un entorno cambiante y real.
 5. Diseñar e instalar un radioenlace punto a multipunto para medir el impacto de las condiciones meteorológicas sobre su rendimiento.
 - a. Definir las características requeridas para poder llevar a cabo el estudio.
 - b. Establecer un acuerdo con la empresa Azimut Electronics en Gandía para poder utilizar su sede central como uno de los puntos de conexión del radioenlace.

- c. Solicitar al área de infraestructuras del Campus de Gandia, la utilización de las terrazas de dos edificios del Campus para poder instalar los otros dos puntos de conexión del radioenlace.
 - d. Establecer un acuerdo con la empresa Borja Ópticos Gandia para que nos faciliten los datos meteorológicos de la estación meteorológica que gestiona en la Playa de Gandia.
 - e. Establecer un nuevo acuerdo con el ASIC para poder conectar un punto del radioenlace a la red privada (con objetivos de investigación) del Campus de Gandia.
 - f. Instalar el radioenlace punto a multipunto entre dos edificios del Campus de Gandia y la sede de Azimut Electronics en Gandia.
6. Tomar medidas de rendimiento del radioenlace.
- a. Decidir qué tipo de tráfico generar en el radioenlace y escoger la herramienta necesaria para ello.
 - b. Estudiar y decidir qué parámetros de rendimiento nos permiten extraer los puntos de acceso utilizados.
 - c. Decidir el periodo de toma de medidas y su frecuencia.
 - d. Capturar y almacenar los parámetros de rendimiento con la frecuencia y durante el periodo establecido.
 - e. Analizar los datos detalladamente, con el objetivo de detectar y eliminar datos anómalos, derivados de una captura de datos en un entorno cambiante y desde dispositivos reales.
 - f. Pre-procesar los datos en crudo que se obtuvieron, de tal manera que la frecuencia de muestreo fuese igual a la de las condiciones meteorológicas.
7. Almacenar las condiciones meteorológicas proporcionadas por Borja Ópticos Gandia.
- a. Estudiar y escoger las condiciones meteorológicas disponibles en la estación meteorológica.
 - b. Establecer la frecuencia y el periodo de toma de datos.
 - c. Almacenar mensualmente los datos proporcionados.
 - d. Analizar los datos detalladamente, con el objetivo de detectar y eliminar datos anómalos, derivados de una captura de datos en un entorno cambiante y desde un dispositivo real.
 - e. Pre-procesar los datos en crudo que se obtuvieron, de tal manera que la frecuencia de muestreo fuese igual a la de los parámetros de red.
8. Llevar a cabo el análisis estadístico seleccionado en la actividad 3.

- a. Analizar detalladamente los resultados y extraer los más relevantes.
 - b. Recoger por escrito las conclusiones obtenidas y analizar la fiabilidad de los resultados.
9. Estudiar en qué consisten los protocolos y redes cognitivas.
- a. Analizar los diferentes enfoques plasmados en la literatura y como conseguir el objetivo perseguido.
 - b. Diseñar un algoritmo cognitivo que tenga en cuenta las condiciones meteorológicas del entorno de red para seleccionar sus características de transmisión.
10. Simular el algoritmo diseñado.
- a. Estudiar las herramientas de simulación para este entorno y seleccionar una de ellas.
 - b. Llevar a cabo la simulación y analizar los resultados obtenidos.
 - c. Analizar detalladamente los resultados y extraer los más relevantes.
 - d. Recoger por escrito las conclusiones obtenidas.
11. Estudiar la tasa de absorción de los cuerpos humanos situados próximos a un escenario WLAN.
- a. Medición en un entorno controlado.
 - b. Medición en un entorno abierto.
 - c. Comparación.
 - d. Rendimiento de la red frente a la interferencia producida por los seres humanos.

1.3 Trabajos Previos

La idea de estudiar el impacto de las condiciones meteorológicas sobre las redes inalámbricas exteriores no es nueva. Debido a que éstas utilizan ondas electromagnéticas que viajan por el aire, es obvio pensar que cualquier factor externo que se encuentre en su camino de propagación, puede afectar a su correcta recepción en el receptor. Sin embargo, en el diseño de sistemas inalámbricos, la influencia de las condiciones meteorológicas se considera para los sistemas que funcionan por encima de los 10 GHz.

El grupo de trabajo de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R), ha presentado varias recomendaciones [16] [17] [18], en las que muestra el nivel de atenuación de las señales según su frecuencia de trabajo para diferentes condiciones meteorológicas. De tal manera que estas medidas pueden ser utilizadas por los diseñadores de red para definir los parámetros de transmisión de dichos sistemas inalámbricos.

Por lo tanto, estas recomendaciones son uno de los puntos de partida en la investigación presentada en esta tesis. No obstante, estas recomendaciones están enfocadas al impacto de las condiciones meteorológicas sobre la capa física (nivel de señal), y la investigación de esta tesis se centra en parámetros de rendimiento de capas superiores, cómo puede ser el número de tramas perdidas o el número de tramas erróneas a nivel MAC. En este sentido, no hay ningún trabajo previo que analice directamente el impacto del tiempo sobre el rendimiento de la capa MAC en las redes IEEE 802.11b/g exteriores.

El inicio y la razón principal para llevar a término esta investigación, surgió después de que el grupo de trabajo en el que se ha desarrollado esta tesis, hubiera llevado a cabo diversos trabajos previos sobre este tipo de redes y hubiera instalado un gran número de ellas [19] [20] [21]. Este hecho, supuso un gran conocimiento previo sobre el funcionamiento y rendimiento de estas redes en diferentes entornos [22].

En entornos abiertos [23] [24], se percibió un peor rendimiento bajo condiciones meteorológicas adversas. Continúas desconexiones, pérdidas de paquetes, menor velocidad de transmisión, menor cobertura, etc., fueron algunas de las consecuencias que percibieron los usuarios de las mismas. Los entornos en los que se instalaron estas WLANs, eran especialmente sensibles a fallos de transmisión, ya que estaban orientadas a proteger espacios naturales de gran valor ecológico, frente a los incendios forestales que cada año arrasaron miles de hectáreas en nuestro país. Por lo tanto, las pérdidas de conexión, o transmisiones erróneas y/o fallidas, podían suponer grandes perjuicios para este tipo de aplicaciones.

Del mismo modo, en entornos cerrados [25] [26] [27], se detectó que la movilidad de las personas, su posición y la cantidad de gente en los alrededores de los puntos de acceso, suponían variaciones en el rendimiento de la red desde el punto de vista del usuario. Éste fue el motivo que propició el estudio en profundidad de la tasa de absorción de las ondas radioeléctricas emitidas por las WLANs, por parte del cuerpo humano. Este tema, además de ser un problema de salud pública de primer orden, también es un factor externo a tener en cuenta en el diseño de este tipo de redes según el entorno dónde vayan a ser instaladas.

Hay diversos trabajos que han aportado ideas y conclusiones útiles para la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral, y que en este documento se presenta y desarrollada a lo largo de 7 capítulos. Por lo tanto, todas las obras de apoyo utilizadas para la elaboración de esta tesis, serán referenciadas en los capítulos correspondientes.

1.4 Contribuciones Principales

En este apartado, se va a mostrar un resumen de cada una de las contribuciones científicas derivadas de la investigación de esta tesis doctoral. Estos trabajos, se agrupan en las cuatro grandes áreas de actividades llevadas a cabo: el análisis del impacto del tiempo en un escenario real WLAN IEEE 802.11b/g, el análisis del impacto del tiempo en un radioenlace punto a multipunto IEEE 802.11b/g, el diseño de un algoritmo cognitivo que tenga en cuenta los anteriores análisis para mejorar el desempeño de estas redes, y el estudio de la tasa de absorción de las ondas radioeléctricas por parte del cuerpo humano.

El primer contacto con el análisis del impacto de las condiciones meteorológicas en el rendimiento de las WLANs IEEE 802.11b/g, se recogió en los artículos [28] y [29]. En ellos, se presentaron los resultados obtenidos sobre el análisis llevado a cabo sobre la red exterior del campus de Vera de la UPV. Cuando se realizó este trabajo, este campus disponía de 26 puntos de acceso exteriores repartidos entre los jardines, caminos, y espacios abiertos alrededor de los edificios. En el primer caso [28], se tomaron medidas de rendimiento de la capa de enlace de datos durante dos meses. Para ello, se recogieron los archivos de log de los puntos de acceso, donde quedan registrados todos los estados, eventos y acciones llevados a cabo por ellos. De este modo, se pudo extraer el número de asociaciones, reasociaciones y número máximo de reintentos de conexión, que habían sufrido por hora. A continuación, se calculó el número medio para todos los puntos de acceso externos de la red. Además, se creó un script que contabilizara el número medio de clientes por hora. Por otro lado, se recogieron los datos de temperatura, velocidad del viento y humedad, de la estación meteorológica situada en el propio campus de Vera, y que pertenece a la AEMET. Finalmente, se realizó un análisis estadístico en el que se mostró el nivel de correlación entre los parámetros de red y las condiciones meteorológicas recogidas. En este primer caso, los resultados mostraron un nivel relativamente bajo de correlación entre ambos grupos de datos.

En el segundo estudio [29], se instaló un enlace punto a punto de corto alcance (25 metros), en la terraza de un edificio del campus de Gandia, perteneciente también a la UPV. Se midieron parámetros de calidad de servicio, como son el jitter y el delay periódicamente. Paralelamente, se tomaron medidas de temperatura, humedad y velocidad del viento, y de nuevo se cruzaron los datos mediante un estudio de correlaciones. De nuevo, los resultados no indicaban un claro grado de asociación entre los datos. En estos dos primeros estudios, los resultados no fueron concluyentes. Sin embargo, se pensó que se habían limitado bastaste ambos trabajos, en cuanto al tipo de parámetros de red y condiciones meteorológicas estudiados. Por lo tanto, se decidió continuar y ampliar esta investigación, para intentar explicar el empeoramiento de las prestaciones de red que se percibía como usuarios, bajo condiciones meteorológicas adversas. Se debía encontrar en qué parámetros de rendimiento de red se percibía mayormente tal impacto, y qué condiciones meteorológicas eran las más influyentes.

Por lo tanto, los siguientes trabajos [30] [31] fueron un paso más allá. De nuevo, estos estudios se basaron en la red exterior del Campus de Vera de la UPV. Pero, además de almacenar los archivos de log, se diseñaron y se pusieron en marcha varios scripts, para consultar periódicamente las bases de información de gestión (en inglés: Management Information Base o MIB) de los puntos de acceso, mediante el protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol), obteniendo así nuevos parámetro de red. De tal manera que, se almacenan periódicamente el número de tramas de control y de gestión de la capa MAC, que habían sufrido algún problema durante la transmisión. En cuanto a las condiciones meteorológicas, además de la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, también se recogió la radiación solar global, directa y difusa. Los resultados en ambos trabajo fueron muy exitosos, ya que demostraron varios niveles de correlación significativos (alrededor de 0.5) entre las condiciones meteorológicas estudiadas y los nuevos parámetros de red estudiados (tramas de control). Una de las principales conclusiones de estos

dos estudios fue que en los anteriores trabajos se estaba investigando el impacto del tiempo en parámetros referidos a las tramas de gestión de capa MAC, y realmente estos últimos análisis demostraron que el impacto se percibe principalmente en los parámetros de las tramas de control. Esto es debido a que las tramas de gestión dependen del funcionamiento de los usuarios y, en cambio, las tramas de control, pertenecen al propio funcionamiento del protocolo de capa MAC del punto de acceso. Por lo tanto, las tramas de control están mucho más relacionadas con el rendimiento de dicha capa.

Dos de los problemas importantes que se consideraron al terminar estos cuatro trabajos iniciales, fueron que la frecuencia de muestreo (recogida de datos) era demasiado alta, los datos se promediaron por hora y realmente las condiciones meteorológicas pueden cambiar en pocos minutos y, por otro lado, el propio promediado entre todos los puntos de acceso exteriores introducía demasiado "error" en los datos para el tipo de relación (relativamente sutil) que se estaba buscando.

Por último, otro de los problemas más importante que se encontró, derivado de llevar a cabo la investigación en una red real con usuarios, era si realmente se estaba aislando correctamente el comportamiento humano de los parámetros de rendimiento de red. Obviamente, las redes exteriores presentan un mayor o menor número de usuarios dependiendo de la climatología, por lo tanto, como esta investigación se centra en el número de distintas tramas que se intercambian los puntos de acceso con los usuarios, estos valores se ven afectados por el número de usuarios de la red. De esta manera, el análisis puede detectar un decremento en el número de estas tramas, debido a que disminuye el número de usuarios, y no por problemas de transmisión derivados de unas condiciones meteorológicas adversas.

Es por ello, que se decidió continuar estudiando esta influencia sobre un entorno real, pero totalmente controlado. De este modo, se decidió diseñar e instalar un radioenlace punto a multipunto, en el que sólo hubiera un punto de acceso con dos clientes conectados y situados a diferentes distancias [32]. El objetivo de esta última característica, era comprobar si las distintas tasas de datos de los clientes y, por lo tanto, el tipo de modulación empleado, suponía una mayor o menor influencia de las condiciones meteorológicas en el rendimiento de las transmisiones. Tal como se puede ver en el artículo, los resultados demostraron que en un escenario real controlado, donde el análisis estadístico es mucho más fiable y exacto por las razones citadas anteriormente, los coeficientes de correlación eran incluso mayores que los presentados en los anteriores estudios. Además, se demostró que en los esquemas de modulación más complejos, que permiten mayores tasas de datos (cliente más cercano), a pesar de estar a una menor distancia, se percibe un mayor impacto de las condiciones meteorológicas sobre las transmisiones inalámbricas. Los coeficientes de correlación fueron generalmente más elevados, que en el caso de las transmisiones con el cliente más alejado. Estas conclusiones, fueron de gran importancia para el diseño posterior del algoritmo cognitivo.

Debido a los resultados obtenidos, sobre este escenario se llevaron a cabo dos estudios más, que actualmente se encuentran en proceso de revisión en dos revistas distintas. En el primero de ellos, se aplicó un análisis de regresiones simbólicas, para intentar aproximar los parámetros de rendimiento de red a partir de las condiciones meteorológicas que se produjeron durante la recogida de dichos

parámetros. El objetivo era ver si otro tipo de análisis corroboraba tales relaciones y, de hecho, así ha sido. En el segundo de ellos, se lleva a cabo un análisis estadístico por grupos, de tal manera que se pudiese concluir bajo qué rangos de las condiciones meteorológicas, su impacto sobre el rendimiento de las WLANs IEEE 802.11b/g era mayor o menos. Esta información también fue de gran utilidad para el diseño posterior del algoritmo cognitivo.

Por lo que respecta al desarrollo posterior del algoritmo cognitivo, en primer lugar, se realizó un estudio minucioso de la literatura publicada al respecto, y tal recopilación de conocimiento fue plasmada en el artículo [33]. A partir de todo este conocimiento, se diseñó un algoritmo cognitivo para redes WLANs IEEE 802.11b/g, basado en las investigaciones previas llevadas a cabo sobre el impacto del tiempo en su rendimiento. Este trabajo se encuentra publicado en [34], junto con las simulaciones que se llevaron a cabo para analizar su desempeño, y los resultados y conclusiones obtenidas.

Un trabajo que se llevó a cabo en paralelo con los estudios citados anteriormente, fue el estudio de la tasa de absorción de los cuerpos humanos en un entorno WLAN IEEE 802.11b/g [35]. Se trata de otro factor externo cuyo estudio está limitado en la bibliografía y que, por lo tanto, se consideró que podía ser de gran interés para la comunidad científica.

La tasa de absorción específica (en inglés: Specific Absorption Rate o SAR) se utiliza para medir la exposición de los tejidos del cuerpo a los campos electromagnéticos. En esta investigación, se estudió mediante el indicador de intensidad de señal recibida (en inglés: Received Signal Strength Indicator o RSSI) por los puntos de acceso de la red. Se consideraron dos escenarios: una cámara anecoica y un entorno real cerrado: la biblioteca del campus de Gandia. De esta forma, se estima la cantidad de energía absorbida por las personas según su peso, complejidad física y distancia a los puntos de acceso. Los resultados demostraron que un nivel significativo de señal es absorbido por el cuerpo humano.

1.5 Estructura de la Tesis

Después de ver los aspectos introductorios de esta tesis, las razones que la han motivado, sus objetivos propuestos, las tareas llevadas a cabo para lograrlos, los trabajos previos sobre los que se apoya, y sus principales contribuciones, el resto de la memoria se organiza de la siguiente manera.

En el Capítulo 2, se presenta una revisión detallada del estado del arte de los contenidos principales tratados en esta tesis. En la parte introductoria de este capítulo, se describen cada uno de los temas claves. En primer lugar, se hace referencia al análisis del impacto del tiempo en las ondas electromagnéticas. A continuación, se centra tal impacto en las redes WLAN IEEE 802.11b/g y cómo éste podría ser reducido a través del concepto de red cognitiva. Finalmente, se trata también el impacto de otro factor externo considerado en esta tesis, como es la tasa de absorción de las radiaciones radioeléctricas por parte del cuerpo humano. A continuación, en cada una de las subsecciones de este capítulo, se presentan y resumen los trabajos relacionados más relevantes sobre cada uno de estos temas.

En los siguientes capítulos, se describen exactamente cada una de las investigaciones llevadas a cabo para la consecución de los objetivos de esta tesis. De este modo, en el Capítulo 3 se explican todos los pasos llevados a cabo para analizar la influencia de algunas condiciones meteorológicas, sobre el rendimiento de la red inalámbrica exterior del campus de Vera. Para ello, se detalla la selección del tipo de datos de rendimiento que se consideraron, cómo se ejecutó el proceso de toma de datos, las dificultades y problemas que presentaba dicho entorno, cómo se intentaron resolver y, finalmente, qué tipo de análisis de datos y por qué se llevó a cabo, concluyendo con los resultados obtenidos.

A continuación, el Capítulo 4 detalla el estudio realizado sobre el impacto del tiempo en el rendimiento de un radioenlace punto a multipunto. En este caso, debido a los problemas presentados en el escenario anterior, se requería realizar de nuevo el estudio pero en un entorno totalmente controlado. El objetivo era conseguir un escenario en el que las únicas condiciones que variarían fueran las meteorológicas y, otros parámetros tales como el tipo de tráfico, el tamaño de los paquetes o el número de usuarios, se mantuviese estable y constante en todo momento. De tal manera que cualquier variación en los parámetros de rendimiento de la red, se pudiese justificar única y exclusivamente por las condiciones meteorológicas del entorno. Por lo tanto, los resultados obtenidos fueran más exactos y precisos, aumentando significativamente el grado de fiabilidad del análisis estadístico. Por lo tanto, en este capítulo se detalla el proceso de diseño y puesta en marcha del radioenlace, la justificación de las características escogidas para el mismo, cómo se tomaron las medidas de rendimiento del mismo, y los diferentes tipos de análisis que se realizaron sobre los datos obtenidos. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos en las investigaciones previas, y presentadas en los capítulos anteriores, el Capítulo 5 recoge el proceso de diseño y creación del algoritmo cognitivo propuesto en esta tesis, para reducir el impacto de las condiciones meteorológicas en las redes IEEE 802.11b/g. Además, se recogen todos los aspectos teóricos de las redes cognitivas.

El Capítulo 6 trata un tema que difiere mucho de los anteriores, esa es la razón por la que se ha situado al final de la memoria. Se trata del análisis de la tasa de absorción de las ondas radioeléctricas por parte de los tejidos del cuerpo humano.

Finalmente, en el Capítulo 7 se realiza un resumen que engloba y unifica las conclusiones vistas en cada uno de los capítulos previos, ya que cada uno de ellos dispone de una sección de conclusiones propias. Además, en este capítulo se describen los trabajos futuros que se pretenden realizar, para la continuación de la investigación llevada a cabo en esta tesis.

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Un sistema inalámbrico en el ámbito de las telecomunicaciones, hace referencia a cualquier sistema de comunicación que utiliza ondas electromagnéticas para transferir información de un sitio a otro, sin la necesidad de utilizar cables eléctricos. Entre los más conocidos, se encuentran los sistemas de telefonía móvil y a las redes inalámbricas de ordenadores. Estos sistemas se diferencian entre ellos, principalmente, por el rango de frecuencias en el que trabajan. En concreto, el objeto de estudio de esta tesis, las redes de área local inalámbricas IEEE 802.11b/g, utilizan la banda de frecuencias de 2.4 GHz, ubicada en el rango de las frecuencias de microondas que oscila entre 0.3 y 300 GHz dentro del espectro electromagnético.

Es obvio pensar, que dichas ondas electromagnéticas que viajan a través del aire, pueden verse afectadas por innumerables fenómenos, entre ellos las condiciones meteorológicas [36]. Éstas ocurren en la atmósfera baja y, por lo tanto, las características de la misma varían constantemente. Así su impacto sobre la propagación de las ondas de radio supone variaciones aleatorias en la amplitud, fase, frecuencia, polarización, ancho de banda de coherencia, dispersión por retardo, y dirección de propagación de las ondas. Debido a la aleatoriedad de estos efectos, sólo las estadísticas pueden ayudar al diseño adecuado de los sistemas de comunicación inalámbricos en exteriores.

El grupo de la ITU-R, se encarga de publicar y actualizar periódicamente sus recomendaciones, cuyo objetivo es garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica, del espectro de frecuencias radioeléctricas para todos los sistemas de radio comunicaciones. Estas recomendaciones incluyen varios estudios experimentales, basados en la estadística, que sirven de base para el diseño y puesta en marcha de dichos sistemas.

Los factores que se considera que influyen significativamente en el camino de propagación de este rango de frecuencias son: cualquier obstáculo físico que se

encuentre en su camino de propagación (por ejemplo, un edificio o la propia vegetación del medio) debido a la atenuación que supone el atravesarlos (absorción y dispersión), y a la difracción y propagación multicamino que pueden suponer.

Además de otros sistemas cercanos electromagnéticamente interferentes, que producen un ruido mayor en el medio y, por lo tanto, disminuyen la relación señal a ruido en el receptor (en inglés: Signal to Noise Ratio o SNR). Todos estos factores, dificultan la correcta recepción de la señal en el receptor. Además, otras características del sistema que se consideran importantes son, la distancia de separación entre la antena transmisora y la receptora (a mayor distancia entre ellas, mayor atenuación de la señal), y las pérdidas y ganancias que suponen ambas antenas. Sin embargo, el impacto de todos estos factores se puede minimizar, en la mayoría de los casos, a través de un buen diseño del sistema inalámbrico, adecuándolo al entorno donde se ubica y utilizando los dispositivos más convenientes.

La influencia de las condiciones meteorológicas en las ondas electromagnéticas, puede ser debida a varias causas dependiendo de la condición de que se trate. Pueden suponer absorción y dispersión de la señal (al atravesar gotas de agua, nieve, etc.), introducir ruido en el medio (rayos eléctricos), o difracción de la señal y provocar propagación multicamino (viento con partículas). Además, condiciones como la humedad o la temperatura, pueden afectar directamente a las antenas de transmisión y recepción ya que se trata de dispositivos eléctricos expuestos. Sin embargo, como las condiciones meteorológicas no se pueden aislar en un entorno real, se puede considerar que la influencia del tiempo en los sistemas inalámbricos exteriores es una mezcla de todos ellos.

En los siguientes apartados de este capítulo, se va a presentar una recopilación de los trabajos científicos publicados relacionados con las tres áreas de estudio de esta tesis. En primer lugar, se revisarán los trabajos que traten sobre el impacto de las condiciones meteorológicas en el espectro electromagnético en general y, a continuación, se enfocará en aquellos que se centren en las redes y sistemas IEEE 802.11b/g. En segundo lugar, se verán las investigaciones recientes llevadas a cabo, para aplicar el concepto de cognición a la próxima generación de las redes de datos. Este término, perteneciente al área de la psicología, hace referencia a la capacidad de las personas de adquirir conocimientos, y todas las acciones que ello comporta, como son la capacidad y acción de almacenar, recuperar, reconocer, comprender, organizar y usar la información recibida a través de los sentidos. Por lo tanto, en el ámbito tecnológico de las redes, hace referencia a la capacidad de éstas de percibir y conocer las condiciones de su entorno, y adaptarse tomando ciertas acciones para lograr los objetivos que se hayan decidido. Además, supone el autoaprendizaje y autoconocimiento de las acciones tomadas y las consecuencias derivadas de las mismas para futuras decisiones. Este concepto en detalle y todas sus posibilidades y aplicaciones se verán en el tercer apartado. A continuación, se presentarán los trabajos que han analizado la tasa de absorción específica de los cuerpos humanos expuestos a las radiaciones electromagnéticas. Aunque este concepto está, en primer lugar, relacionado con el ámbito de la medicina y la salud pública, en esta tesis se considera como otro factor externo que indudablemente influye en el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g. Esa es la razón por la que se van a recoger y resumir las principales publicaciones que con-

forman el estado del arte de este objeto de estudio. Finalmente, se verán las conclusiones principales derivadas del estudio del estado del arte presentado en este capítulo.

2.2 Impacto de las Condiciones Meteorológicas en las Redes IEEE 802.11b/g

Para comenzar con los trabajos relacionados con el impacto de las condiciones meteorológicas sobre la banda de frecuencias de 2.4 GHz, es necesario, en primer lugar, hacer referencia a los estudios de la ITU-R [16] [17] [18], que recogen la influencia del tiempo en todas y cada una de las bandas de frecuencias del espectro electromagnético. Dichos estudios recogen el nivel de atenuación de las señales electromagnéticas según la banda de frecuencias en la que son transmitidas.

Sin embargo, dichos trabajos muestran una atenuación de señal muy baja para las frecuencias inferiores a 5 GHz. Esa es seguramente la razón principal por la cual, actualmente, no se considera el efecto de las condiciones meteorológicas para el diseño de las redes IEEE 802.11b/g en entornos abiertos.

Estos trabajos estudian el impacto de las nubes y la niebla [18], los gases atmosféricos [16] y la lluvia [17], en la atenuación de las señales según la banda de frecuencias en la que trabajen los sistemas inalámbricos. Sin embargo, hay otros fenómenos como la presión atmosférica, la velocidad del viento, la humedad, la temperatura, o la temperatura de rocío, que la ITU-R no ha estudiado, pero sí que lo han hecho otros autores, aunque la mayoría de veces sobre frecuencias muy superiores a los 10 GHz.

La mayoría de los trabajos que estudian la influencia de diferentes condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las redes, lo hacen sobre las redes inalámbricas de sensores (en inglés: Wireless Sensor Networks o WSNs) [37] [38] [39]. Estas redes utilizan normalmente el estándar Zigbee IEEE 802.15.4, que aunque presenta unas características muy distintas al estándar IEEE 802.11, trabaja a la misma frecuencia de 2.4 GHz. Por lo tanto, estos estudios pueden considerarse útiles dentro de la presente investigación.

Boano y otros autores [40], analizan el impacto de las altas temperaturas en los nodos de sensores en un entorno industrial. Llegan a la conclusión de que está condición afecta directamente a la comunicación entre ellos, y que se requiere menos potencia de transmisión a bajas temperaturas. Se demuestra que cuanto mayor es la temperatura, menor es la calidad de las transmisiones en los enlaces entre los nodos sensores. Concluyen que es posible ahorrar hasta un 16% de energía durante las noches y los períodos fríos del año, sin dejar de garantizar una comunicación fiable entre los nodos sensores. Finalmente, a partir de los resultados que obtienen, señalan que la temperatura debería de tenerse en cuenta, tanto en el diseño como en el desarrollo de las redes de sensores en entornos industriales. Sin embargo, trabajos previos a éste ya habían alcanzado conclusiones similares en otros ambientes. En un experimento de laboratorio [41] se confirmó la disminución lineal de la fuerza de la señal recibida, cuando las temperaturas se elevaban desde 25°C hasta 65°C. Los autores estimaron el efecto de la disminución en el

rango de cobertura de un nodo, y luego mediante simulaciones mostraron el impacto sobre la conectividad de la red y sus servicios. Además, Baccour y otros autores [42] confirman que la variación temporal de la calidad de los enlaces en las WSNs, se debe en gran medida a los cambios en las características del entorno, como son las condiciones meteorológicas, la presencia humana, y otras interferencias y obstáculos.

La humedad también ha sido considerada, como una condición a tener en cuenta, en las comunicaciones entre nodos sensores en diversos estudios. Thelen y otros autores [43], describen cómo la propagación radio se ve favorecida por la alta humedad, en su despliegue de una WSN en un campo de patatas. Estos autores basan sus conclusiones en un estudio sobre el nodo sensor Mica2Dot [44]. Sus resultados muestran que las ondas de radio se propagan mejor en condiciones de alta humedad, especialmente por la noche y cuando hay lluvia.

En otro trabajo [45] se estudia si la presión atmosférica y la lluvia también afectan a las transmisiones de las WSNs. Los autores de esta investigación, analizan el rendimiento de las transmisiones en términos de la distancia entre los nodos y de las condiciones meteorológicas. Las mediciones meteorológicas se toman desde los propios nodos sensores, ya que éstos llevan incorporados dispositivos de sensado del tiempo. Los resultados demuestran una relación significativa entre el rendimiento de las WSNs y dichas condiciones meteorológicas.

Por último, la investigación publicada en [46], muestra que el alcance de transmisión de los nodos sensores, disminuye significativamente en presencia de niebla o lluvia. Como se puede ver, la mayoría de las obras que relacionan el clima con el rendimiento de las redes inalámbricas, se refieren a las redes de sensores inalámbricos [47], probablemente debido a que son redes que se despliegan para un gran número de aplicaciones al aire libre.

En cuanto al impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g, hay muy pocos estudios al respecto en la literatura. Probablemente, esto se deba a las conclusiones de la ITU-R, pero sobre todo por su principal aplicación en entornos interiores, donde las condiciones meteorológicas no tienen cabida. No obstante, se pueden encontrar algunos.

En la publicación [48], sus autores despliegan un banco de pruebas compuesto por un radioenlace inalámbrico de larga distancia, y llevan a cabo un análisis de datos con el objetivo de analizar el impacto de algunas condiciones ambientales en su rendimiento. Sus resultados muestran que la lluvia es el atributo que más afecta al rendimiento de la red. Pero, también destacan la influencia de la humedad. Además, muestran que el rendimiento está altamente correlacionado con el tipo de actividades llevadas a cabo por las personas en las intermediaciones de la red. Así, proponen inferir en las rutinas diarias de las personas en su campus universitario, mediante la explotación de los datos de medición a largo plazo, con el fin de mejorar el rendimiento de su red. Sin embargo, la investigación de Ohshima y otros autores [45] difiere de la conclusión anterior. Realizaron una investigación similar sobre una red de sensores que trabajaba bajo el estándar IEEE 802.11b/g. En su estudio, llegan a la conclusión de que es la humedad el factor que más afecta al rendimiento de los enlaces inalámbricos.

Estas diferentes conclusiones son muy comunes en este tipo de investigaciones experimentales, basadas en bancos de pruebas reales, y se deben a que las condiciones meteorológicas son muy variantes de una latitud a otra de la Tierra. El estudio del impacto del tiempo en una determinada zona depende en gran medida del clima general de esa área (por ejemplo, húmedo o seco, tropical o mediterráneo, etc.), y de la época del año en la que se lleve a término. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las condiciones meteorológicas tienen una fuerte correlación entre sí y, por lo tanto, concluir que la condición que más afecta al rendimiento de las redes es la lluvia, es similar a decir que la que más afecta es la humedad, ya que ambas condiciones están muy relacionadas.

Todos los trabajos presentados, que muestran la influencia del tiempo sobre el rendimiento de las redes que funcionan bajo el estándar IEEE 802.11 (WLAN) o el IEEE 802.15.4 (WSN), junto con la experiencia como grupo de investigación en cuanto al rendimiento de este tipo de redes en entornos abiertos, nos hicieron sospechar que, a pesar de que los estudios de la ITU-R muestran una ligera atenuación de las señales en frecuencias inferiores a los 5-10 GHz, posiblemente en parámetros de rendimiento de capas superiores se pudiera percibir más claramente tal impacto.

Hay que resaltar que, aunque las WSNs y la mayoría de WLANs trabajan en la misma banda de frecuencias de 2.4 GHz, y se considera que el impacto de las condiciones meteorológicas en las señales de radio depende en gran medida de rango de frecuencias, las WSNs se componen de enlace inalámbricos de baja potencia, lo que podría determinar un mayor impacto de las condiciones meteorológicas. Sin embargo, tales enlaces son más cortos y esto también podría suponer una ventaja en las transmisiones. Por el contrario, las redes IEEE 802.11b/g pueden trabajar a mayores potencias, ya que no tienen baterías limitadas, pero pueden cubrir también mayores distancias, lo cual podría poner en peligro la comunicación y aumentar el "nivel" del impacto de las condiciones meteorológicas.

Los estudios presentados en este apartado presentan ciertas limitaciones. En primer lugar, realizan mediciones en enlaces de corto o largo alcance, pero no los llevan a cabo de forma simultánea en el mismo entorno. Por lo tanto, no pueden extraer conclusiones acerca de cómo la distancia afecta al impacto del tiempo sobre las comunicaciones. Además, la distancia determina el tipo de modulación y la tasa de datos de las transmisiones, y estas dos características también pueden suponer un mayor o menor impacto de las condiciones meteorológicas. Por eso, todos estos factores han sido estudiados y presentados en los próximos capítulos de esta tesis. Además, el análisis de estos factores podría determinar las características de transmisión óptimas para futuras redes IEEE 802.11b/g en entornos abiertos. Por otro lado, la mayoría de los estudios comentados toman medidas de manera intermitente durante periodos de tiempo relativamente cortos. También, la mayoría de ellos están centrados en el nivel físico de las transmisiones, y no consideran otros parámetros de rendimiento de capas superiores, cómo puede ser el número de tramas erróneas o perdidas. Por último, otros trabajos analizan cómo algunas condiciones climáticas afectan a los enlaces de radio, pero sólo bajo simulaciones [49] sin considerar escenarios prácticos reales. Por el contrario, una parte del trabajo de esta tesis, evalúa un enlace punto a multipunto donde se consideran dos distancias diferentes, durante un período continuo de tiempo de 6 meses, por lo que se tiene en

cuenta las variaciones estacionales y diarias del tiempo, y se realizan mediciones de rendimiento sobre parámetros de red diferentes de nivel físico. Por último, las mediciones se basan en distintos escenarios IEEE 802.11b/g, pero todos ellos reales.

Esta tesis surge de la necesidad de comprobar si, efectivamente, tal como se puede deducir de los estudios de la ITU-R, la influencia de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las WLAN IEEE 802.11 es tan baja como para considerarla despreciable. Y, tal como se ha dicho anteriormente, este interés surge dentro del grupo de investigación en el que se desarrolla esta tesis, después de diseñar y desplegar varias WLANs, y percibir un empeoramiento del rendimiento bajo condiciones meteorológicas adversas.

2.3 Redes Cognitivas Energéticamente Eficientes

Uno de los principales objetivos de las comunicaciones inalámbricas energéticamente eficientes, es reducir el consumo de energía durante la transmisión de paquetes. Además, el ahorro de energía es uno de los temas más importantes en los dispositivos inalámbricos que basan su funcionamiento en baterías limitadas. Actualmente, una gran mayoría de dispositivos portátiles y móviles están equipados con adaptadores WLAN IEEE 802.11, y estudios recientes han demostrado que la interfaz WLAN es una de las principales fuentes de consumo de energía en un dispositivo móvil [50].

Hay varias maneras de reducir el consumo de energía en la transmisión de paquetes. Una de las variables más utilizada es el tamaño del paquete, pero requiere algunas consideraciones. Por un lado, está directamente relacionado con el tiempo de transmisión de tal manera que cuanto menor sea el tamaño, menor tiempo de transmisión es requerido y, por lo tanto, también se reduce el consumo de energía. Por lo tanto, aunque la fragmentación de paquetes en los puntos de acceso podría ser una forma de mejorar la eficiencia energética [51], también implica un mayor número de transmisiones para enviar el mismo volumen de datos. Además, para tamaños de paquetes pequeños, la sobrecarga relacionada con las cabeceras MAC se vuelve un problema importante, así como la mayor cantidad de tráfico de control que también supone. Obviamente, esto conduce a un aumento en la potencia consumida. Sin embargo, hay que tener en cuenta también que los paquetes más pequeños son menos propensos a experimentar colisiones [52] y, en consecuencia, se reduce el número de retransmisiones y la cantidad de tráfico de control intercambiado, lo que supone un menor consumo de energía. Por lo tanto, el hecho de basar la eficiencia energética en esta variable, conlleva buscar un equilibrio entre los pros y los contras de cada caso y adaptarlo según las necesidades u objetivos de la red. Esa es la razón por la que la eficiencia, desde el punto de vista del tamaño del paquete, ha sido analizada en diversos trabajos.

En [53], los autores analizan la eficiencia energética para redes IEEE 802.11b multialto utilizando el simulador NS-3. Los autores muestran que la eficiencia energética disminuye a medida que el tamaño del paquete transmitido aumenta. Ellos concluyen que el valor del consumo de energía crece linealmente con el aumento del tamaño de los paquetes que se envían. Sin embargo, el número de paquetes enviados es constante (10.000 paquetes) en sus simulaciones y sólo

cambia el tamaño del paquete. Por lo tanto, la sobrecarga de la capa MAC, el número de transmisiones y el tráfico de control generado, no se consideran como variables debido a que el número de paquetes es siempre el mismo. Por lo tanto, no están analizando un escenario WLAN real, ya que la fragmentación de paquetes no es tenida en cuenta.

Teniendo en cuenta estos aspectos, otro trabajo [54] relaciona el consumo de energía de los dispositivos WLAN IEEE 802.11g a la cantidad de tráfico enviado/recibido por el nodo, a la modulación y esquemas de codificación utilizados, y al tamaño de las unidades de datos a nivel de sesión. En este trabajo se confirma mediante mediciones experimentales, que realmente tanto paquetes extremadamente grandes, como paquetes pequeños implican un mayor consumo de energía. Esto es debido a la sobrecarga introducida por la capa MAC en paquetes pequeños y la fragmentación en paquetes grandes. En este trabajo los autores llegan a la conclusión de que los paquetes cuyo tamaño oscila entre 1024 y 2048 bytes, son los que menor consumo energético suponen.

Como las investigaciones ya mencionadas, la longitud de trama en la capa MAC presenta los mismos problemas. Sweedy y otros autores [55] evalúan el protocolo MAC IEEE 802.11 según la longitud de trama, la fragmentación y el mecanismo RTS/CTS. En este estudio se llega a la conclusión de que, aunque el proceso de fragmentación implica un mayor intercambio de tráfico de control (un ACK por fragmento) y un mayor tiempo de transmisión (más intervalos de espera SIFS), la probabilidad de ocurrencia de una colisión es cada vez menor conforme los fragmentos son más pequeños ya que el medio está menos tiempo ocupado. Otra ventaja del proceso de fragmentación es que si un fragmento se pierde debido a las colisiones, éste es el único que es retransmitido en lugar de toda la trama. Por lo tanto, en este trabajo se considera que la fragmentación mejora la eficiencia energética del sistema.

Otro trabajo [56] realiza mediciones en una WLAN con el fin de estudiar el rendimiento y la eficiencia de energía, de acuerdo con el tamaño del paquete y la carga ofrecida a nivel de aplicación. Los autores demuestran que la transmisión de flujos de datos a bajas tasas de datos y con tamaños de paquetes pequeños no es energéticamente eficiente. Por lo tanto, proponen que si una aplicación funciona en un escenario de bajo retardo y/o de bajas pérdidas, los parámetros de funcionamiento de la aplicación deberían adaptarse, aumentando el tamaño del paquete para mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, si se encuentra en un escenario con altas pérdidas de paquetes, esto se podría corregir reajustando la construcción del flujo para lograr un mejor equilibrio entre la energía consumida y el rendimiento de la red.

Krishnan y otros autores [57] aplican un modelo completo de la pérdida de paquete y proponen un algoritmo local de adaptación de la longitud del paquete, de modo que cada nodo ajusta dinámicamente la longitud de los paquetes basándose en estimaciones de probabilidad de cada tipo significativo de pérdida de paquete. En su técnica, el punto de acceso difunde periódicamente información de ocupación del canal, y cada nodo la utiliza conjuntamente con sus propias observaciones locales, con el fin de estimar las condiciones actuales de la red. Estas condiciones se

utilizan para estimar la derivada del rendimiento con respecto a la longitud del paquete en cada nodo en las condiciones actuales de la red y para adaptar las longitudes de los paquetes en consecuencia. Las simulaciones de esta técnica demuestran ganancias de rendimiento de hasta el 20% a través del simulador NS-2, y así alcanzan un mayor rendimiento de la eficiencia energética de la red.

Un análisis sobre el impacto del desvanecimiento del canal, y las colisiones directas en los paquetes de la capa MAC en las redes IEEE 802.11 WLAN se presenta en [58]. Los autores concluyen que, por un lado se prefiere un tamaño de paquete grande para minimizar la sobrecarga de cabeceras del protocolo, pero, por otro lado, ante la presencia de terminales ocultos, se requieren paquetes de pequeño tamaño para reducir las pérdidas, debido tanto a desvanecimientos en el canal como a las propias colisiones. Por lo tanto, los autores proponen un algoritmo iterativo para buscar el tamaño óptimo de los paquetes a fin de lograr un equilibrio razonable para minimizar los gastos generales de cabecera, los errores por desvanecimiento y las colisiones, mejorando así la eficiencia energética de la red.

Un algoritmo para la predicción de la longitud de trama óptima en el sistema de envío de acuerdo con las condiciones del canal se presenta en [59]. Esta propuesta se basa en que la elección óptima debería encontrarse entre dos tendencias opuestas. Por un lado, para un canal de comunicación libre de errores, el aumento de la longitud de los datos de usuario promueve la eficiencia del canal debido al aumento de la proporción del tamaño de carga útil respecto a la longitud total del paquete; y para un canal de comunicación con una alta tasa de errores, el aumento de la longitud de los datos de usuario disminuye la eficiencia del canal, como resultado de la retransmisión de tramas erróneas.

Serrano y otros [60] han llevado a cabo un completo análisis de medidas del consumo de energía de los dispositivos IEEE 802.11, que proporciona una anatomía detallada del consumo por paquete y caracteriza el consumo total del dispositivo, y no sólo de su interfaz inalámbrica. Este trabajo revela que una fracción sustancial de la energía se consume cuando los paquetes atraviesan la pila de protocolos y la llaman factor de cruce (en inglés: cross-factor). Este estudio concluye que la energía consumida por este tipo de operaciones a través de la pila de protocolos, no depende del tamaño del paquete, en contraposición con lo que ocurre con las operaciones propias de red, como se ha visto en los trabajos citados anteriormente.

Otro enfoque para reducir el tiempo de transmisión y así el consumo de energía, es asociar un punto de acceso a mayores tasas de datos [61]. Sin embargo, esto implica el uso de modulaciones y esquemas de codificación menos robustos, lo que puede resultar en una mayor tasa de errores para condiciones pobres del canal. Además, si se pierde un paquete, la retransmisión también consume energía. Por lo tanto, la identificación de la tasa de datos más eficiente, que minimice la tasa de pérdida de paquetes y el tiempo de transmisión, es un tema de investigación muy importante. Varios trabajos han estudiado este tema [62], seleccionando diferentes tasas de datos eficientes para distintos supuestos y escenarios para una optimización multi-objetivo [63].

Como se puede ver, el consumo de energía o la eficiencia energética de las redes WLAN IEEE 802.11 se ha estudiado ampliamente, y hay varios estudios

que enfocan este problema desde el punto de vista de la longitud de los fragmentos (proceso de fragmentación en la capa MAC) y en la tasa de datos de los datos utilizada en la capa física. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, se requiere un compromiso entre la reducción del tiempo de transmisión a través de tramas pequeñas y el aumento de sobrecarga por la cabecera MAC que esto supone. Por otra parte, esto siempre depende de las condiciones del canal, pues a medida que se producen más retransmisiones y tráfico de datos de control, también disminuye la eficiencia energética.

Con el fin de mejorar el ahorro de energía en las redes WLAN IEEE 802.11 al aire libre, esta tesis propone un algoritmo cognitivo energéticamente eficiente, basado en los estudios sobre el impacto de las condiciones meteorológicas en el número de errores y retransmisiones del tráfico de control de la capa MAC. Este algoritmo está enfocado en la conservación de la energía al minimizar tales retransmisiones y fallos durante las transmisiones de datos al aire libre. Se basa en un bucle cognitivo que permite adaptar la tasa de datos utilizada y la longitud de los fragmentos para superar los problemas causados en el canal por las condiciones meteorológicas. Este es un problema actual ya que el número de redes inalámbricas en exteriores no para de crecer, al igual que lo hace el número de dispositivos portátiles con interfaces IEEE 802.11.

Respecto al aspecto cognitivo del algoritmo, hay que decir que en los últimos años la mayoría de estudios se han centrado en la parte de la radio cognitiva. Los diferentes aspectos que se tratan al respecto son: la gestión dinámica de los recursos del espectro [64], el acceso al medio cooperativo y las comunicaciones cooperativas [65], la conmutación oportunista entre las redes inalámbricas disponibles (celular, WLAN, malla, etc.) [66] y la selección adaptativa de los recursos de radio disponibles [67] [68], entre otros. Sin embargo, al mismo tiempo, un pequeño número de trabajos de investigación han estudiado la arquitectura de las redes cognitivas (en inglés: Cognitive Networks o CNs) como un todo, con el fin de ampliar este concepto en las redes e ir mucho más allá de simplemente el aspecto radio de las comunicaciones.

Probablemente, la primera vez que se habló de las CNs como tal fue en los años 2002-2003, cuando Clark y otros autores describieron el paradigma del plano de conocimiento para la creación de las redes cognitivas [69] [70]. También Dietterich y otros autores [71] examinaron varios aspectos de la máquina de aprendizaje (machine learning), elemento fundamental para el enfoque cognitivo de las redes. Sin embargo, previamente, Mitola [72] habló de este tipo de redes en su tesis enfocada en la radio cognitiva, ya que consideraba a las redes cognitivas como una extensión o evolución natural de la radio cognitiva. Sin embargo, no detalló nada en este sentido. A continuación, la visión de las redes cognitivas de la agencia de proyectos de investigación avanzados de defensa de los EE.UU (en inglés: The Defense Advanced Research Projects Agency o DARPA) fue presentada por C. Ramming [73] en DarpaTech 2004. A partir de estas primeras obras, la Unión Europea informó de los últimos avances en materia de comunicaciones, donde se incluyó la creación de redes cognitivas como un campo de investigación de futuro [74] en 2005. Por último, el concepto de redes cognitivas quedó completamente definida por Ryan W. Thomas y otros autores en diferentes trabajos, en los que explicaron el concepto de red cognitiva a fondo [75], aclararon la utilidad y la necesidad de las redes cognitivas

[76], y algunas posibles aplicaciones de esta tecnología [77]. Por otra parte, también detallaron un posible marco de trabajo para desplegarlas y presentaron una discusión práctica sobre sus implementaciones [78].

Otros autores [79] proporcionan un estudio de los mecanismos de conocimiento de la situación en las redes de telecomunicaciones, sobre la base esencial del esfuerzo del proyecto de investigación Self-NET [80]. Muestran que el término "conciencia situacional" (en inglés: Situation Awareness o SA) se refiere principalmente a la recogida de información suficiente sobre el entorno y el estado operativo de un sistema, que es un requisito previo "vital" para la posterior toma de decisiones adecuadas y procedimientos de ejecución relacionados. Por otra parte, los autores presentan el marco fundamental para la estructuración apropiada de los mecanismos SA, con el fin de lograr un sistema de gestión de red activa a partir de los elementos de la red con capacidad de acción autónoma, mediante el uso de los conocimientos locales y políticas definidas por el operador. Este marco puede ser útil para investigadores en la creación de arquitecturas de redes cognitivas.

Otro trabajo [81] presenta una plataforma reconfigurable basada en una arquitectura diseñada específicamente para los nodos dentro de una red cognitiva. Esta arquitectura se basa en un nodo adaptable llamado "nodo reconfigurable". Este nodo es capaz de realizar las observaciones a nivel de nodo y de red, requeridas por el motor cognitivo, y responder con las instrucciones y las configuraciones necesarias para el nodo cognitivo. Por último, en esta arquitectura se definen tres tipos de acciones que puede hacer el nodo reconfigurable cuando necesita dar respuesta a algún efecto externo: reconfiguración paramétrica, estructural y de aplicación.

A continuación, algunas propuestas concretas para implementar redes cognitivas desde diferentes aspectos, han sido presentadas en diferentes artículos. Uno de ellos [82] muestra un protocolo de enrutamiento multicast orientado a la red cognitiva. Se llama CogMRT y se centró en el desarrollo de protocolos cognitivos para redes cableadas cognitivas. Es un protocolo distribuido en el que cada nodo mantiene información local y el enrutamiento está enfocado en el modo salto a salto. Este protocolo aplica el algoritmo co-evolutivo competitivo para la construcción del árbol multicast. Los autores evalúan CogMRT y muestran que tiene importantes ventajas basadas en el aspecto cognitivo del mismo.

Zhang y otros [83] proponen un protocolo de enrutamiento estable (en inglés: Stable Routing Protocol o SRP) para las redes cognitivas. Este protocolo está enfocado en predecir el tiempo durante el cual cada enlace estará disponible y elige aquel con un mayor tiempo disponible, ya que se considera el enlace más estable. La idea clave es que los emisores transmiten los paquetes de datos en el medio, y los retransmisores con más tiempo disponible, mejor calidad del enlace y con baja carga se encargan de su retransmisión. Cada emisor en SRP trata de empujar el paquete hacia el destino. La evaluación de este protocolo indica su buen funcionamiento en términos de throughput y de retardo de extremo a extremo, con el mecanismo de predicción de la disponibilidad de los enlaces, de su calidad y de la carga de los nodos.

Otra propuesta hace uso de las redes cognitivas para mejorar el comportamiento de la capacidad multicast [84]. Su modelo de red se compone de una red

primaria híbrida (en inglés: Primary Hybrid Network o PhN) y de una red secundaria ad-hoc (en inglés: Secondary Ad-Hoc Network o SaN). Los autores idean la zona de protección dinámica (en inglés: Protection Area o PA) para cada nodo primario de acuerdo con la estrategia adoptada en la red híbrida primaria. Sobre la base de las áreas protegidas, diseñan las estrategias multicast para la red secundaria ad-hoc. Bajo la condición previa de que la SaN no debería tener ningún impacto negativo en rendimiento de la PhN, su estrategia tiene los siguientes méritos: a) la capacidad óptima para la SaN se puede lograr en algunos casos, b) los nodos secundarios pueden acceder de forma oportunista al espectro tanto desde el dominio del tiempo como del espacio y c) todos los usuarios secundarios pueden ser servidos, salvo algunos casos.

Una gran cantidad de trabajos relacionados con las redes inalámbricas están centrandose sus investigaciones en utilizar técnicas cognitivas para mejorar su comportamiento. Por ejemplo, en [85] se propone una arquitectura de acceso inalámbrico basado en el concepto de la cognición con el fin de ayudar a que los operadores de red resuelvan el problema de la asignación de servicio. A esta arquitectura se conoce como smartA. Los autores consideran un segmento de red típico, pero introduciendo el concepto de punto de acceso principal, que permite al operador de red definir los objetivos del sistema extremo a extremo, y que permite al usuario seleccionar los servicios deseados, el valor de estos servicios y recibir notificaciones significativas en el caso de que el sistema falle. Los autores abordan el problema e identifican la tecnología adecuada para la traducción de los requisitos de aplicación en requisitos de red. A continuación, se presenta una evaluación inicial del motor de asignación, un componente del smartA que es responsable de asignar óptimamente los servicios que se entregarán por los interfaces de acceso de radio. Este motor utiliza técnicas de optimización multi-objetivo para reducir al mínimo el costo monetario y maximizar la satisfacción del usuario.

Otros autores utilizan las redes cognitivas para crear una solución que mejore el control de admisión de llamadas (en inglés: Call Admission Control o CAC), para garantizar cierta calidad de servicio (en inglés: Quality of Service o QoS) en las redes inalámbricas [86]. Presentan una clasificación de los diferentes métodos de implementar las políticas CAC en contextos de redes cognitivas. Los autores muestran los modelos conceptuales para el control de admisión de llamadas conjuntamente con la optimización cross-layer. Además, el beneficio de la cognición sólo puede realizarse plenamente, si los requisitos de la aplicación y los contextos de flujo de tráfico se determinan, para saber qué modos de operación y bandas de frecuencia se deben utilizar en cada momento. Debido a que puede haber un número de parámetros en diferentes niveles que afectan a una decisión CAC y las condiciones para aceptar o rechazar una llamada deben ser calculadas de forma rápida y con frecuencia, la sencillez y la viabilidad son particularmente importantes para el diseño de un algoritmo de CAC factible. Este trabajo considera que una comprensión más profunda del CAC en las redes cognitivas inalámbricas heterogéneas, puede ayudar a un mejor diseño de los algoritmos CAC.

Siguiendo con las redes inalámbricas, se presenta una arquitectura de enrutamiento multicamino diseñada en el marco de las redes cognitivas (en inglés: Cognitive Multipath Rounting o CMR), para mejorar la QoS de las misiones críticas multisalto en redes inalámbricas [87]. La implementación CMR utiliza el protocolo

de gestión de camino múltiple (en inglés: Multiple Path Management Protocol o MP2) mediante el aprovechamiento de las funciones, las interfaces y las estructuras de datos existentes para redes adaptables, y la interfaz de usuario modifica el protocolo para ajustarse a la arquitectura del bucle de cognición, e incorporar el proceso de aprendizaje. El proceso de aprendizaje se compone principalmente de un modelo de red y simula los estados pasados y futuros de la red, con el que comparar los umbrales e identificar tendencias. Esta implementación se ha simulado y su análisis resultó en una mejora significativa de rendimiento.

Finalmente, se aplica el paradigma de redes cognitivas para el desarrollo de puntos de acceso autónomos cognitivos (CogAP) [88] en redes inalámbricas a pequeña escala. En primer lugar, los autores presentan la arquitectura CogAP autónoma. Luego, introducen su solución algorítmica, en el que un predictor de tráfico basado en una red neuronal hace uso de la traza del tráfico histórico, para aprender las condiciones de tráfico de la red y predecir las cargas de tráfico en cada uno de los canales IEEE 802.11b/g. El motor de decisión cognitivo hace uso de las previsiones de tráfico para decidir de forma dinámica qué canal es el mejor en CogAP para operar durante el servicio a sus clientes. Los autores de esta arquitectura han construido un prototipo de dispositivo y han llevado a cabo la evaluación del desempeño de su sistema. Los resultados obtenidos muestran que su propuesta mejora significativamente el rendimiento, en comparación con las estrategias de selección de canal de las tecnologías de última generación.

2.4 SAR: Tasa de Absorción Específica

La SAR se utiliza para medir la exposición de los tejidos del cuerpo a campos electromagnéticos. Debido a la importancia de este concepto en términos de salud pública, la literatura en este campo es bastante abundante. Hay algunos trabajos que presentan investigaciones experimentales o mediante simulaciones para medir la influencia del cuerpo humano en la propagación de las ondas electromagnéticas, en concreto lo que se conoce como la sombra del cuerpo humano en la propagación inalámbrica (en inglés: the effect of human-body shadowing).

Bahillo y otros [89] evalúan cómo el cuerpo humano afecta al campo electromagnético en los sistemas de localización actuales basados en la RSS. El medidor RSS siempre lo sujeta una persona, por lo que este trabajo se basa en la idea de que este hecho introduce errores en las medidas. Actualmente, no se tienen en cuenta estos errores. Con el fin de llevar a cabo este estudio, simularon el cuerpo humano con el método FDTD (finite-difference time-domain). Las frecuencias consideradas fueron 900 MHz, 1800 MHz y 2400 MHz, y para diferentes ángulos de azimut (de 0 a 180 grados), ya que la orientación del medidor RSS puede variar. Las simulaciones muestran el nivel de potencia de la onda incidente del medidor RSS inalámbrico antes y después de atravesar el cuerpo humano. Los resultados ilustran una variación significativa entre ambas medidas. Esto demuestra la absorción de potencia que tiene el cuerpo humano. A continuación, esta conclusión es corroborada en un entorno experimental al aire libre y un cuerpo humano real. Este artículo concluye que el medidor RSS da 15 dB (en media) menos que la onda incidente cuando la persona que lo sujeta le da la espalda al emisor pero, por el contrario, da el mismo nivel de señal cuando la persona se encuentra frente a él.

Otro trabajo interesante [90] analiza el efecto de la sombra humana sobre aplicaciones de vídeo streaming en una red IEEE 802.11b. La calidad del streaming de vídeo se mide en función del tráfico humano en diferentes lugares interiores y variando las distancias al punto de acceso. Los resultados obtenidos concluyen que cuanto mayor es el tráfico humano más degradación sobre la calidad del vídeo se produce.

En el campo de la medicina, hay un trabajo publicado que estudia la influencia del campo electromagnético y la SAR, mediante la implantación de un dispositivo médico activo en la cabeza llamado implante coclear [91]. Los autores de este trabajo simulan una cabeza con y sin el implante coclear durante la exposición a frecuencias WLAN y, a continuación, comparan los dos resultados. Este trabajo considera tanto la polarización vertical como la horizontal de la onda incidente en las simulaciones. La principal conclusión es que cerca del implante coclear de la cabeza, el campo electromagnético y la distribución de SAR varían moderadamente. Esto es más significativo en las frecuencias más bajas. Sin embargo, los valores medios de SAR no muestran variaciones entre las simulaciones con o sin implante.

Por otro lado, varias organizaciones importantes han establecido directrices en las que están recogidos los límites máximos de exposición a la energía de las frecuencias radio para los seres humano. Estos documentos son muy necesarios para la salud pública, especialmente para los fabricantes de dispositivos electrónicos y los investigadores en el área de la medicina. Por ejemplo, la Oficina Federal Suiza de Salud Pública (en inglés: The Swiss Federal Office of Public Health o BAG) pidió a la Fundación para la Investigación sobre Tecnologías de la Información en la Sociedad (en inglés: The Foundation for Research on Information Technologies in Society o IT'IS Foundation), realizar un estudio sobre la exposición a los campos electromagnéticos de las comunicaciones de datos inalámbricas en dispositivos de hasta 6 GHz [92]. El estándar IEEE C95.1 [93] ofrece recomendaciones sobre los límites máximos de exposición para garantizar la seguridad y la salud de las personas expuestas a campos electromagnéticos entre 3 kHz a 300 GHz. En él se explica cada parámetro relacionado en detalle, comenta los factores de seguridad, procedimientos de medición, etc., para dos tipos de entornos: controlados y sin control.

Otras referencias importantes son las Recomendaciones del Consejo Nacional de Protección Radiológica y Medidas (en inglés: The National Council on Radiation Protection and Measurements o NCRP) de los EE.UU y el Consejo Nacional de Protección Radiológica (en inglés: The National Radiation Protection Board o NRPB) del Reino Unido. Por último, la comisión federal de las comunicaciones de los EE.UU (en inglés: Federal Communications Commission o FCC) redactó una guía [94] basada en las recomendaciones de la NCRP, cuyo objetivo es proteger a los trabajadores y a la población en general de los campos de frecuencias electromagnéticas. En EE.UU, de acuerdo a la Ley Nacional de Política Medioambiental de 1969, la FCC tiene responsabilidad legal para hacerlo, por lo que garantiza que los dispositivos inalámbricos que siguen su normativa, cumplen con los límites de exposición máximos permitidos. Europea y otros países siguen sus propias normativas y reglamentos, en la Comunidad Europea se aplica la Directiva 1999/5/EC [95] y la guía ICNIRP [96].

Todas estas guías diferencian entre los límites de exposición para la población en general en un entorno no controlado y para trabajadores en entornos controlados. En general, en un entorno no controlado los límites máximos permitidos son mucho más bajos que en un entorno controlado. Otra clave importante de estas directrices, es la distinción que hacen entre la exposición de todo el cuerpo o de una pequeña área particular del cuerpo, debido a que estos valores cambian considerablemente. Sin embargo, todas ellas concluyen que la exposición a la energía de los campos electromagnéticos es segura si se respetan dichos límites SAR.

En el Capítulo 6, se va a estimar el nivel medio de señal absorbido por una persona en distintos escenarios reales. El objetivo es analizar si el número de personas, su posición y su composición corporal es determinante para el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g, y deberían ser elementos a tener en cuenta en el diseño y despliegue de este tipo de redes.

2.5 Conclusión

En este capítulo se ha analizado en detalle el estado del arte de todos los puntos tratados y desarrollados en esta tesis. En primer lugar se ha visto una pequeña introducción, donde se ha resumido cómo el rendimiento de un sistema de comunicación inalámbrico exterior puede verse afectado por diferentes factores. A continuación, el primer apartado de este capítulo se ha enfocado en los trabajos que se pueden encontrar en la literatura científica, sobre cómo las condiciones meteorológicas influyen en la propagación de las señales radio. Y aunque como se ha visto existen muy pocos, al final del apartado se han resumido las conclusiones de algunos estudios sobre el impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g. En el segundo apartado, se han presentado las investigaciones más importantes desde que apareció el concepto de cognición en redes, hasta el día de hoy. Estos trabajos relacionados son muy importante en esta tesis, porque sirven como base para el desarrollo del algoritmo cognitivo diseñado y simulado en el Capítulo 5. Finalmente, en el Capítulo 4 se han visto las investigaciones más importantes llevadas a cabo sobre la influencias de las ondas electromagnéticas en los cuerpos humanos. La tasa de absorción que tienen las personas es muy importante especialmente en el campo de la medicina, pero tampoco es despreciable en cuanto al diseño y despliegue de redes inalámbricas, ya que supone una absorción de potencia considerable. Tal absorción depende de la posición, composición corporal y cantidad de personas en las inmediaciones de los puntos de acceso.

MEDICIÓN DEL IMPACTO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA RED INALÁMBRICA DE LA UPV

3.1 Introducción

En este capítulo, se va a presentar la primera investigación llevada a cabo para medir y conocer el impacto del tiempo en las redes IEEE 802.11b/g. Dicho estudio está desarrollado sobre la red inalámbrica exterior del campus de Vera de la UPV. Por lo tanto, se trata de un banco de pruebas real, en el que el tráfico transmitido no es constante y cuya distribución es la propia dada en una red universitaria. Además, hay que tener en cuenta los problemas y percances de los dispositivos reales en este tipo de entornos, y que los usuarios obviamente tienen un comportamiento espontáneo y aleatorio. Por lo tanto, se trata de un entorno poco controlado y cambiante.

Aunque, como se ha visto antes, existen variantes más recientes como IEEE 802.11n o IEEE 802.11ac, gran parte del hardware disponible para implementarlas todavía no soporta la MIB 802.11. Por lo tanto, llevar a cabo esta investigación en cualquier otra variante más reciente, no fue posible debido a las limitaciones del hardware. Además, la principal diferencia entre la variante IEEE 802.11n, cada día más utilizada, y la IEEE 802.11b/g, es que la primera permite un ancho de banda mucho mayor debido a la tecnología MIMO. Esta tecnología permite la transmisión simultánea de señales, debido a la utilización de múltiples antenas. Sin embargo, esta última característica no se considera relevante para esta investigación, ya que el impacto del tiempo es independiente de si los datos se transmiten en un único flujo de datos o en varios en paralelo. Sin embargo, lo que es realmente decisivo, es analizar cómo influye el esquema de modulación y la tecnología física en el impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las redes, y estos son comunes. Además, otra diferencia fundamental es la banda de operación que utilizan. IEEE 802.11n opera tanto en la banda de 2.4 GHz como en la de 5 GHz y la variante IEEE 802.11ac en 5 GHz. Sin embargo, este estudio se ha centrado en 2.4 GHz ya que es la banda más baja y, por lo tanto, la más restrictiva según las

conclusiones de la ITU-R, que indican que conforme aumenta la frecuencia de trabajo, el impacto de las condiciones meteorológicas es mayor. Por lo tanto, si este estudio demuestra un impacto significativo del tiempo en la banda de 2.4 GHz, es de esperar un mayor impacto en la banda de operación de 5 GHz. Estas son las razones principales por las que esta investigación se ha llevado a cabo sobre la variante más madura y desplegada alrededor del mundo, la IEEE 802.11b/g.

En los próximos apartados de este capítulo, se van a detallar exactamente las características principales de la red del Campus de Vera. A continuación, se explican cuáles han sido los parámetros de rendimiento de red sobre los que se sustenta este trabajo, cómo y porqué han sido seleccionados, y se enumeran las condiciones meteorológicas estudiadas. Posteriormente, se detalla cómo se ha llevado a cabo la toma de medidas, con qué frecuencia, y cómo han tenido que ser procesados los datos para poder cruzar los dos grupos de datos almacenados. Más adelante, se detalla el tipo de análisis estadístico llevado a cabo, se razona su elección y sobre qué software se ha realizado. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones más importantes, junto con la descripción de los problemas experimentados en este trabajo.

3.2 Banco de Pruebas: Red Inalámbrica Exterior de la UPV

El banco de pruebas de esta investigación ha sido la propia red inalámbrica del campus de Vera de la UPV [20]. Este campus está formado por 50 edificios, repartidos en aproximadamente dos kilómetros cuadrados, y tiene instalados más de 500 puntos de acceso para ofrecer acceso a Internet inalámbrico a más de 40.000 usuarios (entre investigadores, profesores, alumnos y personal asociado). De todos estos puntos de acceso, alrededor de treinta se encuentran situados al aire libre, para dar cobertura y ofrecer conexión en los jardines y alrededores de los edificios.

El modelo de los puntos de acceso es el Aironet 1130AG de la marca Cisco Systems, que utilizan el estándar IEEE 802.11b/g y proporcionan velocidades de hasta 54 Mbps. Estos puntos de acceso garantizan y permiten que los usuarios accedan a Internet desde cualquier punto del campus. La cobertura de cada punto de acceso varía entre 30 metros a 54 Mbps, hasta 137 metros a 1 Mbps en el interior de los edificios.

El área de sistemas de información y comunicaciones (ASIC), es el órgano de la UPV encargado, entre otros, de la planificación y gestión de la red universitaria y del soporte técnico y material para el desarrollo de aplicaciones. Por lo tanto, se necesitó establecer un acuerdo de colaboración con el ASIC, para poder monitorizar los datos de rendimiento de la red exterior del campus de Vera. En este sentido no hubo ningún problema y se ofrecieron a colaborar en esta investigación sin ningún impedimento.

3.3 Evaluación del Rendimiento de la Red

El objetivo de este apartado es revisar los conceptos básicos de las tramas de la capa MAC IEEE 802.11, ya que en esta tesis se evalúa el rendimiento de la red a partir de su correcta o incorrecta recepción.

Comúnmente, como ya se ha comentado, se evalúa el rendimiento de las redes a través de parámetros de capa física, como puede ser el retardo de propagación, la relación señal a ruido, la relación señal a interferencia o la fuerza de la señal recibida. Esto es lógico, ya que estos parámetros están directamente relacionados con el rendimiento del resto de capas superiores. Sin embargo, pequeñas variaciones consideradas insignificantes a nivel físico, podrían suponer errores a nivel de trama o paquete y dicho impacto pasaría desapercibido con este tipo de medidas. Incluso, los paquetes perdidos no se detectarían ya que estos parámetros de capa física se evalúan sobre las señales recibidas en el receptor y, por lo tanto, las señales asociadas a los paquetes que no se reciben, no se pueden obviamente tener en cuenta. Además, parámetros como el número de tramas erróneas o perdidas, están directamente relacionados con la calidad que percibe el usuario final de la red.

Esas son las razones principales por las que en esta tesis se evalúa el rendimiento de los distintos escenarios de red analizados, a partir del número de tramas de control erróneas o perdidas.

Las tramas de control de las redes que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11b/g, se considera que pertenecen a la subcapa MAC como se ha visto en el Capítulo 1.

El formato de la unidad de datos de protocolo a nivel físico se conoce como PPDU (Physical Protocol Data Unit). La PPDU es la unidad de datos elaborada en el dispositivo con la tecnología física y esquema de modulación utilizados, antes de ser transmitida a través del medio. También se conoce como la unidad de datos recibida por el dispositivo desde el medio inalámbrico. La trama PPDU consiste en un campo preámbulo denominado PLCP, una cabecera PLCP y una unidad de datos física de servicio (en inglés: Protocol Service Data Unit o PSDU) [3]. Ver Figura 3-1.

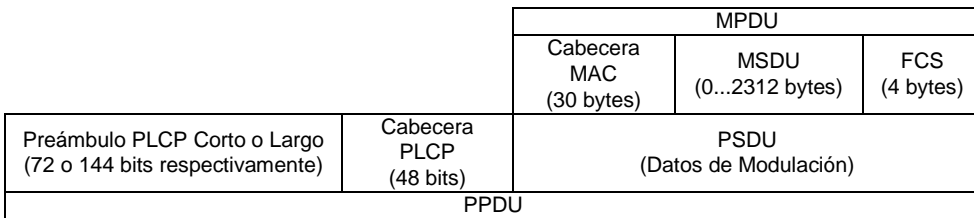


Figura 3-1. Formato PPDU

Además, aunque no aparece en la Figura 3-1, hay algunos bits adicionales, conocidos como bits de cola o de relleno, situados después del campo FCS (Frame Check Sequence) cuando se emplea OFDM como esquema de modulación.

A nivel MAC, cada MPDU (MAC Protocol Data Unit) está formada por los siguientes campos (ver Figura 3-2):

- Control de trama: compuesto por los campos:
 - Versión del protocolo. Indica la versión del protocolo utilizado.

- Tipo/Subtipo. Mientras el campo Tipo identifica si la trama es de datos, control o gestión, el campo Subtipo indica a qué trama concreta hace referencia.
 - HaciaDS/DesdeDS (al Sistema de Distribución/desde el Sistema de Distribución). Identifica si la trama se envía o se recibe al/del sistema de distribución. En redes ad-hoc, tanto HaciaDS como DesdeDS están a cero. El caso más complejo contempla el envío entre dos estaciones a través del sistema de distribución. Para ello se activan ambos campos.
 - Más fragmentos. Se activa si se usa fragmentación.
 - Reintento. Se activa si la trama es una retransmisión.
 - Gestión de Potencia. Se activa si la estación utiliza el modo de economía de potencia.
 - Más datos. Se activa si la estación tiene tramas pendientes en un punto de acceso.
 - WEP (Wired Equivalent Privacy o Privacidad Equivalente a Cableado). Se activa si se usan mecanismos de autenticación y encriptado.
 - Orden. Se utiliza con el servicio de ordenamiento estricto.
- Duración/Identificador: contiene el identificador de estación en tramas del tipo PS o Power-Save (para dispositivos con limitaciones de potencia). En el resto de casos, se utiliza para indicar la duración del periodo que se ha reservado para la transmisión de una estación.
 - Direcciones 1-4: contiene direcciones de 48 bits donde se incluirán las direcciones MAC de la estación que transmite, la que recibe, el punto de acceso origen y el punto de acceso destino.
 - Control de secuencia: contiene tanto el número de secuencia, como el número de fragmento de la trama que se está enviando.
 - Cuerpo de trama: varía según el tipo de trama que se quiere enviar.
 - FCS: posee un código de redundancia cíclica (CRC) de 32 bits para la verificación de la trama.

MPDU										
Cabecera MAC (30 bytes)							MSDU (0..2312 bytes)	FCS (4 bytes)		
Control de Trama	Duración ID	Dirección 1	Dirección 2	Dirección 3	Control de Secuencia	Dirección 4	Cuerpo de la Trama	FCS		
Versión del Protocolo	Tipo	Subtipo	Hacia DS	Desde DS	Más fragmentos	Reintento	Gestión de Potencia	Más Datos	WEP	Orden

Figura 3-2. Formato genérico MPDU

El formato de trama MAC visto en la Figura 3-2 es un modelo genérico, pero según el tipo de trama que se vaya enviar, se utilizan unos campos u otros. Como se ha comentado anteriormente, las tramas MAC se clasifican en tres tipos:

1. Tramas de gestión: se encargan de establecer la comunicación entre una estación/terminal y un punto de acceso. También son conocidas como MMPDUs. Estas tramas proporcionan servicios tales como autenticación, asociación o reasociación. El cuerpo de estas tramas de gestión nunca se retransmite a través de un punto de acceso. De hecho, empiezan y terminan en la capa MAC, así que nunca llegan al servicio de distribución del sistema o LLC. Por lo tanto, el campo Dirección 4 nunca se utiliza en una MMPDU. Las diferentes tramas de gestión son:
 - a. Trama de solicitud de asociación

Este tipo de trama la utiliza la estación cliente para iniciar el proceso de asociación, proceso por el cual el punto de acceso reserva recursos y se sincroniza con una estación cliente. La asociación la inicia el cliente enviando al punto de acceso una trama de solicitud de asociación y el punto de acceso, por su parte, establece un ID de asociación para identificar al cliente y reservar memoria. Las tramas de asociación contienen los datos necesarios para esta función como son el SSID de la red, las tasas de datos, etc.
 - b. Trama de respuesta de asociación

Este tipo de trama la utilizan los puntos de acceso para responder a una solicitud de asociación por parte de un dispositivo. Esta trama comunica al dispositivo si acepta o no su asociación. Si se acepta la asociación la trama también incluye el ID de asociación y las tasas de datos admitidas.
 - c. Trama de solicitud de reasociación

Esta trama la envía un cliente asociado a un punto de acceso, pero que al desplazarse en el medio, puede conectarse a otro punto de acceso con mejor nivel de señal. En este caso, el cliente envía esta trama para reasociarse a su nuevo punto de acceso más cercano.
 - d. Trama de respuesta de reasociación

La trama de respuesta de reasociación tiene la misma función que la respuesta de asociación comentada anteriormente.
 - e. Trama de desasociación

Es una trama que envía una estación asociada a un punto de acceso, cuando va a cerrar sus conexiones de red. Esta trama permite que el punto de acceso libere los recursos que le asignó durante el proceso de asociación.
 - f. Trama de solicitud de prueba

Las estaciones utilizan este tipo de trama cuando necesitan obtener información de otra estación, para por ejemplo las tasas de datos disponibles.
 - g. Trama de respuesta de prueba

Esta trama es la respuesta de una estación a una solicitud. Esta trama contiene la información requerida en la solicitud.

h. Trama beacon (baliza)

Un punto de acceso envía tramas beacon periódicamente para difundir su presencia e información de red, como su SSID, a las estaciones clientes que se encuentren dentro de su radio de cobertura. Las estaciones pueden obtener una lista de los puntos de acceso a su alcance, buscando tramas beacon en todos canales 802.11. Las tramas beacon contienen la información necesaria para identificar las características de la red y poder conectarse con el punto de acceso deseado.

i. Trama de autenticación

La autenticación es el proceso que se encarga de comprobar la identidad de un dispositivo en la red, con el objetivo de aceptarlo o rechazarlo. El cliente inicia este proceso enviando al punto de acceso esta trama, con su identidad en el campo de datos. El diálogo que se establece con las tramas de autenticación depende del sistema de autenticación que use el punto de acceso, si es abierto o con clave compartida. Cuando se trata de sistemas abiertos, el cliente sólo envía la trama de autenticación y el punto de acceso responde con otra trama de autenticación indicándole si acepta o rechaza su conexión. En el caso de la autenticación de clave compartida, el punto de acceso tiene que comprobar que la estación dispone de la clave correcta. Por lo tanto, el punto de acceso cuando recibe la trama de autenticación del cliente, le envía otra de vuelta al cliente con un texto para que lo cifre con su clave, a continuación la estación cliente le responde con el desafío cifrado. De dicha respuesta, depende su correcta autenticación o no en el punto de acceso.

j. Trama de desautenticación

Es una trama que envía una estación a otra cuando quiere terminar las comunicaciones.

k. Tramas TIM o de tráfico pendiente en el punto de acceso

Con estas tramas el punto de acceso informa a los clientes de que tienen datos pendientes de envío en el punto de acceso. Cuando un dispositivo sabe mediante una trama TIM que tiene datos pendientes, permanece activo el tiempo necesario para recibirlos. El punto de acceso dispone de un buffer para almacenar los datos hasta que los envía al cliente.

2. Tramas de control: se utilizan para colaborar en la entrega de tramas de datos entre estaciones. Se encargan de controlar la comunicación mediante la regulación del acceso al medio y el reconocimiento de la correcta recepción de las tramas. En el Capítulo 1 ya han sido comentadas, pero aquí se va a mostrar de qué campos están compuestas [3].

- a. Trama de solicitud RTS, se utiliza para evitar colisiones de datos. La estación cliente envía una trama RTS cada vez que quiere transmitir datos. El formato de la trama RTS se puede ver en la Figura 3-3.

Cabecera MAC (16 bytes)												
Control de Trama (2 bytes)		Duración (2 bytes)		Dirección del Receptor (6 bytes)			Dirección del Transmisor (6 bytes)				FCS (4 bytes)	
Versión del Protocolo	Tipo	Subtipo	Hacia DS	Desde DS	Más fragmentos	Reintento	Gestión de Potencia	Más datos	WEP	Orden		

Figura 3-3. Formato trama RTS

El primer y el último campo tienen la misma utilidad que en la trama genérica de la Figura 3-2. El campo Dirección del Receptor, indica la dirección del destinatario inmediato previsto de la próxima trama de datos o de gestión. El campo Dirección del Transmisor, indica la dirección de la estación transmisora de la trama RTS. El campo duración es el tiempo en microsegundos, necesario para transmitir la próxima trama de datos o de gestión, más el tiempo necesario para transmitir la trama CTS, el ACK y los tres intervalos SIFS correspondientes.

- b. Trama respuesta CTS, son las respuestas a las tramas RTS. Su finalidad es confirmar a la estación que ha enviado el RTS, que puede transmitir porque el canal está libre de transmisiones. Las tramas CTS contienen el valor de tiempo durante el cual el resto de las estaciones no pueden transmitir, porque es el tiempo necesario para que la estación solicitante envíe la trama que tiene pendiente de transmitir. El formato de la trama CTS se puede ver en la Figura 3-4.

Cabecera MAC (10 bytes)										
Control de Trama (2 bytes)		Duración (2 bytes)		Dirección del Receptor (6 bytes)			FCS (4 bytes)			
Versión del Protocolo	Tipo	Subtipo	Hacia DS	Desde DS	Más fragmentos	Reintento	Gestión de Potencia	Más datos	WEP	Orden

Figura 3-4. Formato tramas CTS y ACK

La dirección del receptor de la trama CTS se copia del campo de dirección del transmisor de la trama RTS inmediatamente anterior, es decir, del RTS al que el CTS responde.

El campo duración se obtiene del campo duración de la trama RTS asociada, menos el tiempo en microsegundos necesario para transmitir la trama CTS y su intervalo SIFS.

- c. Acuse de recibo (Acknowledgement o ACK), estas tramas tienen como objetivo confirmar la recepción de una trama. En caso de no llegar la trama ACK, el emisor vuelve a enviar la trama de datos. El

formato de la trama se puede observar en la Figura 3-4. El receptor distingue entre un CTS y un ACK, a través de los campos Tipo y Subtipo. En este caso, la dirección del receptor se obtiene de la dirección 2 de la trama inmediatamente anterior. Si el bit *Más fragmentos* de la trama anterior era igual a 0, el campo duración del ACK es igual a 0, de lo contrario, el valor del campo duración se obtiene del campo duración de la trama previa, menos el tiempo en microsegundos necesario para transmitir la trama ACK y su intervalo SIFS.

3. Tramas de datos: evidentemente existen tramas de datos que son las encargadas de transportar la información de las capas superiores.

3.3.1 Recogida de Datos

Los parámetros que proporcionó el ASIC de la UPV para esta investigación se pueden dividir en tres grupos. Por un lado, se fue almacenando el log que registra los eventos que ocurren en todos los puntos de acceso de la red (ver una muestra en la Figura 3-5). Este log se pasó en crudo (sin ningún tratamiento inicial) y con las direcciones MAC ofuscadas, para evitar cualquier problema con la Ley Orgánica de Protección de Datos (LOPD). En este registro se inserta una línea cada vez que un punto de acceso sufre algún evento o realiza alguna acción, indicando el día y hora exactos, el evento en sí y las estaciones cliente y punto de acceso implicadas. De este extenso registro, se extrajeron las siguientes variables: número de autenticaciones fallidas, número de asociaciones, número de desasociaciones, número de reintentos máximos de conexión y número de roamings.

```
Apr 1 09:19:21 ac3-extgnd3.net.upv.es 263160: Apr 1 09:19:20 CEST: %DOT11-6-DIS-ASSOC: Interface Dot11Radio0, Deauthenticating Station 0080.5a67.dca5 Reason: Sending station has left the BSS
Apr 1 09:19:26 ac3-ext4lo.net.upv.es 65726: Apr 1 09:19:25 CEST: %DOT11-7-AUTH_FAILED: Station 0011.24c0.51c3 Authentication failed
Apr 1 09:19:27 ac3-ext6gs.net.upv.es 51093: Apr 1 09:19:26 CEST: %DOT11-6-DISASSOC: Interface Dot11Radio0, Deauthenticating Station 0018.de55.f699 Reason: Previous authentication no longer
Apr 1 09:19:32 ac3-extgnd3.net.upv.es 263162: Apr 1 09:19:31 CEST: %DOT11-6-DISASSOC: Interface Dot11Radio0, Deauthenticating Station 0080.5a67.dca5 Reason: Sending station has left the BSS
Apr 1 09:19:43 ac3-extgnd3.net.upv.es 263164: Apr 1 09:19:42 CEST: %DOT11-6-DISASSOC: Interface Dot11Radio0, Deauthenticating Station 0080.5a67.dca5 Reason: Sending station has left the BSS...
```

Figura 3-5. Muestra del registro de log de los puntos de acceso

Este registro de log fue almacenado durante dos meses (abril y mayo de 2010). El archivo que se proporcionó pesaba 240MB aproximadamente y se puede ver una pequeña parte en la Figura 3-5.

El recuento de estas variables por día, hora, y punto de acceso, fue realizado mediante scripts y se detallará en la siguiente sección 3.3.2.

Por otro lado, mediante el protocolo simple de gestión de red SNMP [97], se recogieron otros parámetros de rendimiento interesantes para esta investigación.

SNMP se desarrolló como herramienta para monitorear el desempeño de las redes IP [98]. Permite el intercambio de información de gestión con dispositivos de red como routers, puntos de acceso, puentes, estaciones de trabajo y servidores. Este protocolo es parte de la capa de aplicación de la pila de protocolos IP (Internet Protocol) definida por el IETF (Internet Engineering Task Force). En SNMP se consideran tres componentes clave: (a) un dispositivo para ser monitorizado, (b) un agente (software) que se ejecuta en el dispositivo a monitorizar y permite recoger la información requerida, y (c) un sistema de gestión de red (en inglés: Network Management System o NMS) que se ejecuta en el dispositivo que lleva a cabo la monitorización y que se encarga de comunicarse con el agente y obtener la información necesaria del dispositivo monitorizado.

La información disponible en un dispositivo que puede ser monitorizado por SNMP, se organiza mediante una estructura jerárquica conocida como MIB. La MIB 802.11 está definida en el anexo D de la norma ISO/IEC y en el estándar IEEE [99]; allí se recogen las descripciones de cada uno de los parámetros que pueden ser monitorizados en las redes IEEE 802.11. Esta MIB se divide en tres tipos principales de atributos: (a) atributos de la estación para gestionar los procesos de la estación de tal manera que pueda funcionar cooperativamente como una parte de una red IEEE 802.11, (b) los atributos MAC que brindan el apoyo necesario para el control de acceso, generación, y verificación de las secuencias de comprobación de trama, y entrega adecuada de datos válidos a capas superiores, y (c) atributos físicos enfocados en la información operacional necesaria.

Por lo tanto, el número de tramas de control erróneas de la capa MAC se recogen en los atributos MAC. Son atributos definidos mediante contadores de 32 bits [99]. Son números enteros no negativos que van aumentando hasta que alcanzan su valor máximo de $2^{32}-1$, y entonces vuelven a comenzar desde 0.

Los contadores que se recogieron mediante SNMP de todos los puntos de acceso exteriores de la red del campus de Vera, fueron los que se muestran en la Tabla 3-1.

Todos estos valores fueron tomados periódicamente, al igual que los anteriores, durante todos los días de abril y mayo de 2010. En este caso, se proporcionaron los datos con un formato adecuado para el análisis, por lo tanto no hizo falta ningún pre-procesado especial para su posterior análisis, aunque sí que hubo que promediarlos.

Por último, se proporcionó el nº de clientes por tasa de datos disponible cada 30 minutos, durante el mismo periodo de tiempo que los datos anteriores. El objetivo de medir este parámetro era, conociendo el tanto por cien de clientes que existía en cada velocidad cada instante de tiempo, ver si tal porcentaje de clientes estaba relacionado con alguna de las variables meteorológicas citadas anteriormente. De esta forma, si se demuestra dicha relación, significaría que el área de cobertura podría verse afectada por el tiempo.

RTSFailureCount	Es un contador que se incrementa cada vez que no se recibe un CTS en respuesta a un RTS.
ACKFailureCount	Es un contador que registra el número de veces que una trama de datos o de gestión se envía a una dirección individual y no se recibe un reconocimiento de vuelta desde el destino.
FCSErrorCount	Es un contador que registra el número de tramas recibidas de cualquier tipo con errores en el campo FCS. El aumento de la carga en la red y el incremento en la tasa de errores dará lugar a un rápido crecimiento de este contador.
FailedCount	Es un contador que registra el número de intentos de transmisión que son abandonados porque han superado, o bien el límite conocido como ShortRetryLimit (7 intentos) cuando la longitud de la trama es menor o igual que el RTSThreshold (en este caso 0 bytes), o bien el límite LongRetryLimit (4 intentos) cuando la longitud de la trama es mayor que el RTSThreshold.

Tabla 3-1. Parámetros de rendimiento considerados

3.3.2 Pre-Procesado de Datos

Para poder analizar los datos del log proporcionado por el ASIC, fue necesario realizar dos scripts que separasen, ordenasen y discernieran los datos de interés. El primer script fue para los datos del mes de abril, de este mes se disponía desde el día 1 a las 00 horas, hasta el día 30 a las 23 horas.

Y el segundo script para los datos de Mayo, pre-procesó los datos desde el 1 de este mes a las 00 horas hasta el 27 a las 17 horas (debido a problemas técnicos los últimos tres días del mes no se almacenaron). La tarea de los scripts fue hacer para todo ese periodo, un recuento por hora del número de asociaciones, desasociaciones, autenticaciones fallidas, reintentos máximos de conexión, y roamings registrados en el fichero de log, sobre todos los puntos de acceso exteriores únicamente del campus de Vera. A continuación, se realizó un promedio por hora sobre todos los puntos de acceso y los datos quedaron listos para el análisis, tal como se puede ver en la Figura 3-6.

Fecha_Hora	Asociaciones,	Desasociaciones,	Autentic_fallidas,	Reintentos_máx.,	Roamings,
Apr1_00,	68,	68,	15,	61,	13,
Apr1_01,	87,	88,	16,	59,	6,
Apr1_02,	9,	9,	2,	9,	0,
Apr1_03,	28,	28,	3,	16,	1,
Apr1_04,	55,	56,	2,	18,	0,
Apr1_05,	15,	17,	3,	9,	1,
Apr1_06,	10,	7,	3,	2,	0,
Apr1_07,	15,	15,	1,	1,	1,

Figura 3-6. Datos del log pre-procesados

En la Figura 3-7 queda reflejada la evolución del número medio de asociaciones, desasociaciones, y autenticaciones fallidas durante ese periodo en los puntos de acceso exteriores. Se observa que el número de asociaciones y desasociaciones casi se superponen, lo cual indica que existe un equilibrio claro entre los usuarios que se asocian a un punto de acceso y los que se desasocian.

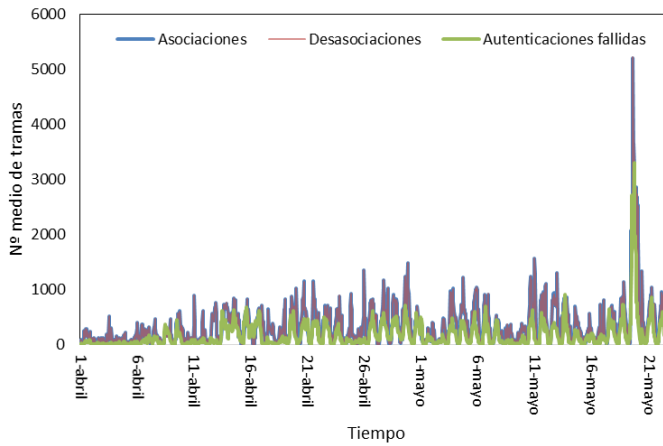


Figura 3-7. Número medio de asociaciones, desasociaciones y autenticaciones fallidas

En la Figura 3-8, también se puede observar que el número de reintentos máximos de conexión, es similar al nº de autenticaciones fallidas mostrado en la Figura 3-7. Pero, en general, existe un mayor número de reintentos máximos de conexión, que autenticaciones fallidas.

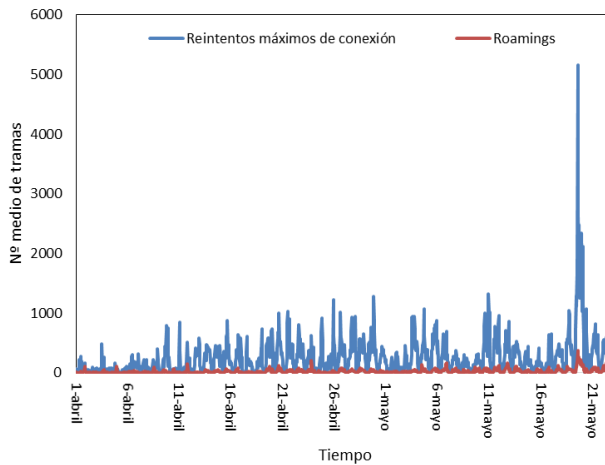


Figura 3-8. Número medio de reintentos máximos de conexión y roamings

Finalmente, respecto al número de roamings, se puede ver que su evolución en cuanto a forma, es similar a los anteriores parámetros, pero su orden de magnitud es mucho menor. En los parámetros ya comentados, los datos se refieren a miles, y en el caso de los roamings a cientos. Además, en la Figura 3-7 y en la Figura 3-8, se puede observar que tanto las asociaciones/desasociaciones, como las autenticaciones fallidas y los reintentos máximos de conexión, presentan valores muy similares, siguen un perfil prácticamente idéntico, lo que demuestra que estos parámetros están fuertemente relacionados.

Por otro lado, los contadores que se obtuvieron por SNMP fueron almacenados desde el 14 de enero de 2010 hasta el 11 de junio del mismo año, y tenían la forma presentada en la Figura 3-9.

Fecha_Hora	Punto de acceso	Contador	Valor,
14/01/2010 14:44	ac3-ext1bs	dot11FailedCount	13173491
14/01/2010 14:44	ac3-ext1bs	dot11RTSFailureCount	1916727
14/01/2010 14:44	ac3-ext1bs	dot11ACKFailureCount	28767537
14/01/2010 14:44	ac3-ext1bs	dot11FCSErrorCount	37723652
14/01/2010 14:44	ac3-ext1bs	dot11FailedCount	8357523
14/01/2010 14:44	ac3-ext2bso	dot11RTSFailureCount	4424821
14/01/2010 14:44	ac3-ext2bso	dot11ACKFailureCount	23020459
14/01/2010 14:44	ac3-ext2bso	dot11FCSErrorCount	79324164

Figura 3-9. Contadores SNMP

A continuación, mediante fórmulas y macros, se calculó también el promedio sobre todos los puntos de acceso, para tener un valor de cada contador por hora para el conjunto de los puntos de red exteriores del campus de Vera. Además, como la fecha de almacenamiento del resto de datos era del 1 de abril al 27 de mayo, se utilizaron los datos a partir de esa fecha. Los datos quedaron ordenados tal como se recoge en la Figura 3-10.

Fecha y Hora	FailedCount	RTSFailureCount	ACKFailureCount	FCSErrorCount
01/04/2010 0:40	11883175.3	5321319.85	31727887.1	343234648
01/04/2010 1:40	11885663.8	5321621.5	31733502.9	343284462
01/04/2010 2:40	11887536.3	5321739.42	31737780.7	343335920
01/04/2010 3:40	11889203.4	5321909.19	31742274.2	343390399
01/04/2010 4:40	11890789.9	5322126.81	31746103.9	343444096
01/04/2010 5:40	11892088.6	5322229.19	31749071	343498902
01/04/2010 6:40	11893578.2	5322230.42	31752222.5	343548840
01/04/2010 7:40	11895622.2	5322589	31756802.2	343600974

Figura 3-10. Contadores SNMP pre-procesados

Además, tal como se explica en el apartado 3.5, para poder cumplir con los requisitos necesarios para aplicar el estudio de correlación seleccionado, los contadores se tuvieron que transformar tomando el valor de la diferencia entre cada medición y su predecesora justo anterior, con el objetivo de obtener el número de tramas de control erróneas justas por hora, y ver el incremento o decremento real de estos contadores cada hora.

Finalmente, con tal de aislar el comportamiento humano de todos los parámetros de red recogidos, se decidió dividir los anteriores parámetros entre el número de usuarios que estaban conectados a la red durante cada medición. Es obvio que, según el tiempo que haga en cada momento, habrá más o menos usuarios en la red exterior del campus y, por lo tanto, se contabilizarán más o menos tramas de red, pero ello no se deberá al impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de la red, sino al comportamiento lógico de los usuarios. Así que esta división era totalmente imprescindible, para aumentar la fiabilidad de los resultados obtenidos del análisis.

Esta relación del comportamiento humano en la red exterior con las condiciones meteorológicas puede verse claramente en la Figura 3-11. Conforme aumenta la temperatura media, más usuarios hay en la red, y esto obviamente conlleva un número mayor de tramas de control (ACKFailureCount, FailedCount y ACKFailure). En cambio, en la Figura 3-12, al dividir el número de tramas por el número de usuarios, los contadores dejan de estar relacionados con el número de usuarios y la temperatura.

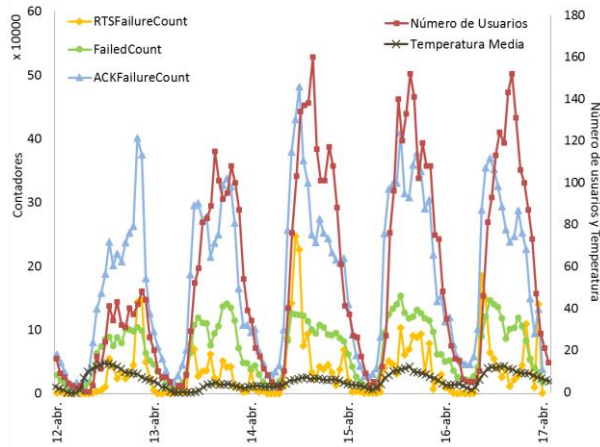


Figura 3-11. Relación entre el nº de usuarios de la red, la temperatura media y el nº de tramas

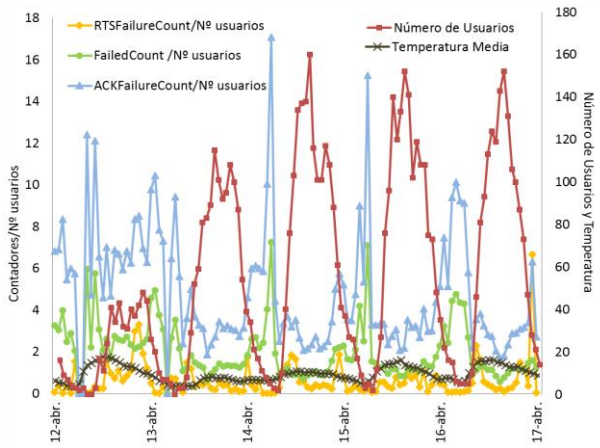


Figura 3-12. Relación entre el nº de usuarios de la red, la temperatura media y el nº de tramas dividido por el número de usuarios

El nº de usuarios que están presentes en la red, se extrajo a partir del log de los puntos de acceso mediante dos scripts. La operación que realizaron los scripts fue contar las direcciones MAC diferentes que había cada hora. En la Figura 3-13 se representa cómo varía el número medio de usuarios de la red durante ese periodo.

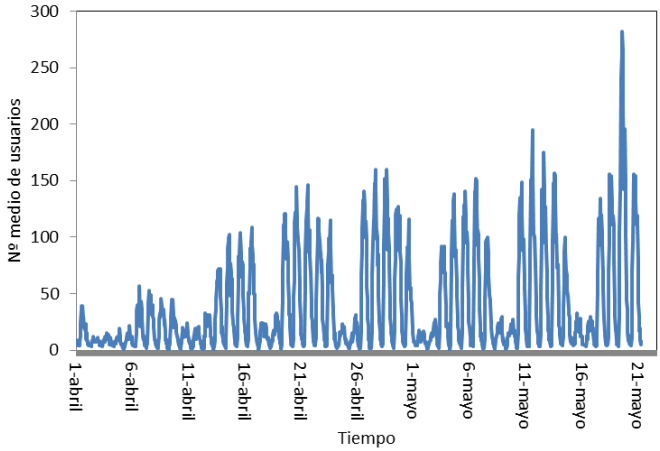


Figura 3-13. Evolución del número medio de usuarios en la red

Por último, el número de clientes por tasa de datos disponible, ya se encontraba en un formato adecuado para el análisis (ver Figura 3-14). Lo único que se hizo fue sumar el nº de clientes total de cada fila y dividirlo por cada una de las celdas de la misma fila. De esta forma se obtuvo el porcentaje de clientes para cada tasa de datos.

1 Mbps	2 Mbps	5.5 Mbps	6 Mbps	9 Mbps	11 Mbps	12 Mbps	18 Mbps	24 Mbps	36 Mbps	48 Mbps	54 Mbps
0	6	0	0	0	8	5	2	2	5	1	15
6	3	0	0	1	7	2	4	2	2	2	9
7	2	0	0	0	5	1	2	3	3	3	10
1	3	0	0	1	5	2	2	3	5	1	7
2	2	0	0	1	7	0	1	0	2	2	9
3	4	0	0	1	8	3	4	1	4	4	8
2	3	0	0	0	6	0	4	2	2	1	8
1	3	0	0	2	7	2	2	3	2	2	7

Figura 3-14. Número de clientes por tasa de datos disponible

3.4 Condiciones Meteorológicas

En las dos siguientes secciones, se va a detallar cómo se recogieron y pre-procesaron los datos meteorológicos, para poder analizarlos conjuntamente con los parámetros de rendimiento de red vistos en el apartado anterior.

3.4.1 Recogida de Datos

Las condiciones meteorológicas se obtuvieron de la estación meteorológica situada en el mismo campus de Vera (ver Figura 3-15). Esta estación pertenece y es gestionada por la AEMET. Por lo tanto, se tuvo que establecer un convenio de colaboración para obtener los datos meteorológicos con una determinada frecuencia y durante un periodo de tiempo concreto. Con este organismo tampoco hubo ningún problema y, desde el primer momento, estuvieron dispuestos a colaborar en esta investigación. La estación meteorológica se encuentra instalada aproximadamente en el centro del campus universitario. Su situación exacta es: Longitud = 002011 Este, Latitud = 392850, Altura = 7. Permite medir la temperatura (T), la velocidad del viento (VV), la humedad relativa (H) y la precipitación (PREC).



Figura 3-15. Estación meteorológica situada en el campus de Vera de la UPV

Para esta investigación se cogieron todas las variables disponibles, ya que se consideró que todas ellas podían afectar de algún modo a los parámetros de rendimiento de red que se seleccionaron previamente.

Por otro lado, como se quería analizar el máximo número de condiciones meteorológicas, se solicitó a la AEMET los datos de radiación solar global, directa y difusa (RGLO, RDIR, RDIF, respectivamente). Estos datos se recogen en la estación meteorológica que la AEMET tiene instalada en Manises. Durante el periodo de toma de medidas, los valores de radiación son superiores a cero entre las 5 horas de la mañana y las 20 horas de la tarde, en el resto de horas es nula.

3.4.2 Pre-Procesado de Datos

Los datos de las condiciones meteorológicas se tuvieron que pre-procesar también para poder analizarlos conjuntamente con los parámetros de red.

La base de datos de la estación meteorológica almacena todas las variables anteriores cada 10 minutos. Por lo tanto, se tuvo que calcular la media de dichos valores para obtener las condiciones meteorológicas por hora. Finalmente, se reunieron todas las variables meteorológicas y todos los parámetros de red en un libro de Excel, ordenados por fecha y hora para proceder al análisis final. Los datos meteorológicos quedaron tal como se muestra en la Figura 3-16.

Precipitación	Temperatura	Velocidad del Viento	Humedad Relativa	Radiación directa	Radiación Difusa	Radiación Global
0	15.1	4.1	42	0	0	0
0	14.55	3.66666667	44.16666667	0	0	0
0	14	2.85	46.83333333	0	0	0
0	13.28333333	1.9	49.83333333	0	0	0
0	13.1	1.43333333	50.16666667	0	0	0
0	12.78333333	1.13333333	53.33333333	0	0	0
0	12.6	1.35	56.66666667	0	0	0
0	12.91666667	2.16666667	57.5	0	9	9
0	14.31666667	2.4	52	16	59	65
0	15.93333333	1.46666667	44.66666667	237	55	179
0	15.83333333	2	49.5	298	51	244

Figura 3-16. Variables meteorológicas pre-procesadas en media

La Figura 3-16 muestra que los datos de lluvia obtenidos no son valorables, debido a que en los dos meses (abril y mayo de 2010) en los que se realizaron las medidas, la cantidad de precipitación que se registró fue insignificante.

En las figuras siguientes, se puede observar la evolución de cada variable meteorológica y de cada parámetro de red almacenado. Aunque, después del pre-procesado anterior, se dispone de 1254 muestras en total (una muestra por hora, durante los dos meses), en las siguientes figuras no se representan todas para una correcta visualización de la evolución de las mismas. En cada figura se ajusta el eje horizontal para que la visualización sea lo más clara posible. En la Figura 3-17, se puede ver la evolución de las variables meteorológicas. La temperatura se encuentra entre 10 y 20°C aproximadamente, la humedad relativa presenta una mayor variación, sus valores se encuentran entre el 30 y el 90%, y la velocidad del viento entre 0 y 5m/s. Las unidades de medida de estas variables son diferentes, pero se han representado sobre los mismos ejes para reducir espacio.

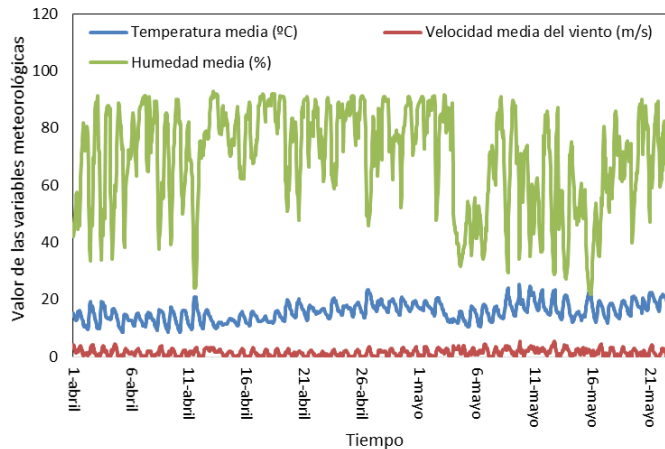


Figura 3-17. Evolución temporal media de la temperatura, velocidad del viento y humedad

En la Figura 3-18, se puede observar la evolución de la radiación solar global, directa y difusa de cada día. Las unidades de radiación son decenas de kilojulios por metro cuadrado.

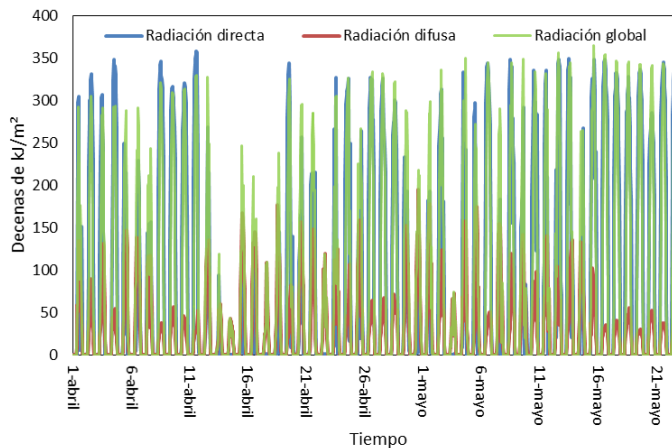


Figura 3-18. Evolución de la radiación solar directa, difusa y global de las 5 a las 20 horas

3.5 Análisis Estadístico: Resultados

Para calcular el impacto del tiempo sobre la red inalámbrica exterior del campus de Vera, se decidió calcular el grado de asociación entre las condiciones meteorológicas y los parámetros de red recogidos mediante un análisis estadístico de correlación.

Los coeficientes de correlación expresan la fuerza de la asociación o interdependencia entre dos variables aleatorias continuas, y varían desde -1 a $+1$. Un coeficiente de correlación positivo indica una relación positiva entre las dos variables (conforme aumenta la variable 'x', aumenta la variable 'y'), mientras que un coeficiente de correlación negativo implica una relación negativa, es decir, conforme aumenta 'x', 'y' disminuye y viceversa.

Cuando el valor del coeficiente de correlación se encuentra alrededor de ± 1 , entonces se dice que existe un grado de asociación del 100% (perfecto) entre las dos variables. En cambio, cuando el valor del coeficiente de correlación se acerca a 0, la relación entre las dos variables se considera nula.

En la ciencia de la estadística, se consideran tres métodos para medir el nivel de correlación entre variables: la correlación de Pearson, la correlación por rangos de Kendall y la correlación por rangos de Spearman [100].

Por un lado, la correlación de Pearson es muy utilizada para medir el grado de asociación entre variables relacionadas linealmente. La principal hipótesis para poder aplicar esta técnica es que ambas variables deben seguir una distribución normal. Además, se requiere que cumplan los principios de linealidad y homocedasticidad. La linealidad asume una relación lineal recta entre las variables estudiadas y la homocedasticidad asume que los datos están normalmente distribuidos alrededor de la línea de regresión.

Por otro lado, la correlación por rangos de Kendall y de Spearman pertenecen al grupo de los métodos estadísticos no paramétricos. Estas técnicas no paramétricas deben emplearse cuando las distribuciones subyacentes de los datos están lejos de una distribución normal. La correlación de Kendall mide la fuerza de la dependencia entre dos variables ordinales escalares. Mientras que el coeficiente de correlación de Spearman es como el coeficiente de correlación de Pearson, pero calculado desde una clasificación por rangos/niveles de los datos.

La correlación de Spearman se utiliza para medir el grado de asociación entre dos variables. No asume ninguna suposición en cuanto a la distribución de los datos, y es el análisis apropiado cuando las variables se miden en una escala que es, al menos, ordinal. Su proximidad a la correlación del coeficiente de Pearson y la idoneidad de la prueba estadística de Spearman para cualquier tipo de intervalo entre los datos, hacen de él el método más flexible. La hipótesis principal de la correlación de Spearman es que la relación entre las variables debe ser monótona, es decir, que conservan el orden de tal manera que o ambas variables aumentan o disminuyen de valor a la vez, o una disminución en una supone un aumento en la otra o viceversa siempre.

Los parámetros de rendimiento de red considerados en esta investigación se basan en contadores que siempre están aumentando hasta alcanzar su valor

máximo, y luego se reinician y comienzan de nuevo desde cero. Sin embargo, las variables meteorológicas son representadas por todos los números reales y pueden aumentar o disminuir. Por lo tanto, con el fin de poder aplicar el estudio de correlación de Spearman, todos ellos deberían poder de aumentar y disminuir su valor. De lo contrario, nunca se cumpliría el requisito de monotonía. Por lo tanto, los contadores se tuvieron que transformar tomando el valor de la diferencia entre cada medición y su predecesora justo anterior, con el objetivo de analizar el número de tramas de control erróneas justas por minuto.

El rango de correlación de Spearman (ρ) se calcula a partir de la ecuación 3-1, donde d_i es la diferencia entre los rangos de los valores correspondientes a las dos variables computadas y n es el número de muestras.

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum d_i^2}{n * (n - 1)} \quad 3-1$$

Para llevar a cabo el análisis de correlaciones, se utiliza el software SPSS [101]. Éste señala con un asterisco los coeficientes de correlación significativos al nivel 0.05 y, con dos asteriscos, los significativos al nivel 0.01. Este nivel lo indica el valor de significancia (referenciado en la Tabla 3-2 y en la Tabla 3-3 como Sig.), que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas, para decidir si sobre la base del tamaño de la muestra hay evidencia o no de que existe una correlación monótona en los datos. El objetivo es probar la hipótesis nula, H_0 , que indica que no hay correlación monótona en los datos frente a la hipótesis alternativa, H_1 , que indica que sí que existe. El objetivo es indicar cuál de estas hipótesis opuestas es más probable que sea cierta. Si ρ es el coeficiente de correlación de Spearman, entonces se puede expresar esta prueba como se muestra en la ecuación 3-2.

$$\begin{aligned} H_0: \rho &= 0 \\ H_1: \rho &\neq 0 \end{aligned} \quad 3-2$$

Valores de significancia por debajo de 0.05 indican que se puede rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%, y valores de significancia por debajo de 0.01 indican que se puede rechazar con un nivel de confianza del 99%.

En la Tabla 3-2, se muestran los coeficientes de correlación de Spearman entre los parámetros de rendimiento almacenados y las condiciones meteorológicas consideradas. Además, se incluye una fila con la relación con el n^o de usuarios, cuyo objetivo es demostrar que los datos se debían aislar de esta variable para evitar resultados erróneos, ya que presenta una relación relativamente alta con las condiciones meteorológicas.

		T	VV	H	RDIR	RDIF	RGLO
Nº Usuarios	Coefficiente de Correlación	0,339**	0,361**	-0,265**	0,304**	0,463**	0,418**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Asociaciones/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,110**	-0,163**	0,169**	-0,275**	-0,294**	-0,298**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Desasociaciones/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,118**	-0,171**	0,175**	-0,289**	-0,309**	-0,313**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Autenticaciones_fallidas/usuarios	Coefficiente de Correlación	0,127**	-0,068*	0,045	0,002	0,015	0,018
	Sig.	0,000	0,020	0,119	0,938	0,618	0,534
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Roamings/usuarios	Coefficiente de Correlación	0,235**	0,117**	-0,045	0,005	-0,005	0,012
	Sig.	0,000	0,000	0,123	0,877	0,874	0,694
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Reintentos_máximos_de_conexión/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,068*	-0,187**	0,182**	-0,296**	-0,302**	-0,311**
	Sig.	0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
Reintentos_máximos_de_transmisión/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,499**	-0,415**	0,288**	-0,408**	-0,524**	-0,521**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
RTS_fallidos/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,493**	-0,414**	0,285**	-0,408**	-0,526**	-0,522**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
ACK_fallidos/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,496**	-0,414**	0,286**	-0,407**	-0,525**	-0,521**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
FCSError/usuarios	Coefficiente de Correlación	-0,491**	-0,413**	0,280**	-0,408**	-0,528**	-0,523**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254

Tabla 3-2. Coeficientes de correlación resultantes de las tramas de red

En la Tabla 3-3, se puede observar el grado de asociación entre el porcentaje del nº de usuarios en cada velocidad y las condiciones meteorológicas analizadas. En este caso no se muestra ningún nivel de correlación realmente alto entre las condiciones meteorológicas y el porcentaje del número de clientes por velocidad. Por lo tanto, a partir de este trabajo, no se puede concluir que la cobertura y las condiciones meteorológicas tienen un grado de asociación significativo. No se presentan coeficientes de correlación para las tasas de datos de 5.5 y 6 Mbps, porque son tasas no disponibles en la red del campus de Vera.

De la Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La condición meteorológica que muestra un mayor grado de asociación con los parámetros de red analizados es la temperatura. Especialmente con el grupo de los contadores de las tramas de control: RTSFailureCount, ACKFailureCount, FailedCount y FCSErrorCount. Sobre los parámetros que recogen el número de ciertas tramas de gestión (asociaciones, desasociaciones, reintentos máximos de conexión, roamings y autenticaciones fallidas), el grado de asociación es muy bajo.

		T	VV	H	RDIR	RDIF	RGLO
1Mbps	Coef. de Correlación	0,208**	0,163**	-0,048*	0,077*	0,115**	0,109**
	Sig.	0,000	0,000	0,035	0,035	0,001	0,003
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
2Mbps	Coef. de Correlación	0,235**	0,255**	-0,133**	0,133**	0,184**	0,181**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
5,5Mbps	Coef. de Correlación	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Sig.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
6Mbps	Coef. de Correlación	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Sig.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
9Mbps	Coef. de Correlación	0,249**	0,254**	-0,107**	0,149**	0,213**	0,201**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
11Mbps	Coef. de Correlación	0,320**	0,305**	-0,162**	0,158**	0,177**	0,185**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
12Mbps	Coef. de Correlación	0,249**	0,262**	-0,161**	0,160**	0,205**	0,214**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
18Mbps	Coef. de Correlación	0,236**	0,207**	-0,136**	0,198**	0,171**	0,207**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
24Mbps	Coef. de Correlación	0,212**	0,192**	-0,148**	0,165**	0,186**	0,204**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
36Mbps	Coef. de Correlación	0,250**	0,300**	-0,185**	0,275**	0,340**	0,333**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
48Mbps	Coef. de Correlación	0,271**	0,261**	-0,138**	0,231**	0,290**	0,286**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254
54Mbps	Coef. de Correlación	0,342**	0,403**	-0,184**	0,289**	0,384**	0,366**
	Sig.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	N	1254	1254	1254	1254	1254	1254

Tabla 3-3. Coeficientes de correlación resultantes de las tasas de datos

Esto era lo que realmente se esperaba, ya que las tramas de gestión dependen, en primer término, del comportamiento del usuario. En cambio, las tramas de control fallidas o erróneas, están directamente relacionadas con el rendimiento de la transmisión inalámbrica y, por lo tanto, es donde realmente se puede percibir el impacto de las condiciones meteorológicas. Sin embargo, se decidió medir también el coeficiente de correlación del tiempo con las tramas de gestión, para comprobar que este tipo de análisis tenía un grado de fiabilidad considerable sobre el tipo de datos que se estaba analizando. Además, también es cierto, que ciertas de las tramas de gestión medidas, como el número de desasociaciones o el número de reintentos máximos de conexión, sí que podrían estar relacionados con las condiciones del canal inalámbrico, y así lo demuestran los únicos niveles de correlación relativamente significativos de estas tramas con la radiación mostrados en la Tabla 3-1.

2. El siguiente fenómeno con mayor correlación es la radiación solar y la velocidad del viento. Al igual que ocurre con la temperatura, esta correlación es más importante en los parámetros de control.
3. En cuanto a la relación de la cobertura y las condiciones meteorológicas, los niveles de correlación resultantes son bajos. Esto tiene una explicación lógica. Realmente, la tasa de datos entre los clientes y los puntos de acceso depende de la distancia del cliente al punto de acceso, las condiciones del canal y la potencia de transmisión utilizada por los dispositivos. La potencia

de transmisión se supone que siempre es la misma pero, como en este escenario no se puede controlar la variable distancia a las que se encuentran los clientes y la movilidad de los mismos, el grado de asociación entre el número de clientes que cambian la tasa de datos por decaimiento del rendimiento del canal y las condiciones meteorológicas, queda empañado/oculto por aquellos que lo hacen por su distancia o movilidad respecto del punto de acceso. Si bien es cierto que este parámetro se analizó porque si en una determinada hora, existen muchos clientes a altas tasas de datos, y en la siguiente hora, se presentan más clientes a bajas tasas de datos, esto posiblemente sea debido a un peor funcionamiento del canal. Pero, en este caso, el análisis no considera un alto grado de relación entre ambos parámetros.

3.6 Conclusión

En este capítulo se ha analizado la correlación existente entre distintas condiciones meteorológicas como son la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar, y un grupo de parámetros de gestión y control de la capa de control de acceso al medio, de una red de área local inalámbrica con tráfico abundante, como es la red del campus de Vera de la UPV. Los parámetros de gestión analizados han sido: el número medio de asociaciones, desasociaciones, autenticaciones fallidas, roamings y reintentos máximos de conexión, de todos los puntos de acceso de la red inalámbrica. Y, el grupo de parámetros de control lo componen: el número medio de RTSs fallidos, de ACKs fallidos, del número de reintentos máximos de transmisión, y número de tramas con el campo FCS erróneo. Los parámetros de rendimiento de red fueron obtenidos gracias al ASIC de la UPV, que permitió su recogida para esta investigación, y las condiciones meteorológicas de la estación situada en el propio campus de Vera gestionada por la AEMET, entidad que también permitió la obtención de estas condiciones, para el desarrollo de este trabajo.

Para poder analizar ambos grupos de datos de forma conjunta, el primer paso fue pre-procesar todos los datos recogidos y almacenados. Se trata de datos extraídos de una red real y, por lo tanto, se tuvo que hacer un análisis detallado para eliminar valores atípicos derivados de un funcionamiento erróneo de algún dispositivo, o por alguna característica inusual de la red. Por ejemplo, los contadores sobre los que se extraen el número de tramas de control, de vez en cuando son reseteados por parte de los técnicos informáticos del campus, bien porque detecten algún problema en la red inalámbrica o bien por tareas de mantenimiento. Después de realizar este minucioso pre-procesado, se obtuvo una muestra por hora de cada condición meteorológica y parámetro de red, mediante el cálculo del promedio por hora de todas las muestras recogidas y de todos los puntos de acceso, en el caso de los parámetros de red. El periodo de recogida de los datos fueron los meses de abril y mayo de 2010 durante las 24 horas, así que finalmente se obtuvieron 1254 muestras para realizar el análisis. En cuanto a las condiciones meteorológicas, presentan valores esperados dentro del periodo en el que se recogieron. Cabe señalar que debido a las bajas precipitaciones registradas en este periodo, esta variable no se pudo considerar en el análisis.

Después de observar los resultados obtenidos del análisis, se puede concluir que, en términos generales, el grupo de parámetros de control (RTSs fallidos, ACKs fallidos, número de reintentos máximos de transmisión y número de tramas con FCS erróneo), presenta un grado de asociación mayor con las condiciones meteorológicas. Esto es lógico, ya que las tramas de gestión aunque pueden aumentar o disminuir por problemas en el canal entre el cliente y el punto de acceso, siempre predominará la influencia del comportamiento humano en estas tramas ya que en la mayoría de casos parten directamente de las acciones tomadas por los usuarios. Por lo tanto, el impacto del tiempo en el canal, y consecuentemente sobre el número de tramas de este tipo, es secundario. En cambio, las tramas de control erróneas o pérdidas, que son transmitidas directamente por los dispositivos sin que el comportamiento de los usuarios tenga nada que ver, están plenamente relacionadas con el rendimiento del canal y, por lo tanto, es lógico que presenten un mayor grado de asociación con las condiciones meteorológicas que afectan a dicho canal directamente.

Sin embargo, hay que destacar que este trabajo presentó varias dificultades, que hacen que sus resultados no puedan considerarse totalmente concluyentes. Todos ellos son derivados de la toma de datos sobre un escenario real, sobre el que no se tiene ningún control. Variables como la cantidad de tráfico en la red, el tipo de tráfico, o ciertas características de los usuarios, como su distancia al punto de acceso, su movilidad o sus acciones, suponen un cierto nivel de incertidumbre sobre los resultados obtenidos.

En primer lugar, a pesar de haber dividido los parámetros de red por el número de usuario, como no se trata de un número totalmente exacto (se ha extraído sumando el número de MACs distintas que se encontraban en el archivo de log cada hora), no se puede asegurar el total aislamiento del comportamiento humano de los resultados. El sumatorio del número de MACs distintas en una hora, no permite asegurar que todos esos usuarios distintos estén conectados durante los 60 minutos seguidos, algunos de ellos pueden estar simplemente unos minutos y desconectarse de la red, y otros pueden hacer roaming en un determinado momento, a otro punto de acceso con mejor nivel de señal.

En segundo lugar, en este trabajo no se ha podido contar con la cantidad de tráfico que había en la red en cada momento, y se trata de un dato muy importante, ya que está directamente relacionado con el número de tramas de control y gestión generadas.

Además, los valores promediados de todos los datos recogidos por hora, y sobre todos los puntos de acceso exteriores en el caso de los parámetros de red, puede implicar valores engañosos de los datos. Esto es debido, por ejemplo, en el caso de las condiciones meteorológicas, a que durante ese periodo de 60 minutos, haya una fuerte variación en alguna de las condiciones meteorológicas y el promediado oculte dicha variación tan significativa en este trabajo. En el caso de los parámetros de red, el promediado también podría ocultar variaciones significativas de los datos y, además, en el caso de que algún punto de acceso se encuentre alejado de los puntos de reunión más habituales de los usuarios, su participación en el promediado podría suponer también un cierto enmascaramiento de los valores por

su participación en el promediado. Así, que se considera que la longitud del promediado realizado (1 hora), es demasiado elevada para este estudio, ya que supone cierta ocultación/inexactitud en los datos y, por lo tanto, sería conveniente reducirla.

Por estas razones, se consideró necesario continuar con esta investigación, mediante otros estudios que minimizaran todos los problemas citados en este trabajo, y confirmaran los indicios de asociación presentados en los resultados de este capítulo. Por lo tanto, en el próximo Capítulo 4, para medir el grado de asociación entre los parámetros de rendimiento de red y las condiciones meteorológicas, se diseña y desarrolla un escenario mucho más controlado, en el que desaparecen todos los inconvenientes presentados en este trabajo inicial.

Los trabajos y resultados derivados del estudio presentado en este capítulo, han sido publicados en tres congresos [28], [29] y [31], el último de los cuales está indexado en la lista Core, y una revista [30] indexada en la lista ISI Thomson.

MEDICIÓN DEL IMPACTO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN UN ENLACE PUNTO A MULTIPUNTO IEEE 802.11B/G

4.1 Introducción

A pesar de las ventajas obvias de realizar un estudio de investigación sobre un escenario real, el trabajo presentado en el Capítulo 3 tuvo una serie de limitaciones y problemas derivados precisamente de tal entorno, citadas ya en dicho capítulo. El control prácticamente nulo sobre variables no relacionadas con esta investigación, como son el número de usuarios, su comportamiento en la red, el tipo de tráfico transmitido, los fallos en los dispositivos, las interferencias no deseadas, etc., suponen un nivel alto de incertidumbre en cuanto a la fiabilidad y exactitud de los resultados. Sin embargo, evidenciaron una cierta relación entre las condiciones meteorológicas y el rendimiento de la red, que permitieron seguir con esta investigación con ciertas garantías y seguridad.

Por lo tanto, el siguiente paso fue diseñar y desarrollar un entorno real pero totalmente controlado, que permitiera conocer con exactitud el impacto del tiempo sobre el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g. Y, de este modo, realizar un análisis mucho más detallado y preciso, en el que los resultados fueran lo más fiables y concluyentes posible.

Dicho escenario específico, desplegado únicamente para esta investigación, estaba compuesto por un enlace punto a multipunto IEEE 802.11b/g.

Es importante tener en cuenta ciertas consideraciones, para extrapolar conclusiones derivadas del estudio de un enlace WLAN sobre escenarios completos. En primer lugar, el estudio de una WLAN completa es más complejo en cuanto al diseño y al despliegue de la misma. La asignación de canales, la distribución de los puntos de acceso, el tipo de tráfico que se va a transmitir, la cantidad media de usuarios, etc., son características a tener en cuenta para poder proporcionar un

buen servicio a los clientes inalámbricos. En segundo lugar, siempre se presentan problemas particulares, como son los terminales ocultos u otros más graves, como la congestión, la pérdida de paquetes o retardos en la red. Por lo tanto, son escenarios más difíciles de monitorizar y estudiar.

Hoy en día, los enlaces radio al aire libre son ampliamente utilizados para conectar diferentes puntos y dispositivos como sensores, cámaras de vídeo o redes inalámbricas. Además, muchas de estas aplicaciones y servicios requieren transmisiones fiables, ya que soportan servicios críticos como el de vídeo-vigilancia, de detección y control de condiciones peligrosas, o la transmisión de información en tiempo real. Por lo tanto, es esencial garantizar la calidad (en términos de disponibilidad del enlace) con el objetivo de dar un servicio adecuado a este tipo de aplicaciones.

Los enlaces radio pueden emplear cualquier frecuencia permitida dentro del espectro radioeléctrico, pero esta elección siempre implica algunos pros y contras en términos de rendimiento, diseño, precio de la instalación, soporte y mantenimiento [102]. Hoy en día, el estándar IEEE 802.11 es la forma más económica, rápida y eficaz de conectar de forma inalámbrica dos puntos remotos. Principalmente, debido al bajo precio del tipo de hardware requerido y a la no necesidad de contratar un proveedor de servicio. Por otra parte, teniendo en cuenta algunos aspectos de diseño [24], su rendimiento es excelente. Esa es la razón por la que la popularidad de los enlaces y redes IEEE 802.11 no ha parado de crecer en los últimos años, y continúan en alza.

Tal como se ha visto anteriormente, existen diferentes variantes dentro del estándar IEEE 802.11, pero las mayormente desplegadas por todo el mundo son la variante IEEE 802.11a, 802.11b y 802.11g, ya que fueron las primeras en comercializarse y desplegarse de forma masiva. Tal como se ha comentado, utilizan diferentes tecnologías en la capa física, y por lo tanto son diferentes en términos de frecuencia, tasas de datos, tipos de modulación y comportamiento frente a interferencias [103].

Sin embargo, algunas de estas variantes pueden trabajar juntas y por ello hay disponibles dispositivos en modo dual (IEEE 802.11b/g) e incluso tri-modo (IEEE 802.11a/b/g), ya que comparten el mismo protocolo CSMA/CA de acceso al medio. Esta investigación se centra en el rango de frecuencia de 2.4 GHz, por lo que las variantes consideradas son IEEE 802.11b/g, debido además de su amplio despliegue alrededor de todo el mundo.

La variante IEEE 802.11g utiliza OFDM como tecnología de transmisión física, que funciona dividiendo la señal de radio en múltiples sub-señales más pequeñas y, a continuación, se transmiten simultáneamente a diferentes frecuencias hasta el receptor [104]. OFDM reduce la cantidad de interferencias co-canal en la transmisión de las señales, y permite alcanzar tasas de datos de hasta 54 Mbps.

Sin embargo, la variante IEEE 802.11b utiliza DSSS como tecnología física, que necesita un ancho de banda mayor que el espectro necesario para transmitir las señales y alcanza tasas de datos más bajas. Necesita un ancho de banda mayor porque cada bit es reemplazado o ampliado por un código de ensanchado de banda

ancha. Debido a que la información se transmite en muchos más bits de información, esta tecnología tiene la capacidad de operar en condiciones de baja SNR [8]. En este sentido, DSSS se considera más robusto que OFDM. La señal transmitida se multiplica directamente por una secuencia de ensanchamiento, compartida por el transmisor y el receptor en DSSS y permite alcanzar tasas de datos hasta 11 Mbps.

Esta investigación se centra en la evaluación del desempeño de la transmisión de las tramas de control de capa MAC, según las condiciones meteorológicas. Dicho estudio se realiza a través de un análisis de correlación simple en primer lugar, a continuación se evalúa tal relación a través de un análisis de correlación pero agrupando las condiciones meteorológicas por rangos con el objetivo de destacar aquellos rangos sobre los que el impacto es mayor, y para poder analizar las condiciones meteorológicas en conjunto sobre un mismo grupo de datos, y finalmente, se va un paso más allá realizando un estudio por regresiones sobre los datos.

Con el objetivo de estudiar cómo la tecnología física (DSSS u OFDM), y por lo tanto, los diferentes esquemas de modulación y tasas de datos, influyen sobre la presente investigación, las medidas del desempeño de las transmisiones de las tramas de control se realizan sobre un enlace punto a multipunto a diferentes distancias.

Una vez que las tramas de la capa MAC (MPDU) se encapsulan en tramas PPDU, éstas se propagan a través del medio inalámbrico por ondas electromagnéticas con una cierta codificación, modulación y a una tasa de datos, que dependen de las condiciones del medio y de la tecnología de transmisión utilizada.

Las tecnologías físicas disponibles en los dispositivos empleados para el despliegue del enlace punto a multipunto son: DSSS, DSSS de alta tasa (HR-DSSS) y OFDM. Estas tecnologías ofrecen una amplia gama de esquemas de modulación, técnicas de codificación y tasas de datos. Los dispositivos empleados en este trabajo (D-Link AirPlus DWL-2000AP+), permiten las opciones físicas de transmisión presentadas en la Tabla 4-1.

Todas estas opciones disponibles, son posibles gracias a la función de adaptación de la tasa de datos en los estándares IEEE 802.11 [1]. Sin embargo, esta capacidad no está completamente especificada en el estándar 802.11, sino más bien es posible gracias a mecanismos especificados en el mismo. Esto permite a los proveedores implementar esta capacidad utilizando sus propios enfoques (propietarios) y así poder competir entre ellos.

El objetivo de esta capacidad de adaptación es que el transmisor sea capaz de transmitir a la tasa de datos más óptima y más apropiada según las condiciones en que se encuentre el canal inalámbrico en un momento determinado. Así se permite la adaptación de la red a un entorno cambiante como es el inalámbrico, para alcanzar las mejores características de transmisión posibles. La clave de esta capacidad es que cada velocidad (o tasa) de datos se apoya en una técnica diferente de modulación, y cada esquema de modulación implica un número específico de bits por símbolo (tasa de símbolos).

Estándar IEEE	Tecnología de transmisión	Tipo de modulación	Tasa	Sensibilidad en el receptor (Tasa de error de paquete <10%)
802.11 b+	HR-DSSS	Packet Binary Convolutional Coding (PBCC)	22 Mbps	-80 dBm
		Complementary Code Keying (CCK)	11 Mbps 5.5 Mbps	-82 dBm - 85 dBm
802.11 b	DSSS	Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)	2 Mbps	-86 dBm
		Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK)	1 Mbps	-89 dBm
802.11 g	OFDM	64 Quadrature amplitude modulation (QAM-64)	54 Mbps	-68 dBm
		64 Quadrature amplitude modulation (QAM-64)	48 Mbps	-68 dBm
		16 Quadrature amplitude modulation (QAM-16)	36 Mbps	-75 dBm
		16 Quadrature amplitude modulation (QAM-16)	24 Mbps	-79 dBm
		Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	18 Mbps	-82 dBm
		Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	12 Mbps	-84 dBm
		Binary Phase Shift Keying (BPSK)	9 Mbps	-87 dBm
		Binary Phase Shift Keying (BPSK)	6 Mbps	-88 dBm

Tabla 4-1. Especificaciones técnicas físicas

Por otra parte, los esquemas de modulación de orden más alto, son capaces de ofrecer tasas de datos mucho más altas y mayores niveles de eficiencia espectral para los sistemas de comunicaciones radio [105]. Sin embargo, esto conlleva un precio. Los esquemas de modulación de orden superior son considerablemente menos resistentes al ruido y a las interferencias, debido a que el receptor tiene que distinguir entre muchos niveles de señal o símbolos entre sí, lo cual puede resultar difícil si se dispone de un canal pobre con una relación señal a ruido baja, lo cual supone una tasa de error de bit elevada (en inglés: Bit Error Rate o BER). Por lo tanto, en estos casos, es necesario elegir un esquema de modulación más simple, cuya tasa de datos sea más baja pero utilice esquemas de modulación más sencillos y robustos (menos símbolos y menor número de bits por símbolo para distinguir) y mejorar así las comunicaciones [106]. Esa es la razón por la cual muchos sistemas de comunicación radio utilizan técnicas dinámicas adaptativas de la

tasa de datos. Su objetivo es utilizar la mayor tasa de datos posible (la más apropiada) según las condiciones dadas en el canal, para minimizar simultáneamente la BER y maximizar el rendimiento.

Se han desarrollado muchos algoritmos de adaptación de tasa [107], pero generalmente se pueden clasificar en aquellos esquemas que estiman las condiciones del canal basándose en la relación de señal a ruido (SNR) (Receiver Based Auto Rate [108]) o basados en el ratio de pérdida de tramas (en inglés: Frame Loss Ratio o FLR) (Auto Rate Fallback (ARF) [12]).

En el caso de los dispositivos empleados en esta investigación, evalúan las condiciones del canal desde la SNR como muestra la Tabla 4-1 y, en consecuencia, ajustan la tasa. Este enfoque se basa en la calidad de la señal inalámbrica recibida en el receptor. La señal electromagnética se propaga a través del medio inalámbrico desde el transmisor al receptor, y se recibe como una forma degradada de la señal original transmitida por el emisor (debido a los efectos de la atenuación, la propagación multicamino y las interferencias que se han visto anteriormente, entre otros) y al ruido del canal. Con el fin de medir el nivel de calidad de esta señal recibida, se utiliza la SNR. Esta es una medida relativa que compara la fuerza de una señal deseada (información transmitida) con el nivel del ruido. Por lo tanto, cuanto mayor sea la SNR, más fácil será para el receptor extraer la información útil. Obviamente, la BER y la tasa de error de paquete (en inglés: Packet Error Rate o PER) están directamente relacionadas con la SNR, de tal forma que conforme aumenta la SNR, éstas disminuyen y a la inversa. La SNR (y por lo tanto la BER) pueden cambiar como consecuencia de la movilidad o debido a cambios en el medio ambiente. En el primer caso, se sabe que si un usuario conectado a un punto de acceso se aleja del mismo, la SNR cae conforme aumenta dicha distancia. En este caso, si la tasa de datos y, por lo tanto, la técnica de modulación utilizada entre el punto de acceso y el usuario no cambian, la BER irá aumentando conforme la SNR disminuye impidiendo que las tramas se reciban correctamente. Esa es la razón por la que en esta tesis se estudian dos enlaces a diferente distancia, con el fin de comparar cómo el tiempo afecta al tipo de modulación, y comprobar si efectivamente los esquemas de modulación de orden inferior, son más resistentes al ruido y a las interferencias.

La segunda forma de implementar esta capacidad de adaptación se basa en el ratio de pérdida de tramas. La idea es que si un nodo envía "X" tramas seguidas sin recibir "Y" confirmaciones (una indicación implícita de que están existiendo errores de bit en el canal), la velocidad de transmisión baja a una tasa anterior más baja. Por el contrario, si "Z" tramas seguidas son confirmadas, o si un temporizador que controla el tiempo desde la última bajada de la tasa expira, la velocidad de transmisión se incrementa a la siguiente tasa más alta. Los valores de X, Y y Z son valores generales establecidos en el algoritmo.

Por lo tanto, estas son dos de las formas en las que se ha implementado esta capacidad de adaptación en los dispositivos IEEE 802.11. Y, es gracias a esta capacidad, por la que se ha podido analizar el impacto del tiempo sobre las modulaciones en un entorno real, ya que la distancia entre el emisor y el receptor (característica fácilmente reproducible) delimita dicha modulación.

Una vez vistos los aspectos introductorios necesarios para el desarrollo de esta investigación y la correcta interpretación de sus resultados, el resto de este capítulo está estructurado de la siguiente manera. En el apartado 4.2, se definen las características del escenario sobre el que se han tomados las medidas de red para esta investigación. A continuación, en el apartado 4.3, se detalla el proceso de toma de medidas y sus particularidades concretas. Finalmente, en el apartado 4.4, se detallan cada uno de los tres análisis llevados a cabo en este escenario en tres subsecciones diferentes donde, además, se presentan los resultados concretos de cada uno de ellos. Este capítulo finaliza con el apartado 4.5 en el que se recogen las principales conclusiones derivadas de este trabajo.

4.2 Banco de Pruebas: Escenario Experimental de un Enlace Punto a Multipunto

Con el objetivo de medir el impacto exacto del tiempo sobre el rendimiento de los enlaces radio, se ha desplegado un banco de pruebas real compuesto por un enlace punto a multipunto que trabaja bajo el estándar IEEE 802.11b/g. Como se puede ver en la Figura 4-1, se ha considerado un enlace de largo alcance desde el punto A al B y un enlace de corto alcance del punto A al C. Las distancias de la Figura 4-1 están a escala, situada en la esquina inferior izquierda de la misma. Los puntos A y C del enlace se sitúan en el campus universitario de Gandia, de la UPV. Gandia es una ciudad situada a 65 kilómetros al sur de Valencia (España). Los puntos A y C se encuentran ubicados en el tejado de dos edificios del campus, cuya distancia entre ellos es de aproximadamente 100 metros. El punto B se encuentra en el tejado de la empresa Azimut Electronics [109] en la ciudad de Gandia, que se sitúa a 2.200 metros del campus. En ambos casos, ningún obstáculo impide la visión directa entre ellos.

La topología de red es la siguiente: el punto A está configurado como punto de acceso al cual se conectan de forma inalámbrica los dos clientes situados en los puntos B y C. Además, el punto A tiene conectado por cable un ordenador que está constantemente transmitiendo tráfico ICMP (en inglés: Internet Control Management Protocol) de forma constante y continua en el tiempo mediante la utilidad ping a los clientes remotos B y C.



Figura 4-1. Escenario real del enlace punto a multipunto IEEE 802.11b/g desplegado

Los datos de rendimiento de ambos enlaces son recogidos de los clientes B y C. Tanto los clientes como el punto de acceso son puntos de acceso D-Link

(modelo DWL-2000AP+) que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11b/g estándar. Los clientes (B y C) tienen conectadas dos antenas Yagi cuya ganancia es de 18 dBi. En cambio, el punto de acceso al que se conectan (punto A) está conectado a una antena omnidireccional cuya ganancia es 15 dBi. Con este esquema de red (ver Figura 4-2), el cliente B (punto más alejado) es un terminal oculto para el cliente C, ya que no está en su rango de cobertura. Por lo tanto, es esencial para llevar a cabo la comunicación activar el mecanismo RTS/CTS en todos los puntos de acceso con el fin de evitar colisiones entre ellos. Así el umbral RTS se configura a cero con el fin de activar este mecanismo para cualquier tamaño de datos.

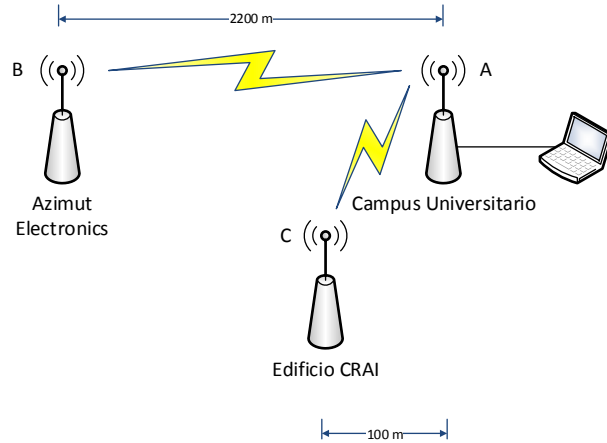


Figura 4-2. Diseño de la topología de red

Todos los puntos del enlace (A, B y C) están implementados en las terrazas superiores de los edificios para garantizar la línea de visión directa y que se encuentren lo más aislados posibles de las interferencias electromagnéticas causadas por dispositivos personales, como son los teléfonos móviles, las tabletas u ordenadores portátiles, entre otros. Esto era un elemento fundamental en el despliegue del escenario IEEE 802.11b/g desplegado para la investigación de esta tesis, ya que se pretendía estudiar un impacto relativamente sutil de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de los enlaces. Por lo tanto, para poder imputar cualquier variación en el rendimiento de los enlaces (en la variación del número de tramas de control erróneas o pérdidas), a la variación de las condiciones meteorológicas, se requería un escenario lo más "limpio" posible en cuanto a otro tipo de interferencias. Por lo tanto, en la elección de las posibles ubicaciones se desecharon aquellas en la que existía cualquier posible fuente de interferencia, como pueden ser las máquinas de aire acondicionado o cualquier otro sistema electromagnético. Finalmente, las ubicaciones seleccionadas fueron el tejado del edificio CRAI (biblioteca campus de Gandia), la terraza del edificio de física del mismo campus, y el tejado de la empresa Azimut Electronics en Gandia. Se puede ver la localización exacta sobre un mapa real en la Figura 4-3. Además, el canal inalámbrico seleccionado fue el menos usado en el área.

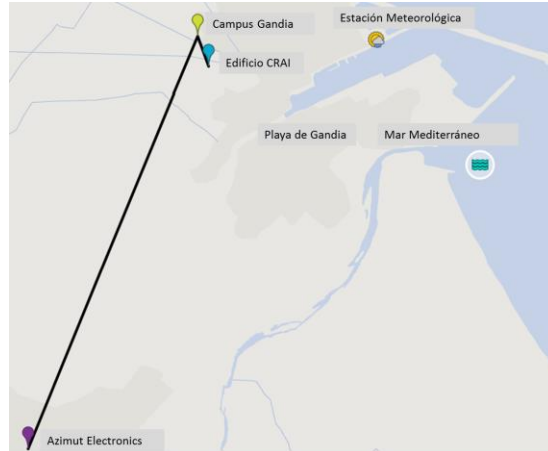


Figura 4-3. Enlace punto a multipunto desplegado

En cuanto a las condiciones meteorológicas, los datos se recogieron de una estación meteorológica situada aproximadamente a 500 metros del enlace punto a multipunto (ver Figura 4-4). Esta estación meteorológica es gestionada y administrada por la empresa gandiense Borja Opticos Gandia [110].

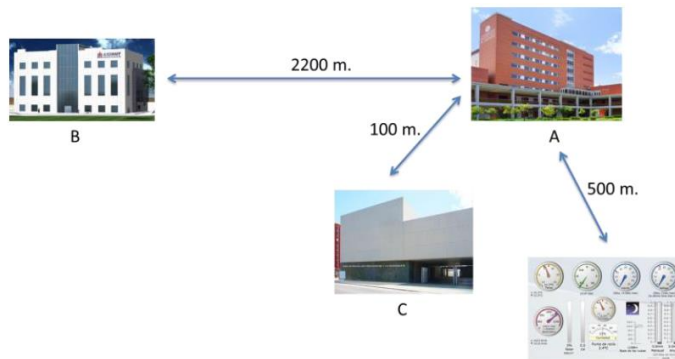


Figura 4-4. Distribución del equipamiento utilizado

Pero antes de desplegar el enlace punto a multipunto, en la fase de diseño se tuvo que determinar la situación en la que se encontraban las zonas de Fresnel (ver Figura 4-5 y Figura 4-6), para comprobar si había algún obstáculo que obstruyera la visión directa y causara interferencias en alguno de los haces de Fresnel. Aunque sólo la primera zona de Fresnel (línea verde) debe estar completamente libre de obstáculos para evitar la interferencia directa con la recepción de la señal, en el diseño propuesto para este trabajo, el resto de zonas también estaban libres de cualquier obstrucción. Por lo tanto, ambos caminos quedaban completamente libres de obstrucciones, y las ondas de radio viajaban en línea recta desde el transmisor al receptor. La Figura 4-5 y la Figura 4-6 muestran el perfil real de los caminos de propagación de las ondas de radio, tanto para el enlace de corto alcance como para el de largo alcance respectivamente.

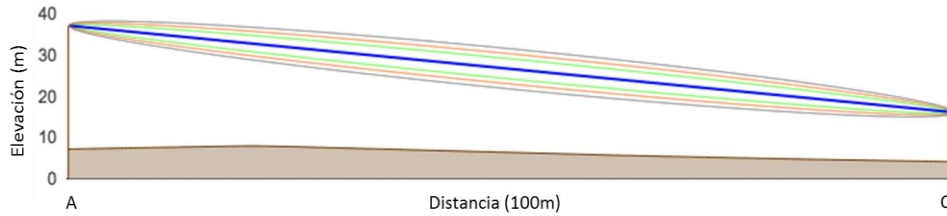


Figura 4-5. Zonas de Fresnel en el enlace de corto alcance

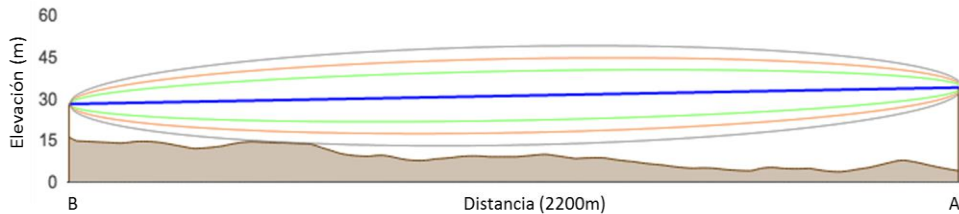


Figura 4-6. Zonas de Fresnel en el enlace de largo alcance

4.3 Toma de Medidas

Esta investigación, analiza el impacto de las condiciones meteorológicas sobre el rendimiento de las transmisiones, en el escenario explicado en el apartado anterior.

Dicho rendimiento es medido a partir de la evolución del número de tramas de control erróneas o pérdidas de la capa MAC. A fin de generar y transmitir tramas de control en dichos enlaces, es necesario generar algún tipo de tráfico a través de ellos. Como ya se ha dicho, en este trabajo esto se consigue enviando tráfico ICMP a través de la utilidad ping desde el ordenador conectado al punto de acceso A, hacia los clientes B y C. El mecanismo de funcionamiento del ping es muy sencillo, todas la solicitud de eco ("ping") se transmiten a través de un mensaje ICMP cuyos datos se espera que sean reenviados de vuelta cuando lleguen al receptor, a través de una respuesta de eco ("pong") en otro mensaje ICMP enviado de vuelta al emisor. Todas las peticiones de eco que lleguen correctamente al receptor, deben tener asociada una respuesta de eco que contiene los datos exactos recibidos en el mensaje de petición.

En la práctica, los sistemas operativos utilizan un identificador único para cada proceso de ping, el número de secuencia es un número creciente dentro de ese proceso. Los sistemas Linux son capaces de enviar una solicitud de eco por segundo sin descanso. Por lo que este ha sido el sistema operativo utilizado en el ordenador conectado al punto de acceso A, con el fin de mantener un tráfico constante y generar tramas de control de forma continua.

Dado que los datos transmitidos por el enlace punto a multipunto son tráfico ICMP, la Figura 4-7 recoge el formato genérico de un paquete de este tipo. En ella se muestran los campos específicos de un paquete ICMP de 32 bytes.

	Bit 0-7	Bit 8-15	Bit 16-23	Bit 24-31
Cabecera IP (20 bytes)	Versión/Longitud_Cabecera	Tipo de Servicio	Longitud Total del Paquete	
	Identificación		Flags y Offset del Paquete	
	Tiempo de Vida (TTL)	Protocolo	Checksum de la Cabecera	
	Dirección IP origen			
	Dirección IP destino			
Cabecera ICMP (8 bytes)	Tipo de Mensaje	Código	Checksum de la Cabecera	
	Datos de Cabecera			
	Identificador		Número de Secuencia	
Carga útil ICMP (Opcional)	Datos de Carga Útiles			

Figura 4-7. Formato paquete ICMP

Los campos Protocolo y Tipo de Servicio del encabezado IP (ver Figura 4-7), se establecen a 1 y 0 respectivamente para el tráfico ICMP. Por otra parte, el campo de datos de cabecera (32 bits) se compone de un identificador de 16 bits y de un número de secuencia de la misma longitud, para poder asociar cada solicitud de eco a su respuesta. Los campos Tipo de Mensaje y Código de la cabecera ICMP para la solicitud de eco se establecen a 8 y a 0, respectivamente. En cambio, para la respuesta de eco ambos campos se establecen a 0.

Las medidas de la cantidad de tramas de control erróneas o perdidas se tomaron de los clientes B y C periódicamente mediante el protocolo SNMP, versión 2. Estos atributos MAC, tal como se ha visto en el Capítulo 3, son atributos definidos mediante contadores de 32 bits, que se van incrementado hasta que alcanzan su valor máximo $2^{32}-1$, y entonces vuelven a comenzar desde 0. Al igual que se ha hecho en el anterior capítulo, como las variables meteorológicas están representadas por todos los números reales y pueden aumentar o disminuir, para poder cumplir el requisito de relación monótona de Spearman, los contadores se tuvieron que transformar tomando el valor de la diferencia entre cada medición y su predecesora justo anterior, con el objetivo de obtener el número de tramas de control erróneas justas por minuto. Los contadores recogidos para esta investigación se detallan en la Tabla 4-2, algunos de ellos fueron analizados también en el estudio presentado en el Capítulo 3 y se detallan en la Tabla 3-1.

Los datos, en este caso, fueron almacenados por minuto durante todos los días, desde el mes de enero hasta agosto de 2013. Se considera que este periodo de toma de medidas, es más adecuado que el utilizado en la investigación anterior (1 hora). Permite considerar variaciones más sutiles, tanto de los parámetros de rendimiento como de las condiciones meteorológicas.

Las condiciones meteorológicas disponibles en la estación meteorológica próxima al enlace fueron: la temperatura, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la humedad, el punto de rocío, la lluvia, y la velocidad de ráfaga de viento. Por lo tanto, todas ellas fueron recogidas y utilizadas en esta investigación.

RTSFailureCount	Definido en la Tabla 3-1.
ACKFailureCount	Definido en la Tabla 3-1.
FCSErrorCount	Definido en la Tabla 3-1.
RetryCount	Es un contador que registra el número de tramas que requirieron al menos una retransmisión para ser entregadas con éxito al receptor.
MultipleRetryCount	Es un contador que registra el número de tramas que requieren más de una retransmisión para ser entregadas con éxito al receptor.
FailedCount	Definido en la Tabla 3-1.
FameDuplicateCount	Es un contador que registra el número de tramas que llegan por duplicado al receptor.

Tabla 4-2. Parámetros de rendimiento considerados

4.4 Análisis Estadísticos

Este apartado se divide en tres subsecciones. Cada una de ellas se corresponde con uno de los tres análisis estadísticos que se llevaron a cabo sobre los datos. El objetivo era comprobar, por distintos métodos estadísticos, que los resultados obtenidos eran concluyentes y concordantes entre ellos y, por lo tanto, se podía considerar que existía un alto grado de fiabilidad en los resultados.

4.4.1 Resultados (I): Estudio de Correlación Base

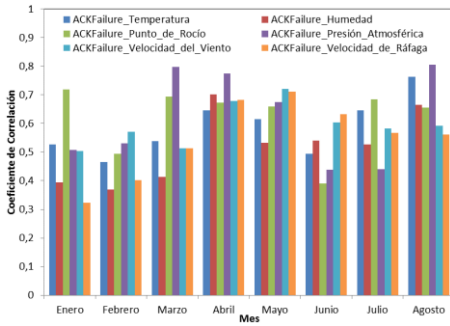
El primer análisis llevado a cabo sobre los datos, fue un análisis básico de correlaciones para saber el grado o nivel de asociación entre las condiciones meteorológicas recogidas y los parámetros de rendimiento de red almacenados. Este tipo de análisis estudia el grado de asociación entre dos variables, por lo tanto en esta investigación se estudió el nivel de correlación entre cada una de las condiciones meteorológicas y cada uno de los parámetros de rendimiento considerados.

Tal como se ha comentado anteriormente, los valores de todos los datos se tomaron cada minuto, por lo que cada día se generaban 1.440 medidas, tanto de las condiciones meteorológicas como de los parámetros de rendimiento considerados. Sin embargo, los coeficientes de correlación se calcularon sobre grupos de 120 muestras (dos horas), para comprobar si un número de muestras más pequeño, ayudaban a encontrar un grado de asociación más exacto. Las relaciones buscadas pueden ser muy puntuales y pasar inadvertidas en grandes volúmenes de datos.

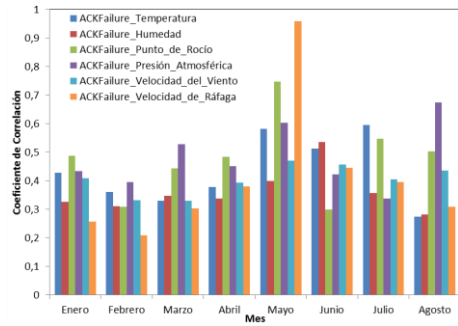
El análisis fue, como en el trabajo anterior, realizado mediante el software estadístico SPSS de IBM. En la Figura 4-8 se presentan los niveles de correlación más altos encontrados a lo largo de todo el periodo de medidas, en lugar de presentar valores promedios que pueden suponer conclusiones erróneas, ya que realmente el impacto del tiempo es un impacto puntual, que será mayor, menor o in-

cluso despreciable en algunos casos, dependiendo de las condiciones meteorológicas en conjunto. El objetivo de este primer análisis era mostrar el nivel de asociación más alto entre cada condición meteorológica y cada parámetro de rendimiento para cada uno de los meses en los que se tomaron las medidas, con el fin de ver cuáles de ellos presentan un mayor grado de asociación. A continuación, comparando los valores promedios para cada enlace, se podrá concluir qué tecnología física (DSSS o OFDM) presenta un mejor desempeño frente al impacto del tiempo.

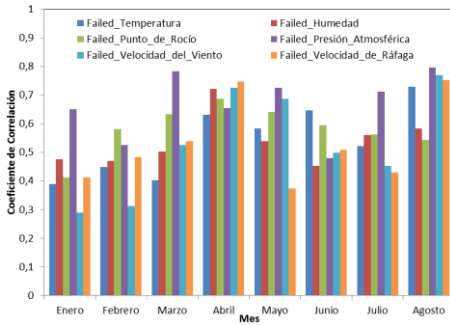
Por lo tanto, en la Figura 4-8 se muestran los niveles de correlación más altos encontrados mensualmente entre cada condición meteorológica y cada parámetro de rendimiento de los enlaces, para ambos enlaces radio. Se expresan en valor absoluto, ya que el objetivo es conocer el nivel de asociación entre ellos, en lugar de la dirección de tal relación, que dependerá del rango en el que se encuentren el resto de condiciones.



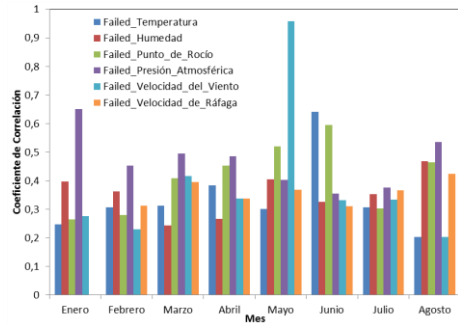
a) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



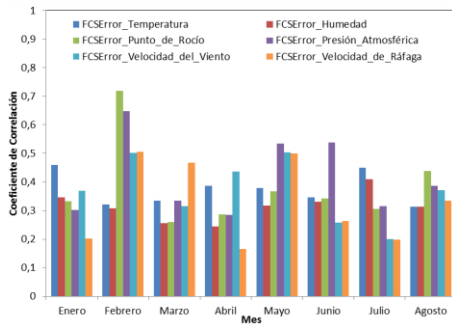
b) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



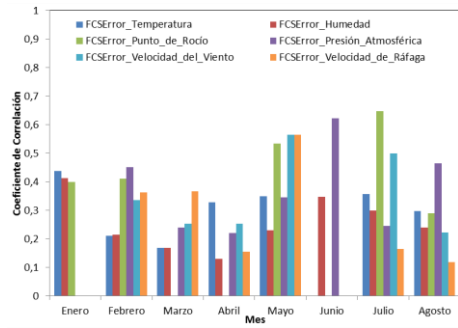
c) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



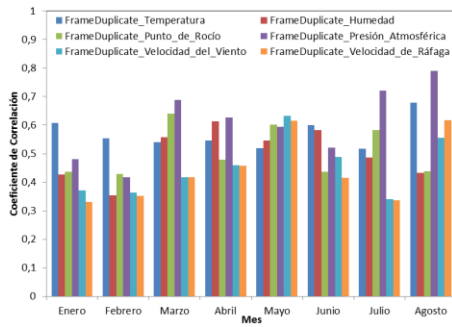
d) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



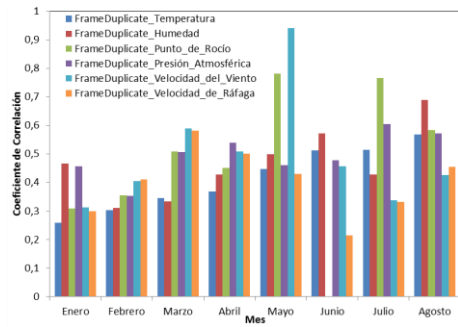
e) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



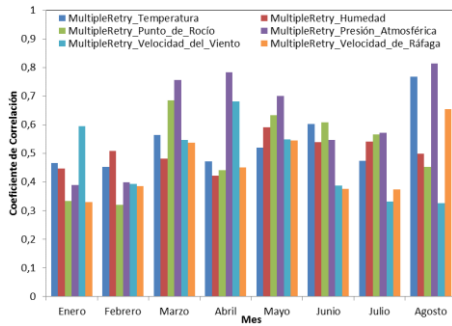
f) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



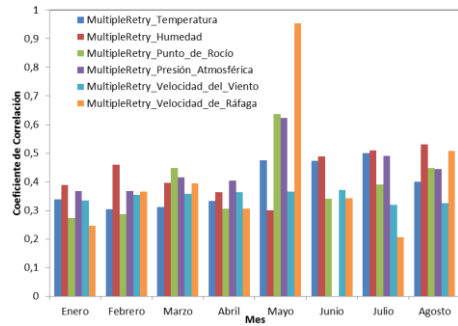
g) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



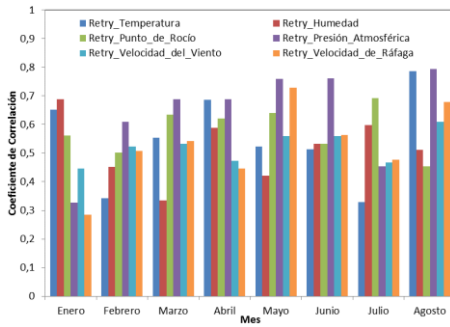
h) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



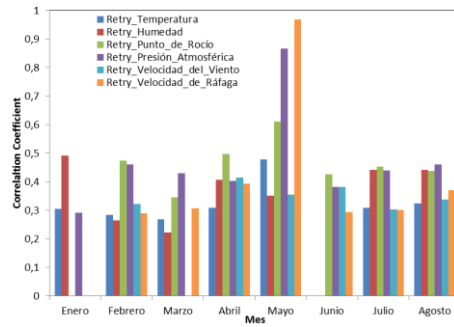
i) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



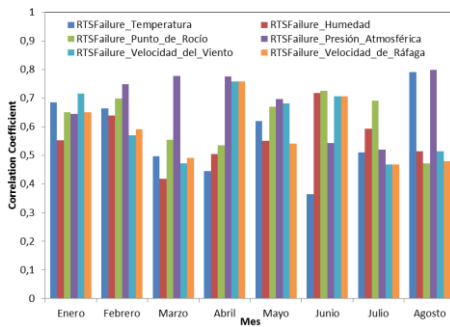
j) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



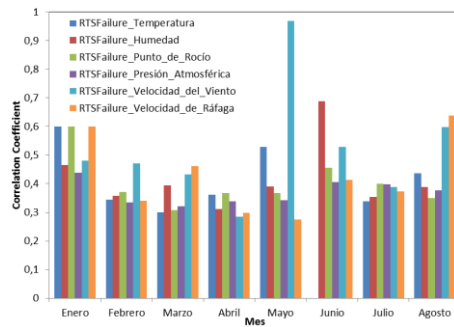
k) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance



l) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance



m) Coeficientes de correlación en el enlace de corto alcance (RTS Failure)



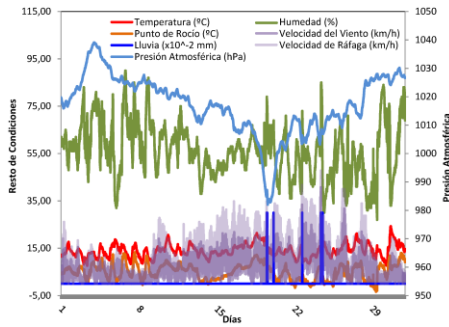
n) Coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance (RTS Failure)

Figura 4-8. Coeficientes de correlación entre los parámetros de rendimiento y las condiciones meteorológicas

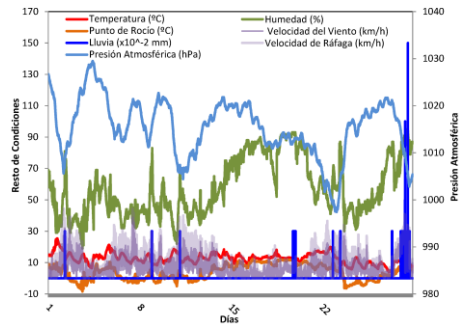
Todos los valores de correlación presentados en la Figura 4-8, han sido reportados por el SPSS como estadísticamente significativos al nivel 0,01, ya que el resultado de la prueba de significancia es 0,000 (Inferior a 0,01). Por lo tanto, se considera que se puede rechazar H_0 y se puede llegar a la conclusión, de que existe una fuerte evidencia para creer que las condiciones meteorológicas y los parámetros de rendimiento estudiados están monótonamente relacionados, con una probabilidad menor al 1% de que el nivel de asociación encontrado haya sucedido por casualidad.

Las condiciones meteorológicas registradas mensualmente durante el periodo de toma de medidas, se presentan en la Figura 4-9. A pesar de que se recogieron datos de lluvia durante algunos periodos de tiempo, no se ha encontrado ningún nivel de correlación significativo con ningún parámetro de rendimiento. Probablemente, esto se deba a que realmente los niveles de tasa de lluvia registrados en esos casos eran realmente bajo (niveles de mililitros). Esta escasez de lluvia es una condición normal en la ciudad de Gandia, lugar donde se llevó a cabo esta investigación.

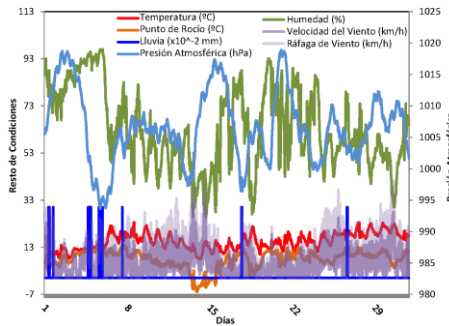
Por otra parte, hay algunos valores perdidos en agosto (ver Figura 4-9 h) en el proceso de toma de medidas, esto fue debido a problemas técnicos que sufrió la estación meteorológica durante esos días.



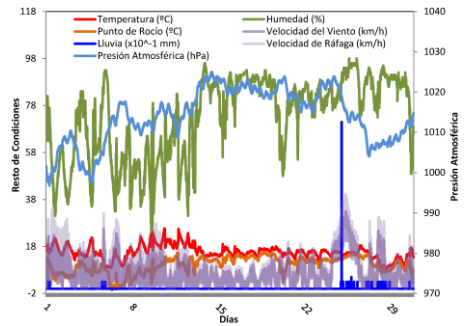
a) Condiciones Meteorológicas de Enero



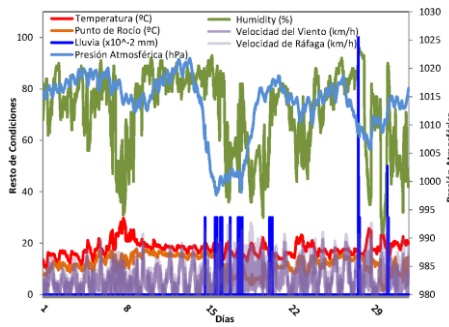
b) Condiciones Meteorológicas de Febrero



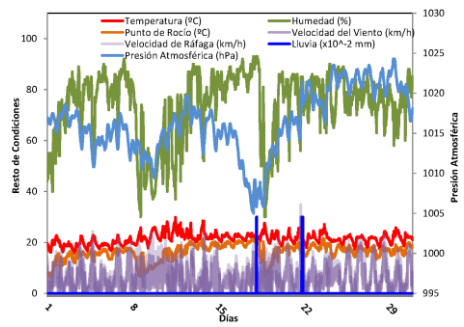
c) Condiciones Meteorológicas en Marzo



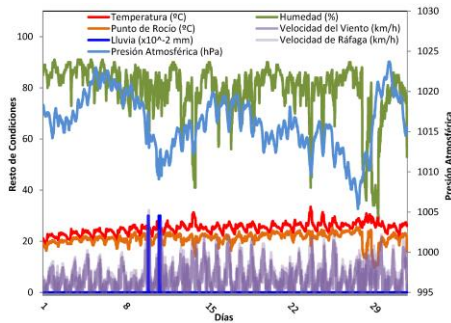
d) Condiciones Meteorológicas en Abril



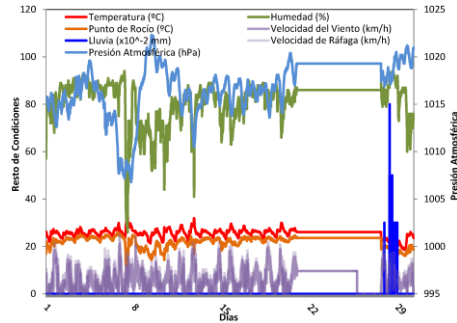
e) Condiciones Meteorológicas en Mayo



f) Condiciones Meteorológicas en Junio



g) Condiciones Meteorológicas en Julio



h) Condiciones Meteorológicas en Agosto

Figura 4-9. Condiciones meteorológicas mensuales

Existen tres aspectos claves a destacar a partir de los resultados obtenidos. En primer lugar, se han obtenido coeficientes de correlación más elevados que en el trabajo previo presentado en el Capítulo 3. Por lo tanto, se puede concluir que realizar este tipo de estudio directamente sobre un escenario real, como es la WLAN exterior del campus de Vera, no es muy conveniente ya que se trata de una red con demasiadas variables no controladas, que pueden suponer el enmascaramiento de correlaciones tan sutiles como las buscadas en este trabajo. Los principales problemas se derivan principalmente del número cambiante de usuarios y, por lo tanto, de la variación de la cantidad de tráfico o carga en la red. Esto conduce a tener más o menos errores en las tramas de control, y no hay manera de aislar las interferencias causadas por los efectos meteorológicos, de las causadas por la congestión de la red, o por las típicas colisiones entre los clientes inalámbricos. Además, otras interferencias no deseadas diferentes a las condiciones meteorológicas, pueden aparecer fácilmente en un escenario WLAN real en cualquier momento, y llevar a resultados erróneos sobre el impacto del tiempo. Por lo tanto, la implementación de un escenario experimental, totalmente controlado en un entorno específico, se consideró esencial para refinar y encontrar las correlaciones subyacentes precisas de esta investigación.

En segundo lugar, como se muestra en la Figura 4-8, los coeficientes de correlación en la columna de la izquierda son generalmente más altos que los presentados en la columna de la derecha. Los resultados mostrados en la columna izquierda se derivan del análisis del enlace de corto alcance (A-C). Este enlace trabaja a las tasas de datos más altas, alcanzadas por las técnicas de modulación empleadas en la tecnología OFDM. En cambio, los resultados que se muestran en la columna derecha se extraen del enlace de largo alcance (A-B). En este caso, los dispositivos se ven obligados a trabajar a menores tasas de datos, debido a la considerable distancia que los separa. Estas son establecidas por las técnicas de modulación soportadas por la tecnología DSSS. Por lo tanto, se puede confirmar que realmente los esquemas de modulación y tasas de datos asociados a la tecnología DSSS, son más robustos frente a las posibles interferencias causadas por las condiciones meteorológicas. Esto lleva a pensar que, a pesar de cubrir una mayor dis-

tancia, las tasas de datos y las modulaciones utilizadas en el enlace más largo (enlace A-B), son menos susceptibles a las variaciones de las condiciones meteorológicas

Por último, otro aspecto interesante a considerar, es analizar cómo varía el grado de asociación entre las condiciones meteorológicas y los errores de las tramas de control, según el tamaño de la trama. Los contadores que registran los tamaños de trama más pequeños son ACKFailureCount y RTSFailureCount, que hacen referencia únicamente a las tramas de control ACK y RTS. El resto de contadores hacen referencia a tamaños de trama mayores, ya que se consideran las tramas que transportan los datos y por tanto poseen mayor carga útil. FCSErrorCount es una excepción, ya que hace referencia a un campo específico de las tramas, por lo tanto es una referencia a nivel de bit. Teniendo en cuenta estas consideraciones, cabe señalar que los coeficientes de correlación más pequeños se producen con la variable FCSErrorCount. Por lo tanto, esto indica que el grado de asociación entre los fenómenos meteorológicos y los parámetros de red, se percibe realmente a nivel de trama más que a nivel de bit. Esto es lógico, porque la relación que puede existir con el nivel de bit de las tramas, es mucho más sutil que con el nivel de fallo entero de la trama.

Además, faltan algunos niveles de correlación en algunos meses, especialmente en el caso de FCSErrorCount (ver Figura 4-8 f). Esto significa que el SPSS no ha mostrado ningún coeficiente de correlación significativo durante ese mes.

El segundo contador con menor grado de asociación con las condiciones meteorológicas es de tramas duplicadas (ver Figura 4-8 h). Este contador puede aumentar, bien porque el remitente no reciba el acuse de recibo (ACK) porque se ha perdido, por lo tanto el remitente retransmite la trama sin ser necesario, o bien porque el medio de transmisión presenta una alta latencia, de tal manera que el tiempo de espera del remitente vence antes de que le llegue el acuse de recibo del receptor y, por lo tanto, el remitente vuelve a retransmitir la trama. En este punto, cabe señalar que los niveles de correlación son similares tanto en el enlace de corto como de largo alcance, sin embargo en algunos casos es incluso mayor en este último, posiblemente debido a que las tramas sufren una mayor latencia por la distancia del mismo.

Si bien, por lo general, los coeficientes de correlación fluctúan durante el mismo mes de una manera similar (ver Figura 4-8); existen meses como Mayo, en el que los niveles de correlación aumentan drásticamente, hasta casi la correlación perfecta en el enlace de largo alcance (ver la columna derecha en la Figura 4-8). La velocidad de ráfaga y la velocidad del viento, son las condiciones meteorológicas que presentan dichos niveles de correlación con los parámetros de red. Esto probablemente fue debido a las condiciones de viento que se dieron del 14 al 20 de mayo, que fueron especialmente fuertes y continuadas (ver Figura 4-9 e). Como se puede ver en la Figura 4-8, este efecto se asocia especialmente a los parámetros de red del enlace de largo alcance, pero también se percibe en algunos contadores del enlace de corto alcance. Por lo tanto, aunque generalmente el rendimiento del enlace de corto alcance es el que muestra una correlación más significativa con las condiciones meteorológicas, en ciertos casos dicha correlación es mayor en el enlace de largo alcance. Así que aunque los datos transmitidos con la tecnología física

DSSS a través de enlace de largo alcance presentan, en general, un grado de asociación inferior con las condiciones meteorológicas, la distancia también es un factor influyente bajo ciertas condiciones, en las que el grado de asociación es incluso superior al del enlace de corto alcance debido al mayor retardo de propagación.

Finalmente, el rango de correlación más común para los contadores del enlace de corto alcance varía desde 0.3 a 0.8. El contador ACKFailureCount (ver Figura 4-8 a) alcanza su grado de asociación mínimo en enero con la condición velocidad de ráfaga de viento. En cambio, su grado de asociación máximo se alcanza en marzo (ver Figura 4-9 c) y en agosto (ver Figura 4-9 h) con la presión atmosférica. Lo mismo sucede con el contador FailedCount (ver gráficos c y d en la Figura 4-8), excepto para el valor mínimo que es proporcionado por la velocidad del viento, y el resto de los contadores. El contador FCSErrorCount es un poco diferente como ya se ha explicado anteriormente.

Por el contrario, los coeficientes de correlación típicos en el enlace de largo alcance varían dentro de un rango más amplio, desde 0.2 (0.1 sólo para el caso de FCSErrorCount) hasta casi 1, como se ha comentado en los párrafos anteriores. Por lo tanto, se puede concluir que en este enlace se presenta una mayor dispersión de los datos de correlación y unas fluctuaciones más irregulares. Sin embargo, debe señalarse que la mayoría de los coeficientes de correlación son más bajos en el enlace de largo alcance y estos están alrededor de 0.2 y 0.5.

Los contadores MultipleRetryCount y RetryCount (ver gráficos i y k en la Figura 4-8), presentan un grado de asociación alto con la presión atmosférica en la mayoría de los meses analizados, alcanzando un nivel de correlación de 0.8 en agosto.

Para concluir esta investigación, se presentan los resultados de este trabajo en promedio en la Tabla 4-3 y en la Tabla 4-4. Las dos primeras columnas muestran el coeficiente de correlación medio de los ocho meses analizados, entre cada parámetro de rendimiento de red y cada condición meteorológica. La primera columna está referida al enlace de corto alcance y la segunda al enlace de largo alcance. Como ya se ha comentado anteriormente, los coeficientes de correlación dependen de la tecnología física empleada para las transmisiones y, por lo tanto de la distancia del enlace. Por lo tanto, en la columna etiquetada como "Tasa de Variación (%)", se recoge el porcentaje del grado de asociación superior de las condiciones meteorológicas con el rendimiento del enlace de corto alcance, con respecto al grado de asociación en el enlace de largo alcance. Finalmente, la columna etiquetada como "Media", muestra el promedio del coeficiente de correlación para cada condición meteorológica, independientemente del parámetro de red.

La temperatura es la que presenta tasa de variación más alta, por lo tanto se considera que su grado de asociación con los parámetros de red, depende en mayor medida del tipo de tecnología física y, por lo tanto, del esquema de modulación y tasa de datos utilizada. Respecto a los parámetros de red, los contadores FailedCount y RetryCount, son que presentan las mayores tasas de variación (ver Tabla 4-3).

La humedad es otra de las condiciones meteorológica que presenta un alto grado de asociación con los parámetros de red. En este caso, son ACKFailureCount

y FailedCount los que presentan las tasas de variación más significativas, del 30% y 34,36% respectivamente (ver Tabla 4-3).

El punto de rocío tiene un comportamiento diferente en los contadores FCSErrorCount y FrameDuplicateCount (ver tasa de variación de color rojo en la Tabla 4-3). En ambos casos, se puede ver que tienen un mayor coeficiente de correlación sobre el enlace de largo alcance. Esto es debido a la función FEC (Forward Error Correction) del estándar IEEE 802.11. De acuerdo con [111], la capa física IEEE 802.11 proporciona diferentes tasas de datos con diferentes esquemas de modulación y velocidades de código. La corrección de errores en recepción del estándar IEEE 802.11, se realiza mediante el entrelazado de bits y la velocidad media de la codificación convolucional. La codificación convolucional tiene la capacidad de corrección de errores proporcional a d_{free} , que es inversamente proporcional a la velocidad de codificación.

En la Tabla 4-4, la presión atmosférica es la condición meteorológica que mayor grado de asociación presenta con los parámetros de red, con un coeficiente de correlación medio de 0.608 sobre el enlace de corto alcance. Además, presenta una tasa de variación media del 26%, por lo tanto el grado de asociación de la presión atmosférica con los parámetros de red medidos sobre el enlace de corto alcance, es un 26% más alto que sobre el enlace de largo alcance. Por lo tanto, de nuevo se demuestra que los esquemas de modulación utilizados en el estándar IEEE 802.11b y sus tasas de datos, bajo la tecnología física DSSS, presentan un menor grado de asociación con las condiciones meteorológicas, que las modulaciones utilizadas en la variante IEEE 802.11g. La velocidad del viento también presenta nivel altos de correlación con los parámetros de red, en este caso especialmente sobre los contadores ACKFailureCount y RTSFailureCount, con niveles de 0.595 y 0.61 respectivamente sobre el enlace de corto alcance. En cambio, con el contador FrameDuplicateCount muestra una tasa de variación negativa (ver tasa de variación de color rojo en la Tabla 4-3), esto sucede por la misma razón que se ha mencionado en el caso del punto de rocío.

Finalmente, en cuanto a la velocidad de ráfaga, relacionada obviamente con la velocidad del viento, presenta conclusiones similares. En este caso, ACKFailureCount y RTSFailureCount muestran los coeficientes de correlación más altos con valores de 0.549 y 0.586. Por último, el contador FailedCount tiene una tasa de variación de un 32,29%, lo que significa que el grado de asociación de la velocidad de ráfaga con los contadores de red, es un 32% mayor en el enlace de corto alcance, respecto del grado de asociación en el enlace de largo alcance.

Como conclusión final de este análisis, se puede decir que la temperatura, la presión atmosférica y la humedad, son las condiciones meteorológicas con un mayor grado de asociación con los parámetros de rendimiento de red a nivel de trama MAC, en el estándar IEEE 802.11b/g. Además, este grado de asociación es más elevado en el caso de los enlaces inalámbricos que trabajan bajo el estándar IEEE 802.11g, ya que, tal como muestran la Tabla 4-3 y la Tabla 4-4, presentan mayores tasas de variación.

Contador	Temperatura			Humedad			Punto de Rocío		
	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)
ACK Failure	0.587	0.433	26.214	0.518	0.362	30.010	0.621	0.478	23.078
Failed	0.545	0.338	37.971	0.538	0.353	34.363	0.582	0.412	29.296
FCS Error	0.374	0.307	17.745	0.316	0.256	18.908	0.382	0.457	-19.685
Frame Duplicate	0.570	0.414	27.400	0.500	0.465	7.023	0.505	0.536	-6.032
Multiple Retry	0.540	0.392	27.327	0.503	0.430	14.605	0.505	0.392	22.437
Retry	0.549	0.326	40.591	0.516	0.374	27.457	0.580	0.464	19.998
RTS Failure	0.572	0.416	27.348	0.561	0.418	25.479	0.625	0.403	35.548
Media	0.534	0.375	29.228	0.493	0.380	22.549	0.543	0.449	14.949

Tabla 4-3. Promedio de los coeficientes de correlación y tasa de variación entre los enlaces de corto y largo alcance (I)

Contador	Presión Atmosférica			Velocidad del Viento			Velocidad de Ráfaga		
	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)	Corto alcance	Largo alcance	Tasa de Variación (%)
ACK Failure	0.621	0.481	22.551	0.595	0.405	32.060	0.549	0.407	25.814
Failed	0.666	0.469	29.497	0.533	0.386	27.529	0.531	0.359	32.295
FCS Error	0.418	0.370	11.457	0.370	0.355	3.879	0.330	0.289	12.307
Frame Duplicate	0.605	0.496	17.996	0.454	0.497	-9.534	0.443	0.402	9.122
Multiple Retry	0.620	0.445	28.234	0.476	0.349	26.745	0.456	0.416	8.932
Retry	0.635	0.467	26.451	0.521	0.353	32.294	0.529	0.418	20.991
RTS Failure	0.688	0.370	46.284	0.610	0.519	14.932	0.586	0.425	27.370
Media	0.608	0.443	26.067	0.508	0.409	18.272	0.489	0.388	19.547

Tabla 4-4. Promedio de los coeficientes de correlación y tasa de variación entre los enlaces de corto y largo alcance (II)

4.4.2 Resultados (II): Estudio de Correlación Agrupado

El objetivo de este segundo análisis es determinar bajo qué rangos de las condiciones meteorológicas, el grado de asociación entre los parámetros de red y dichas condiciones es mayor, en los enlaces IEEE 802.11b/g.

Como en el análisis anterior se demostró que existe un grado de asociación significativo entre las condiciones meteorológicas y los parámetros de rendimiento de los enlaces, se decidió llevar a cabo un análisis más exhaustivo sobre este tema, en el que se tuvieran en cuenta los rangos de las variables meteorológicas. Además, con este análisis se considera el grado de asociación, a partir de los rangos de todas las condiciones meteorológicas que interactúan al mismo tiempo. Esto es realmente lo que ocurre en la realidad y como podrían influir sobre la transmisión de las señales inalámbricas. El análisis anterior sólo presenta los niveles de corre-

lación entre cada una de las condiciones meteorológicas y cada uno de los parámetros de red. Por lo tanto, no se evalúa de ningún modo la combinación de las condiciones meteorológicas.

Como en la realidad las condiciones meteorológicas no se pueden aislar, en esta segunda subsección se presenta un análisis de correlación, pero considerando los rangos en los que se encuentran las condiciones meteorológicas simultáneamente. Además, conocer el grado de asociación según el rango en el que se encuentren las condiciones meteorológicas, es muy interesante para futuras propuestas de mejora del protocolo radio. En esta tesis doctoral, este análisis servirá como base para el algoritmo cognitivo presentado en el Capítulo 5.

Según la estación en la que nos encontremos, las condiciones meteorológicas varían dentro de ciertos rangos/intervalos, de acuerdo a la zona terrestre en la que nos encontremos. Es de esperar, que dependiendo de la combinación de tales intervalos, éstos resulten en un mayor o menor número de problemas en las transmisiones inalámbricas. Por lo tanto, el objetivo de este segundo análisis es mostrar el nivel de correlación entre cada condición meteorológica y cada parámetro de rendimiento, según el intervalo en el que se encuentren las condiciones meteorológicas estudiadas. De esta manera, se podrá determinar bajo qué rangos de las condiciones meteorológicas el grado de asociación del tiempo con el rendimiento de la red es mayor y, por lo tanto, sería conveniente llevar a cabo algún tipo de adaptación de la red.

Para ello, en primer lugar se requiere la división de las condiciones meteorológicas en grupos. En este caso, de nuevo, se utiliza el software SPSS. Este programa permite realizar agrupaciones visuales mediante la división de las variables en grupos. La agrupación visual en SPSS está diseñada para crear nuevas variables, basadas en la agrupación de los valores contiguos de las variables en un número limitado de categorías distintas. Este tipo de agrupamiento requiere que las variables sean numéricas, escalares u ordinales, ya que asume que los valores de los datos representan algún orden lógico que pueda ser utilizado para agruparlos de una manera significativa.

En esta investigación, la agrupación visual permite convertir los datos contiguos de las condiciones meteorológicas, en nuevas variables categóricas basadas en los rangos de dichas condiciones. El objetivo es estudiar si, en función de los rangos de las condiciones meteorológicas, su grado de asociación es mayor o menor con el rendimiento de los enlaces IEEE 802.11b/g. Además, debido al largo período y la frecuencia de la toma de medidas, el número de muestras tomadas de cada condición y parámetro es muy elevado (magnitud de millones). Así, de esta forma, se reduce a un número de muestras adecuado para ser analizado estadísticamente.

Con el fin de dividir las variables de forma regular, SPSS define tres formas de hacer los puntos de corte. En primer lugar, permite crear clases de igual anchura, más una primera clase sin un límite inferior definido y una clase final sin un límite superior. En segundo lugar, se pueden crear las clases basándose en la igualdad de los percentiles. Esto significa que todas las clases contienen un número igual de observaciones. Por último, SPSS también permite dividir las variables definiendo

un punto de corte en el valor medio y en ± 1 , ± 2 o ± 3 desviaciones estándar sobre la base de los casos explorados.

En esta investigación cada condición se ha dividido mediante esta última técnica, de acuerdo a su media y ± 1 desviación estándar. De esta forma, se han tenido en cuenta todos los datos recogidos y cada condición meteorológica se ha dividido en cuatro grupos distintos. Se ha considerado que, de acuerdo con la naturaleza de estas variables, cuatro grupos es un número suficiente y razonable de categorías. Un número menor podría haber implicado una investigación no tan detallada y un número mayor, supone un número inmanejable de combinaciones, aumentando considerablemente la complejidad del análisis de los resultados y del diseño del algoritmo cognitivo presentado en el Capítulo 5.

La Figura 4-10 representa la división llevada a cabo en esta investigación sobre los datos recogidos, mediante la herramienta de agrupación visual del SPSS. En una curva normal, alrededor del 68% de las muestras, caen dentro del rango de ± 1 desviación estándar (σ) de la media (\bar{x}) (grupo 2 y 3 en la Figura 4-10); y el 32% restante representa al resto de muestras, en este trabajo divididas en los grupos 1 y 4 de la Figura 4-10.

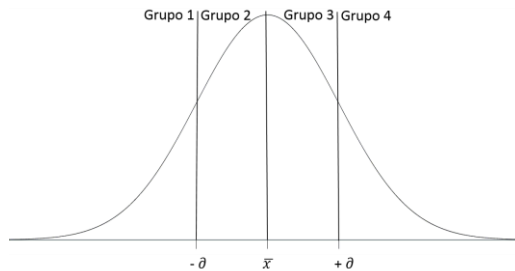


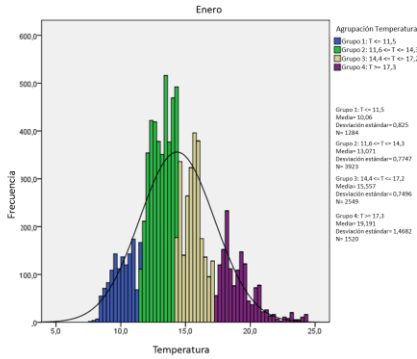
Figura 4-10. Asignación visual basada en ± 1 desviación estándar de la media

Debido al importante volumen de datos (una medición por minuto, las 24 horas durante seis meses), se ha decidido presentar únicamente los resultados de dos meses muy diferentes en cuanto al clima: enero y julio. Se considera que este resumen del análisis es adecuado y suficiente, para demostrar la clara correlación que presentan los datos analizados. De esta manera, se dispone de un documento de longitud manejable. Por otra parte, sólo se presentan las tablas de resultados obtenidas del SPSS para enero. En el caso de julio, se detallan los resultados a través de explicaciones para facilitar la lectura y comprensión de esta tesis doctoral.

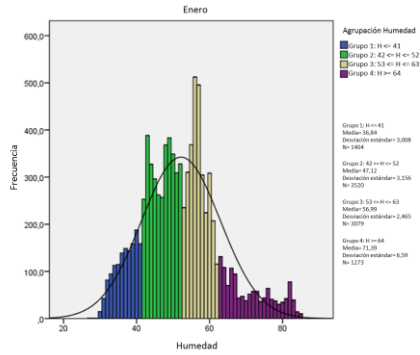
Los histogramas de la Figura 4-11 y de la Figura 4-12, muestran la distribución de frecuencias de cada una de las condiciones meteorológicas estudiadas, con su correspondiente división en grupos para los meses de enero y julio. Además, se muestra el valor medio de los datos, su desviación estándar y el número de muestras de cada grupo. Finalmente, también se presenta la curva normal estándar en color negro sobre las distribuciones, para demostrar que la mayoría de las condiciones no siguen una distribución normal perfecta.

En enero, la temperatura varía desde los 7-8 °C hasta casi los 25°C. Pero, la mayor parte del tiempo se sitúa en torno a los 13-14 °C (ver Figura 4-11 a). En el caso de la humedad, es una condición muy significativa en el lugar costero donde

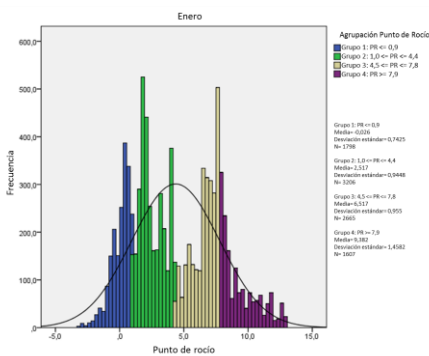
se ha llevado a cabo este estudio, y varía desde el 30% hasta un 85%, siendo el 57% el valor más frecuente (ver Figura 4-11 b). La Figura 4-11 c, muestra la distribución del punto de rocío, que presenta una mayor variabilidad y se mide también en °C, porque se trata de un nivel de temperatura. En enero, hay dos valores frecuentes: 7.8 y 1.3. Por último, la presión atmosférica más frecuente está alrededor de 1015hPa (ver Figura 4-11 d).



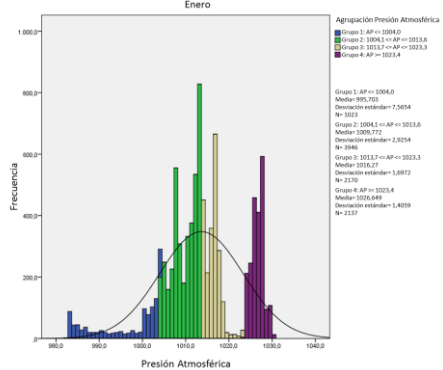
a) Distribución de frecuencias de la temperatura



b) Distribución de frecuencias de la humedad



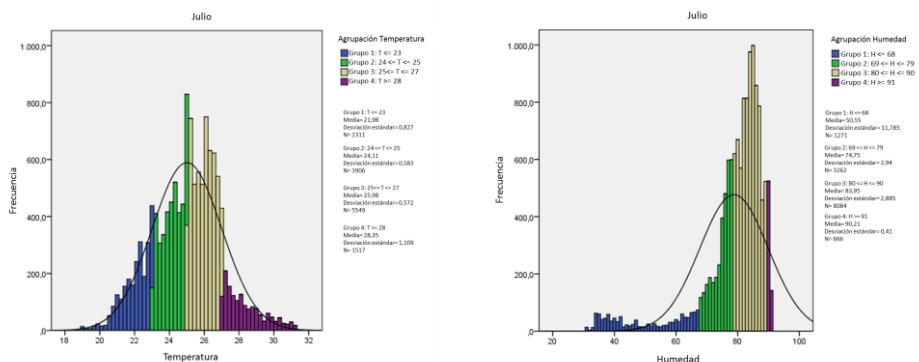
c) Distribución de frecuencias del punto de rocío



d) Distribución de frecuencias de la presión atmosférica

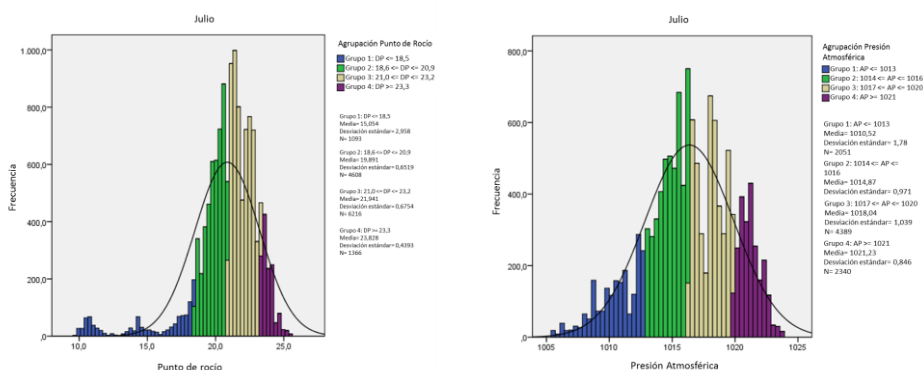
Figura 4-11. Distribución de frecuencia de las condiciones meteorológicas agrupadas en enero

Como en enero, los histogramas mostrados en la Figura 4-12, presentan la distribución de frecuencias de las condiciones meteorológicas en julio. Obviamente, como se puede ver en la Figura 4-12 a, la temperatura en julio es mucho más alta que en enero. En este caso, la distribución de frecuencias sigue casi una distribución normal siendo, 25°C el valor medio más frecuente. Los valores más comunes de humedad se encuentran entre el 80 y el 90% (ver Figura 4-12 b), ligeramente más altos que en enero. La Figura 4-12 c, muestra que el punto de rocío más habitual en julio se encuentra alrededor de los 22°C y, respecto a la presión atmosférica (ver Figura 4-12 d), se encuentra alrededor de 1016 a 1018hPa.



a) Distribución de frecuencias de la temperatura

b) Distribución de frecuencias de la humedad



c) Distribución de frecuencias del punto de rocío

d) Distribución de frecuencias de la presión atmosférica

Figura 4-12. Distribución de frecuencia de las condiciones meteorológicas agrupadas en julio

A continuación, se presentan los resultados más importantes obtenidos en enero y en julio. Aparte del nivel preciso de correlación, también se presenta el número de muestras utilizadas por SPSS para extraer dichos coeficientes de correlación (N), y el nivel de significancia (Sig.). Todos los valores de correlación presentados en este análisis han sido reportados por el SPSS como estadísticamente significativos. Por lo tanto, se puede rechazar la hipótesis H_0 , y se puede concluir que existe una fuerte evidencia para creer que las variables meteorológicas y los parámetros de rendimiento presentan una correlación monótona con una probabilidad menor al 1% (valor de significancia menor a 0.01 señalado en las tablas con doble asterisco**) o al 5% (valor de significancia menor a 0.05 señalado en las tablas con un asterisco*), de que tal nivel de asociación haya ocurrido por casualidad.

Como se puede ver en las siguientes tablas de resultados, el número de muestras (N) en el enlace de largo alcance es generalmente más bajo que en el enlace de corto alcance. Esto se debe a su mayor distancia, ya que implica mayores

pérdidas de paquetes y, por lo tanto, menor número de muestras de cada agrupación.

Todas las tablas presentadas, se dividen en los resultados obtenidos sobre el enlace de corto alcance y los obtenidos sobre el enlace de largo alcance, con el fin de hacer más fácil su comparación. Finalmente, las últimas cuatro columnas de la derecha, señalan en qué grupo se encuentra cada una de las condiciones meteorológicas, para ese conjunto de datos del que se deriva el nivel de correlación correspondiente.

La Tabla 4-5, recoge los niveles de correlación más elevados entre la temperatura y los parámetros de rendimiento, de acuerdo con los grupos correspondientes de las condiciones meteorológicas. En cuanto a los resultados obtenidos sobre el enlace de corto alcance, la temperatura presenta un mayor grado de asociación con el contador `FrameDuplicateCount`. Distintas agrupaciones de las condiciones meteorológicas, muestran un nivel significativo de correlación con este contador, en el que la mayoría de los casos se encuentra alrededor de 0.4 Sin embargo, los contadores `ACKFailureCount` y `RTSFailureCount`, presentan los niveles más altos de correlación, especialmente para las agrupaciones T=2, H=4, PR=2, AP=4; T=4, H=1, PR=2, AP=2; T=2, H=4, PR=2, AP=1 y T=1, H=3, PR=4, AP=4, cuyos niveles son superiores a 0.6. Finalmente, los contadores `RetryCount`, `MultipleRetryCount` y `FailedCount`, también presentan un significativo grado de asociación con la temperatura, entre 0.5 y 0.6, pero en un menor número de agrupaciones. Como se puede observar, el rendimiento del enlace de corto presenta un grado de asociación con la temperatura principalmente positivo, lo cual indica que conforme aumenta la temperatura, también lo hacen los parámetros de rendimiento considerados, que suponen un mayor número de tramas de control MAC erróneas o pérdidas.

Por el contrario, los resultados del enlace de largo alcance, muestran una relación negativa, por lo que de acuerdo con el conjunto de datos analizados, conforme aumenta la temperatura, el número de tramas pérdidas o erróneas disminuye o viceversa. Probablemente, esta diferencia se deba a la diferente distancia de los enlaces. El enlace de corto alcance funciona a tasas de datos más altas, y los esquemas de modulación utilizados son más susceptibles a los cambios del tiempo. Esa es también la razón por la cual, la mayoría de los coeficientes de correlación, son más altos para el enlace de corto alcance que para el de largo alcance, a pesar de cubrir una distancia menor. De nuevo, en el enlace de largo alcance, es el contador `FrameDuplicateCount` el que presenta un mayor número de agrupaciones con un nivel de correlación significativo con la temperatura. En este caso, el coeficiente de correlación más alto se presenta sobre este contador con un nivel de 0.6 para la agrupación T=3, H=3, PR=4, AP=3. Sin embargo, es necesario destacar que el número de muestras es bajo (N = 17). La mayoría de los coeficientes de correlación en el enlace de largo alcance se encuentran alrededor de 0.4 y 0.3.

La agrupación de las condiciones meteorológicas, ha permitido mostrar los rangos bajo los cuales el grado de asociación es mayor, y sobre qué parámetros de rendimiento. Como se puede ver en la Tabla 4-5, cuando la temperatura se mantiene entre el grupo 1 o 2, la humedad entre el grupo 3 o 4, el punto de rocío en el grupo 2 o 4, y la presión atmosférica principalmente en el grupo 4, la temperatura afecta generalmente a los parámetros de rendimiento en el enlace de corto alcance.

	Coefficiente de Correlación de Spearman entre la Temperatura y cada Contador	N	Sig.	Grupo de la Temperatura (T)	Grupo de la Humedad (H)	Grupo del Punto de Rocío (PR)	Grupo de la Presión Atmosférica (AP)
Enlace de Corto Alcance							
FrameDuplicateCount	0,459**	153	0	4	3	1	4
FrameDuplicateCount	0,461**	220	0	4	3	2	2
ACKFailureCount	-0,616**	43	0	4	1	2	2
FrameDuplicateCount	0,425**	140	0	3	3	2	4
ACKFailureCount	0,616**	97	0	2	4	2	4
FrameDuplicateCount	0,609**	97	0	2	4	2	4
RetryCount	0,521**	97	0	2	4	2	4
RTSFailureCount	0,685**	97	0	2	4	2	4
FrameDuplicateCount	-0,515**	43	0	2	4	2	1
FrameDuplicateCount	0,448**	165	0	2	3	4	1
FrameDuplicateCount	0,413**	39	0	2	2	4	2
RTSFailureCount	0,502**	80	0	2	1	2	4
MultipleRetryCount	0,461**	118	0	1	4	2	3
ACKFailureCount	0,526**	353	0	1	3	4	4
FrameDuplicateCount	0,607**	353	0	1	3	4	4
RetryCount	0,652**	353	0	1	3	4	4
RTSFailureCount	0,536**	353	0	1	3	4	4
MultipleRetryCount	-0,465**	258	0	1	2	4	4
ACKFailureCount	0,411**	25	0	1	1	4	4
FailedCount	-0,503**	25	0	1	1	4	4
Enlace de Largo Alcance							
FrameDuplicateCount	-0,259*	67	0,035	3	4	4	3
FrameDuplicateCount	-0,612**	17	0,009	3	3	4	3
FrameDuplicateCount	-0,422*	33	0,014	3	1	2	2
ACKFailureCount	0,452*	23	0,030	2	4	4	3
FrameDuplicateCount	-0,447*	23	0,032	2	4	4	3
ACKFailureCount	-0,429**	41	0,005	2	3	3	3
MultipleRetryCount	-0,339*	37	0,040	2	2	1	3
FailedCount	-0,339*	52	0,014	2	2	1	1
RetryCount	-0,306*	52	0,027	2	2	1	1
FCSErrorCount	-0,438*	29	0,017	2	1	1	3
FailedCount	-0,247*	65	0,047	1	4	3	3
FrameDuplicateCount	-0,333**	65	0,006	1	4	3	3

Tabla 4-5. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la temperatura en enero

En cuanto al grado de asociación de la temperatura con los parámetros de red en julio, sobre el enlace de corto alcance, se percibe principalmente sobre el contador ACKFailureCount. Diversas agrupaciones de las condiciones meteorológicas, muestran un nivel significativo en este contador. Sin embargo, el mayor coeficiente de correlación, 0.698, se da para la agrupación T=3, H=2, PR=2, AP=3. El resto de casos, se encuentran en niveles de asociación de alrededor de 0.4 y 0.5. Como se mostraba en los resultados de enero en el enlace de corto alcance, el grado de asociación entre la temperatura y los contadores de red es positivo, es decir, conforme aumenta la temperatura, el número de tramas de control perdidas o erróneas es mayor. En este caso, los resultados en el enlace de largo alcance, presentan los mayores coeficientes de correlación. Los contadores ACKFailureCount y RTSFailureCount, presentan niveles de correlación con la temperatura de casi 0.8, para la agrupación T=4, H=1, PR=1, AP=3. Esta agrupación presenta, en diversos casos, los coeficientes de correlación más altos. Por lo tanto, en general, la coeficientes de correlación entre la temperatura y los contadores en julio son más altos que en enero. Según los resultados obtenidos, esto es lógico ya que al presentar una asociación positiva, a mayor temperatura, mayor número de trama de control erróneas o perdidas. Aunque hay que tener en cuenta, que también dependerá del resto de las condiciones meteorológicas porque siempre se dan en conjunto, y hay muchas más de las estudiadas en este trabajo.

La Tabla 4-6, recoge los niveles de correlación entre la humedad y los parámetros de rendimiento de red, según las posibles agrupaciones de las condiciones meteorológicas. En cuanto a los resultados sobre el enlace de corto alcance, el grado de asociación de la humedad es principalmente alto con los contadores FailedCount y MultipleRetryCount. Varias agrupaciones muestran una asociación significativa con estos contadores. Sin embargo, el valor más alto se presenta en FailedCount bajo la agrupación T=4, H=1, PR=1, AP=1, con un nivel de correlación de 0.607, y en el caso de MultipleRetryCount en la agrupación T=1, H=1, PR=1, AP=4, con un nivel de 0.748. En estos casos se demuestra que, a pesar de presentar un bajo número de muestras (N = 31 para FailedCount y N = 25 para MultipleRetryCount), los coeficientes de correlación son altos. Así que, como se ha comentado antes, aunque el enlace de largo alcance presenta un menor número de muestras para cada agrupación, no le impide presentar altos niveles de correlación. Por lo tanto, los coeficientes de correlación más bajos que se presentan en el enlace de largo alcance, realmente indican un grado de asociación menor que en el enlace de corto alcance. Otro aspecto importante que se puede destacar de los resultados obtenidos del enlace de corto alcance, es que hay alguna agrupación, como T=1, H=1, PR=4, AP=4, en la que la humedad presenta un grado de asociación significativo sobre varios contadores, en este caso, sobre ACKFailureCount, FailedCount, MultipleRetryCount y RTSFailureCount. Esto es completamente lógico, ya que la mayoría de estos contadores están directamente y altamente relacionados por el tipo de condiciones que monitorizan. Además, los resultados muestran que el grado de asociación de la humedad con los contadores, puede ser de dirección positiva o negativa, depende de los rangos en los que se encuentren el resto de las condiciones meteorológicas. Por último, hay que destacar que, los niveles de correlación más altos se dan sobre los contadores RetryCount (0.689), RTSFailureCount (-0.795), y ACKFailureCount (0.615). Para el enlace de largo alcance, los contadores RetryCount, ACKFailureCount, RTSFailureCount y FrameDuplicateCount, son los que presentan los grados de asociación más altos con la humedad, llegando casi a un nivel de 0.5.

El grado de asociación de la humedad en julio con los contadores de red, es particularmente alto con ACKFailureCount, RetryCount y RTSFailureCount, con un nivel de correlación de casi 0.6 para la agrupación T=3, H=1, PR=1, AP=3, en el enlace de corto alcance. Es similar a los resultados anteriores de temperatura, pero cambian los rangos de la humedad y punto de rocío. Otra agrupación importante es T=1, H=3, PR=2, AP=3, ya que sobre ésta la humedad presenta un alto grado de asociación sobre varios contadores, aunque los coeficientes de correlación no son tan altos como en el caso anterior. La agrupación más significativa para el enlace de largo alcance es T=2, H=2, PR=1, AP=4, en la que RTSFailureCount logra un grado de correlación de -0.6 con la humedad. Por otra parte, en la agrupación T=1, H=3, PR=1, AP=2, hay varios contadores que se incrementan significativamente conforme la humedad disminuye.

	Coefficiente de Correlación de Spearman entre la Humedad y cada Contador	N	Sig.	Grupo de la Temperatura (T)	Grupo de la Humedad (H)	Grupo del Punto de Rocío (PR)	Grupo de la Presión Atmosférica (AP)
Enlace de Corto Alcance							
FailedCount	0,607**	31	0	4	1	1	1
FailedCount	-0,465**	140	0	3	3	2	4
FailedCount	-0,584**	68	0	3	3	3	2
RetryCount	0,689**	92	0	3	2	3	4
RTSFailureCount	-0,795**	43	0	2	4	2	1
MultipleRetryCount	0,563**	47	0	2	3	3	4
FrameDuplicateCount	-0,427**	165	0	2	3	4	1
RTSFailureCount	0,553**	155	0	2	1	2	3
ACKFailureCount	0,394**	87	0	1	4	3	4
FailedCount	-0,475**	87	0	1	4	3	4
MultipleRetryCount	-0,446**	353	0	1	3	4	4
MultipleRetryCount	0,461**	258	0	1	2	4	4
ACKFailureCount	0,615**	25	0	1	1	4	4
FailedCount	-0,584**	25	0	1	1	4	4
MultipleRetryCount	0,748**	25	0	1	1	4	4
RTSFailureCount	0,521**	25	0	1	1	4	4
Enlace de Largo Alcance							
RetryCount	-0,491*	18	0,038	4	1	2	2
FrameDuplicateCount	0,288*	67	0,018	3	4	4	3
ACKFailureCount	0,497*	17	0,042	3	3	4	3
FCSErrorCount	-0,414*	33	0,017	3	1	2	2
ACKFailureCount	0,327*	41	0,037	2	3	3	3
RTSFailureCount	-0,465**	37	0,004	2	2	1	3
MultipleRetryCount	0,388*	29	0,034	2	1	1	3
FailedCount	0,397**	54	0,003	1	3	2	3
FrameDuplicateCount	0,465**	54	0	1	3	2	3

Tabla 4-6. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la humedad en enero

La Tabla 4-7 recoge los niveles de correlación más altos entre el punto de rocío y los parámetros de rendimiento de red. Se aprecian varios coeficientes de correlación importantes sobre el enlace de corto alcance. Los coeficientes más altos se han obtenido sobre los contadores ACKFailureCount, FailedCount y MultipleRetryCount, con niveles de casi 0.8 para la agrupación T=1, H=1, PR=4, AP=4. Cabe destacar esta agrupación ya que aparece en todas las tablas de resultados presentadas. También la agrupación T=1, H=3, PR=4, AP=4, donde la humedad es la única condición meteorológica que varía con respecto a la anterior, aparece en varias tablas de resultados. En cuanto al enlace de largo alcance, hay que destacar el nivel de correlación entre el contador FrameDuplicateCount y el punto de rocío, con un nivel de 0.64 para la agrupación T=1, H=2, DP=1, AP=1. Finalmente, otra agrupación significativa es T=1, H=3, PR=2, AP=3. En julio, el punto de rocío en el enlace de corto alcance, presenta varias agrupaciones sobresalientes: T=4, H=1, PR=1, AP=1; T=1, H=2, PR=2, AP=4 y T=3, H=1, PR=1, AP=3. Este último caso, presenta el nivel de correlación más importante en RetryCount y RTSFailureCount, con un valor de casi 0.7. Respecto al enlace de largo alcance, cabe destacar cuatro agrupaciones en particular: T=4, H=1, PR=1, AP=3; T=2, H=3, PR=2, AP=1; T=2, H=2, PR=1, AP=4 y T=1, H=3, PR=1, AP=2. ACKFailureCount y FrameDuplicateCount son los contadores que reflejan el grado de asociación más alto con el punto de rocío, con niveles por encima de 0.7.

	Coefficiente de Correlación de Spearman entre el Punto de Rocío y cada Contador	N	Sig.	Grupo de la Temperatura (T)	Grupo de la Humedad (H)	Grupo del Punto de Rocío (PR)	Grupo de la Presión At- mosférica (AP)
Enlace de Corto Alcance							
FrameDuplicateCount	-0,427**	43	0	4	1	2	2
FrameDuplicateCount	-0,436**	583	0	3	3	3	1
ACKFailureCount	0,719**	92	0	3	2	3	4
RTSFailureCount	0,402**	92	0	3	2	3	4
RetryCount	-0,446**	97	0	2	4	2	4
RTSFailureCount	-0,651**	97	0	2	4	2	4
RTSFailureCount	0,521**	67	0	2	3	3	3
FailedCount	0,463**	263	0	2	2	3	4
FailedCount	0,411**	118	0	1	4	2	3
ACKFailureCount	0,491**	87	0	1	4	3	4
FailedCount	-0,616**	87	0	1	4	3	4
ACKFailureCount	0,392**	33	0	1	3	4	3
FrameDuplicateCount	0,392**	33	0	1	3	4	3
MultipleRetryCount	0,392**	33	0	1	3	4	3
RTSFailureCount	0,395**	33	0	1	3	4	3
ACKFailureCount	0,452**	353	0	1	3	4	4
FailedCount	0,413**	353	0	1	3	4	4
FrameDuplicateCount	0,396**	353	0	1	3	4	4
RetryCount	0,561**	353	0	1	3	4	4
RTSFailureCount	0,445**	353	0	1	3	4	4
RetryCount	0,475**	258	0	1	2	4	4
ACKFailureCount	0,787**	25	0	1	1	4	4
FailedCount	-0,842**	25	0	1	1	4	4
FrameDuplicateCount	-0,507**	25	0	1	1	4	4
MultipleRetryCount	0,847**	25	0	1	1	4	4
RTSFailureCount	0,467**	25	0	1	1	4	4
Enlace de Largo Alcance							
FCSErrorCount	-0,400*	33	0,021	3	1	2	2
ACKFailureCount	0,565*	18	0,014	3	1	1	3
ACKFailureCount	0,488*	23	0,018	2	4	4	3
FrameDuplicateCount	0,437**	52	0,001	2	2	1	1
FCSErrorCount	-0,444*	29	0,016	2	1	1	3
FrameDuplicateCount	-0,308*	65	0,013	1	4	3	3
FailedCount	0,325*	54	0,016	1	3	2	3
FrameDuplicateCount	0,432**	54	0,001	1	3	2	3
MultipleRetryCount	0,273*	54	0,046	1	3	2	3
FrameDuplicateCount	0,643**	16	0,007	1	2	1	1

Tabla 4-7. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y el punto de rocío en enero

La Tabla 4-8 recoge los niveles de correlación entre la presión atmosférica y los parámetros de rendimiento capturados del enlace de corto y largo alcance, según el rango en el que se encuentre ésta y el resto de condiciones meteorológicas. Se pueden observar los niveles más altos de correlación, entre la presión atmosférica y cada uno de los contadores de tramas MAC erróneas y perdidas. Los niveles más significativos, se han obtenido sobre el enlace de corto alcance para la agrupación meteorológica T=1, H=1, PR=4, AP=4. Los contadores con un mayor grado de asociación son ACKFailureCount, FailedCount y MultipleRetryCount, con niveles de 0.8 y 0.9. Otra agrupación importante es T=2, H=4, PR=2, AP=4, que también es significativa en la tabla de resultados de la temperatura. La presión atmosférica, es la condición meteorológica que presenta el mayor número de agrupaciones significativas sobre el enlace de corta distancia. En el enlace de largo alcance, destaca de nuevo la agrupación T=1, H=3, PR=2, AP=3, bajo la cual se presenta el mayor número de contadores, con un grado de asociación alto con la presión atmosférica. El contador FailedCount, con un coeficiente de -0.651, es el que presenta el mayor grado de asociación.

	Coefficiente de Correlación de Spearman entre la Presión Atmosférica y cada Contador	N	Sig.	Grupo de la Temperatura (T)	Grupo de la Humedad (H)	Grupo del Punto de Rocío (PR)	Grupo de la Presión At- mosférica (AP)
Enlace de Corto Alcance							
FrameDuplicateCount	-0,481**	228	0	4	2	2	4
FrameDuplicateCount	-0,425**	29	0	4	1	2	3
RetryCount	-0,733**	33	0	4	1	1	1
FailedCount	0,563**	164	0	3	3	2	1
RetryCount	0,413**	68	0	3	3	3	2
ACKFailureCount	-0,507**	154	0	3	2	3	1
RTSFailureCount	-0,652**	55	0	3	1	1	2
MultipleRetryCount	0,722**	140	0	2	4	2	2
ACKFailureCount	0,411**	97	0	2	4	2	4
FrameDuplicateCount	0,413**	97	0	2	4	2	4
MultipleRetryCount	0,563**	97	0	2	4	2	4
RetryCount	0,425**	97	0	2	4	2	4
RTSFailureCount	0,639**	97	0	2	4	2	4
FailedCount	0,794**	43	0	2	4	2	1
RTSFailureCount	0,695**	47	0	2	3	3	4
RTSFailureCount	0,645**	200	0	2	3	3	4
RetryCount	-0,731**	22	0	2	2	4	4
FailedCount	-0,406**	1167	0	2	2	3	3
RTSFailureCount	0,434**	263	0	2	2	3	4
ACKFailureCount	0,715**	39	0	2	2	4	2
ACKFailureCount	-0,611**	87	0	1	4	3	4
FailedCount	0,651**	87	0	1	4	3	4
ACKFailureCount	0,448**	33	0	1	3	4	3
FrameDuplicateCount	0,448**	33	0	1	3	4	3
MultipleRetryCount	0,448**	33	0	1	3	4	3
RTSFailureCount	0,439**	33	0	1	3	4	3
RTSFailureCount	0,423**	353	0	1	3	4	4
FailedCount	0,396**	186	0	1	3	3	3
MultipleRetryCount	-0,551**	186	0	1	3	3	3
RetryCount	0,422**	112	0	1	2	4	2
MultipleRetryCount	-0,553**	258	0	1	2	4	4
ACKFailureCount	-0,824**	25	0	1	1	4	4
FailedCount	0,875**	25	0	1	1	4	4
FrameDuplicateCount	0,521**	25	0	1	1	4	4
MultipleRetryCount	-0,902**	25	0	1	1	4	4
Enlace de Largo Alcance							
FrameDuplicateCount	-0,456**	67	0	3	4	4	3
FrameDuplicateCount	-0,629**	17	0,007	3	3	4	3
ACKFailureCount	0,447*	23	0,032	2	4	4	3
FrameDuplicateCount	-0,372*	37	0,023	2	2	1	3
FrameDuplicateCount	-0,472**	52	0	2	2	1	1
ACKFailureCount	-0,434**	54	0,001	1	3	2	3
FailedCount	-0,651**	54	0	1	3	2	3
FrameDuplicateCount	-0,535**	54	0	1	3	2	3
MultipleRetryCount	-0,367**	54	0,006	1	3	2	3
RTSFailureCount	-0,439**	54	0,001	1	3	2	3

Tabla 4-8. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la presión atmosférica en enero

La agrupación T=2, H=3, PR=2, AP=2 es la que presenta más casos con un alto grado de asociación entre los contadores y la presión atmosférica en julio. Sin embargo, es T=3, H=3, PR=1, AP=1, la agrupación que presenta el mayor coeficiente de correlación, con un valor de -0.7 con el contador FailedCount en el enlace de corto alcance. Los resultados para el enlace de largo alcance, presentan dos agrupaciones importantes: T=4, H=2, PR=3, AP=1 y T=4, H=1, PR=1, AP=3, con niveles de correlación de aproximadamente 0.6, especialmente con los contadores FrameDuplicateCount, ACKFailureCount y RTSFailureCount.

Por último, la Tabla 4-9 recoge los niveles más significativos de correlación entre la velocidad del viento y los contadores de red, según los rangos en los que se encuentren el resto de las condiciones meteorológicas. En este trabajo, no se ha considerado la división en grupos de la velocidad del viento debido a ciertas

particularidades de esta variable. El impacto del viento sobre el rendimiento de las transmisiones inalámbricas, puede ser debido a dos posibles razones. Por un lado, puede dar lugar a pequeños movimientos de las antenas, y generar desequilibrios en las mismas que dificulten la propagación de las ondas electromagnéticas y, por lo tanto, la comunicación entre el emisor y el receptor. Por otro lado, el viento puede arrastrar pequeñas partículas sólidas que bloquean o dificulten la comunicación inalámbrica debido a estos obstáculos físicos. En estos casos, la dirección del viento es fundamental. Por lo tanto, la influencia del viento sobre las comunicaciones inalámbricas claramente es muy variable, y puede cambiar rápidamente de un momento a otro y según el lugar en el que se sitúen las antenas. Por lo tanto, se ha analizado esta variable según el rango en el que se encuentren el resto de condiciones meteorológicas. Los resultados del análisis muestran que, la velocidad del viento presenta un alto grado de asociación con los contadores considerados, especialmente con RTSFailureCount y FailedCount, con niveles de correlación de casi 0.7 para el enlace de corto alcance. La principal agrupación es T=1, H=1, PR=4, AP=4, ya que presenta el mayor número de correlaciones significativas. En este caso, el enlace de largo alcance también presenta un nivel de correlación de 0.7 para la agrupación T=1, H=2, PR=1, AP=1.

	Coefficiente de Correlación de Spearman entre la Velocidad del Viento y cada Contador	N	Sig.	Grupo de la Temperatura (T)	Grupo de la Humedad (H)	Grupo del Punto de Rocío (PR)	Grupo de la Presión Atmosférica (AP)
Enlace de Corto Alcance							
RetryCount	-0,446**	338	0	3	4	1	2
FailedCount	-0,651**	25	0	3	4	2	2
RetryCount	-0,651**	25	0	3	4	2	2
ACKFailureCount	0,452**	68	0	3	3	3	2
RetryCount	0,452**	168	0	3	1	1	3
RTSFailureCount	0,463**	168	0	3	1	1	3
RetryCount	0,561**	97	0	2	4	2	4
RTSFailureCount	-0,716**	43	0	2	4	2	1
ACKFailureCount	-0,577**	22	0	2	2	4	4
RTSFailureCount	0,579**	22	0	2	2	4	4
RTSFailureCount	0,645**	39	0	2	2	4	2
ACKFailureCount	0,504**	411	0	2	2	4	4
MultipleRetryCount	0,595**	258	0	1	2	4	4
ACKFailureCount	-0,684**	25	0	1	1	4	4
FailedCount	0,759**	25	0	1	1	4	4
FrameDuplicateCount	0,404**	25	0	1	1	4	4
MultipleRetryCount	-0,557**	25	0	1	1	4	4
RTSFailureCount	-0,418**	25	0	1	1	4	4
Enlace de Largo Alcance							
MultipleRetryCount	0,539*	18	0,0210	4	1	2	2
FrameDuplicateCount	-0,313**	67	0,001	3	4	4	3
FrameDuplicateCount	-0,577*	17	0,015	3	3	4	3
RTSFailureCount	0,481*	18	0,043	3	1	1	3
MultipleRetryCount	-0,330*	41	0,035	2	3	3	3
ACKFailureCount	0,410*	37	0,012	2	2	1	3
MultipleRetryCount	0,335*	37	0,043	2	2	1	3
FrameDuplicateCount	0,437**	52	0,001	2	2	1	1
FailedCount	-0,277*	54	0,043	1	3	2	3
FrameDuplicateCount	0,772**	16	0	1	2	1	1

Tabla 4-9. Coeficientes de correlación de Spearman entre los contadores de red y la velocidad del viento en enero

Los niveles de correlación de Spearman entre la velocidad del viento y los contadores de red en julio sobre el enlace de corto alcance, se encuentran en torno a 0.3 y 0.4, excepto para el contador ACKFailureCount que casi alcanza un nivel de 0.6. Sin embargo, en el enlace de largo alcance, los coeficientes de correlación

varían entre 0.4 y 0.5, excepto en el caso del contador `FrameDuplicateCount`, que es de aproximadamente 0.6.

Finalmente, es necesario destacar que las agrupaciones destacadas en todos los resultados, rara vez son las mismas para el enlace de corto alcance y el de largo alcance. Por lo tanto se demuestra que, realmente según el esquema de modulación empleado y la tasa de datos, el grado de asociación entre las condiciones meteorológicas y los parámetros de rendimiento considerados, varían. En concreto, este estudio al igual que el anterior presentado en el Capítulo 3, demuestran que las modulaciones de orden superior utilizadas en el enlace de corto alcance, presentan un grado de asociación, en general, mayor con las condiciones meteorológicas que las modulaciones de orden inferior empleadas en el enlace de largo alcance. Por otra parte, la temperatura y la humedad presentan un mayor grado de asociación con los contadores de red en los enlaces en julio y el punto de rocío, la presión atmosférica y la velocidad del viento en enero. Pero la diferencia no es muy significativa, así que no se pueden extraer conclusiones definitivas en ese sentido.

4.4.3 *Resultados (III): Estudio de Regresión*

El principal objetivo de este tercer análisis, es modelar los parámetros de rendimiento medidos sobre el enlace punto a multipunto IEEE 802.11 b/g, en función de las condiciones meteorológicas. Este trabajo, trata de buscar los modelos matemáticos que mejor ajustan la evolución de la cantidad de tramas MAC pérdidas o erróneas, a partir de las condiciones meteorológicas que ocurren durante la transmisión de las mismas. Para ello, se utiliza la técnica conocida como regresión simbólica.

Hasta ahora, se han presentado tres análisis de correlación distintos, para conocer y corroborar el grado de asociación entre las condiciones meteorológicas y los parámetros de rendimiento de los enlaces IEEE 802.11b/g. Y, se ha demostrado, que dicho grado de asociación es significativo en diversos casos. Pero este tipo de análisis estadístico, presenta dos limitaciones principales. En primer lugar, sólo permite evaluar el nivel de correlación entre cada condición meteorológica y cada parámetro de rendimiento, y no es posible estimar el nivel de correlación del grupo de las condiciones meteorológicas en su conjunto, como sucede en la realidad. En segundo lugar, es necesario prestar atención al concepto CINAC (en inglés: Correlation is Not a Cause). Esto significa que por el simple hecho de encontrar un nivel de correlación alto, no se puede confirmar o deducir una causalidad directa entre ellos, es decir, que uno sea la causa del otro o viceversa. Hace falta corroborar esa causalidad con otro tipo de análisis. Por lo tanto, un alto grado de asociación entre ciertas condiciones meteorológicas y los parámetros de rendimiento de red, no permite concluir directamente que estas condiciones meteorológicas sean la causa directa y única del aumento de tramas MAC pérdidas o erróneas, sin antes profundizar en este tema. Por ejemplo, si se analiza el número de tramas perdidas en una WLAN exterior real con un número inestable de usuarios y diversos tipos de tráfico, es posible que existan altos niveles de correlación con diferentes condiciones meteorológicas, pero ¿es eso suficiente para predecir o concluir que las condiciones meteorológicas causan un peor o mejor rendimiento de la red? Obviamente no, sin duda el tiempo meteorológico va a tener una relación directa con el número de usuarios de la red exterior y, por lo tanto, habrá más o menos tramas perdidas.

Además, en un momento puntual donde la red presente una alta carga porque hay muchos usuarios, se producirán pérdidas debido a la congestión y a las colisiones, y no a las condiciones meteorológicas subyacentes. En estos casos, la razón de altas correlaciones se debe al comportamiento de los usuarios, en lugar de a las interferencias causadas por el clima en las comunicaciones inalámbricas. Aunque estos últimos problemas se han intentado aislar en los estudios de correlación anteriores, se considera de gran utilidad realizar otro tipo de análisis estadístico sobre los datos tomados del escenario del enlace punto a multipunto, que supere estas limitaciones y pueda corroborar los resultados anteriores.

La solución escogida para ello ha sido la regresión simbólica. Su característica principal, a diferencia de las regresiones comunes, es que busca modelos matemáticos de aproximación para conjuntos de datos experimentales, de los cuales los científicos no saben nada acerca de cómo se relacionan entre sí. Este tipo de análisis busca automáticamente en el espacio del conjunto de las expresiones matemáticas, para encontrar el modelo que mejor se ajuste a los datos, tanto en términos de precisión como de complejidad predictiva. Su objetivo es extraer datos en bruto, en ecuaciones matemáticas no lineales [112]. Este método ha permitido modelar los parámetros de rendimiento de red, a partir de las condiciones meteorológicas en su conjunto. De tal manera, que el software escogido para ello, ha extraído los modelos de aproximación que mejor se ajustan a los datos, escogiendo del conjunto de condiciones meteorológicas, aquellas que permiten un mejor ajuste de los contadores de red.

Hoy en día, el software Eureka [113] es una de las herramientas más potentes para llevar a cabo este tipo de estudio. Su algoritmo descubre las relaciones subyacentes y explica las relaciones intrínsecas escondidas dentro de un conjunto de datos. Esta herramienta busca, tanto los parámetros del conjunto de datos introducidos más relevantes para los modelos, como la forma de las ecuaciones simultáneamente y del mismo modo, retiene las ecuaciones que encajan mejor con el conjunto de datos.

Las condiciones meteorológicas utilizadas para este análisis y los parámetros de red, han sido los mismos que para los estudios de correlación anteriores. Sin embargo, el periodo considerado de medidas ha sido el mes de abril, ya que fue el mes más variable en términos de tiempo meteorológico. Además, como en los estudios anteriores se ha demostrado un grado de asociación mayor de estos datos, en el enlace de corto alcance, se han utilizado los datos obtenidos de éste.

La Figura 4-13, la Figura 4-14 y la Figura 4-15, muestran los resultados extraídos de esta investigación para los contadores FrameDuplicateCount, Failed-Count y ACKFailureCount, respectivamente. Estos son los contadores que han presentado los resultados más concluyentes en este análisis.

La sensibilidad mostrada en las figuras, se refiere al impacto relativo que una variable tiene sobre la variable de destino, para cada modelo presentado. La probabilidad de que el aumento de esta variable, aumente la variable de destino, corresponde a tener un porcentaje positivo. Tal porcentaje positivo indica el % del tiempo en el que esta variable está aumentando y que conduce a aumentos en la variable de destino. De la misma manera, la magnitud positiva, indica cuán grande es el impacto positivo. El porcentaje negativo y la magnitud negativa tienen el

mismo significado anterior, pero en el sentido contrario. Los aumentos en la variable, suponen la disminución de la variable de destino. Esto se muestra en la Figura 4-13, la Figura 4-14 y la Figura 4-15 de manera gráfica. La gráfica del modelo de ajuste propuesto para cada contador (línea continua de color rojo), se muestra sobre los valores reales observados. Los puntos de datos de color azul claro, se utilizan para la creación del ajuste y los puntos de datos de color azul oscuro, para su validación. Por otra parte, se muestran los valores observados frente a los predichos, esto esboza los valores reales observados frente a los valores pronosticados por el modelo seleccionado. Además, se muestra que la evolución de los parámetros de red es similar, porque todos ellos hacen referencia a problemas de transmisión relacionados, referidos a las tramas de capa MAC. Los valores constantes en los modelos están representados por letras minúsculas. Todos los modelos se basan en funciones seno y coseno, que son expresiones periódicas de baja complejidad, que reflejan la naturaleza periódica de la relación.

En la Figura 4-13, se representa el modelo matemático que mejor ajusta el número de tramas duplicadas (`FrameDuplicateCount`) en el enlace de corto alcance, a partir de la temperatura (T), la humedad (H), el punto de rocío (PR) y la presión atmosférica (AP) que se dan durante su transmisión. La humedad y el punto de rocío presentan una relación ligeramente negativa. Sin embargo, la influencia de la temperatura y la presión atmosférica es principalmente positiva. El contador de tramas no transmitidas con éxito (`FailedCount`, ver Figura 4-14) por exceder el límite de reintentos máximos, está modelado por las mismas condiciones meteorológicas, a excepción de la temperatura. En este caso, el punto de rocío y la presión atmosférica se ajustan principalmente de forma positiva y la humedad de forma negativa.

Por último, el modelo apropiado para los ACKs perdidos (`ACKFailureCount`) se puede ver en la Figura 4-15. Este modelo se basa en la temperatura, la humedad y la presión atmosférica y, como en la Figura 4-13, la relación con la temperatura y la presión atmosférica es principalmente positiva y, en el caso de la humedad, totalmente negativa.

Todos los modelos de ajuste presentados en este capítulo, presentan una alta bondad de ajuste (R^2 alto), con valores de 66%, 64% y 63% respectivamente. Lo mismo ocurre con el nivel de correlación entre los datos predichos por el ajuste y los datos reales, con niveles de: 0.81, 0.8 y 0.79 respectivamente. Como se puede comprobar, la velocidad del viento no ha sido incluida en ninguno de los modelos presentados, ya que no fue muy significativo durante el mes sobre el que se ha llevado a cabo este trabajo, el mes de abril.

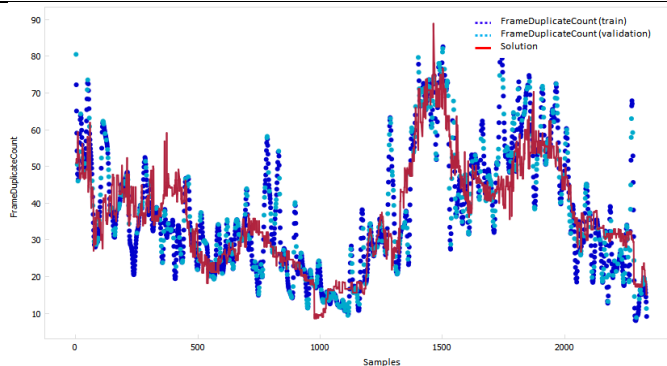
Solución: $\text{FrameDuplicateCount} = a * \sin(b * PA) + \frac{c}{(d * H^2 - e * \sin(f * T) - g * \cos(h * PR * H^2))}$
 donde $a=100$, $b=49.69 * 10^{-2}$, $c= 1.002 * 10^4$, $d=0.01$, $e=6.37$, $f=2.05$, $g=2.92$, $h=8.66 * 10^{-4}$

R² Bondad del Ajuste: 0.66

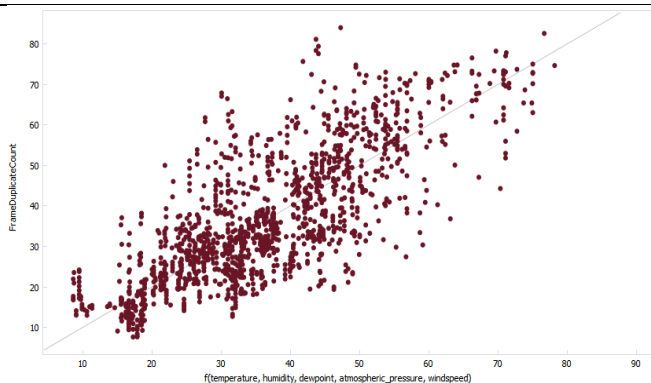
Coefficiente de Correlación: 0.81

Error Absoluto Medio: 7.48

Representación del Modelo de Ajuste Propuesto



Datos Observados frente a los Datos Predichos por el Modelo Propuesto



Variable	Sensibilidad	% Positivo	Magnitud Positiva	% Negativo	Magnitud Negativa
T	1.0023	75%	0.99181	25%	1.0344
H	4.1492	36%	3.3451	64%	4.6099
PR	2.8571	49%	2.9874	51%	2.7315
PA	1.4427	68%	1.4688	32%	1.3858

Figura 4-13. Modelo de ajuste que representa el número de tramas duplicadas a partir de las condiciones meteorológicas

La humedad, el punto de rocío y la temperatura son tres indicadores ampliamente utilizados para conocer la cantidad de humedad en el aire [114]. La humedad está principalmente relacionada de forma positiva con los parámetros de red, lo que implica que hay mayor probabilidad de obtener un peor rendimiento de la red cuando el ambiente es más húmedo. La presión atmosférica es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire sobre la superficie terrestre. Su principal influencia positiva muestra que, generalmente, cuando hay una mayor masa atmosférica sobre la ubicación de la WLAN, más problemas en la transmisión inalámbrica son percibidos en la red.

$$\text{Solución: FailedCount} = a + b * \cos(c * H - PR) - d * \sin(e * PA)$$

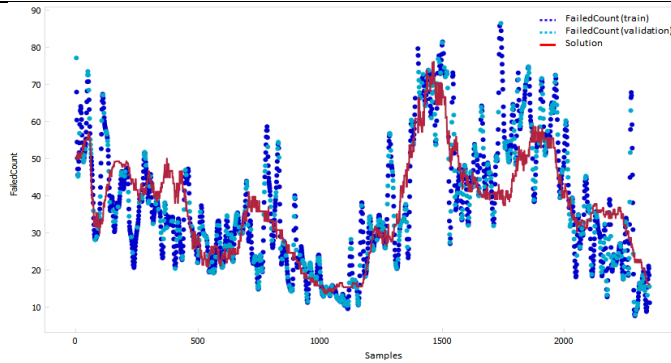
donde a=1993; b=17.92; c=0.3138; d=1962; e= 0.1

R2 Bondad del Ajuste: 0.64

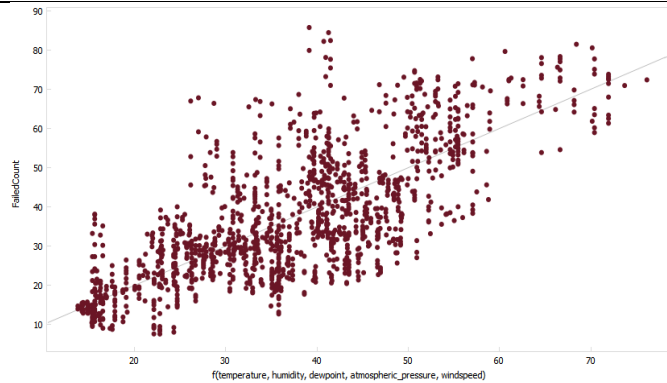
Coefficiente de Correlación: 0.80

Error Absoluto Medio: 7.96

Representación del Modelo de Ajuste Propuesto



Datos Observados frente a los Datos Predichos por el Modelo Propuesto



Variable	Sensibilidad	% Positivo	Magnitud Positiva	% Negativo	Magnitud Negativa
H	0.6865	84%	0.73382	16%	0.44368
PR	0.8701	84%	0.93008	16%	0.56234
PA	1.1203	69%	1.1934	31%	0.96101

Figura 4-14. Modelo de ajuste que representa el número de reintentos máximos de transmisión a partir de las condiciones meteorológicas

Esta investigación, corrobora el nivel de asociación mostrado en los estudios anteriores, entre las condiciones meteorológicas y los parámetros de red. El estudio presentado en este capítulo se ha basado en la técnica de la regresión simbólica, ya que es un método muy potente para analizar relaciones ocultas, entre variables de las que se desconoce absolutamente su relación a priori. Los resultados demuestran que, la agrupación de las condiciones meteorológicas, implica un incremento significativo de los niveles de correlación, en comparación con los estudios anteriores. Por lo tanto, la consideración inicial que suponía un grado de asociación mayor al analizar las condiciones meteorológicas como un conjunto, ha sido confirmada.

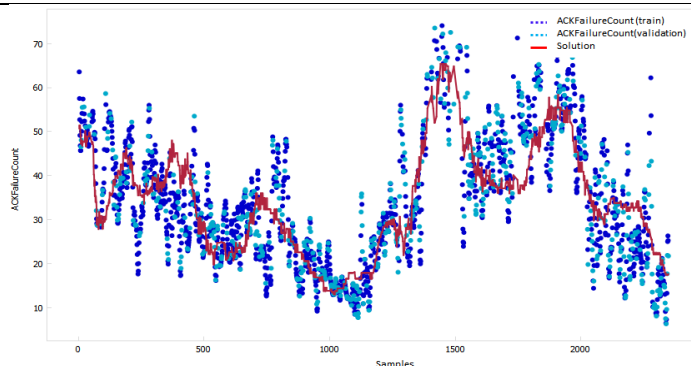
Solución: $ACKFailureCount = a + b * \sin(c * T - d * PA) - e * H - f * \sin(g * AP)$
 donde $a=2142$; $b=9.324$; $c=1.584$; $d=0.5592$; $e=1.931$; $f=1943$; $g=0.1$

R2 Bondad del Ajuste: 0.63

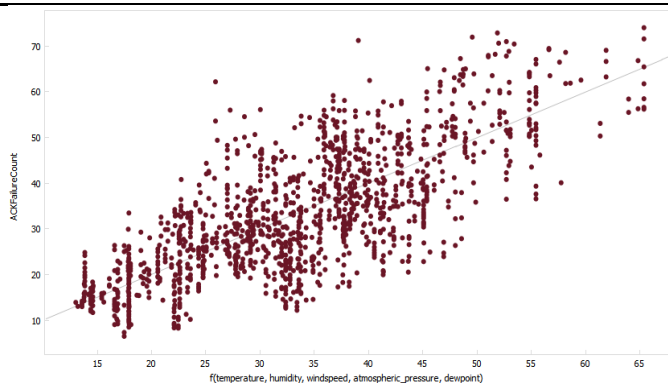
Coefficiente de Correlación: 0.79

Error Absoluto Medio: 7.04

Representación del Modelo de Ajuste Propuesto



Datos Observados frente a los Datos Predichos por el Modelo Propuesto



Variable	Sensibilidad	% Positivo	Magnitud Positiva	% Negativo	Magnitud Negativa
T	0.74744	72%	0.7832	28%	0.65742
H	1.5563	100%	1.5563	0%	0
PA	1.4147	65%	1.4788	35%	1.2955

Figura 4-15. Modelo de ajuste que representa el número de tramas ACK perdidas a partir de las condiciones meteorológicas

4.5 Conclusión

En este capítulo se han detallado las características de diseño y desarrollo de un enlace punto a multipunto, que ha servido como escenario más estable para la investigación del impacto del tiempo en los enlaces IEEE 802.11b/g. Se trata de un esquema red basado en un punto de acceso al que se conectan de forma inalámbrica dos clientes remotos, situados a diferentes distancias. Esta característica ha permitido analizar cómo la distancia, y sus correspondientes características de transmisión, afectan al impacto del tiempo. Además, el punto de acceso tiene conectado un terminal que genera un tráfico ICMP constante hacia los clientes. De

esta forma, se genera un tráfico de control compuesto por diferentes tramas MAC en los enlaces, que ha servido como parámetros de rendimiento en esta investigación. Para la captura de estos parámetros, se ha interrogado periódicamente la MIB de los clientes a través del protocolo SNMP, y se han ido almacenando los datos. En cuanto a las condiciones meteorológicas, han sido recogidas con la misma frecuencia de una estación meteorológica muy cercana a este escenario.

La primera y principal conclusión de este capítulo, es que se ha demostrado que existe un importante grado de asociación entre los parámetros de rendimiento de los enlaces IEEE 802.11b/g, y las condiciones meteorológicas que se producen en su entorno.

Además, se confirman los problemas derivados de estudiar este tema sobre un escenario real (comentados en el Capítulo 3), ya que sobre el escenario punto a multipunto analizado en este capítulo, se alcanzan niveles de asociación mucho más elevados. Además, se han llevado a cabo tres análisis estadísticos distintos y los tres confirman tales relaciones.

Otra de las conclusiones más importantes de este capítulo, es que la tecnología física utilizada y, por lo tanto, la tasa de datos y el esquema de modulación utilizados, influyen sobre el grado de asociación entre los parámetros de rendimiento de red y las condiciones meteorológicas. Esto confirma que los esquemas de modulación de orden superior, que permiten tasas de datos más elevadas, son a la vez menos robustos frente a interferencias. Esta conclusión es clave para el diseño del algoritmo cognitivo que será presentado en el próximo capítulo.

Otra idea clave de los estudios de correlación presentados, es el concepto CINAC, que indica que un nivel de correlación significativo no implica causalidad. Para deducir causalidad, se deben considerar más estudios. Por lo tanto, ese es el motivo principal por el que se ha realizado un tercer análisis, basado en la relación simbólica entre ambos conjuntos de datos. A partir de este análisis, se han extraído diversos modelos matemáticos que ajustan la evolución de los parámetros de red a partir de las condiciones meteorológicas en su conjunto. Los resultados demuestran que estos modelos presentan una alta bondad del ajuste, y altos coeficientes de correlación entre los datos observados y los predichos por los modelos. Este estudio ha permitido ir un poco más allá en el estudio de la relación entre el tiempo y el rendimiento de la red, analizando el conjunto de las variables meteorológicas que se dan al mismo tiempo.

Los trabajos y resultados derivados de los estudios presentados en este capítulo han sido publicados, el primero de ellos en una revista indexada en la lista ISI Thomson [32], y los otros dos se encuentran en fase de revisión en otras dos revistas.

ALGORITMO COGNITIVO ENERGÉTICA- MENTE EFICIENTE PARA MINIMIZAR EL IMPACTO DE LAS CONDICIONES METEO- ROLÓGICAS EN LOS ENLACES IEEE 802.11B/G

5.1 Introducción

A día de hoy, los sistemas de telecomunicación y, en concreto las redes, tienen el difícil desafío de intentar reducir sus consumos de energía. Por un lado, las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TICs), se consideran elementos clave para el ahorro energético global, gracias a iniciativas como el teletrabajo, la logística inteligente, o el consumo responsable y sostenible a través de ciudades y edificios inteligentes, todos ellos basados en redes de comunicaciones. Sin embargo, por otro lado, el número de redes y los volúmenes y tipos de tráfico que soportan, aumenta día a día alrededor de todo el mundo, con el aumento del consumo de energía que ello comporta. De hecho, se considera que actualmente una parte significativa del consumo de energía global en todo el mundo, es debida a las infraestructuras de red existentes.

Por lo tanto, hoy en día muchos investigadores se centran en el desarrollo de tecnologías eficientes, para reducir el impacto medioambiental de todos estos sistemas y contribuir a la sostenibilidad global. Esto es fundamental para garantizar el futuro del planeta. Según diversos estudios [115] [116], las TICs tienen un papel muy importante en lucha contra este problema. Hoy en día, la demanda eléctrica mundial de las TICs se estima en torno al 10% de la electricidad generada en el mundo. Esa es la razón por la que muchos científicos e instituciones oficiales están dirigiendo sus esfuerzos, hacia el desarrollo de sistemas tecnológicos energéticamente eficientes [117]. Las redes inalámbricas son una parte importante dentro del ámbito de las TIC. La portabilidad y movilidad de sus dispositivos y su acceso radio inherente, implican un mayor consumo de energía.

Para encontrar soluciones que mejoren la eficiencia energética de las redes inalámbricas [118], es esencial identificar primero las principales fuentes de consumo de energía, y entender cómo los protocolos inalámbricos y sus procedimientos afectan a tal consumo. Un caso de especial de interés, son las redes de área local inalámbricas [13], ya que son una de las tecnologías inalámbricas más populares en todo el mundo.

Dejando de lado el consumo de energía de referencia, basado en el consumo básico de los dispositivos cuando no envían ni reciben tráfico, el consumo de energía en este tipo de redes, deriva principalmente de los procesos de comunicación llevados a cabo en cada uno de los niveles del modelo por capas TCP/IP [60]. Como consecuencia, la eficiencia energética en este tipo de redes, ha sido investigada sobre el diseño del hardware de sus dispositivos y sobre el diseño de los mecanismos llevados a cabo por los protocolos de red utilizados en este tipo de redes [119].

Respecto al proceso de comunicación, el consumo de energía de una interfaz de red inalámbrica IEEE 802.11, está determinado por la potencia consumida durante la transmisión, la recepción y en los modos de espera de los dispositivos. Y, además, depende del tiempo de operación en cada uno de ellos. Aunque en todas las capas de la pila de protocolos TCP/IP se promueven iniciativas para el ahorro energético, la capa MAC es la más sensible a esta característica. El principal motivo es que esta capa se basa en el protocolo CSMA/CA, el cual fue diseñado desde sus inicios teniendo en cuenta dicho consumo de energía. Se trata de un protocolo basado en una estructura de temporización, con el objetivo de detectar si el canal está ocupado o no, evitando así colisiones y sus correspondientes retransmisiones, que suponen un malgasto considerable de energía. Por otra parte, en esta capa también se utilizan las tramas RTS/CTS, que reducen las colisiones en el problema de los terminales ocultos. A pesar de que estos mecanismos suponen un ahorro energético por la reducción de colisiones y retransmisiones que suponen, por otro lado también implican un cierto consumo, por la contención y consumo de tiempo que suponen [120]. Además, estas mismas tramas (RTSs, CTSs y ACKs), que controlan el envío y la recepción de las tramas de datos, pueden fallar debido a las condiciones del canal o a sus propias colisiones, y su propia retransmisión también implica un mayor consumo de energía.

Tal como se ha visto en el Capítulo 3 y en el Capítulo 4, hay un grado de asociación significativo entre las tramas de control erróneas o perdidas y las condiciones meteorológicas que se producen en su entorno de transmisión. Por esta razón, dentro de los objetivos de esta tesis doctoral, se incluyó el diseño de un algoritmo cognitivo para los enlaces IEEE 802.11b/g, que tuviera en cuenta dicho grado de asociación. De tal manera que los puntos de acceso de este tipo de redes, pudieran tomar ciertas decisiones y acciones en el caso de que percibieran una disminución en el rendimiento de sus transmisiones.

Este algoritmo cognitivo tiene en cuenta el concepto CINAC expuesto en el capítulo anterior y, por lo tanto, no se basa sólo en las condiciones meteorológicas para adaptar el funcionamiento de la red, sino que también evalúa al mismo tiempo, los parámetros de rendimiento de red para confirmar que, efectivamente, las con-

diciones meteorológicas adversas están disminuyendo el rendimiento de los parámetros de red considerados. Esto, a diferencia de centrarse únicamente en los parámetros de red, debido al importante grado de asociación entre éstos y las condiciones meteorológicas, supone una cantidad de información mayor para el algoritmo cognitivo y, por lo tanto, un funcionamiento más preciso del mismo. Para esta razón, tanto los parámetros de rendimiento de red como las condiciones meteorológicas, se consideran variables de entrada del algoritmo.

Además, los resultados obtenidos de los estudios realizados sobre el enlace punto a multipunto (ver Capítulo 4), han permitido conocer qué características de transmisión presentan un menor grado de asociación con las condiciones meteorológicas del entorno y, por lo tanto, proponer tales características de transmisión como salidas del algoritmo, cuando el rendimiento del enlace se vea afectado por las condiciones meteorológicas.

Para el diseño del algoritmo se tuvieron en cuenta, principalmente, dos aspectos. En primer lugar, se consideró fundamental que las posibles acciones a tomar por parte del algoritmo, en el caso de que perciba un impacto considerable del tiempo en el rendimiento del enlace, estuvieran ya contempladas dentro del propio estándar. De este modo, se garantiza la facilidad del proceso de integración del algoritmo y la compatibilidad de los dispositivos. En segundo lugar, debido a las limitaciones actuales de energía de los dispositivos portátiles inalámbricos, y de la necesidad global de reducir el consumo de energía de los sistemas electrónicos, se consideró fundamental que fuese un diseño eficiente desde el punto de vista energético. Estas son las dos características más importantes del algoritmo cognitivo presentado en este capítulo.

Finalmente, la propuesta presentada ha sido validada a través de varias simulaciones, que demuestran que el enfoque dado al algoritmo es una buena estrategia para ahorrar energía, y poder superar las posibles interferencias de las condiciones meteorológicas sobre los enlaces exteriores IEEE 802.11b/g.

El resto de este capítulo está estructurado de la siguiente forma. En el segundo apartado, se detallan las características de las redes cognitivas y de los enfoques más relevantes actualmente: los diseños de radio cognitivos y los esquemas cross-layer. A continuación, se presenta un estudio sobre el consumo de energía de los dispositivos que funcionan bajo el estándar IEEE 802.11b/g. El objetivo de este tercer apartado es modelar el consumo de energía en este tipo de redes, ver qué mecanismos consumen la mayor parte de la energía y estimar su consumo. En el cuarto punto se presenta la propuesta del algoritmo cognitivo energéticamente eficiente, para minimizar el impacto del tiempo en el rendimiento de los enlaces IEEE 802.11b/g exteriores. Finalmente, en el último apartado, se presentan los resultados de la simulación de este algoritmo y, a continuación, se recogen las conclusiones más relevantes de este trabajo.

5.2 Redes Cognitivas

Las CNs son un concepto relativamente reciente en el mundo científico. Las primeras investigaciones se remontan a los comienzos del año 2000 y, desde entonces hasta ahora, han ido evolucionando sin descanso. Su objetivo es conseguir redes capaces de ser autoconscientes de su entorno y, de este modo, que sean

capaces de adaptar dinámicamente sus parámetros de funcionamiento, en respuesta a las características puntuales de dicho entorno y a sus propios requerimientos. Otro aspecto muy importante, es que sean capaces de aprender de sus decisiones pasadas y puedan utilizar este conocimiento para sus decisiones futuras [121]. Por lo tanto, se dice que estas redes tienen la capacidad de pensar, aprender y recordar, con el fin de reducir en la medida de lo posible la intervención humana y maximizar su autoconfiguración y automantenimiento. Con el fin de cumplir con este nuevo paradigma, se considera un bucle de cognición clave que cuenta con los siguientes bloques: observación, orientación, planificación, decisión, actuación y aprendizaje [72].

La mayoría de los enfoques actuales, limitan la capacidad cognitiva de la red a observaciones locales y reactivas. Sin embargo, el concepto de red cognitiva va más allá, y busca satisfacer ciertos objetivos extremo a extremo [75]. Por lo tanto, las CNs buscan trabajar con parámetros de todas las capas de la pila de protocolos. Este tipo de redes seleccionan y optimizan los parámetros, basados en los requerimientos de extremo a extremo de la red. Su principal motivación es mejorar las redes de nueva generación, creando sistemas más complejos, heterogéneos y dinámicos, con el fin de facilitar su autoorganización y el cumplimiento de los objetivos del usuario y de la aplicación, en la comunicación extremo a extremo.

Se considera que las redes cognitivas pueden lograr sus objetivos introduciendo un plano de conocimiento, conocido como plano KP (Knowledge Plane), en su funcionamiento, que implica a las diferentes capas de la red, para tomar decisiones y mejorar el funcionamiento de la red según su entorno. El plano KP añade inteligencia a los elementos de la red, así como cierta sensibilidad sobre lo que está ocurriendo a su alrededor. El KP permite a la red cognitiva aprender sobre los resultados de la toma de decisiones a lo largo del tiempo, para influir en sus decisiones futuras, y mejorar así su funcionamiento [70].

La Figura 5-1, muestra las cuatro fases requeridas en una máquina de aprendizaje, para ser utilizada en una red cognitiva. La primera es el entorno; este elemento se debe tener en cuenta ya que será el responsable de los cambios en el rendimiento de la red. Este elemento está conectado directamente con la fase de rendimiento, que está relacionada a su vez con el funcionamiento de la red para cualquiera de los elementos monitorizados. El bloque de conocimiento aportará información para activar el proceso de aprendizaje y será el elemento más inteligente del sistema, ya que tiene que llevar a cabo acciones apropiadas para mejorar el rendimiento de la red a través de dicha información y de lo que está ocurriendo en el entorno. Finalmente, el objetivo general del aprendizaje es mejorar el rendimiento de cualquier tarea que pueda llevar a cabo el sistema.

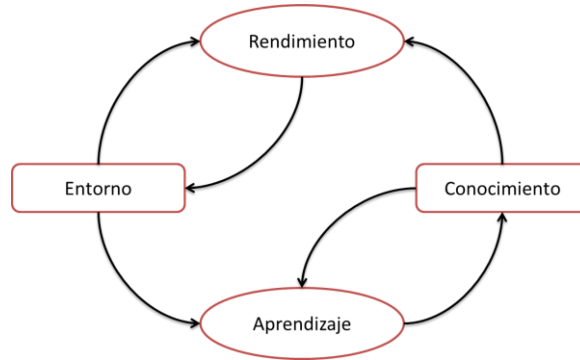


Figura 5-1. Fases que conforman la máquina de aprendizaje de las redes cognitivas

5.2.1 *Redes Cognitivas vs. Diseños Cross-layer vs. Diseños Radio Cognitivos*

Aunque las CNs, los diseños radio cognitivos (en inglés: Cognitive Radios o CRs) y los diseños cross-layer, tienen como objetivo mejorar el rendimiento de la red en algún aspecto (gestión de recursos, QoS, seguridad, control de acceso, etc.), cada uno de ellos lo lleva a cabo mediante un enfoque diferente.

Las redes cognitivas van más allá de los diseños de radio cognitivos y los diseños cross-layer. Mientras que las redes cognitivas consideran todas las capas de la pila de protocolos para cumplir con las metas de los requerimientos de extremo a extremo de la red, los diseños de radio cognitivos sólo se centran en los aspectos de radio, para tratar de llegar a metas locales e individuales. Lo mismo ocurre con los diseños cross-layer. Por lo tanto, las redes cognitivas cubren todas las partes que forman los elementos de red que están involucrados en la transmisión de un flujo de datos (subredes, enrutadores, conmutadores, medios, interfaces, etc.), y poseen un aspecto de cooperación entre capas que los otros enfoques cognitivos no poseen. Las CNs solo presentan limitaciones en términos de aplicabilidad, debido a la capacidad de adaptación de los elementos de red y la flexibilidad del proceso cognitivo para desarrollar las tareas específicas. Por otra parte, los diseños de radio cognitivos obviamente sólo se utilizan para redes inalámbricas, mientras que las redes cognitivas pueden incluir redes inalámbricas y cableadas, por lo que permiten la integración de redes heterogéneas [122].

Sin embargo, las redes cognitivas y los diseños de radio cognitivos, tienen algunos aspectos en común. En primer lugar, comparten el concepto de proceso cognitivo, que sirve para aprender de las observaciones del pasado y de las decisiones adoptadas, y utilizarlo para futuras decisiones. Por otra parte, ambos enfoques están orientados a objetivos, y ambas tecnologías requieren de un elemento adaptable de software que esté controlado por el proceso cognitivo. Este elemento se encargará de traducir los objetivos, en una forma comprensible para la red y, además, será capaz de proporcionar una salida en forma de acciones sobre los elementos modificables de la red. En el caso de las CNs, este elemento se llama software para la adaptación de la red (en inglés: Software Adaptable Network o SAN), que es el encargado de la comunicación entre la interfaz externa de acceso y la red cognitiva, así como de traducir los valores recogidos por los sensores que

controlan el estado de la red. Estos dispositivos se utilizan para proporcionar control y retroalimentación desde y hacia la red. Por lo contrario, en los diseños de radio controlados por software (en inglés: Software Defined Radio o SDR), el software se convierte en el elemento de elección para las características del diseño radio cognitivo [123]. En las SDRs, el software puede cambiar las propiedades de ancho de banda de la frecuencia portadora de la señal, la modulación, cualquier criptografía si es necesaria, y la codificación de fuente.

Comparando los diseños cross-layer y las redes cognitivas, se puede destacar que ambos infringen el diseño por capas tradicional, ya que se permite que capas no adyacentes se comuniquen directamente o compartan información interna entre ellas. Se considera que las redes cognitivas incluyen un enfoque cross-layer, debido a que la red adapta las diferentes funciones que deben adoptar las diversas capas, según las observaciones de las condiciones actuales proporcionadas por otras capas. Estas observaciones se entregan al proceso cognitivo y entonces este último, determina que es lo óptimo para la red y cambia las configuraciones de los elementos de red en las capas correspondientes.

A pesar de las similitudes, las redes cognitivas tienen un área de actuación más extensa que los diseños de cross-layer. La principal diferencia es que, mientras las redes cognitivas buscan una optimización de múltiples objetivos (en inglés: Multi-objective optimization o MOO), los diseños cross-layer suelen considerar la optimización de objetivos de forma individual. En el caso de los diseños de cross-layer, sólo pueden realizar optimizaciones objetivas independientes, y esto provoca que no puedan hacer frente a los objetivos de rendimiento de toda la red simultáneamente. Por lo tanto, se puede decir que los diseños cross-layer son menos eficientes que las redes cognitivas, que tratan de lograr todos los objetivos de forma conjunta en el proceso de optimización. Por el contrario, los diseños cross-layer pueden suponer conflictos entre las diferentes adaptaciones requeridas en un nodo, cuando se quieren optimizar diferentes objetivos.

Otro punto diferente entre ellos es el concepto de aprendizaje. Como se ha explicado antes, las redes cognitivas tienen la capacidad de aprender de las decisiones tomadas en el pasado y aplicar este aprendizaje para futuras decisiones. Sin embargo, el proceso de aprendizaje no está soportado en los diseños cross-layer, por lo que las situaciones pasadas no son tomadas en cuenta en el futuro. Este es un inconveniente importante del diseño cross-layer, ya que, por lo tanto, la inteligencia de la red está limitada. Estos diseños siempre se enfrentan a un conjunto de entradas de la misma manera, aunque su resultado en el pasado no fuese el esperado.

Las últimas diferencias, al igual que en el diseño de radio cognitivo, están asociadas al alcance de los objetivos y a las observaciones. Las observaciones utilizadas en el proceso cognitivo incluyen a todos los nodos de la red, como consiguiente la optimización se lleva a cabo teniendo en cuenta los objetivos de todos los nodos. En cambio, en el diseño cross-layer se realiza la optimización y las observaciones de forma individual en los nodos. Por lo tanto, los objetivos se centran en cada nodo de forma independiente. Las redes cognitivas son conscientes de toda la red y, toda esta información global, permite al proceso cognitivo, adaptar las

funciones de red mucho mejor que cuando la visibilidad de la red se limita a un único nodo.

Por último, cabe destacar que la inclusión de la cognición, siempre implica unos costes en la arquitectura y el funcionamiento de las redes, por lo que se debe analizar siempre si estos costes son menores, a las mejoras de rendimiento que supone, de lo contrario no tiene sentido su aplicación.

En la Tabla 5-1, se presenta una comparativa entre los tres enfoques para incorporar cierta inteligencia en las redes definidos hasta la fecha. El objetivo de todos ellos es poder satisfacer los exigentes requerimientos actuales. Como se puede ver, estos tres enfoques comparten algunas características y son diferentes en otros aspectos. Sin embargo, en cuanto a características, las redes cognitivas son las más completas tal como se muestra en la siguiente tabla.

	Red Cognitiva	Diseño Radio Cognitivo	Diseño cross-layer
Alcance	Extremo a extremo	Local	Local
Optimización	Optimización Múltiple Objetivos (MOO)	Optimizaciones solo objetivo	Optimizaciones solo objetivo
Naturaleza de la Red	Inalámbrico y por cable	Sin hilos	Sin hilos
Conocimiento	Auto-consciente (capacidad de aprender de las decisiones pasadas y utilizar este aprendizaje para influir en el comportamiento futuro)	Auto-consciente (capacidad de aprender de las decisiones pasadas y utilizar este aprendizaje para influir en el comportamiento futuro)	Sin memoria
Pila de protocolo	La comunicación entre capas no adyacentes	Tradicional enfoque por capas	La comunicación entre capas no adyacentes
Acción	Proactivo	Proactivo	Reactivo

Tabla 5-1. Comparación entre las redes cognitivas, la radio cognitiva y el cross-layer

5.3 Análisis Matemático sobre el Consumo de Energía

En este apartado, se modela el consumo de energía en una comunicación inalámbrica entre dos dispositivos. Además, se presenta un modelo de consumo de energía, que muestra la variación de energía requerida por cada tasa de datos, si existen retransmisiones en la red y según el nivel de fragmentación a nivel MAC.

Para llevar a cabo este análisis, se debe definir un modelo analítico de red inalámbrica. Esto permite conocer la forma en la que están estructurados y conectados los nodos. Las redes inalámbricas IEEE 802.11 presentan dos posibles tipos de conexión de sus dispositivos: infraestructura o ad-hoc. En este caso, este estudio se centra en las conexiones infraestructura, ya que se trata de una conexión punto a multipunto, en la que existe un punto de acceso al que se conectan dos clientes.

5.3.1 Tasa de Error de Trama en IEEE 802.11b/g

Las posibilidades físicas de transmisión de la variante IEEE 802.11b/g, han sido definidas en la Tabla 4-1 presentada en el Capítulo 4.

Con el fin de cuantificar la robustez de cada tipo de tasa de datos frente al ruido, se va a calcular la probabilidad de que una trama MAC falle en una comunicación entre dos nodos sin tener en cuenta ninguna interferencia. Para llevar a cabo esta evaluación, se ha considerado un ruido blanco gaussiano (en inglés: Additive White Gaussian Noise o AWGN) para modelar el canal inalámbrico. Por otra parte, se ha fijado la SNR y la tasa de datos.

Para analizar la tasa de error de trama (en inglés: Frame Error Rate o FER), en cada tasa de datos del estándar IEEE 802.11b, se han seguido las ecuaciones empíricas que se presentan en [124]. Las siguientes ecuaciones muestran la relación entre la BER y la SNR a nivel de bit (S_{bit}) en la capa física. La BER de la capa física está representada por las ecuaciones 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 a 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps y 11 Mbps, respectivamente.

$$BER_{PHY-1Mbps}(S_{bit}) \leq Q(\sqrt{11S_{bit}}) \quad 5-1$$

$$BER_{PHY-2Mbps}(S_{bit}) \leq Q(\sqrt{5.5S_{bit}}) \quad 5-2$$

$$BER_{PHY-5.5Mbps}(S_{bit}) \leq \frac{8}{15} (14Q(\sqrt{8S_{bit}}) + Q(\sqrt{16S_{bit}})) \quad 5-3$$

$$BER_{PHY-11Mbps}(S_{bit}) \leq 24Q(\sqrt{4S_{bit}}) + 16Q(\sqrt{6S_{bit}}) + 174Q(\sqrt{8S_{bit}}) + 16Q(\sqrt{10S_{bit}}) + 24Q(\sqrt{12S_{bit}}) + Q(\sqrt{16S_{bit}}) \quad 5-4$$

Donde $Q(x)$, es la probabilidad de que una variable aleatoria normal (Gaussiana), obtenga un valor superior a x desviaciones estándar por encima de la media. Aunque es más común el uso de la SNR en lugar de la S_{bit} , existe una relación directa de acuerdo a la ecuación 5-5, donde B es el ancho de banda del canal de radio (20 MHz) y R es la tasa de datos en Mbps.

$$S_{bit} = SNR \frac{B}{R} \quad 5-5$$

Con el fin de calcular la BER en la capa MAC, es necesario añadir la ganancia de codificación presentada en la Tabla 5-2.

Tasa (Mbps)	Esquema de Modulación	Tasa de FEC	Sensibilidad en el receptor (tasa de error de paquete < 10%) - dBm	Ganancia del código - dB	IEEE 802.11
1	DBPSK	1/11	-89	10.4	b
2	DQPSK	1/11	-86	10.4	b
5.5	CCK	4/8	-85	8	b
6	BPSK	1/2	-82	-	g
9	BPSK	3/4	-81	-	g
11	CCK	8/8	-82	8	b
12	QPSK	1/2	-79	-	g
18	QPSK	3/4	-77	-	g
24	16-QAM	1/2	-74	-	g
36	16-QAM	3/4	-70	-	g
48	64-QAM	2/3	-66	-	g
54	64-QAM	3/4	-65	-	g

Tabla 5-2. Especificaciones físicas de las redes IEEE 802.11b/g

Relacionando las ecuaciones de BER_{PHY} con la ecuación 5-5 y la adición de la ganancia de codificación de cada tasa, se obtiene la ecuación 5-6, donde j es 1 o 2 Mbps y la ecuación 5-7, donde i es 5.5 o 11 Mbps. Estas ecuaciones muestran la relación de BER con la SNR en la capa MAC.

$$BER_{MAC-jMbps}(SNR) = BER_{PHY-jMbps} \left(SNR \frac{B}{R} 10^{1.04} \right) \quad 5-6$$

$$BER_{MAC-iMbps}(SNR) = BER_{PHY-iMbps} \left(SNR \frac{B}{R} 10^{0.8} \right) \quad 5-7$$

Un cálculo similar de la BER a nivel MAC en función de la SNR, se ha realizado para los diferentes esquemas de modulación (BPSK, QPSK y N-QAM) de la variante IEEE 802.11g. Siguiendo el cálculo teórico presentado en [125] para los esquemas de modulación utilizados en casa tasa de la variante IEEE 802.11a/g con un canal AWGN, se puede conocer la tasa de error de símbolos (en inglés: Symbol Error Rate o SER) en función de la N-aria modulación de amplitud de pulso (en inglés: N-Pulse Amplitude Modulation o N-PAM) utilizando la ecuación 5-8.

$$SER_{N-PAM}(SNR) = 2 \left(1 - \frac{1}{N} \right) Q \left(\sqrt{\frac{6SNR}{N^2 - 1}} \right) \quad 5-8$$

El esquema de modulación BPSK es el mismo que el 2-PAM, por lo que el SER de BPSK se representa en la ecuación 5-9. Otros esquemas de modulación utilizados en IEEE 802.11g son N-QAM, incluyendo QPSK que es la misma de 4-QAM. Para estas modulaciones, el SER se calcula utilizando la ecuación 5-10.

$$SER_{BPSK}(SNR) = SER_{2-PAM}(SNR) \quad 5-9$$

$$SER_{N-QAM}(SNR) = 1 - \left(1 - SER_{\sqrt{N}-PAM} \left(\frac{SNR}{2} \right) \right)^2 \quad 5-10$$

En la capa física, los símbolos binarios se transmiten utilizando el código Gray. Si se quiere calcular la BER en este nivel, se tiene que usar la ecuación 5-11, donde k es el número de bits por símbolo, $k = \log_2(N)$.

$$BER_{PHY}(SNR) = \frac{1}{k} SER(SNR) \quad 5-11$$

El FEC (Forward Error Correction) del estándar IEEE 802.11g debe tenerse en cuenta para calcular la tasa de error en la capa MAC. El BER en la capa MAC se presenta en la ecuación 5-12, donde d_{free} es la distancia libre del código convolucional, a_d es el número total de eventos de error de peso d y $P_d(SNR)$, es la probabilidad de que el decodificador elija una ruta incorrecta con la distancia d desde la trayectoria correcta. Esto depende de la BER_{PHY} que se define en la ecuación 5-11. Todos estos valores se definen en el estándar IEEE 802.11a [126].

$$BER_{MAC}(SNR) = \sum_{d=d_{free}}^{\infty} a_d \cdot P_d(SNR) \tag{5-12}$$

A partir de las fórmulas anteriores, se puede obtener la BER_{MAC} para cada tasa de datos del estándar IEEE 802.11b/g y, suponiendo, que una pérdida en la trama de datos se produce cuando uno o más bits están dañados. La probabilidad de que falle una trama de datos, se define por la ecuación 5-13 donde L es la longitud de la carga útil en bits.

$$FER_{MAC} = 1 - (1 - BER_{MAC}(SNR))^L \tag{5-13}$$

La Figura 5-2, muestra la FER frente a las curvas de SNR, para las diferentes tasas de datos del estándar IEEE 802.11b/g. Estas curvas se han obtenido teóricamente, suponiendo un entorno con un ruido blanco gaussiano y un tamaño de paquete de 1000 bytes. En este escenario, se supone que no hay interferencias. Por lo tanto, los errores son sólo debido al ruido de fondo. Los retardos de propagación también se consideran insignificantes. Estas curvas demuestran que las modulaciones de orden superior, implican un peor rendimiento (mayor FER), en un escenario de baja SNR, a diferencia de las modulaciones de orden inferior. Por lo tanto, la adaptación de la tasa de datos es una de las posibles acciones para afrontar el impacto de los efectos meteorológicos a nivel MAC.

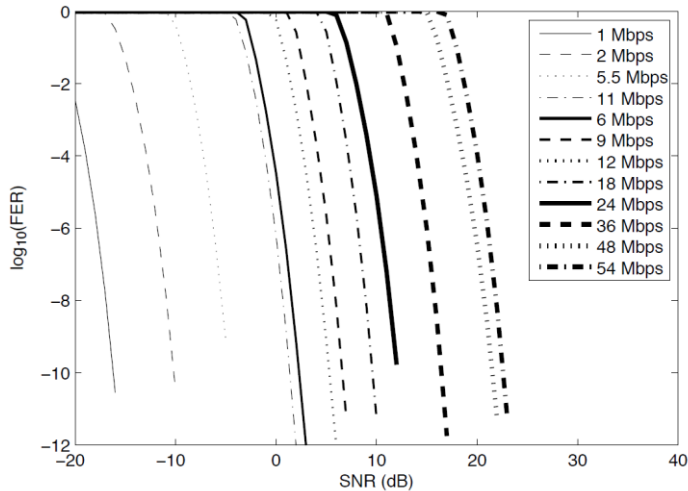


Figura 5-2. FER para cada tasa de datos del estándar IEEE 802.11b/g

5.3.2 Modelo sobre el Consumo de Energía en el Estándar IEEE 802.11b/g

Como se ha visto en el apartado anterior, las modulaciones utilizadas para las tasas de datos del estándar IEEE 802.11b, son más robustas que las utilizadas en el estándar IEEE 802.11g. Esto significará que habrá menos errores en la comunicación inalámbrica entre dos nodos de la red que utilicen esta variante, bajo

condiciones pobres del canal (SNR baja). Este hecho supone, por lo tanto, un menor número de retransmisiones y, por lo tanto, un mayor ahorro de energía, ya que además se envían menos tramas de control. El hecho de utilizar la tasa de datos más baja, no significa una relación directa con la energía necesaria para transmitir cierta información. Esto es porque hay una relación inversa entre el tiempo requerido para enviar cierta información y la tasa de datos utilizada. Por esta razón, se modula el consumo de energía en el estándar IEEE 802.11b/g con el uso de tramas RTS/CTS.

Sea una red de nodos $W(N, L)$, donde N es el conjunto de nodos y L es el conjunto de conexiones inalámbricas directas entre ellos. El enlace entre un nodo fuente s y un nodo destino d , se define por la dupla (s, d) y la distancia entre los dos nodos es $d(s, d)$. El tráfico de la red en el enlace (s, d) está representado por $D(s, d)$ y la tasa a nivel físico como $DR(s, d)$. A partir de este modelo simple, se puede ver la relación entre todos los parámetros que afectan a la energía consumida por un nodo inalámbrico en una comunicación. En la Tabla 5-3 se detalla la notación matemática utilizada en el modelo desarrollado.

Variable	Definición	Variable	Definición
$RTX_{success}$	Número de retransmisiones	T_{ACK}	Tiempo ACK
T_{DIFS}	Tiempo DIFS	CW	Contenido de la ventana
T_{BO}	Tiempo de backoff	n_{frag}	Número de fragmentos
T_{RTS}	Tiempo RTS	$Header$	Cabecera
T_{SIFS}	Tiempo SIFS	$DR(s, d)$	Tasa de datos
T_{CTS}	Tiempo CTS	$DR_{base}(s, d)$	Tasa de datos básica
T_{RTO}	Tiempo de retransmisión agotado (Time out de transmisión)	RTS	Tamaño del RTS
CTS	Tamaño CTS	ACK	Tamaño del ACK
P_i	Potencia en modo inactivo	P_{TX}	Potencia de transmisión
P_{RX}	Potencia de recepción	E_{DR}	Energía en una tasa de datos

Tabla 5-3. Notación matemática

Basándose en el estudio presentado en [127], el número medio de retransmisiones ($RTX_{success}$) hasta que un receptor recibe con éxito la trama de datos, viene dado por la ecuación 5-14.

$$\begin{aligned}
 RTX_{success} &= \lim_{x \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^x n \cdot FER_{MAC}^{n-1} (1 - FER_{MAC}) \\
 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=1}^x n \cdot FER_{MAC}^{n-1} - \sum_{n=2}^{x+1} (n-1) \cdot FER_{MAC}^{n-1} \right) = \frac{1}{1 - FER_{MAC}}
 \end{aligned}
 \tag{5-14}$$

El tiempo necesario en una transmisión de tramas sin pérdidas se modela por la ecuación 5-15. Donde, se requieren cinco tiempos diferentes en el transmisor (Tx) y otros tres en el caso del receptor (Rx).

$$T_{frame_sucess} = \underbrace{T_{DIFS} + T_{BO} + T_{RTS}}_{Tx} + \overbrace{T_{SIFS} + T_{CTS}}^{Rx} + \underbrace{T_{SIFS} + T_{DATA}}_{Tx} + \overbrace{T_{SIFS} + T_{ACK}}^{Rx}
 \tag{5-15}$$

La longitud del tiempo de backoff (T_{BO}) viene determinado por un valor aleatorio dentro del rango $[0, CW]$ multiplicado por el tiempo de slot (T_{slot}). El valor de CW varía según el número de retransmisiones sucesivas. El valor de CW para la i -ésima retransmisión se calcula a través de la ecuación 5-16.

$$CW_i = \min(2^{i-1}CW_{min}, CW_{max}) \quad i \geq 1 \quad 5-16$$

Conociendo los tiempos involucrados en el proceso de transmisión y recepción de una trama (ver ecuación 5-15), ahora se va a dividir cada tiempo con el fin de calcular la energía consumida para la transmisión de $D(s,d)$. Estos tiempos se calculan en las ecuaciones 5-17, 5-18 y 5-19 usando las variables explicadas en la Tabla 5-3. La notación para el tiempo de transmisión, recepción y de reposo del nodo de origen ($T_{TX}^s, T_{RX}^s, T_{idle}^s$) y para el nodo de destino ($T_{TX}^d, T_{RX}^d, T_{idle}^d$). De acuerdo con [128], un nodo inalámbrico (en modo de reposo) gasta menos energía durante sus tiempos de espera ($T_{DIFS}, T_{BO}, T_{SIFS}$). En el caso de que haya retransmisiones, hay que añadir un time-out de retransmisión ($T_{DIFS}, T_{BO}, T_{SIFS}$).

$$T_{TX}^s = T_{RX}^d = \frac{1}{1-FER_{MAC}} (T_{RTS} + T_{DATOS}) = \frac{1}{1-FER_{MAC}} \left(\frac{RTS}{DR_{base}(s,d)} + \frac{D(s,d) + n_{frag} \cdot Header}{DR(s,d)} \right) \quad 5-17$$

$$T_{RX}^s = T_{TX}^d = \frac{1}{DR_{base}(s,d)(1-FER_{MAC})} (CTS + n_{frag} \cdot ACK) \quad 5-18$$

$$T_{idle}^s = T_{idle}^d = \frac{1}{1-FER_{MAC}} \left\{ T_{DIFS} + (1-FER_{MAC})T_{BO} + \left(2 + \frac{1}{n_{frag}} + 2FER_{MAC} \right) n_{frag} T_{SIFS} + FER_{MAC} \left(T_{RTO} - \frac{D(s,d) + n_{frag} \cdot Header}{DR(s,d)} \right) \right\} \quad 5-19$$

Dependiendo de las tasas de datos (en inglés: Data Rate o DR) disponibles en el estándar IEEE 802.11b/g, la energía consumida por unidad de tiempo viene determinada por la ecuación 5-20. Se observa una clara diferencia entre el estado de reposo, el estado de transmisión y el estado de recepción. Esto se debe al nivel de energía requerido por cada estado para llevar a cabo las acciones correspondientes.

$$E^{DR} = P_i \cdot (T_{idle}^s + T_{idle}^d) + P_{TX} \cdot (T_{TX}^s + T_{TX}^d) + P_{RX} \cdot (T_{RX}^s + T_{RX}^d) = 2 \cdot P_i \cdot T_{idle}^s + (P_{TX} + P_{RX})(T_{TX}^s + T_{RX}^s) \quad 5-20$$

Como se puede ver en la Figura 5-3, conforme aumenta la probabilidad de recibir tramas erróneas (mayor FER), el consumo de energía también aumenta. Esto se explica por el hecho de que cuando hay más retransmisiones, se intercambia más tráfico de control de datos y, por lo tanto, se consume más energía. Además, se observa que las transmisiones con tasas de datos más pequeñas consumen más energía, ya que el tiempo de transmisión es mayor para enviar la misma cantidad de datos. Pero, también es cierto, que pueden cubrir distancias más grandes y son más resistentes a las interferencias del canal inalámbrico. Por lo tanto, debe considerarse una relación de compromiso en este sentido. Finalmente, es importante destacar que a partir de 5.5 Mbps, las diferencias de consumo

de energía son muy bajas. Con el fin de obtener la Figura 5-3, las potencia P_i , P_{TX} y P_{RX} asumidas, han sido seleccionadas de una hoja de características de un dispositivo real [129].

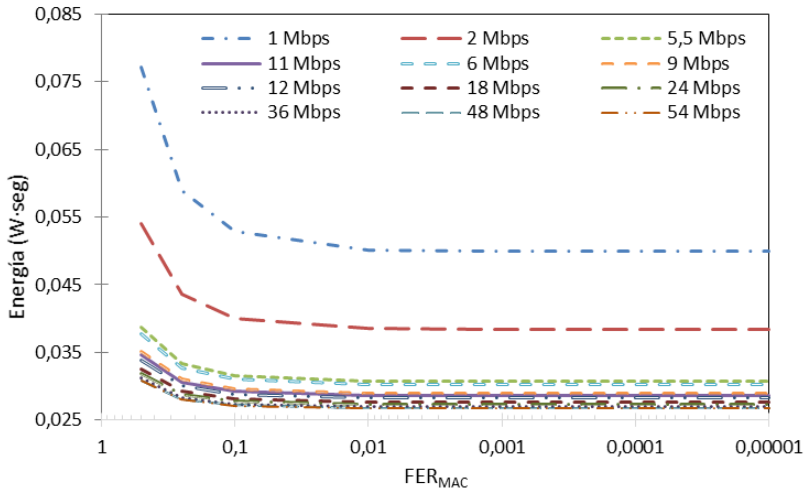


Figura 5-3. Energía consumida frente a la FER a nivel MAC para las tasas de datos

A raíz de los resultados presentados en esta sección, se han definido las posibles acciones a tomar por parte de los dispositivos, en el algoritmo cognitivo energéticamente eficiente propuesto y analizado en los próximos apartados.

5.4 Propuesta de Algoritmo Cognitivo Energéticamente Eficiente

En esta sección se explica con detalle el algoritmo cognitivo energéticamente eficiente, diseñado con el fin de reducir la energía necesaria en una comunicación inalámbrica entre dos dispositivos. Este ahorro de energía vendrá determinado por la reducción del número de retransmisiones y del tráfico de control derivado, ocasionado por el impacto de las condiciones meteorológicas en el rendimiento de los enlaces exteriores IEEE 802.11b/g.

Teniendo en cuenta los resultados presentados en el Capítulo 3 y en el Capítulo 4, se ha diseñado un KP para el desarrollo del algoritmo cognitivo energéticamente eficiente, que considera como variables de entrada ciertas condiciones meteorológicas y algunos parámetros de rendimiento de la red a nivel de capa MAC. La propuesta de KP consta de los elementos mostrados en la Figura 5-4. Ciertos sensores se encargan de monitorizar las condiciones meteorológicas y, mediante el seguimiento de las MIBs de los dispositivos, también se recogen los datos de rendimiento de la red de forma periódica. A continuación, un módulo cognitivo, según ciertas reglas definidas, procesa esta información y decide si se debe aplicar algún cambio sobre las características de transmisión o no. Por último, si se requiere alguna modificación de las transmisiones, el mismo módulo cognitivo envía

las órdenes a los puntos de acceso involucrados, con el objetivo de mejorar la comunicación inalámbrica. La Figura 5-4 muestra los elementos que componen el plano de conocimiento.

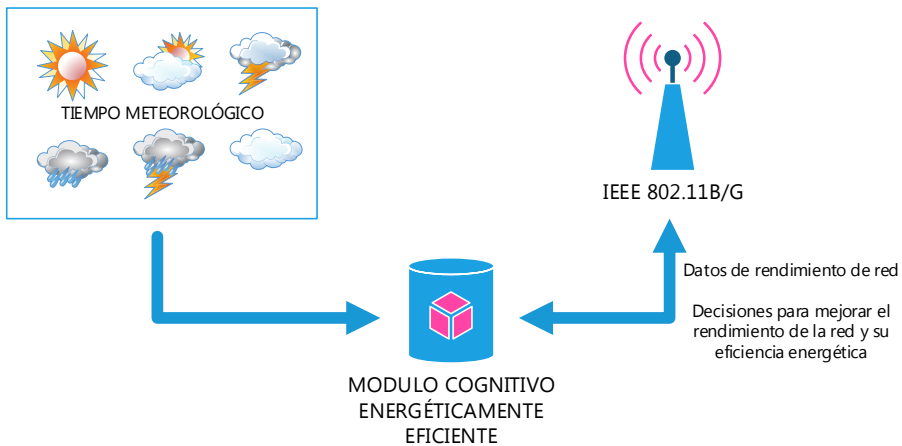


Figura 5-4. Agentes KPs involucrados en el algoritmo propuesto

Los bloques principales que forman el módulo cognitivo energéticamente eficiente y sus conexiones se muestran en la Figura 5-5. La explicación de este módulo cognitivo se realiza de forma secuencial. En primer lugar, el módulo cognitivo debe comenzar su proceso cognitivo. De este proceso cognitivo nacen dos subprocesos, uno para la toma de información sobre las condiciones meteorológicas y otro para la toma de medidas del rendimiento de la red (tramas de control erróneas o pérdidas a nivel MAC). De acuerdo con la combinación de estos datos, este algoritmo creará las acciones apropiadas en el proceso “Crear Acciones”. Entonces, según la combinación de los datos de red con las condiciones meteorológicas, una acción o una combinación de varias serán elegidas en el módulo “Seleccionar Acciones”, teniendo en cuenta la eficiencia energética y el rendimiento requerido por el usuario final. Luego, dicha acción o acciones serán ejecutadas por el módulo “Aplicar Acción”, y monitorizadas para llevar a cabo las demandas del módulo de eficiencia de red y energía. Finalmente, habrá un proceso de aprendizaje, que estará almacenando las acciones tomadas para cada combinación de datos (meteorológicos y de rendimiento de red a nivel MAC). Esto permitirá que el algoritmo presentado vaya mejorando su rendimiento de forma automática conforme vaya aumentando su tiempo en funcionamiento, y le permita ser cada vez más rápido en la ejecución y creación de nuevas acciones futuras. El funcionamiento detallado del algoritmo se presenta en la Figura 5-6.

Se debe asumir que el algoritmo cognitivo se ejecuta cada instante de tiempo t y dicho algoritmo posee memoria, es decir, es capaz de almacenar la información leída en $t-1$. Por otra parte, este algoritmo funciona en modo síncrono, de esta manera los datos que provienen de las condiciones meteorológicas y del rendimiento de la red, corresponden al mismo instante de tiempo. Las condiciones meteorológicas recopiladas son, de acuerdo con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, la temperatura (T), la humedad (H), el punto de rocío (PR), la presión atmosférica (AP) y el viento (VV). De acuerdo con el estudio de correlación

basado en las condiciones meteorológicas agrupadas presentado en el Capítulo 4, el primer paso sería comprobar si los datos meteorológicos tomados pertenecen alguna agrupación significativa (ver apartado 4.4.2).

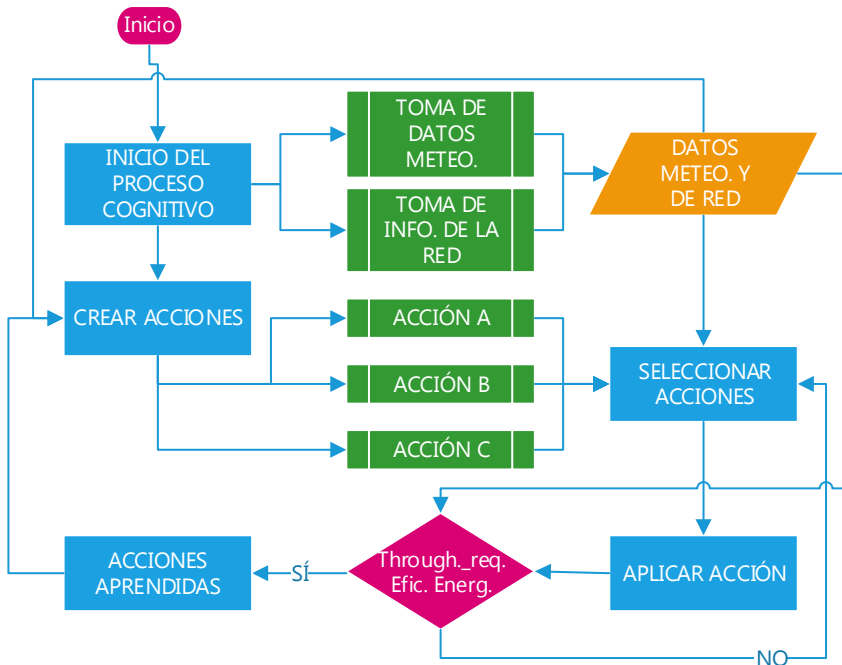


Figura 5-5. Módulo cognitivo

Si la condición meteorológica pertenece a una agrupación significativa, continuará al proceso de combinación de grupos significativos. Este proceso ayuda al algoritmo a centrarse sólo en las tramas de control MAC (en inglés: Control Frame o CF), que tienen un nivel de correlación significativo de acuerdo a los resultados del Capítulo 4. Si la variable no está dentro de una agrupación significativa, esto significará que se tendrán en cuenta todas las tramas de control MAC medidas, para su procesamiento.

Según las tramas de control seleccionadas, el procesamiento de las tramas de control activará el proceso de toma de acciones. Estas acciones pueden ser la disminución/aumento de la tasa de datos de los datos, disminuir/aumentar la longitud del paquete de datos, disminuir/aumentar el tamaño de CW, etc. Debido a que las posibles acciones propuestas para el algoritmo cognitivo, están relacionadas con parámetros de las capas físicas y MAC, el algoritmo propuesto se considera que sigue en parte el enfoque de las redes cognitivas. Sin embargo, si en determinadas condiciones, sólo se toman acciones sobre la capa física, se podría considerar como parte de los diseños de radio cognitivos [122] que se vio en el apartado 5.2. El módulo denominado “Procesar Tramas de Control” (ver Figura 5-6) realizará el procesamiento de las tramas de control utilizando rangos debido a la propia naturaleza de los contadores SNMP utilizados. Cada rango definirá el rendimiento de la red, donde el rendimiento A significa un rendimiento de la red muy bueno, el

rendimiento B significa que la red funciona correctamente y el rendimiento C significa que la red tiene muchas retransmisiones, errores, etc. Este último caso implicará que hay que mejorar su comportamiento para ahorrar energía, respetando al máximo los requisitos de la conexión del usuario final. La forma en que este proceso seleccionará si un rango referido a las tramas de control está dentro de un grupo u otro, viene determinado por las ecuaciones 5-21, 5-22 y 5-23, donde $E[x]$ representa el promedio de un contador en un instante t y σ es su desviación típica. Las variables j y k permiten al algoritmo ajustar la amplitud de los rangos. Los valores que satisfacen la ecuación 5-21 se incluirán en el rendimiento A, los valores de la ecuación 5-22 se incluirán en el rendimiento de C y los otros valores se incluirán en el rendimiento B (ver Figura 5-6).

$$E[CF_i(t)] < E[CF_i(t-1)] - j \cdot \sigma_i(t-1) \tag{5-21}$$

$$E[CF_i(t)] > E[CF_i(t-1)] + k \cdot \sigma_i(t-1) \tag{5-22}$$

$$E[CF_i(t-1)] - j \cdot \sigma_i(t-1) \geq E[CF_i(t)] \leq E[CF_i(t-1)] + k \cdot \sigma_i(t-1) \tag{5-23}$$

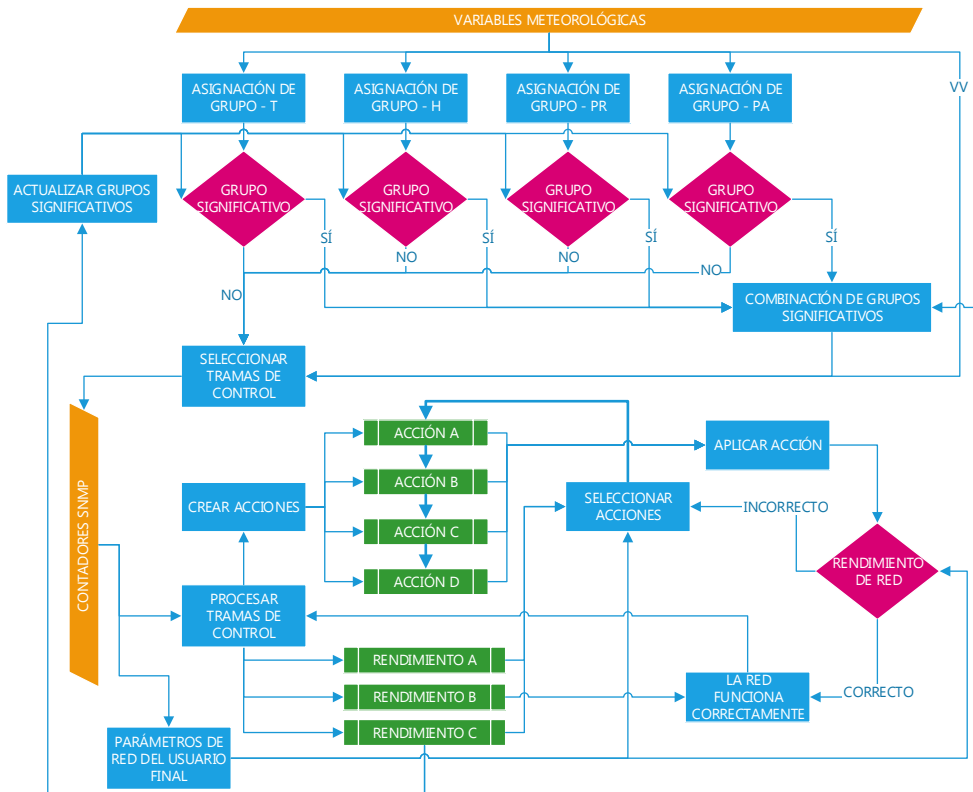


Figura 5-6. Esquema detallado del módulo cognitivo propuesto energéticamente eficiente

El siguiente módulo se denomina “Seleccionar Acciones”, su función es seleccionar una acción de acuerdo con el rango de rendimiento activado. La acción

seleccionada siempre trata de satisfacer el caudal requerido por el usuario final, buscando la mayor eficiencia en términos de ahorro energético. Después de seleccionar la acción, esta se aplica a la red. A través de la información de rendimiento de la red, el algoritmo comprobará si se están aplicando las acciones correctas para mejorar la eficiencia energética, teniendo en cuenta el rendimiento requerido por el usuario final. Si estas acciones son apropiadas, esta información debe ser enviada al módulo llamado "Procesar Tramas de Control" con el fin de mejorar el algoritmo. Este proceso será más rápido cuando las acciones sean creadas para unas determinadas tramas de control (CF). De lo contrario, se alertará al módulo "Seleccionar Acciones", para escoger acciones más agresivas y poder lograr los objetivos.

Por último, el algoritmo actualiza los grupos significativos y la combinación de los mismos. Esto ocurrirá sólo con las nuevas entradas no significativas que se den dentro del rango de rendimiento C. Este algoritmo irá ganando inteligencia conforme vaya aprendiendo de las acciones tomadas y vaya incluyendo nueva información significativa, que le permitirá adaptarse automáticamente a los cambios que pueda tener la red inalámbrica donde se aplique.

5.5 Simulación del Algoritmo Cognitivo Propuesto

En esta sección, se van a mostrar las simulaciones realizadas para comprobar que el algoritmo cognitivo propuesto funciona correctamente, e introduce un mejor comportamiento/rendimiento en términos de eficiencia energética y de disminución del número de retransmisiones y de tráfico control, derivados del impacto del tiempo en el rendimiento de la red.

5.5.1 Banco de Pruebas

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo cognitivo propuesto en el apartado anterior, se han realizado varias mediciones con el simulador Riverbed Modeler Wireless [130]. Se ha considerado un escenario para cada tasa de datos del estándar IEEE 802.11 b/g, y en cada uno de ellos se establece un escenario de red basado en una conexión punto a multipunto, con el objetivo de simular el mismo escenario que se desarrolló para los trabajos presentados en el Capítulo 4. Por lo tanto, tal como ocurre en el escenario real desplegado, los puntos de acceso se colocan en las posiciones estratégicas para que uno de ellos represente el problema del terminal oculto.

La simulación de las condiciones meteorológicas no es posible en este simulador de red. Por esta razón, a fin de intentar reproducir su posible impacto en los enlaces inalámbricos, se han realizado variaciones aleatorias en las condiciones del canal inalámbrico durante la transmisión de los datos. Para ello, se ha introducido un ruido de interferencia aleatorio que va desde 1 a 2.5 dB. Estos niveles de ruido están asociados a los niveles de impacto de las condiciones meteorológicas presentados en los capítulos anteriores. Con este método de ingeniería inversa, se ha conseguido introducir el impacto de los datos meteorológicos en las simulaciones y que esta información esté relacionada con los estudios anteriores.

Acerca de los parámetros de transmisión de la red inalámbrica, se ha fijado la tasa de datos en cada escenario. En todos los escenarios se ha utilizado la función de coordinación distribuida con el mecanismo RTS/CTS activado. Además, se

ha incluido el umbral de potencia de la Tabla 5-2 para cada una de las tasas de datos. El umbral de fragmentación ha sido 2304 bytes. El intervalo de beacon de cada punto de acceso es igual a 0.02 segundos y el máximo tiempo de vida para recibir una trama es de 0.5 segundos. Se han utilizado diferentes canales inalámbricos a fin de evitar las interferencias co-canal.

5.5.2 *Resultados*

El tipo de tráfico inyectado para las simulaciones es de tipo “best effort” y ha sido generado por el propio simulador. Este tráfico empieza 40 segundos después del comienzo de la simulación y termina cuando esta finaliza. El tráfico sigue una distribución exponencial (para las llegadas) con un tiempo medio entre llegadas de 20 milisegundos. El tamaño del paquete sigue una distribución exponencial con un valor medio de 256, 512, 1024, 1536, 2048, 3072 y 4098 bytes. El tráfico inyectado tiene una dirección destino aleatoria dentro de las utilizadas en la simulación, para obtener una simulación independiente de la dirección del tráfico. Este tráfico se representa en la Figura 5-7, donde se puede ver que el tráfico medio incluido en las simulaciones ha sido muy similar para cada una de las tasas de datos físicas del estándar IEEE 802.11b/g.

La Figura 5-8 muestra el tráfico total perdido de capas superiores (bits/seg) como resultado de los intentos de retransmisión fallidos. En esta figura se muestra el número de paquetes caídos de capas superiores, debido a que la capa MAC no recibe ningún acuse de recibo ACK de los paquetes o sus fragmentos, y se alcanza el límite máximo de reintentos de transmisión. La Figura 5-9 muestra estos valores en promedio con el fin de hacer más fácil su comparación. En este caso, se puede apreciar que en las tasas de datos de 54 Mbps, 48 Mbps y 36 Mbps, se producen mayores pérdidas de paquetes. Las tasas de datos más bajas presentan una menor cantidad de datos caídos y, por lo tanto, un menor número de retransmisiones, aunque como se puede observar en la Figura 5-3, las tasas de datos más altas consumen menos energía para la misma FER y el mismo número de retransmisiones. En un entorno simulado cercano a la realidad, estas tasas de datos más elevadas, presentan una mayor vulnerabilidad frente a condiciones pobres del canal inalámbrico. De acuerdo con esta información (ver Figura 5-8), se ha decidido no utilizar todas las tasas del estándar IEEE 802.11b/g como posibles cambios en las características de la transmisión del algoritmo cognitivo. Esto es debido a que algunas de las tasas, como son las de 6 y 9 Mbps, presentan un número de datos caídos mayor que en 11 Mbps. Además, implican una menor eficiencia de rendimiento y energía. Por lo tanto, se considera que las mejores tasas de la variante IEEE 802.11b/g son 54, 36, 18, 11, 5.5, 2 y 1 Mbps.

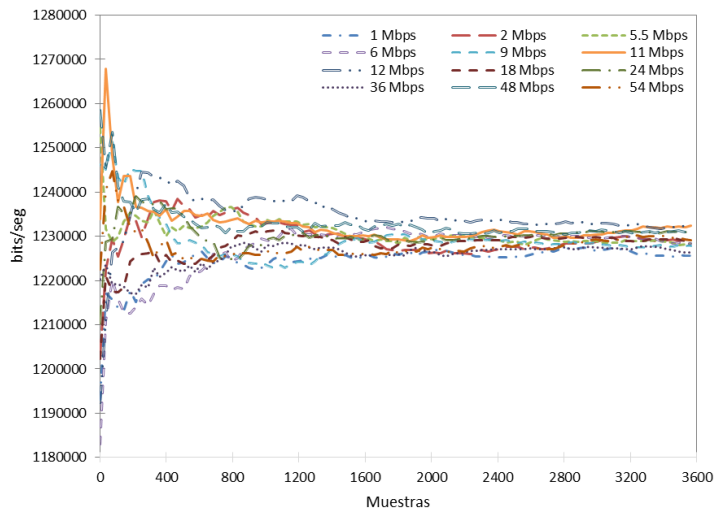


Figura 5-7. Tráfico generado para cada tasa de datos con un tamaño de paquete de 1024 bytes

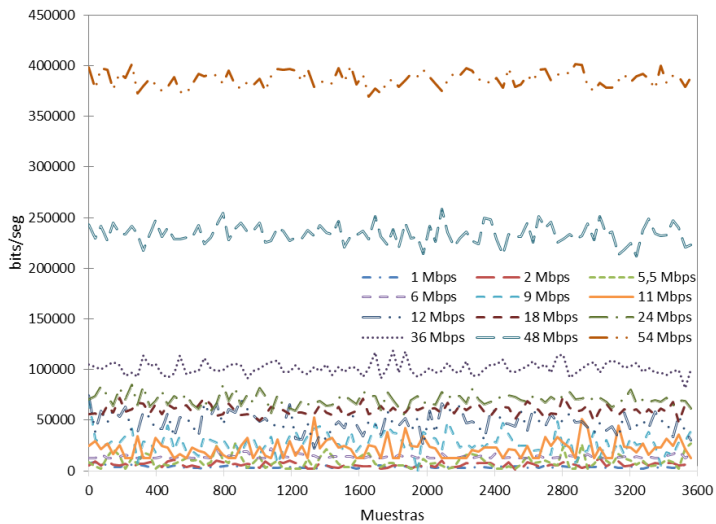


Figura 5-8. Datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para cada tasa de datos

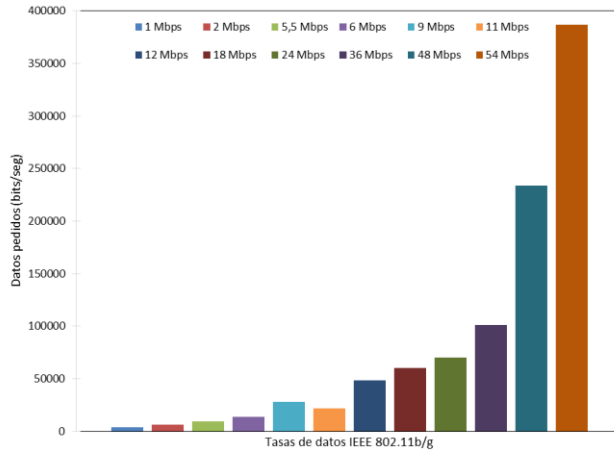


Figura 5-9. Promedio de datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para cada tasa de datos

En la Figura 5-10, se ha estudiado la variación del tamaño de los paquetes de datos para las diferentes tasas de datos. En esta figura, se puede ver como el tamaño de los paquetes, está relacionado con la cantidad de tráfico de control introducido por una estación en la red. Este tráfico de control incluye las tramas RTS, CTS y ACK. En 1 y 2 Mbps, el tamaño del paquete más eficiente es 4096 bytes, mientras que en las otras tasas de datos, el mejor tamaño se encuentra alrededor de 2048 o 1536 bytes. Esto se debe a que el propio proceso de fragmentación conlleva más tráfico de control a altas tasas de datos, porque el canal de radio puede ser liberado más pronto. Teniendo en cuenta este fenómeno, el algoritmo cognitivo presentado seleccionará un tamaño de paquete de datos adecuado a la tasa de datos utilizada.

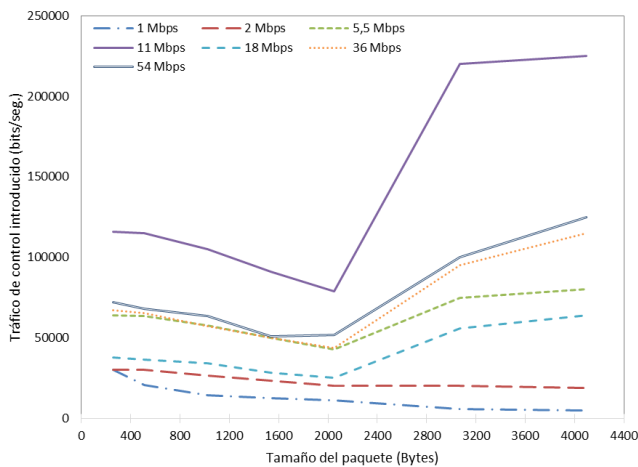


Figura 5-10. Variación del tamaño de paquete de los datos frente al tráfico de control introducido por una estación IEEE 802.11b/g para cada tasa de datos

En la Figura 5-11 se representa la SNR de la simulación (línea azul), sin tomar en consideración la simulación de las condiciones meteorológicas. En cambio, como se puede ver en esta figura, la SNR disminuye 2 dB en algunas muestras, cuando se introducen los fenómenos meteorológicos (línea roja). Cuando hay una SNR baja, se supone que las condiciones meteorológicas están afectando a la comunicación. Por esa razón, se puede ver que los datos caídos en la tasa de los 36 Mbps aumentan o disminuyen, en el caso contrario.

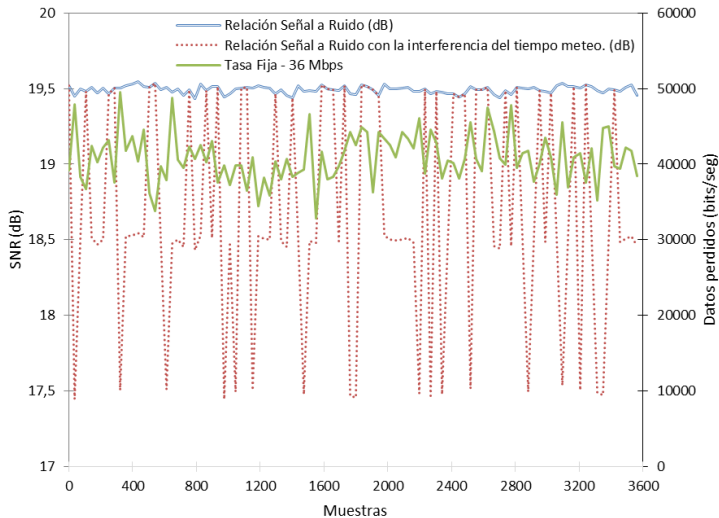


Figura 5-11. SNR frente a los datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión para la tasa de 36 Mbps en una estación inalámbrica

Por último, se simula el funcionamiento del algoritmo cognitivo propuesto en este capítulo. En este caso, en primer lugar, el algoritmo aumenta el tamaño del paquete de datos desde 1024 hasta 2048 bytes. La siguiente tarea es verificar la eficiencia energética, en este caso no se ha mejorado y el rendimiento del usuario final se ha reducido a 24 Mbps. El resultado de estas acciones puede verse en la Figura 5-12. Esta figura compara los datos caídos en una operación normal, con los datos que cayeron utilizando el algoritmo cognitivo. Como se puede apreciar en la Figura 5-12, hay menos datos caídos cuando se utiliza el algoritmo propuesto, lo que implica un menor número de retransmisiones y un mejor rendimiento de la red desde el punto del usuario final

Finalmente, se compara el nivel de energía requerido en una comunicación a 36 Mbps, aplicando el algoritmo cognitivo y sin él (ver Figura 5-13). El algoritmo presenta una mayor eficiencia energética, especialmente en algunos picos máximos (ver las muestras de 1600 a 2400 en la Figura 5-13). El algoritmo tiene un consumo medio de 0.0715 W·s y la comunicación estándar de 0.083 W·s. Esto significa que el algoritmo proporciona una mejora del 14%, en términos de eficiencia energética, respetando el rendimiento requerido por el usuario final.

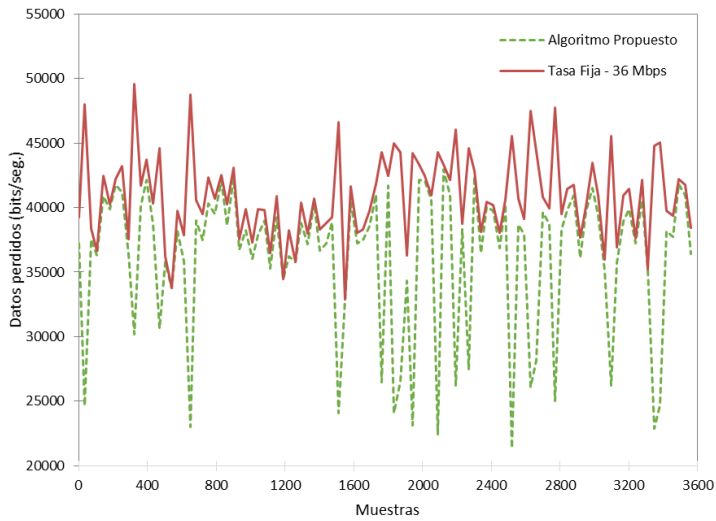


Figura 5-12. Comparación de los datos perdidos por exceder el límite de reintentos de transmisión a 36 Mbps

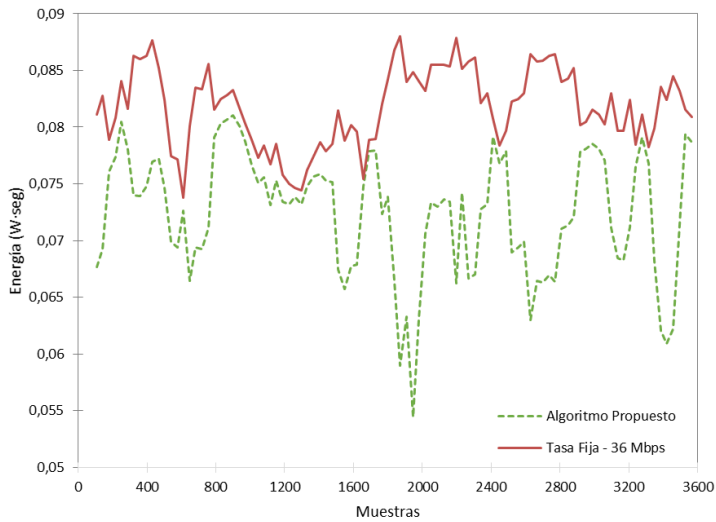


Figura 5-13. Comparación de la energía requerida a 36 Mbps

5.6 Conclusión

La investigación presentada en este capítulo aborda el problema actual del consumo de energía en las redes inalámbricas. En concreto, se centra en las redes externas utilizando el estándar IEEE 802.11b/g. Las interfaces WLAN son uno de los elementos que más energía consume en un dispositivo portátil y dicho estándar ha sido hasta la fecha uno de los más utilizados en todo el mundo. Tal y como se ha visto en los capítulos anteriores, existe un grado de asociación significativo entre

las condiciones meteorológicas y el rendimiento de las redes inalámbricas exteriores. Se ha demostrado que realmente el tiempo meteorológico, presentan una relación significativa con el número de tramas de control MAC erróneas o perdidas y, éstas a su vez, están relacionadas directamente con el número de retransmisiones, con lo cual es fundamental tener en cuenta estos factores si se quiere tener redes energéticamente eficientes en exteriores. Por otra parte, se ha modelado el consumo de energía en las redes WLAN y, de acuerdo a esos resultados, se ha propuesto un algoritmo cognitivo energéticamente eficiente, para superar el impacto de las condiciones meteorológicas en el rendimiento de las redes, reduciendo así el impacto de las retransmisiones y del aumento del tráfico de control, que suponen un aumento en el consumo de energía. Finalmente, a través de simulaciones, se demuestra el buen rendimiento del algoritmo propuesto.

Los trabajos y resultados derivados del trabajo presentado en este capítulo han sido publicados, como capítulo de libro [33] y ha sido aceptado como artículo en una revista indexada, pero todavía no está disponible su referencia.

TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA DEL CUERPO HUMANO

6.1 Introducción

El objetivo de llevar a cabo este trabajo, se deriva del estudio presentado en el Capítulo 3, en el que se demuestra que el comportamiento humano influye en el rendimiento de las redes IEEE 802.11b/g exteriores, desde el punto de vista de su conectividad a la red según las condiciones meteorológicas. De tal manera que, según el número de usuarios conectados a la red y del tipo y cantidad de tráfico que transmiten, el rendimiento de la red puede ser uno u otro. Sin embargo, a partir de este trabajo, se decidió analizar si la mera presencia de personas en los alrededores de los puntos de acceso, sin la necesidad de que estuvieran conectados, influía también en el rendimiento de las transmisiones debido a la tasa de absorción del cuerpo humano. En tal caso, aumentaría el grado de incertidumbre de los resultados obtenidos en dicho trabajo, ya que no es posible aislar esta variable (número de personas en los alrededores del campus de Vera) de las medidas tomadas sobre ese escenario. Por lo tanto, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos de dicha investigación, en la que se trata la presencia de las personas, como un factor externo que puede influir en el rendimiento de las redes, del mismo modo que se ha hecho para las condiciones meteorológicas. Pero obviamente, en este caso, no importa si la red está ubicada en un entorno exterior o interior, y es independiente de si las personas están conectadas o no a la red.

Hoy en día, el elevado número de tecnologías inalámbricas desarrolladas, suponen multitud de campos electromagnéticos (CEM) a nuestro alrededor, y existen muchas especulaciones en torno a su influencia negativa sobre los seres humanos.

En respuesta a esta preocupación, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció el Proyecto Internacional CEM en 1996 [131]. Este proyecto fue enfocado a analizar los posibles efectos en la salud de los campos electromagnéticos en el rango de frecuencias de 0 a 300 GHz.

Existen varias directivas públicas y recomendaciones en Europa, entre las que destaca la Directiva 1999/5/CE del Parlamento y del Consejo Europeo, del 9

de marzo de 1999. Esta versa sobre los límites máximos de radiación permitidos en los equipos radioeléctricos y equipos terminales de telecomunicación [132]. La Recomendación del Consejo Europeo del 12 de julio de 1999, trata sobre la exposición del cuerpo humano a los campos electromagnéticos, e indica los límites máximos recomendados de exposición para la población en general [133].

Las restricciones básicas sobre los campos electromagnéticos dependen de la frecuencia [133] y sus principales efectos adversos en la salud son:

- De 0 a 1 Hz, la densidad de flujo magnético para los campos magnéticos estáticos (0 Hz) y la densidad de corriente para campos variables en el tiempo hasta 1 Hz se tienen en cuenta. El objetivo es prevenir los efectos sobre el sistema cardiovascular y nervioso central.
- Desde 1 Hz a 10 MHz, se tiene en cuenta la densidad de corriente para prevenir los efectos sobre las funciones del sistema nervioso.
- De 100 kHz a 10 GHz, se tiene en cuenta las restricciones del SAR para prevenir el estrés del calor en todo el cuerpo y un calentamiento local excesivo de los tejidos. En el rango de 100 kHz a 10 MHz, se proporcionan restricciones de la densidad de corriente y el SAR.
- De 10 GHz a 300 GHz, se proporcionan restricciones básicas de la densidad de potencia para evitar el calentamiento en el tejido en o cerca de la superficie del cuerpo.

Con el fin de establecer unos valores de seguridad, muchos países han limitado la potencia de transmisión de los dispositivos WLAN, de acuerdo con la frecuencia de trabajo. La Tabla 6-1 muestra las limitaciones de potencia de transmisión según el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) y de la FCC para varias frecuencias de radio.

	Banda (GHz)				
	2.4	5.15 – 5.25	5.25 – 5.35	5.470 – 5.725	5.725 – 5.825
ETSI					
Potencia	100 mW	200 mW	200 mW	1000 mW	25 mW
EIRP	20 dBm	22 dBm	22 dBm	30 dBm	14 dBm
FCC					
Potencia	4000 mW	200 mW	1000 mW		P2MP-4 W (36 dBm)
EIRP	36 dBm	22 dBm	30 dBm		P2P-200 W (53 dBm)

Tabla 6-1. Comparación entre las limitaciones de la ETSI y de la FCC

En cuanto a los límites de exposición, se describen en términos de tasa de absorción específica (SAR). Esta tasa indica la absorción de energía de radiofrecuencia por unidad de masa de tejido corporal. El SAR medio se calcula para todo el cuerpo o para algunas partes del cuerpo. Se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). Las medidas del SAR en todo el cuerpo, están relacionadas con los efectos térmicos causados por la exposición a la radiofrecuencia (RF). Por otro lado, se utilizan los valores de SAR locales, para evaluar y poner límites de absorción de energía de RF en las partes individuales del cuerpo; particularmente en las partes más sensibles como son la cabeza o las orejas, conocidas como partes blandas del cuerpo.

El SAR aparece en las especificaciones técnicas de todos los teléfonos móviles con el fin de establecer el límite máximo permitido [134]. Este parámetro se establece en la Directiva 1999/5/CE del Parlamento Europeo [131], y en las normas ICNIRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica para ondas no ionizantes) [133].

La Tabla 6-2, que ha sido obtenida a partir de la referencia [132], muestra las restricciones básicas para los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (de 0 Hz a 300 GHz). Los valores para el objeto de esta investigación de este trabajo se muestran en la penúltima fila. Se puede ver que es 0.08 W/kg para todo el cuerpo, 2 W/Kg para la cabeza y el tronco, y 4 W/Kg para las extremidades. Estos valores han sido calculados para un período de seis minutos y 10 gramos de tejido corporal.

Rango Magnético	Densidad de flujo magnético (mT)	Densidad de corriente (mA/m ²) (rms)	SAR medio en un cuerpo (W/kg)	SAR localizado (cabeza y troco) (W/kg)	SAR localizado (piernas y brazos) (W/kg)	Densidad de potencia S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
>0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1-4 Hz	-	8/f*	-	-	-	-
4-1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1000 Hz-100 KHz	-	f/500	-	-	-	-
100 KHz-10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 GHz-300 GHz	-	-	-	-	-	10

* f es la frecuencia en Hz.

Tabla 6-2. Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos entre 0 y 300 GHz

Con el fin de establecer los niveles de incertidumbre relacionados con las sensibilidades individuales de cada individuo, las condiciones ambientales y las posibles diferentes características de las personas, como la edad o la salud, todos estos factores se han tenido en cuenta en este trabajo. Las mediciones del SAR en esta investigación, se han llevado a cabo mediante el funcionamiento estándar de los dispositivos IEEE 802.11b/g, es decir, mientras el dispositivo transmite al máximo nivel de potencia certificado en la bandas de frecuencias de 2.4 GHz (ver en la Tabla 6-1). Cuando un dispositivo está funcionando, el nivel de SAR medido puede ser inferior al valor máximo posible, ya que los dispositivos están diseñados para usar sólo la potencia máxima, cuando sea necesario para alcanzar una red. La potencia necesaria puede variar de acuerdo a algunos factores tales como, la ganancia de la antena del dispositivo, la proximidad a la estación base o la frecuencia de trabajo. Por lo tanto, estos factores también influirán en el SAR directamente.

En este capítulo se va a analizar el SAR del cuerpo humano para dispositivos WLAN IEEE 802.11b/g, en un entorno interior controlado y en un ambiente no controlado, donde no se puede establecer ninguna variable de forma previa. El objetivo es ver las diferencias en el nivel del SAR en ambos casos.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera. En el segundo apartado se describen los elementos que conforman el cuerpo humano y se explica cómo las ondas electromagnéticas afectan a cada parte del mismo y cuáles son sus consecuencias. A continuación, en el tercer apartado, se describen los aspectos analíticos considerados para la estimación del SAR en este trabajo. En el cuarto apartado, se explica cómo se ha realizado la toma de las medidas, en qué lugares y qué software se ha utilizado para el análisis de los datos. Además, en este apartado se muestran los resultados obtenidos en los dos escenarios considerados. Finalmente, en el último apartado de este capítulo se recogen las conclusiones más importantes derivadas de este estudio.

6.2 El Cuerpo Humano y los Efectos de las Ondas Electromagnéticas

En este apartado se detalla el cuerpo humano y los principales efectos de las ondas electromagnéticas sobre él.

6.2.1 La Composición del Cuerpo Humano

Se considera que el cuerpo humano es la suma de diversos tejidos y sistemas, que difieren de la anatomía morfológica y conforman la anatomía química. El conocimiento de la anatomía química facilita la comprensión de muchos procesos, especialmente aquellos que generan cambios en la composición del tejido o en algunas partes del cuerpo y que, a menudo, ayudan a explicar los mecanismos fisiopatológicos.

Con el fin de determinar la composición del cuerpo humano, hay métodos basados en el análisis químico directo de las partes del cuerpo humano. Son más exactos pero tiene la desventaja de que no se pueden aplicar durante el período vital. Pero, la composición del cuerpo humano también se puede deducir por métodos indirectos, basados en la estimación de la densidad y del volumen del cuerpo humano. Midiendo el peso corporal bajo el agua, y aplicando a continuación el principio de Arquímedes, se puede calcular ambos valores.

El modelo teórico de la composición del cuerpo humano de los "5 niveles" permite más de 30 consideraciones [135]. Los cinco niveles considerados son:

- Nivel atómico
- Nivel molecular
- Nivel celular
- Nivel hístico (orgánico)
- Nivel global

6.2.1.1 Nivel Atómico

El oxígeno es el elemento más abundante en el cuerpo humano. A continuación está el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno y el calcio. En la Tabla 6-3, se puede ver el porcentaje de cada elemento en un cuerpo humano medio.

Elemento	% Del peso
Oxígeno	61
Carbono	23
Hidrógeno	10
Nitrógeno	2.6
Calcio	1.6

Tabla 6-3. Composición atómica del cuerpo humano

6.2.1.2 Nivel Molecular

El agua es el 60% del peso corporal, siendo el compuesto químico más abundante, seguidos por las proteínas y los lípidos. En la Tabla 6-4 se muestra la división de los compuestos en un cuerpo humano medio.

Compuesto	Porcentaje de peso corporal
Agua	60%
Lípidos	20%
Proteína	15%
Minerales	5,3%

Tabla 6-4. Composición molecular del cuerpo humano

6.2.1.3 Nivel Celular

La masa celular total para un adulto es de 1018 células, que se clasifican en 4 clases:

- Conectivas (adipocitos, los osteoclastos, osteoblastos)
- Células epiteliales
- Nervio
- Músculo

6.2.1.4 Nivel Hístico

En este nivel se incluye:

- El tejido muscular. El músculo esquelético representa entre el 30 y el 40% del peso corporal.
- Los tejidos mesénquima. El tejido óseo es 7,1%, la sangre representa el 7,9%, el tejido conectivo y el tejido adiposo (que es subcutáneo el 11%, el visceral 7,1%, el intersticial 1,4% y el de la médula ósea 2,1%).
- Los tejidos epiteliales. Se forman por la piel (3,7%), el hígado (2,6%), el tracto gastrointestinal (1,7%) y los pulmones (1,4%).
- El tejido nervioso. Es el sistema nervioso central y el sistema periférico. El sistema nervioso central representa alrededor del 2%.

6.2.1.5 Nivel Global

Por último, la división del cuerpo humano para este nivel es:

- La cabeza
- El cuello
- Los brazos

- El tronco
- Las piernas

6.2.2 *Efectos Electromagnéticos sobre el Cuerpo Humano*

Desde la introducción de los teléfonos móviles a mediados de la década de los 80, se ha sabido que la exposición a las ondas electromagnéticas puede ser perjudicial debido a la capacidad que posee la energía de radiofrecuencia para calentar rápidamente el tejido biológico [136]. A continuación, se va a analizar cómo se produce este calentamiento en el cuerpo humano.

Desde el punto de vista médico, las oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia no causan la despolarización de las fibras nerviosas. A pesar de que las ondas de alta frecuencia presentan un número elevado de alternancias, que atraviesan las estructuras musculares, los músculos no son excitados. Las ondas de alta frecuencia producen calor en el interior del cuerpo. Por el contrario, las ondas de frecuencia baja tienen otros efectos importantes (pero que no se estudian en este capítulo porque las WLANs no se considera que trabajen a bajas frecuencias).

Todas estas ondas EM penetran fácilmente a través de la piel, que no es un obstáculo demasiado grande. Además, estas ondas calientan las áreas más funcionales de los componentes acuosos (tejidos blandos y órganos), de las partes grasas. Aunque, todas las ondas producen calor dentro del cuerpo, el calor será diferente de acuerdo a su penetración y la manera de difundir dicho calor producido.

Las ondas de alta frecuencia actúan sobre el cuerpo de acuerdo a la corriente eléctrica que fluye a través de las estructuras organizativas.

Las ondas electromagnéticas de alta frecuencia pueden penetrar en el cuerpo humano a través de tres mecanismos:

- Como corriente continua. La consecuencia más importante de este mecanismo es la producción de calor a través de la ley de Joule.
- Como corriente de desplazamiento. Las ondas de alta frecuencia son capaces de pasar a través de organismos dieléctricos. Para entenderlo, se debe pensar que las moléculas son dipolos potencialmente eléctricos, que se convierten en un dipolo real cuando tienen un campo eléctrico y las cargas eléctricas están orientadas.
- Como corriente de inducción. La corriente de alta frecuencia puede inducir una corriente en la misma frecuencia. Estas ondas pasan a través de cuerpos conductores como corriente de conducción. Por el contrario, estas ondas pasan por los cuerpos no conductores como ondas inducidas o de desplazamiento.

El efecto del campo electromagnético sobre un área determinada del cuerpo humano, provoca que las moléculas bajo su influencia tengan un cambio de polaridad de muchos millones de veces por segundo. Este número de cambios depende de su frecuencia específica.

En el interior del cuerpo humano, la molécula más abundante es el agua, aproximadamente el 60% del peso corporal, como se indica en la subsección anterior. Aunque la molécula de agua es eléctricamente neutra, tiene una distribución

de carga que se asemeja a un dipolo. Es decir, que tiene una carga positiva para los átomos de hidrógeno y una carga más negativa para los átomos de oxígeno. Esta molécula tiene una apariencia similar a un ángulo de 120° , donde la molécula de oxígeno es el vértice y las de hidrógeno están en cada lado.

Teniendo en cuenta que las moléculas de hidrógeno se colocan al lado del campo positivo y el campo negativo está en el otro lado, el campo electromagnético comienza a actuar sobre las moléculas de agua. Los átomos de hidrógeno serán rechazados por las cargas del mismo signo, y atraídos por el contrario. Sin embargo, el átomo de oxígeno será rechazado por las cargas negativas y atraído por las cargas positivas.

En general, la molécula de agua tiende a girar para ser colocada en el sentido contrario, por lo que sus polos positivos se enfrentan a las cargas negativas, y los polos negativos se sitúan frente a las cargas positivas.

Como la frecuencia cambia tan rápidamente, una vez este movimiento de rotación ha comenzado, la situación de los campos es opuesta. A la derecha estará el polo negativo del campo y a la izquierda el positivo. Por lo tanto, la molécula de agua inicia un giro en la dirección opuesta al evento anterior, ahora en esta molécula sus cargas están cerca del campo de polaridad opuesta.

Este fenómeno se repite con cada nuevo cambio de polaridad, una y otra vez. Las moléculas de agua comienzan una serie de rotaciones sucesivas, de modo que las moléculas se frotan las unas contra las otras. Esta fricción provoca un efecto de calentamiento sobre las moléculas.

En resumen, la acción del campo electromagnético en las ondas de alta frecuencia provoca fricción, y a su vez esto produce calentamiento dentro de moléculas de agua. Los órganos internos (músculos, órganos blandos, vísceras, etc.) se componen principalmente de agua, y por lo tanto se calientan. Sin embargo, este calor no viene desde fuera, sino que se genera en el interior del cuerpo. Es interesante saber que en comparación con otros órganos, la piel y las grasas del cuerpo no se calientan fácilmente cuando se irradian por las ondas EM.

Esta agitación de las moléculas provoca diferentes efectos en los seres humanos. Los efectos generales son el aumento de la temperatura y la reducción de la presión arterial. Otros efectos reportados por Thom [137] son un exceso de fatiga y la necesidad de dormir más, en respuesta al calentamiento corporal. Está claro que estos efectos se producen cuando un cuerpo es irradiado durante un largo periodo de tiempo. Thom concluye que el efecto acumulativo de muchas irradiaciones puede ser peligroso.

A partir de la implantación de las comunicaciones móviles inalámbricas, algunas personas dijeron sufrir algunos síntomas causados por dichas radiaciones electromagnéticas. Por lo general, ocurren cuando las personas viven o están cerca de los transmisores. Se considera que los síntomas más comunes son ansiedad, fatiga, depresión, dolores de cabeza e insomnio.

Hoy en día, los equipos actuales de radiación de alta frecuencia producen menos efectos indeseables, debido a que han sido mejorados en este sentido y a

que se toman mayores precauciones. Por esta razón, los lugares que suelen evitarse para ubicar estos equipos de alta frecuencia, en la medida de lo posible, son los hospitales, escuelas, parques, etc. u otros lugares donde hay mucha gente durante largos períodos de tiempo.

El nivel de calor causado en las moléculas cuando las ondas pasan por el cuerpo, depende de la onda de frecuencia y del campo incidente. Varios estudios han demostrado esta conclusión y el nivel de calor en cada elemento del cuerpo humano [138]. En la Tabla 6-5, se observa el nivel de calor de 0 a 5, donde 0 significa que no hay calor y 5 significa calor alto. De acuerdo a esta tabla, se puede ver que las microondas afectan a los músculos (4) y a la grasa corporal (3). Por lo tanto, se considera que las personas con más músculos y/o grasa corporal, absorben más ondas electromagnéticas. Esta conclusión se ha observado en la investigación presentada en este capítulo.

	Grasa	Músculos	Periostio	Huesos
Onda Corta – Campo capacitivo	4	2	1	1
Onda Corta – Campo solenoidal	1,5	5	1	1
Onda Corta - Solenoidal y circuplode	0	5	2	2
Ondas UHF – Campo selenoidal	1	4	1	1
Ondas UHF – Campo transversal	2	4	2	2
Microondas	3	4	0	0

Tabla 6-5. Calentamiento del cuerpo humano frente a las diferentes ondas EM

Para realizar este estudio se utiliza equipamiento estándar que trabaja en la banda de frecuencia radio de 2.4GHz y con una longitud de onda de 12.5 cm. En esta longitud de onda, la energía producida por las alta frecuencias es particularmente bien absorbida por los tejidos del cuerpo. Esto es así debido al alto porcentaje de agua de nuestro cuerpo. Estas microondas pasan a través de la grasa subcutánea y, en los músculos y los órganos con mucha sangre, se transforman en calor. Este fenómeno también a través de la piel. Obviamente, este aumento de la temperatura en el cuerpo no es deseable.

En estudios llevados a cabo sobre animales, se ha visto que exposiciones a niveles muy altos de RF, aunque sea durante un corto periodo de tiempo, producen cataratas en los conejos, esterilidad temporal debido a cambios en el número de espermatozoides y en su movilidad. Los ratones y conejos han sido empleados para la mayoría de las investigaciones experimentales sobre los efectos biológicos de la exposición de RF [139].

Por otra parte, un estudio epidemiológico sobre el cáncer, ha descubierto que los principales tipos de cáncer asociados con la exposición a los campos electromagnéticos son la leucemia, tumores del sistema nervioso, el linfoma y el cáncer de mama, entre niños en entornos residenciales y adultos en lugares de trabajo [140].

Otros efectos de la exposición a los CEM son la depresión, la fatiga, irritabilidad y dolor de cabeza. Dichos estudios epidemiológicos han encontrado una relación de síntomas similares a la depresión y mayores tasas de suicidio entre las personas que viven cerca de las líneas de transmisión. Por otro lado, los resultados

adversos en el embarazo, incluyendo abortos involuntarios, malformaciones congénitas y enfermedades al nacer, están asociados con la exposición ocupacional materna a los campos electromagnéticos. Por otra parte, la exposición ocupacional paterna a campos electromagnéticos también se ha relacionado con la reducción de la fertilidad, menor proporción de hombres (sexo) en la descendencia, malformaciones congénitas y los efectos teratogénicos expresados en forma de cáncer infantil. Los estudios en vivo mostraron que la exposición a campos eléctricos elevados reduce las concentraciones de testosterona en plasma y reduce la viabilidad del espermatozoides.

6.3 Consideraciones Analíticas

En esta sección se detallan las consideraciones analíticas que se tienen en cuenta para llevar a cabo el análisis de este capítulo.

En primer lugar, la tasa de absorción específica del cuerpo humano en este trabajo, se estudia a partir de la disminución del RSSI en el receptor.

Los valores de RSSI recibidos desde un dispositivo en una red inalámbrica, dependen de un gran número de factores impredecibles. En concreto, en una red WLAN IEEE 802.11, pequeños cambios en la posición o dirección de los dispositivos pueden suponer cambios notables en el RSSI. Además, aunque los dispositivos permanezcan completamente estáticos, la presencia de objetos que interfieran en la propagación de la onda entre el punto de acceso y la estación móvil, también causan grandes cambios en el RSSI.

Está claro que el primer factor que influye en los valores de RSSI obtenidos por un dispositivo inalámbrico, es la distancia entre el emisor y el receptor, ya que conforme aumenta la distancia, disminuye el nivel de señal recibido. En el espacio libre, dicha atenuación se calcula fácilmente con la ecuación básica de pérdida en espacio libre, pero en entornos reales, los materiales que deben atravesar las ondas y su posible mayor o menor absorción, comportan mayores dificultades de medición. Por lo tanto, para tener alguna idea acerca de la energía dispersada por la presencia de los seres vivos, es necesario determinar de antemano el tipo de dependencia presente entre esos valores RSSI y la distancia entre el emisor y el receptor. Por lo general, esto ha sido conocido como pérdida de trayectoria, y se modela de forma inversamente proporcional a la distancia entre el emisor y el receptor elevado a un cierto exponente. Este exponente se conoce como exponente de pérdida de trayectoria [141], el factor de pérdida de trayecto [142], o el gradiente de pérdida de trayecto [143].

Otros factores que afectan a los valores de RSSI son la trayectoria multicarminio y las zonas de sombra [139]. Estos dos factores pueden ser modelados con los modelos Rayleigh o Ricean y con distribuciones log-normales [141]. Por lo tanto, los valores de RSSI pueden ser modelados, por medio de la fórmula de transmisión de Friis [142], ecuación 6-1.

$$P_R = \frac{G_t G_r}{4\pi} \cdot P_t \cdot \frac{g^2 \cdot \gamma}{d^n} \quad 6-1$$

Donde P_t es la potencia transmitida, G_t y G_r son las ganancias del transmisor y del receptor respectivamente, d es la distancia entre el transmisor y el receptor, n es el índice de variación de la atenuación con la distancia ($n = 2$ en el aire), y g y γ son los parámetros que conforman los modelos Rayleigh/Rician y las distribuciones log-normales respectivamente.

En muchos modelos se añade el efecto de las pérdidas debido al efecto multicamino [144] [145]. Pero, observando la media en un determinado intervalo de tiempo, se puede eliminar dicho factor [146]. Así, las pérdidas de propagación pueden ser modeladas por la expresión 6-2.

$$L(\text{dB}) = L_o - 10 \cdot n \cdot \log(d) - K \cdot SAR \quad 6-2$$

Donde L_o son las pérdidas (en dB) a un 1 metro de distancia, K es el número de personas en la ubicación de la red, y el SAR es la media de las tasas de absorción de todas las personas que hay dentro de la habitación. Todos los otros parámetros se han definido anteriormente.

Sin embargo, estas pérdidas de propagación se producen para cada punto de acceso en la habitación, por lo que la RSSI absorbida dependerá del SAR, del número de personas en la habitación, del número de puntos de acceso, y de la distancia con los dispositivos inalámbricos.

La técnica de modelado FDTD [147] es el método preferido para hacer los cálculos de SAR. Esta formulación diferencial, permite a los usuarios dividir el modelo espacial en celdas muy pequeñas, que proporcionan una mayor resolución del tejido en el cuerpo humano. Otros métodos computacionales son incapaces de modelar la estructura del tejido humano a una resolución lo suficientemente precisa para dichos cálculos.

Por lo tanto, utilizando la técnica FDTD se pueden obtener los componentes de campo E en cualquier área en que se desee. Y así, modelar y distribuir los valores locales del SAR directamente a partir de la distribución del campo eléctrico, que da como resultado la expresión 6-3 [148] [149].

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E_{max}^2}{2 \cdot p} \quad 6-3$$

Donde σ es la conductividad en la celda deseada del dominio FDTD y p es la densidad de la muestra.

El valor dependerá en gran medida de la geometría de la parte del cuerpo que está expuesta a la energía de RF, y de la localización y la geometría exacta de la fuente de RF. El valor de SAR se calcula en el lugar que presenta la mayor tasa de absorción, que es la cabeza.

En condiciones de campo lejano, el WBSAR (Wide Body Averaged SAR) se ha utilizado con éxito como un estimador fácil para el SAR. Como se muestra en los estudios anteriores [150], es razonable considerar el cuerpo humano aproximadamente como un dipolo de media onda. La frecuencia de resonancia puede ser estimada a partir de la altura de las personas. La analogía de un dipolo de media

onda y los modelos del cuerpo humano en su respectiva frecuencia de resonancia se analizó en [151].

Resumiendo las características fundamentales del dipolo de media onda, la distribución de corriente en la antena $I(z)$ y el máximo de corriente $I_0[A]$, la altura efectiva de la antena $L_e[m]$ viene dada por la ecuación 6-4 [152].

$$L_e = \frac{1}{I_0} \int_0^L I(z) dz \quad 6-4$$

Donde, L es la altura física de la antena. La altura efectiva del dipolo de media onda está dada por la ecuación 6-5 [152].

$$L_e = \frac{\lambda}{\pi} \cong 0.636L \quad 6-5$$

Para una antena de altura efectiva conocida, el voltaje inducido $V_o[V]$ resulta de multiplicar la altura efectiva por el campo eléctrico incidente o la densidad de potencia incidente $S_{inc}[W/m^2]$, que estará relacionado con la potencia de la señal recibida y la sección eficaz del cuerpo humano bajo el ángulo de incidencia de la señal. Dicha relación se muestra en la ecuación 6-6.

$$V_o = \sqrt{120\pi \cdot S_{inc} \cdot L_e} \quad 6-6$$

Así, se puede estimar la tensión inducida en la antena y obtener una ecuación para estimar el WBSAR en un modelo de cuerpo humano utilizando la ecuación 6-7.

$$WBSAR \cong 7.52 \cdot S_{inc} \cdot \frac{H^2}{W} = 7.52 \cdot \frac{S_{inc}}{B} \quad 6-7$$

Donde W es el peso del cuerpo humano, y $B=W/H^2 [Kg/m^2]$ es el índice de masa corporal (IMC). De esta última ecuación se puede estimar el WBSAR en términos de la potencia de RSSI, el índice de masa corporal del cuerpo humano y el ángulo de incidencia de la señal.

6.4 Análisis y Recogida de Datos

A continuación, se muestran los dos estudios llevados a cabo en este trabajo para el cálculo del SAR para las redes IEEE 802.11b/g. El primer banco de pruebas, se basa en las medidas de RSSI tomadas según el número y peso de las personas que se encontraban situadas en el interior de la biblioteca del campus de Gandia de la UPV. Se trata de una red inalámbrica situada en un entorno real y en un ambiente no controlado. Por el contrario, el segundo banco de pruebas se estableció a partir del despliegue de una red inalámbrica en una cámara anecoica, desarrollada únicamente para este trabajo, por lo que se trataba de un ambiente controlado. En este caso, el cálculo del SAR se basa en las mediciones del RSSI pero,

en este caso, relacionado con las características específicas de los cuerpos humanos que se situaron en el interior de la cámara anecoica y sus posiciones.

6.4.1 Banco de Pruebas 1

Con el objetivo de analizar la radiación electromagnética absorbida por las personas, se han medido las variaciones del nivel de señal recibido en una WLAN IEEE 802.11b/g en un entorno interior, como es la biblioteca del campus de Gandia (ver Figura 6-1). Para llevar a cabo el experimento, se utilizó el analizador de red Vistumbler [153]. Este programa permite detectar todos los puntos de acceso inalámbricos dentro de su alcance y detectar cuáles están disponibles y cuáles no. Además, permite conocer las direcciones MAC de cada punto de acceso, el RSSI (en % y en dBm) de cada uno, su tipo de autenticación utilizado, etc. En este trabajo se prestó especial atención a los niveles de RSSI medidos.

La biblioteca de este campus presenta unas buenas características para hacer este tipo de mediciones, porque las personas están estudiando o leyendo en silencio, y su movimiento en este lugar es mínimo.

Las medidas han sido tomadas con un ordenador portátil con una tarjeta inalámbrica Atheros 802.11b/g/n. Después de escanear todas las redes inalámbricas, los datos se exportaron a un archivo de Excel. Mientras el equipo estaba escaneando las redes inalámbricas, no estaba conectado a ninguna otra red, con el fin de obtener resultados precisos. Se recogieron muestras cada segundo durante un periodo de 250 segundos. Una vez que los datos fueron exportados a un archivo de Excel, se calcularon los principales parámetros estadísticos (véase la Tabla 6-6) y se representó su evolución temporal (ver Figura 6-2, Figura 6-3 y Figura 6-4).

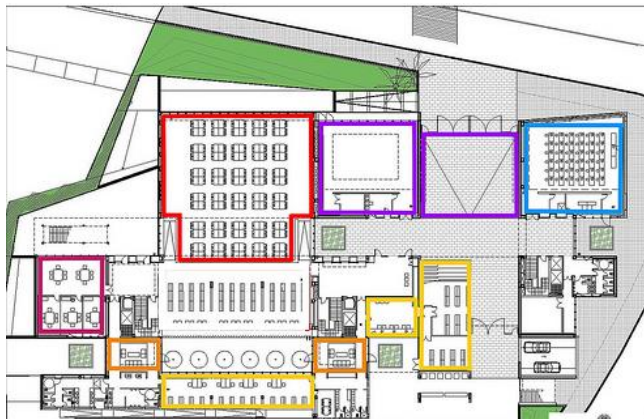


Figura 6-1. Plano del edificio donde está la biblioteca

La biblioteca es la mayor sala del edificio (se dibuja dentro de la zona roja en la Figura 6-1). Aquí, hay cinco largas mesas centrales y cinco mesas laterales en ambos lados. Por otra parte, a pesar de que esta sala cuenta con una cobertura de varios puntos de acceso, existe un punto de acceso principal situado en el centro de la sala. Por lo tanto, las medidas se tomarán a partir de ese punto de acceso.

Las primeras medidas fueron tomadas a las 8:00 sin que hubiera nadie dentro de la sala, la segunda se recogieron a las 21:00 con 11 personas sentadas, y el último a las 23:00 con 34 personas. Los datos se han recogido en un período de 250 segundos, porque es suficiente para ver resultados y valores medios precisos. Por último, se recogió el peso de cada persona dentro de la habitación.

En la Tabla 6-6 se muestran los principales resultados estadísticos del banco de pruebas: el RSSI máximo, el RSSI mínimo y el RSSI medio (en dBm), y el peso medio en Kg. Como la potencia de transmisión del punto de acceso alcanzado en este lugar es 1mW, se debe considerar que -30 dBm son equivalentes a un nivel de señal de 100% a 0.001 mW.

	0 personas	11 personas	34 personas
Valor máximo de RSSI (dBm)	-30	-30	-30
Valor mínimo de RSSI (dBm)	-31	-33	-34
Valor medio de RSSI (dBm)	-30.01158301	-30.01571709	-30.62544803
Peso medio (kg)	-	65.09090909	64.32352941

Tabla 6-6. Medidas estadísticas de la biblioteca

Aunque entre cero y once personas no existen diferencias significativas, se puede ver que el flujo se reduce considerablemente cuando el número de personas se incrementa hasta 34 personas. Los gráficos siguientes muestran la evolución del nivel de señal para todos los casos. Esto demuestra que hay picos más bajos con once personas (ver Figura 6-3), y con treinta y cuatro personas (ver Figura 6-4) que cuando la biblioteca está vacía (ver Figura 6-2).

En la Figura 6-2 se representa el RSSI en dBm a lo largo del tiempo cuando no hay ninguna persona. El valor RSSI es -30 dBm la mayor parte del tiempo excepto en el instante 18 que el RSSI se reduce hasta -31 dBm. Como sólo hay un valle, se puede considerar una tendencia lineal continua. Se ve que cuando no hay ninguna persona, el RSSI alcanza su valor máximo. Por lo tanto, se deduce que el RSSI absorbido se considera cero.

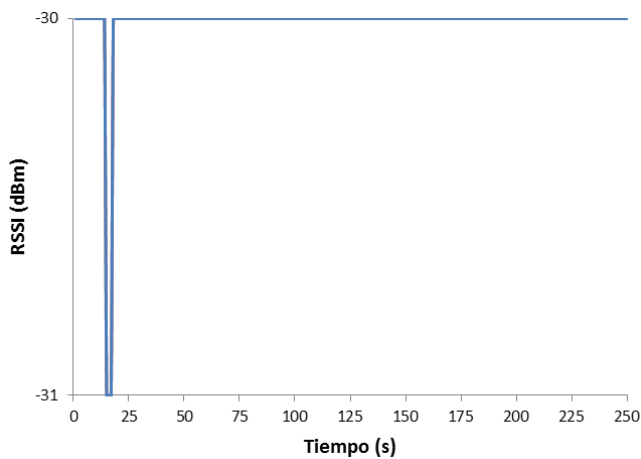


Figura 6-2. Nivel de señal sin gente en la sala

En la Figura 6-3 se muestra el nivel RSSI en dBm a lo largo del tiempo cuando hay 11 personas en la sala. Todas estas personas no estaban conectadas con un ordenador o cualquier tipo de dispositivo a la WLAN, se encontraban estudiando. Se puede ver en la Figura 6-3, que sus cuerpos absorben parte de la señal, porque el nivel de RSSI medido es menor. La evolución de la RSSI presenta una tendencia lineal en -30 dBm, pero en este caso hay dos picos inferiores: el primero en el instante 18 y el segundo en el 99. Se puede ver que la absorción de señal no es todavía muy importante.

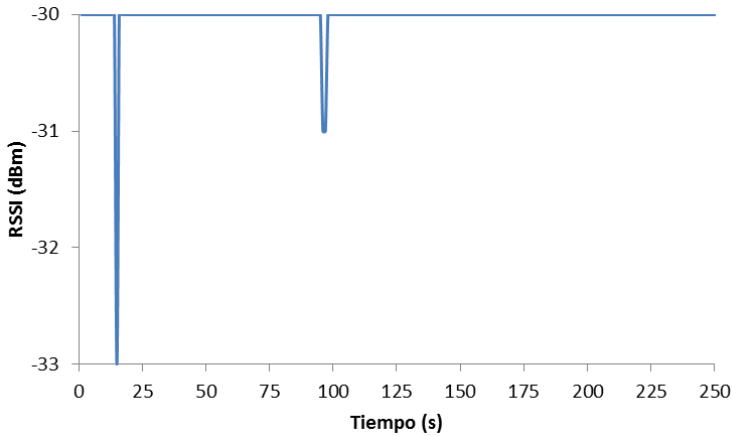


Figura 6-3. Nivel de señal con 11 personas en la sala

En la Figura 6-4 se puede ver la evolución del RSSI cuando hay 34 personas en la biblioteca. En este caso, el RSSI es muy cambiante. Por lo tanto, cuando hay más personas en la sala, la absorción señal es más elevada y presenta una mayor dispersión. La medida más baja se da en el instante 222 con un valor de -34 dBm. Hay algunos valores intermedios que van desde -31 dBm a -33 dBm. A partir de esta figura y de las anteriores, se puede concluir que cuantas más personas haya, más señal es absorbida. Por tanto, el SAR será más alto en este último escenario.

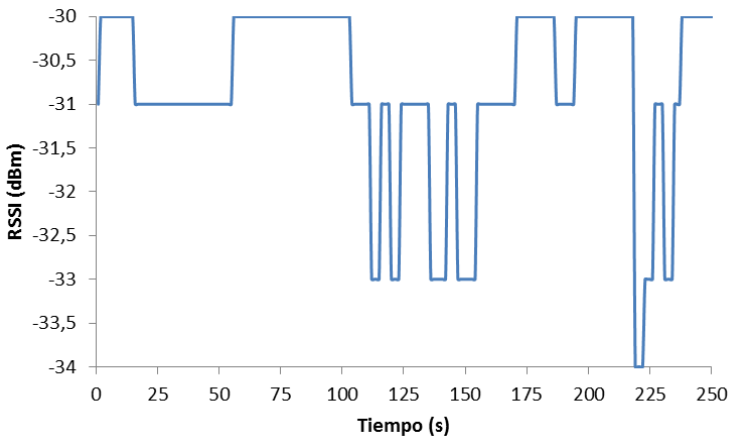


Figura 6-4. Nivel de señal con 34 personas en la sala

Se ha calculado el SAR utilizando dos métodos diferentes. Por un lado, se ha estimado el nivel de señal medio absorbido por persona según las variaciones medidas del RSSI y, por otro lado, se ha estimado el valor de señal medio absorbido por Kg. La Tabla 6-7 muestra los valores de SAR obtenidos en el primer escenario WLAN.

	11 personas	34 personas
Promedio RSSI (dBm)	-30.01571709	-30.62544803
RSSI media absorbida (dBm)	0.01571709	0.625448003
Peso medio (kg)	65.09090909	64.32352941
SAR (nivel de señal absorbida (dBm) / número de personas)	0.001428826	0.018395530
SAR (nivel de señal absorbida (dBm) / Kg)	0.000241463	0.009723471

Tabla 6-7. Cálculo del SAR para las medidas anteriores

6.4.2 Banco de pruebas 2

En este segundo escenario, se ha analizado la tasa de absorción específica en un ambiente controlado.

Se ha optado por montar la infraestructura de red en una cámara anecoica. Este tipo de habitáculo está diseñado para detener las reflexiones de las ondas de sonido y las ondas electromagnéticas [132]. En este caso, la cámara anecoica situada en el campus de Gandia de la UPV, está diseñada para impedir las reflexiones de las ondas sonoras. Por lo tanto, está aislada acústicamente. Aunque las ondas acústicas no son importantes para este experimento, dentro de esta sala no habrá interferencias de ninguna otra red. Por lo tanto, se trata de un lugar idóneo para realizar este estudio y evitar posibles interferencias externas. De esta manera, las variaciones de la intensidad de la señal inalámbrica, se deberán únicamente a la presencia de las personas que se consideren para este experimento. Este análisis se realizó en la cámara anecoica que se ve en la Figura 6-5.



Figura 6-5. Cámara anecoica del campus de Gandia de la UPV

Para conocer el SAR de un cuerpo humano en el interior de esta sala, se debe medir, en primer lugar, el nivel de señal recibido sin ninguna presencia humana. Para medir el RSSI se ha utilizado de nuevo el software Vistumbler. Como punto de acceso se ha utilizado el router inalámbrico de banda ancha Wireless-G de Linksys, concretamente el modelo WRT54G. La influencia de la presencia de personas en la señal inalámbrica se refleja en los cambios en la intensidad de la señal recibida. La potencia de salida mínima es de 0 dBm (1 mW), por lo que esta es la potencia de transmisión que se ha configurado en el dispositivo.

La antena del punto de acceso (router Linksys) tiene un diseño omnidireccional de 360 grados (ver Figura 6-6). Se trata de dos antenas de alta ganancia con conectores R-TNC y un estabilizador de antena. Este es el modelo HGA7T. Su ganancia máxima es de 7 dBi y su relación máxima tensión permanente de onda es 1.92 con una impedancia nominal de 50 ohmios. Además, proporciona una polarización lineal vertical y su patrón de radiación es el de la Figura 6-6.

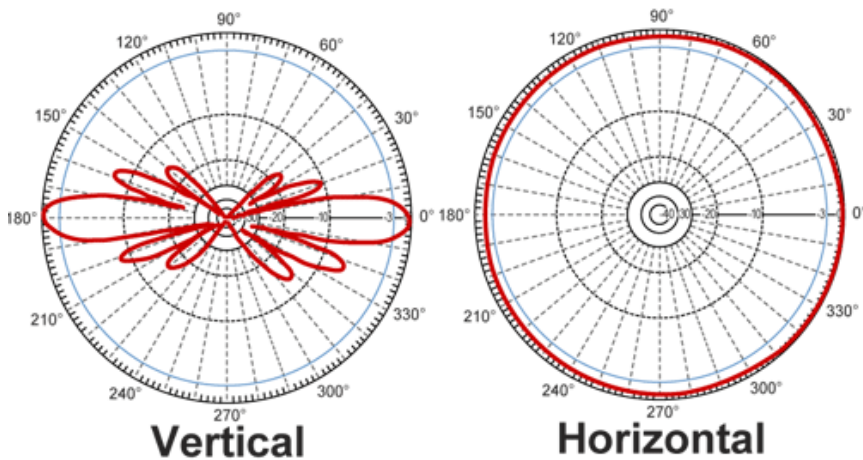


Figura 6-6. Diagrama del patrón de radiación de las antenas HGA7T

Según las características de la antena anterior y su patrón de radiación, se ha calculado la región de campo cercano y campo lejano. Lo cual permite conocer en qué posición exacta de la cámara anecoica, se deben colocar los cuerpos humanos para estudiar el SAR.

El espacio que rodea a una antena se subdivide en tres regiones [154]: la región de campo cercano reactivo, la región de campo cercano radiante y la región de campo lejano.

La región de campo cercano se divide en el campo cercano reactivo y el campo cercano radiante. La región de campo cercano reactivo ($r < \lambda$) es la región más cercana a la antena, es una zona compleja de predecir porque la relación entre el campo electromagnético y magnético es muy variable. En un determinado lugar, uno de ellos puede dominar y sólo con un pequeño cambio puede cambiar totalmente y dominar el opuesto. En esta región la componente reactiva del campo cercano puede dar resultados ambiguos o indeterminados, cuando se toman medidas en esta región.

En cambio, la región de campo cercano radiante, también llamada zona de Fresnel, no presenta componentes de campo reactivos de la antena fuente. La relación entre el campo electromagnético y magnético es más predecible, pero esta relación sigue siendo compleja y diferente al campo lejano. En esta región, todavía hay algunas fluctuaciones de energía localizadas. Cuando la distancia r de la antena es menor que R_2 , se considera la región de campo cercano, y cuando la distancia r es mayor que R_2 se está dentro de la región de campo lejano. Por otro lado, en la región de campo lejano, conocida como la región de Fraunhofer, la distribución angular del campo electromagnético es independiente de la distancia a la antena. Es decir, el campo tiene una distribución regular de la fuerza del campo eléctrico, y la intensidad de campo magnético se encuentra en un plano perpendicular a la dirección de propagación. En otras palabras, la onda es localmente plana. Sin embargo, la amplitud del campo electromagnético disminuye de acuerdo a la inversa con la distancia, es decir, la potencia de transmisión disminuye con el cuadrado de la distancia desde la antena.

Las distancias de estas regiones se pueden calcular a través de las fórmulas 6-8, 6-9 y 6-10. La primera de ellas (ecuación 6-8), es útil para conocer la distancia límite de la región de campo cercano reactivo desde la antena.

$$r < R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{d_{max}^3}{\lambda}} \quad 6-8$$

El parámetro r es la distancia a la fuente de antena, R_1 es el límite entre el campo cercano reactivo y el campo cercano radiante, y d_{max} es la dimensión máxima de la antena utilizada. El λ es la longitud de onda que depende de la frecuencia (f) y la velocidad de la luz (c), de acuerdo con la fórmula $\lambda=c/f$. En estas comunicaciones, λ es 12.5cm. Para las antenas utilizadas, su d_{max} es 28.5cm, por lo que R_1 es igual a 8.44cm.

A continuación, la distancia del campo cercano radiante se calcula utilizando la fórmula 6-9, con los valores anteriores y $R_2=13$ cm.

$$R_1 < r < R_2 = \frac{2d_{max}^2}{\lambda} \quad 6-9$$

Como se puede apreciar en la ecuación 6-10, al superar R_2 se obtiene el campo lejano radiante.

$$r > R_2 \quad 6-10$$

En conclusión, las regiones de campo para la antena utilizada en esta investigación son las observadas en la Figura 6-7 y la Tabla 6-8.

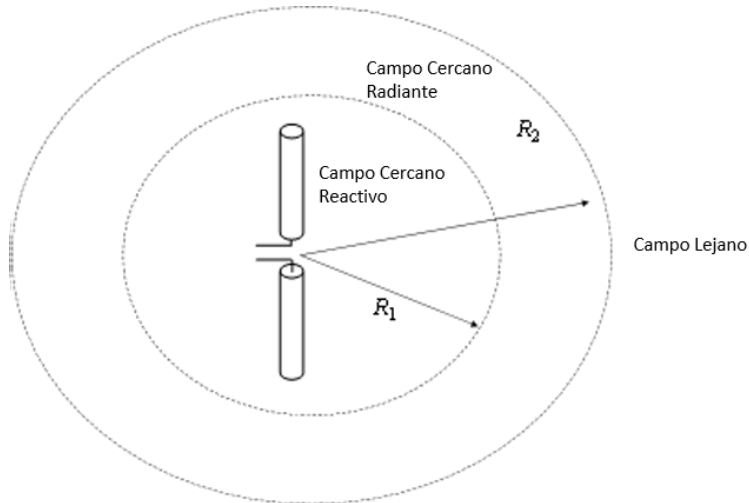


Figura 6-7. Regiones de campo para una antena omnidireccional

Región de campo cercano reactivo	Región de campo cercano radiante	Región de campo lejano
de $r=0\text{cm}$ a $R_1=8.44\text{cm}$	Desde $R_1=8.44\text{cm}$ a $R_2=13\text{cm}$	Desde $R_2=13\text{ cm}$

Tabla 6-8. Regiones de campo para el banco de pruebas 2

Para analizar el SAR del cuerpo humano, se han seleccionado cuatro personas, dos mujeres y dos hombres de diferente estructura corporal. La primera persona es un hombre (H1), que tiene un peso de 81 Kg y una altura de 185 cm. Este posee una constitución atlética y fuerte. Su masa muscular es alta y su índice de masa corporal es igual 23.6 Kg/m². El segundo hombre (H2), pesa 69 kg y tiene una altura de 179 cm. Su estructura es delgada y tiene una elevada masa ósea. Su índice de masa corporal es 21.53 Kg/m². La tercera persona es una mujer (M1), con una altura de 169 cm y un peso de 77.8 Kg. Esta mujer es de gran complexión, con una masa corporal elevada. Su índice de masa corporal es 27.24 Kg/m². Por último, la segunda mujer (M2) tiene una altura de 160 cm y un peso de 52 Kg. Presenta una constitución delgada, con un índice de masa corporal de 20.31 Kg/m².

Cada una de estas personas, se ha introducido en la cámara anecoica de forma individual y se ha mantenido durante 5 minutos en cinco posiciones diferentes, mientras que el portátil ha ido tomando medidas con el analizador de red. En la Figura 6-8, se puede ver la posición exacta del portátil que toma las medidas y del router dentro de la cámara anecoica. Las cinco posiciones de las personas se representan en la figura con cruces rojas.

La primera posición se encuentra situada junto a la antena del router, a un centímetro concretamente, así que situaremos al individuo en la región de campo cercano reactivo. En la segunda posición, la persona se coloca en frente del punto de acceso, justo en el camino de la visión entre el medidor portátil y el punto de acceso, pero aún en la región de campo cercano reactivo. Sin embargo, la tercera

posición se encuentra junto al punto de acceso, pero a 12 centímetros de la antena, por lo que la persona ya está en la región de campo cercano radiante. La cuarta posición es en el punto medio de la ruta directa entre el punto de acceso y el portátil, pero, en este caso, sin interferir con la visión entre ellos. En este caso, la persona está en la región de campo lejano, a 1 metro de la antena. La última posición es junto al portátil, y obviamente en la región de campo lejano.

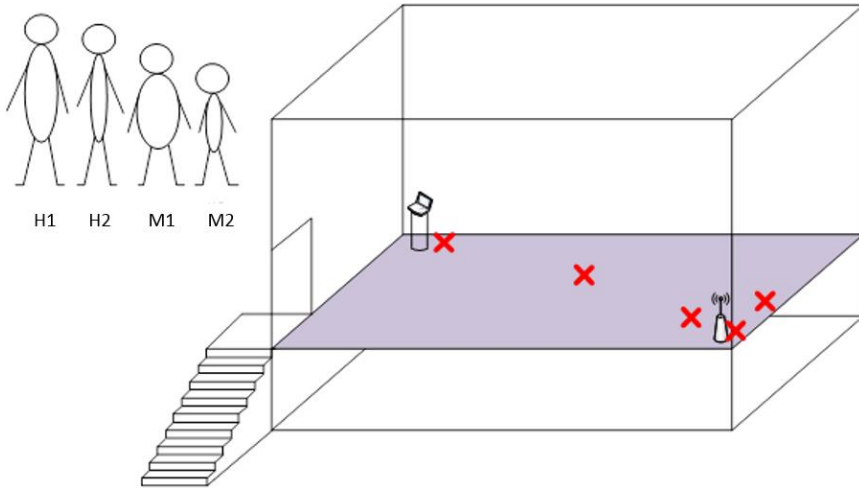


Figura 6-8. Esquema de las mediciones tomadas en la cámara anecoica

Los resultados obtenidos están muy relacionados con la masa corporal de las cuatro personas analizadas y con la región del campo donde se encuentran ubicados. A continuación, se van a presentar varios gráficos con los principales resultados extraídos. Cada gráfico representa las variaciones del nivel de RSSI recibido por el ordenador portátil, para cada persona en una posición particular. Es necesario saber que un nivel de señal recibido de 100% es equivalente a -30 dBm. Así que cuando menor sea este valor, mayor será la absorción existente.

En la primera gráfica (ver Figura 6-9), se pueden ver las variaciones del RSSI para cada persona cuando se encuentran individualmente a 1 cm. de la antena del punto de acceso.

En este lugar, la persona estudiada se encuentra en la región de campo cercano reactivo y tal y como se indicó anteriormente, cualquier pequeña variación puede suponer comportamientos diferentes en la señal recibida. De hecho, la mujer M1 no presenta ninguna absorción en este lugar, el nivel de la señal es constante en -30 dBm durante todo el tiempo. Por el contrario, el hombre H1 tiene una absorción muy alta antes del instante 20, y la señal se reduce a -40 dBm. Sin embargo, el resto del tiempo, su absorción es mucho menor. Por otra parte, los resultados de la mujer M2 y del hombre H2 son más coherentes. El H2 tiene un peso superior a M2 y, por lo tanto, presenta una mayor absorción de la señal.

En la Figura 6-10, se puede ver el nivel medio de la señal recibida por el ordenador portátil, para cada persona cuando se sitúa a un centímetro de la antena. De esta manera, se puede concluir que los resultados no son coherentes si se tiene en cuenta el peso de cada persona. Esto ocurre porque en la región de

campo cercano reactivo, el campo electromagnético es muy variable, por lo que la potencia de la señal también.

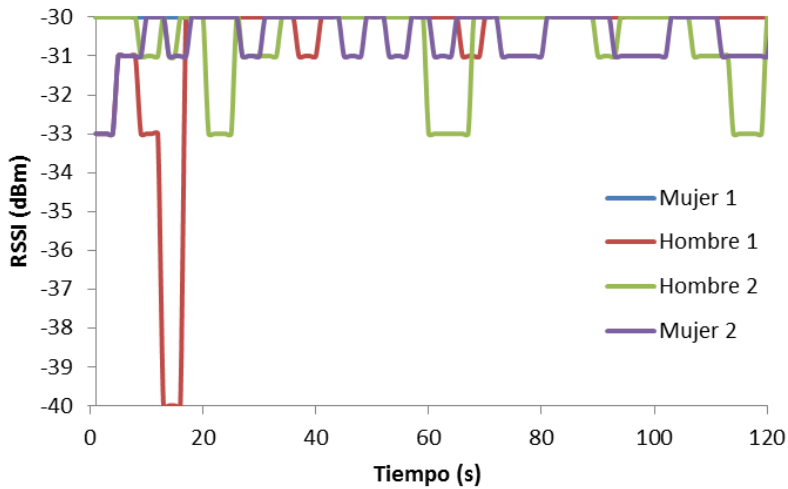


Figura 6-9. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 cm. de la antena

Aunque en la segunda posición, las personas se encuentran todavía en la región de campo cercano reactivo, de acuerdo a su constitución, los resultados son mucho más coherentes que en el caso anterior (ver Figura 6-11 y Figura 6-12). En este caso, las personas están en frente del punto de acceso lo que impide la visión directa entre el portátil y el punto de acceso. Se puede considerar que en este lugar, las personas actúan como un obstáculo en el camino de propagación de las ondas.

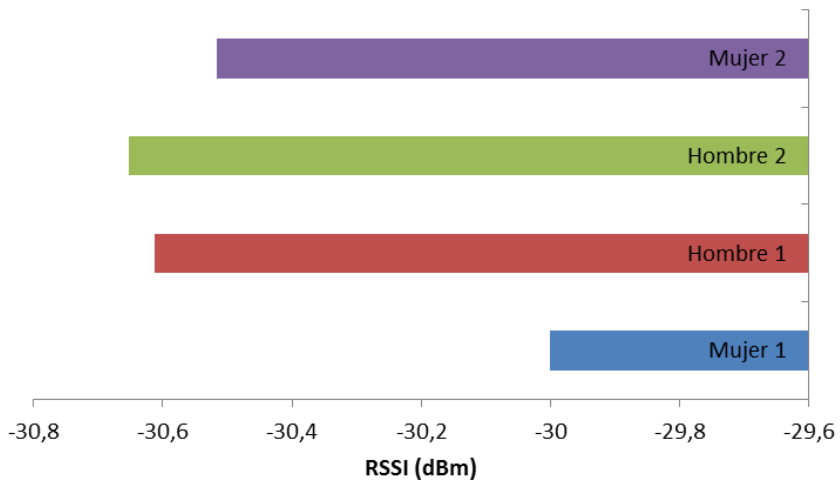


Figura 6-10. RSSI medio en la primera posición

En la Figura 6-11, se observa que la evolución del RSSI es similar para todas las personas, pero con diferentes rangos de valores. Cuando la mujer M1 está en la segunda ubicación, el nivel de RSSI es el más bajo. Por lo tanto, se considera que presenta una mayor absorción de señal. A pesar de que tiene un peso más bajo que el hombre H1, 3.3Kg menos exactamente, su constitución es mucho más grande. Además, como en esta posición las personas actúan como una pared, y tiene un índice de masa corporal más alto, es lógico que su absorción sea mayor.

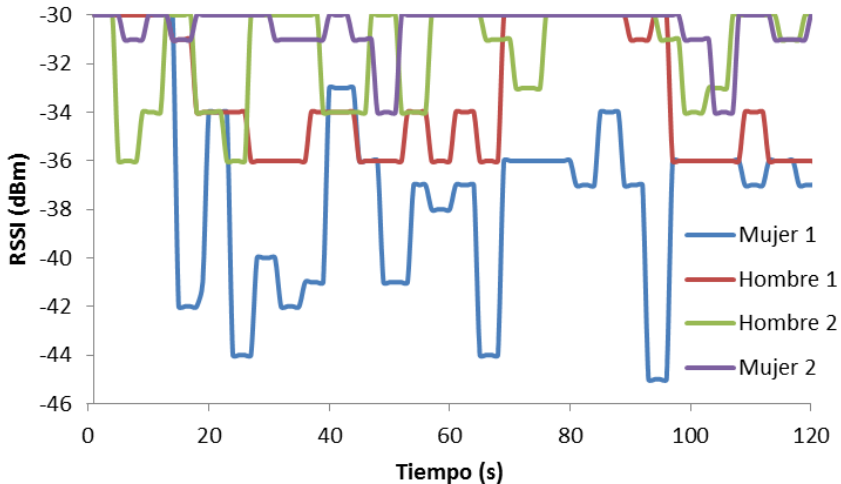


Figura 6-11. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 cm. de la antena obstaculizando la visión directa

Por otro lado, la segunda persona más absorbente es el hombre H1, seguido del hombre H2 y, finalmente, de la mujer M2. Estos resultados están directamente relacionados con el índice de masa corporal de cada persona. La Figura 6-12 recoge el nivel medio de RSSI, cuando cada persona se encuentra en este segundo lugar dentro de la cámara. El nivel medio de la señal, cuando la mujer M1 se encuentra en el segundo lugar durante 5 minutos, es de -37 dBm, este nivel es de -33 dBm para el primer hombre H1, -31 dBm para el segundo hombre H2, y -30,52 dBm cuando la mujer M2 está presente.

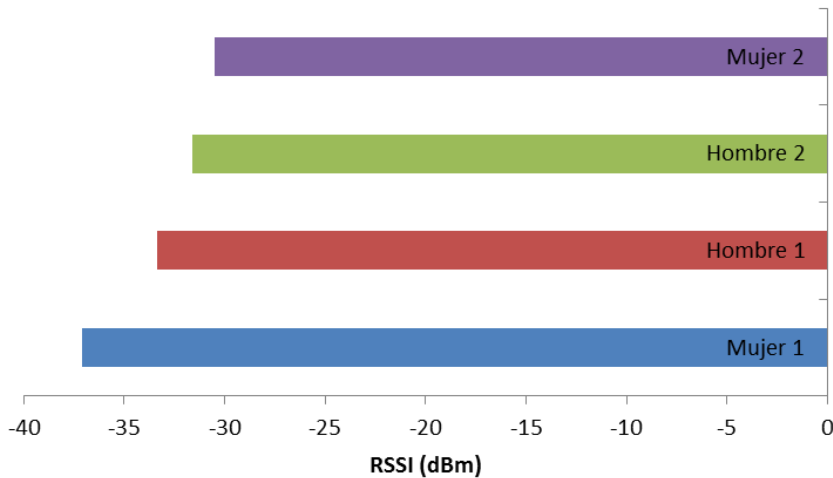


Figura 6-12. RSSI medio en la segunda posición

En la tercera ubicación, las personas están situadas dentro de la región de campo cercano radiante. Cada uno de los individuos considerados, se sitúa a 12 cm. de la antena del punto de acceso. En este caso, la amplitud del campo electromagnético es un poco más predecible.

La Figura 6-13 muestra las variaciones de la señal de las cuatro personas para la tercera posición. En este caso, el hombre H1 absorbe más nivel de señal. En este caso, es más influyente el peso total que el índice de masa corporal. Esto es así porque en esa ubicación la señal, no necesariamente tiene que pasar por el cuerpo para alcanzar el ordenador que toma las medidas. La siguiente persona más absorbente es la mujer M1, que tiene el segundo peso más alto después de H1. Después de ella, el hombre H2 la sigue de cerca y, por último, la mujer M2 es la menos absorbente.

El valor medio del nivel de RSSI para esa tercera ubicación está representado en la Figura 6-14. El nivel medio de RSSI cuando el hombre H1 está dentro de la cámara es -35.22 dBm, cuando está la mujer M1 es -32.9 dBm, -32.7 dBm para el hombre H2, y -31.2 dBm para la mujer M2.

A continuación, se analizan los resultados en la cuarta posición. En esta ubicación, las personas se encuentran dentro de la región de campo lejano, ya que se encuentran a un metro del punto de acceso y del ordenador portátil. Exactamente las personas se sitúan justo al lado de la línea de visión directa del punto de acceso y el portátil. Es importante señalar que la visión directa entre ellos está libre. Por lo tanto, en este caso, las personas no actúan como un obstáculo, sino como un objeto absorbente, de la misma manera que ocurría en la primera y tercera posición.

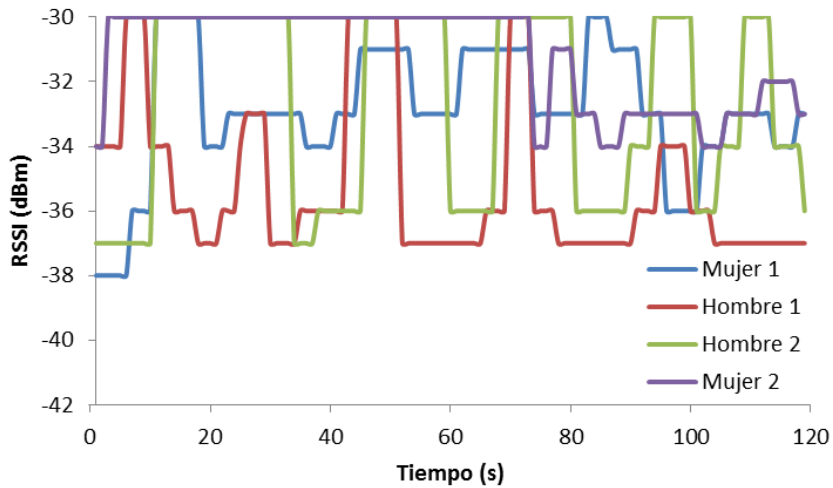


Figura 6-13. Evolución del RSSI para la posición situada a 12 cm. de la antena

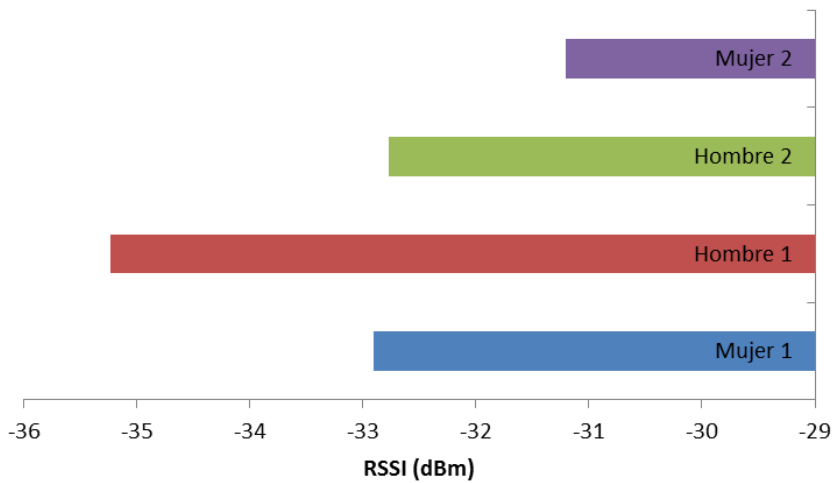


Figura 6-14. RSSI medio en la tercera posición

Tal y como ocurría en la Figura 6-14, el RSSI recibido es el más bajo cuando el hombre H1 está en esta posición, por lo que sigue siendo el más absorbente. A continuación, el segundo nivel más bajo de RSSI se da cuando la mujer M1 está en la cámara anecoica. Por último, el hombre H2 y la mujer M2 son los menos absorbentes porque sus pesos son los más bajos. Ellos muestran una absorción similar en este punto (ver Figura 6-15).

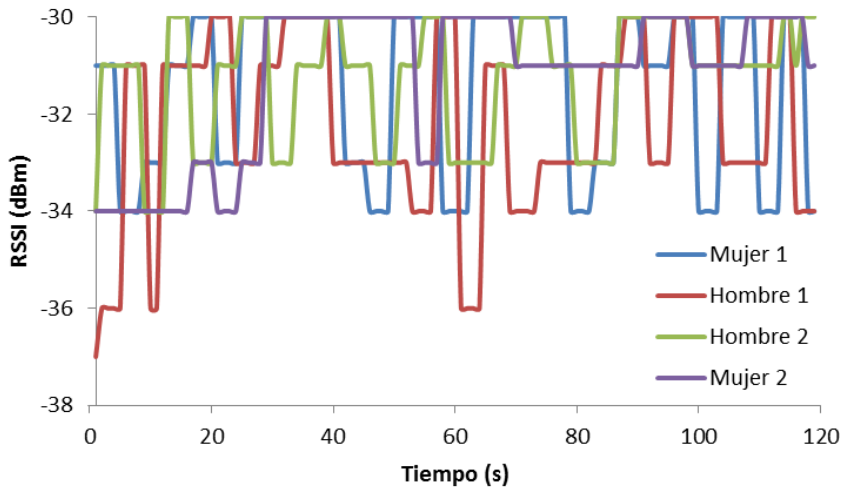


Figura 6-15. Evolución del RSSI para la posición situada a 1 m. de la antena

La Figura 6-16 muestra que la absorción de la señal inalámbrica en esta ubicación, es menor con respecto a la ubicación anterior. El nivel de RSSI medido en promedio es mayor. En este caso, cuando el hombre H1 está presente en la cámara, el nivel medio de RSSI es de -32.18 dBm, cuando la mujer M1 está dentro, el RSSI medio es de -31.42 dBm, y en torno a -31.2 dBm para el hombre H2 y la mujer M2.

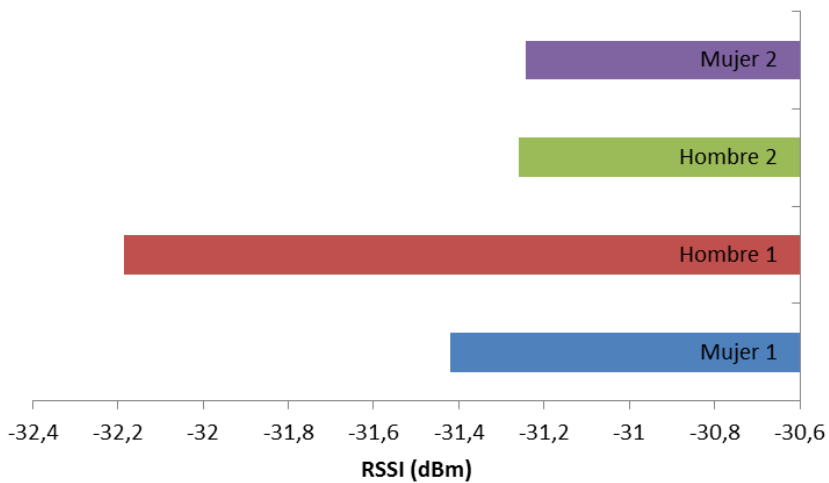


Figura 6-16. RSSI medio en la cuarta posición

Por último, se ha considerado una quinta posición para comprobar si cerca de la antena del ordenador portátil, los cuerpos humanos tienen algún efecto significativo con respecto a su absorción. En esta posición, las personas se sitúan a 10

centímetros del portátil y, por supuesto, están dentro de la región de campo lejano. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6-17 y son similares a los obtenidos en la cuarta y la tercera ubicación.

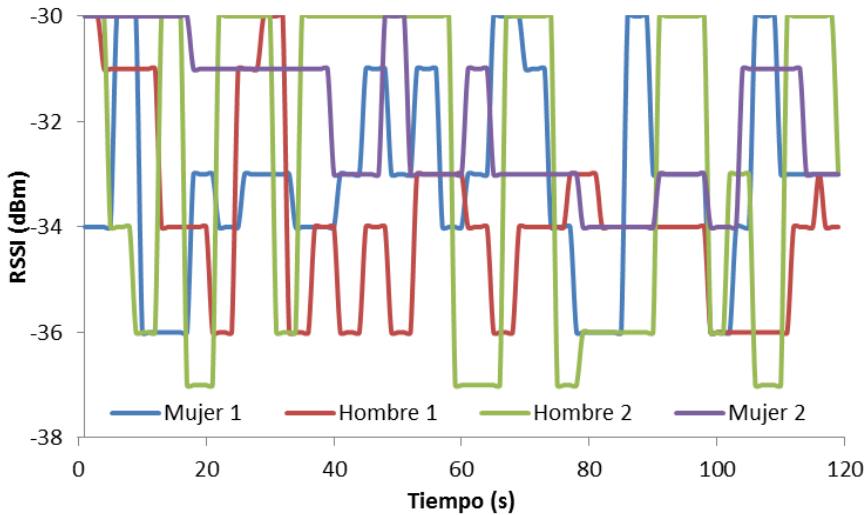


Figura 6-17. Evolución del RSSI para la posición situada a 10 cm. del ordenador portátil

Aunque en la Figura 6-17, el hombre H2 presenta picos más bajos en la evolución del nivel de RSSI, en promedio, es el segundo nivel más bajo, cercano a -32.7 dBm (ver Figura 6-18). Estos picos pueden ser debido a algún movimiento de la persona. Como se puede ver en la Figura 6-18, el hombre H1 es el más absorbente con un nivel medio de RSSI de -33.87 dBm, la mujer M1 es la siguiente con -33.1 dBm, y la última es la mujer M2 con un RSSI medio de -32 dB.

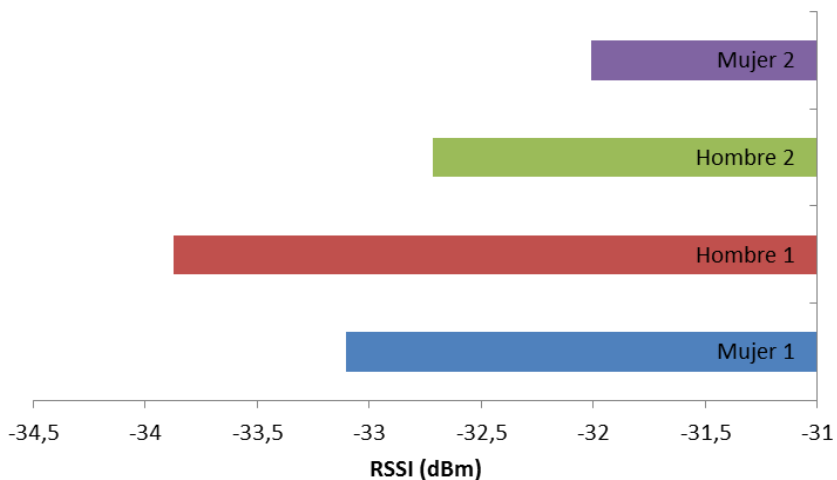


Figura 6-18. RSSI medio en la quinta posición

A continuación, se ha estimado el SAR por persona, según su peso total y su índice de masa corporal. Se ha calculado para todas las ubicaciones, excepto para la primera. Los resultados en esta posición no son significativos, debido a que en la región de campo cercano reactivo, las condiciones no son predecibles. En cambio, aunque en la segunda ubicación también se considera que se sitúa en el campo cercano reactivo, como las personas actúan como un obstáculo, sí que se ha considerado en esta parte del estudio.

El cálculo del SAR para la segunda ubicación se puede ver en la Tabla 6-9. Como en esta ubicación la absorción de la señal inalámbrica es más dependiente del índice de masa corporal, el cálculo del SAR conforme a este parámetro es el más representativo.

	<i>Mujer M1</i>	<i>Hombre H1</i>	<i>Hombre H2</i>	<i>Mujer M2</i>
Promedio RSSI (dBm)	-37.08943089	-33.36585366	-31.59349593	-30.5203252
RSSI media absorbida (dBm)	7.08943089	3.36585366	1.59349593	0.5203252
Total de peso (Kg)	77.8	81	69	52
Índice de Masa Corporal (kg/m²)	27.24	23.6	21.53	20.31
SAR (nivel de señal absorbida/Kg)	0.09112379	0.04155375	0.02309414	0.01000625
SAR (nivel de señal absorbida/Kg/m²)	0.26025811	0.14262092	0.07401282	0.02561916

Tabla 6-9. Cálculo del SAR para la segunda ubicación

El SAR en el caso de la mujer M1 es el más alto, con un valor de 0.26025811 dB/Kg/m². Esto es así porque su índice de masa corporal es el más elevado. Como en esta ubicación (frente al punto de acceso), la señal tiene que atravesar el cuerpo, se considera que frente a una masa corporal mayor, se absorbe más señal. Además, la mujer M1 presenta una complexión bastante ancha, por lo que ello dificultará su atravesamiento y supondrá más pérdida de potencia en la señal inalámbrica. En este lugar, la mujer M1 es la que presenta un nivel de SAR más alto, y es el más alto de todos los casos estudiados. Por la misma razón, la SAR en dB/Kg es también el más alto para la mujer M1, siendo igual a 0.09112379 dB / Kg.

El segundo nivel de SAR más significativo es el obtenido por el hombre H1. Este individuo tiene un SAR en dB/Kg/m² de 0.14262092. El SAR en dB/Kg para él es de 0.04155375. A continuación, la mujer M2 y el hombre H2, como tienen un índice de masa corporal y peso más bajos, presenta niveles de absorción inferiores. Además, su complexión es relativamente estrecha. Según su índice de masa corporal, el SAR para el hombre H2 es 0.07401282 dB/Kg/m², y teniendo en cuenta su peso total es de 0.02309414 dB/Kg. Para el caso de la mujer M2 se obtiene una absorción de 0.02561916 dB/Kg/m² y 0.01000625 dB/Kg. Por lo tanto, ella es la persona menos absorbente.

La Tabla 6-10 representa los resultados obtenidos de SAR para la tercera ubicación.

	<i>Mujer M1</i>	<i>Hombre H1</i>	<i>Hombre H2</i>	<i>Mujer M2</i>
Promedio RSSI (dBm)	-32.907563	-35.2268908	-32.7731092	-31.2016807
RSSI media absorbida (dBm)	2.90756303	5.22689076	2.77310924	1.20168067
Peso total (Kg)	77.8	81	69	52
Índice de Masa Corporal (Kg/m²)	27.24	23.6	21.53	20.31
SAR (nivel de señal absorbida/Kg)	0.03737228	0.06452952	0.04018999	0.02310924
SAR (nivel de señal absorbida/Kg/m²)	0.10673873	0.22147842	0.1288021	0.05916695

Tabla 6-10. Cálculo del SAR para la tercera ubicación

Como se puede ver, en esta tercera posición, el hombre H1 es más absorbente que el resto de personas. En este punto, las personas no se sitúan en la línea de visión directa entre el punto de acceso y el ordenador, por lo tanto no actúa como un obstáculo, y sólo absorben parte de la señal inalámbrica. Como el hombre H1 tiene un peso superior al resto de individuos, en este caso él es el que absorbe más nivel señal. En concreto, su absorción es 0.22147842 dB/Kg/m² y 0.06452952 dB/Kg.

En este caso, la segunda persona más absorbente es el hombre H2, con un valor SAR de 0.1288021 dB/Kg/m² y 0.04018999 dB/Kg. La mujer M1 presenta valores muy similares a él, 0.10673873 dB/Kg/m² y 0.03737228 dB/Kg. En esta ubicación, se considera que la característica corporal más influyente es la altura de las personas. Esto probablemente se deba a que cuanto mayor es la superficie de impacto de la señal, mayor absorción se produce. Esta es la razón por la cual la mujer M2 es la menos absorbente de nuevo, debido a su relativa baja estatura. La mujer M2 presenta una absorción de 0.05916695 dB/Kg/m² y 0.02310924 dB/Kg en la tercera posición del estudio.

La Tabla 6-11 presenta los niveles de absorción para cada persona según sus índices de masa corporal y su peso. En este caso, se encuentran en el punto medio entre el ordenador portátil y el punto de acceso, a un metro de cada uno, pero sin interferir en su visión directa.

	<i>Mujer M1</i>	<i>Hombre H1</i>	<i>Hombre H2</i>	<i>Mujer M2</i>
Promedio RSSI (dBm)	-31.4201681	-32.1848739	-31.2605042	-31.2436975
RSSI media absorbida (dBm)	1.42016807	2.18487395	1.2605042	1.24369748
Peso total (Kg)	77.8	81	69	52
Índice de Masa Corporal (Kg/m²)	27.24	23.6	21.53	20.31
SAR (nivel de señal absorbida/Kg)	0.01825409	0.02697375	0.01826818	0.02391726
SAR (nivel de señal absorbida/Kg/m²)	0.05213539	0.0925794	0.05854641	0.06123572

Tabla 6-11. Cálculo del SAR para la cuarta ubicación

En general, en la cuarta ubicación se registran los valores más bajos de SAR. Esta ubicación está en un punto medio de la cámara y la influencia sobre las ondas electromagnéticas es menos importante. En este caso, los resultados son un poco ambiguos, porque no dependen del peso, la talla, el índice de masa corporal o la complejión. Aunque el nivel de RSSI medio sí que tiene un valor más bajo para las personas que pesan más, el nivel de SAR no sigue esta norma. El hombre H1 es el más absorbente en este punto, seguido de la mujer M2 y, en último lugar, la mujer M1 y el hombre H2, que presentan los niveles más bajos de SAR.

Para finalizar los cálculos del SAR, la Tabla 6-12 muestra los resultados para la quinta y última ubicación.

	<i>Mujer M1</i>	<i>Hombre H1</i>	<i>Hombre H2</i>	<i>Mujer M2</i>
Promedio RSSI (dBm)	-33.1008403	-33.8739496	-32.7142857	-32.0084034
RSSI media absorbida (dBm)	3.10084034	3.87394958	2.71428571	2.00840336
Peso total (Kg)	77.8	81	69	52
Índice de Masa Corporal (Kg/m²)	27.24	23.6	21.53	20.31
SAR (nivel de señal absorbida/Kg)	0.03985656	0.04782654	0.03933747	0.03862314
SAR (nivel de señal absorbida/Kg/m²)	0.11383408	0.16415041	0.12606994	0.09888741

Tabla 6-12. Cálculo del SAR para el quinto lugar

En este caso, los niveles de SAR son coherentes con las características corporales de las personas analizadas. En este caso, la persona que presenta la tasa de absorción más alta es el hombre H1. Su SAR es de 0.16415041 dB/Kg/m² y 0.04782654 dB/Kg. Tanto su peso y su altura son los más elevados. A continuación, el hombre H2 es la segunda persona más absorbente en términos de dB/Kg/m² con un valor de 0.12606994, aunque su índice de masa corporal es menor que la mujer M1. Por el contrario, de acuerdo con el peso total, la mujer M1 es la segunda más absorbente con un valor de SAR de 0.03985656 dB/Kg. Se puede considerar que ambos tienen un SAR similar si se compara en las mismas unidades, es decir, en dB/Kg o en dB/Kg/m². El hombre H2 tiene un valor de SAR de 0.03933747 dB/Kg y la mujer M1 absorbe 0.11383408 dB/Kg/m².

Finalmente, como en el resto de los casos, excepto en la cuarta ubicación, la mujer M2 es la menos absorbente, ya que presenta el peso, la altura y el índice de masa corporal más bajos del estudio.

6.5 Conclusión

En este capítulo, se ha monitoreado una red de área local inalámbrica real con el fin de conocer el SAR en un entorno interior no controlado. El lugar utilizado para tomar las mediciones fue la biblioteca del campus de Gandia de la UPV. Se eligió este lugar porque las personas en su interior presentaban poca movilidad.

En este primer análisis, el RSSI se midió durante 250 segundos en tres momentos distintos, para observar cómo variaba su valor en función de la cantidad de

personas que hubiera en la sala. A continuación, se realizó un análisis estadístico con las mediciones obtenidas y se comprobó que la presencia de personas en los alrededores de los puntos de acceso, influye en el RSSI en un entorno cerrado. Por último, se estimó el SAR en términos de la RSSI absorbida según el número de personas y de la RSSI absorbida por kilogramo.

Debido a la relación directa entre el número de personas y de la RSSI, cuanto más gente haya en un entorno WLAN, mayor será el RSSI que se absorbe. Estos resultados deberían de tenerse en cuenta para el diseño y despliegue de redes WLAN en entornos muy concurridos.

A continuación, se realizó otra toma de medidas para el cálculo del SAR, pero en un entorno controlado. Se optó por hacer las pruebas en una cámara anecoica donde no había ninguna interferencia. El banco de pruebas estaba compuesto por un router del cual se medía su RSSI, y un ordenador que realizaba dichas mediciones. Las variaciones en el RSSI se debieron a la presencia de personas con diferentes características corporales, en diferentes puntos de la cámara. Los resultados muestran que el nivel de SAR está relacionado tanto con la ubicación de la persona respecto al router, como con su complexión física, su peso, su masa corporal y su talla. Además, es fundamental tener en cuenta la región del campo electromagnético para obtener mediciones coherentes. Además, es necesario enfatizar que las personas en ambos escenarios considerados, no se movían. Estaban sentados en el primer banco de pruebas y de pie en el segundo banco de pruebas.

En general, los resultados muestran que las personas con mayor peso, talla e índice de masa corporal, absorben más señal inalámbrica que las personas con estas características más bajas. Dependiendo de la posición respecto a los puntos de acceso, cada una de estas características del cuerpo humano, afecta más o menos a la señal inalámbrica.

Los trabajos y resultados derivados del trabajo presentado en este capítulo han sido publicados como capítulo de un libro [35].

CONCLUSION AND FUTURE WORK

7.1 Introduction

This chapter summarizes the thesis, discusses its findings and contributions, points out limitations of the current work, and also outlines directions for future research. Although in each chapter it is presented a conclusion section which summarizes the topics deal with in and its main results, this chapter summarizes all these findings with a global perspective.

The extensive use of the Standards IEEE 802.11 in the field of wireless local area networks can be seen at the beginning of this thesis. Especially the variant IEEE 802.11b/g has been used for multiple and diverse applications around the world. It makes WLANs a main research area for many research groups. Thanks to its speed and ease of installation, low cost of hardware and low maintenance, this technology is an option very desirable and used for connecting remote sites, both indoor and outdoor environments. However, as any other wireless technology, their transmissions are impacted by many external factors affecting the path of propagation of electromagnetic waves, and therefore its correct operation and performance.

This thesis examines how weather conditions affect the performance of IEEE 802.11b/g networks when they are deployed in outdoor environments. Performance is measured from the number of MAC control frames lost or damaged. The assessment is performed from a correlation study whose objective is to find the level of association between the values of weather conditions and of performance parameters. Measurements have been taken and analyzed from two very different WLAN IEEE 802.11b/g scenarios. The first one is a real IEEE 802.11b/g network, in particular the outdoor WLAN of UPV. However, it presented an important number of drawbacks that resulted in inconsistent results. Problems were derived from analyzing a real WLAN with variable number of users and changeable traffic, because these two features made difficult to insulate the human behavior (very related to the weather) from the obtained results.

Therefore, subsequently, a point-to-multipoint scenario was designed and deployed in order to check previous results and to find more precise and rigorous levels of association. This scenario was completely controlled, and so results were totally consistent. In this second scenario, it was proved that there is a high degree

of association between weather conditions around links IEEE 802.11b/g and network performance. It was assessed from three different statistical analysis conducted over data. Weather conditions were measured from a near weather station. Measurements were taken per minute for a period of six months. Finally, the initial findings were corroborated. Moreover, in this second scenario other aspects about the function of the standard IEEE 802.11 were also studied in order to go into detail about this topic. The most important aspect was to consider links of different lengths. This fact allowed to study how the physical technology, and so modulation scheme and data rate used, influence on the relationship between weather conditions and network performance. This information was of great interest to the next proposed cognitive algorithm.

After checking the significant degree of association between two sets of data, it was decided to design a cognitive algorithm to minimize this degree of association. It was focused on taking weather conditions from the environment and network performance parameters, and from this information to decide if it was necessary to apply some correction actions on wireless transmission features. The proposed corrective actions was based on the own options that the Standard IEEE 802.11b/g provides, since it allows to change several transmission features according to the wireless performance. It will guarantee total compatibility and ease to deploy in real devices. Moreover, this algorithm was designed to be energy efficient in order to meet current requirements of green networks. It will entail a reduction of the power consumption derived from reducing the number of retransmissions and control traffic on the network, due to the negative weather's impact on WLANs. This algorithm is simulated and different results show a good performance in terms of energy efficiency and improvements of network performance.

Finally, as drawbacks found on the first scenario considered to study the weather's impact on WLANs were derived from the uncontrolled human behavior connected to network, it was decided to analyze whether the mere presence of people around access points, regardless of whether they are or not connected, is relevant in network performance because of body absorption rate. In such case, results from this first scenario would be even more inconsistent that it was thought initially because this variable was not possible to control at all. Therefore, the absorption rate of human bodies exposed to signals of networks IEEE 802.11b/g was also analyzed in this dissertation. In addition to being a very important public health problem, this issue could entail a decrease of network performance. From results of this study, it can be concluded that absorption rate of human bodies should be taken into account to deploy this kind of networks in crowded environments.

7.2 Contributions

In this section it is shown the main contributions of this thesis following the order of chapters.

The first chapter is an introduction about the topics of this dissertation. It collects the objectives and details the tasks required to achieve them. Moreover, this chapter summarizes all the work carried out in this thesis and it details the general structure.

Next, in order to perform the works mentioned in the above section, firstly it was essential to review in detail the state of art of the all topics addressed in this thesis. This study is presented in Chapter 2. Introduction section of this chapter summarizes how the performance of an outdoor wireless communication system can be affected by different factors. Next section is focused on the related work found in the scientific literature about how weather conditions affect the propagation of radio signals. Moreover, although there are very few studies about that impact on WLANs IEEE 802.11b/g, the findings of some of them have been presented at the end of this section. Then, it is shown the most important research works about cognitive networks in order to see how they are been deploying today. Finally, some works about the influence of electromagnetic waves on human bodies have been commented. The absorption rate of human bodies is a very important topic in the public health, but it is also important on the field of wireless networks since it represents a significant power absorption.

Then, a statistical analysis to study of levels of correlation between different weather conditions such as precipitation, temperature, wind speed, relative humidity and solar radiation, and a set of management and control data which reflect the network performance on MAC layer, is presented in Chapter 3. This has been performed on the outdoor WLAN of the Vera's Campus of the UPV. Note that due to low rainfall recorded during the period of taking measurements, this variable could not be considered in the analysis. It can be concluded from this analysis that particularly the group of control frames (RTSs failed, ACKs failed) and the number of maximum retries of transmission and frames with wrong FCS field, has a high degree of association with the weather conditions studied. However, it is noteworthy that several difficulties were presented in this study, and they make not possible to consider their results as conclusive. Firstly, despite of network parameters were divided by the number of users in order to insulate data from this variable, it is considered that there is no enough evidence that human behavior is completely insulated from data collected, and so it could entail wrong results. Secondly, this work could not consider the type and amount of traffic that was transmitted on the network at all times, and they are two very important variables for this study because they are directly related to the number of control and management frames generated. Finally, to perform this analysis on average values, especially on network parameters, it also supposes a high level of uncertainty in the results.

Due to such problems found in the first scenario, it was decided to continue with this research in order to achieve more reliable and concrete results. Therefore, in chapter 4 it has been detailed the design features and how a point-to-multipoint link was deployed. It was used as more stable setting to investigate the weather's impact on the performance of links IEEE 802.11b/g. The network scheme is based on an access point, which wirelessly connect two remote clients at different distances. This feature allows to analyze how the distance, and so the physical technology (DSSS or OFDM) influences on such impact. The physical technology determines de modulations schemes and data rates on wireless transmissions. Moreover, the access point used was connected to a laptop that generated a constant ICMP traffic to both clients. The control traffic generated through these data transmissions is used as network performance data in this research. In order to collect this control traffic, the MIB of clients has been periodically pulled. In the case of

weather conditions, they were collected with the same frequency from a close weather station. First and main conclusion of this chapter was that the degree of association between the performance parameters of links IEEE 802.11b/g and weather conditions is high and significant. Moreover, it has been shown from three different statistical analysis that confirm such relationship. Another important conclusion is that the data rate used, and therefore the modulation scheme, influence on the degree of association between network performance parameters and weather conditions. This confirms that higher-order modulations, which allow higher data rates, are less robust against interferences than lower-order modulations. This conclusion is key to the design of the subsequent cognitive algorithm. Another key concept in this research is the term CINAC (Correlation is Not a Cause), that means that correlation always does not imply causality. This term means that a significant level of correlation between two variables does not necessarily means that one variable causes the other. To infer causality, it is essential to consider further studies. It is the main reason why a third analysis about symbolic regressions was carried out.

Next, a cognitive algorithm has been proposed in Chapter 5. It has been based on the grades of association obtained from results of previous studies. It takes into account weather conditions and network parameters as inputs in order to apply some corrective actions on transmissions if it was necessary and to reduce the weather's impact. Several simulations have shown that it entails energy savings and a better network performance. It is not based only on weather conditions to adapt wireless transmissions, but also it takes into account performance parameters to confirm that the weather is affecting transmissions.

Finally, in last chapter of this thesis it is studied another external factor that could affect network performance: the absorption rate of human bodies. Two scenarios have been analyzed in order to measure such parameter. It has been found that the presence of people around the access points affects wireless transmissions. There is a direct relationship between the number of people and the received signal level. When the number of people increases in a WLAN environment, it involves an important RSSI absorption. Moreover, such absorption depends on the position, body composition, and number of people in the vicinity of the access points. Therefore, it can be concluded that this feature should be taken into account in the design of such networks.

Several scientific contributions (conference papers, book chapters and journal papers) have been derived directly from this dissertation. They have been seen at the end of each chapter. Main papers directly related to the research of this thesis have been [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34] and [35].

7.3 Future Work

But not everything has been perfect for the realization of this thesis. Therefore, it has been considered necessary to show some future works.

Firstly, it has been considered to introduce other features in the proposed cognitive algorithm such as the window size, in order to improve its performance. But following the same idea of not modifying specific aspects of the Standard to guarantee interoperability between devices.

Secondly, it is essential to analyze the applicability of the presented algorithm in recent variants IEEE 802.11, such as IEEE 802.11n and IEEE 802.11ac. This is very important because nowadays many devices can work with these variants of the Standard.

Another aspect to study as future work will be the effect of rain on wireless communications IEEE 802.11b/g. Rainfall during the periods of taking measurements was not really significant. Gandia and Valencia, the cities where this research has been performed, are places where it rains very little. Therefore, the impact of this weather condition has not been able to be analyzed.

Moreover, the cognitive algorithm presented in this thesis has a reactive behavior, which means that the algorithm takes actions when some of the monitored values of network performance exceed a certain threshold. However ideally, this algorithm could become a proactive algorithm. If algorithm had this capability, it would increase notably the performance of WLANs. Therefore, it has been considered as an important future work.

Finally, last future work considered has been to implement this solution on real devices in order to check how the designed cognitive algorithm works in a real environment.

GLOSARIO

ACK: Acknowledgement

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

AP: Presión Atmosférica

ARF: Auto Rate Fallback

ASIC: Área de Sistemas de Información y Comunicaciones

AWGN: Additive White Gaussian Noise

BER: Bit Error Rate

BPSK: Binary Phase Shift Keying

BPSK: Binary Phase Shift Keying

CAC: Call Admission Control

CCA: Clear Channel Assessment

CCK: Complementary Code Keying

CEM: Campos Electromagnéticos

CF: Control Frame

CFP: Contention Free Period

CINAC: Correlation Is Not a Cause

CMR: Cognitive Multipath Rounting

CN: Cognitive Network

CogAP: Cognitive Access Point

CR: Cognitive Radio

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CW: Content Window

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency

DBPSK: Differential Binary Phase Shift Keying

DCF: Distribution Coordination Function

DIFS: DCF Inter Frame Space

DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying

DR: Data Rate

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

EIFS: Extended Inter Frame Space

ETSI: Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación

FCC: Federal Communications Commission

FCS: Frame Check Sequence

FDTD: finite-difference time-domain

FEC: Forward Error Correction

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum

FLR: Frame Loss Ratio

H: Humedad

HR-DSSS: High Rate Direct Sequence Spread Spectrum

ICMP: Internet Control Management Protocol

ICNIRP: Comisión Internacional de Protección Radiológica para Ondas no Ionizantes

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IETF: Internet Engineering Task Force

IP: Internet Protocol

ISM: Industrial, Scientific and Medical

ITU: International Telecommunication Union

KP: Knowledge Plane

LLC: Logical Link Control

LOPD: Ley Orgánica de Protección de Datos

MAC: Medium Access Control

MIB: Management Information Base

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output

MMPDUs: MAC Management Protocol Data Units

MMPDUs: MAC Management Protocol Data Units

MOO: Multi-objective optimization

MP2: Multiple Path Management Protocol

MPDU: MAC Protocol Data Unit

NAV: Network Allocation Vector

NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements

NMS: Network Management System

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PA: Protection Area

PBCC: Packet Binary Convolutional Coding

PCF: Point Coordination Function

PDUs: Protocol Data Units

PER: Packet Error Rate

PhN: Primary Hybrid Network

PHY: Physical Layer

PIFS: PCF Inter Frame Space

PLCP: PHY Layer Convergence Protocol

PMD: PHY Medium Dependent

PPDU: Physical Protocol Data Unit

PR: Punto de Rocío

PSDU: Protocol Service Data Unit

QAM-16: 16 Quadrature amplitude modulation

QAM-64: 64 Quadrature amplitude modulation

QoS: Quality of Service

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RF: Radio Frequency

RSSI: Received Signal Strength Indicator

RTS/CTS: Request to Send/Clear to Send

SA: Situation Awareness

SaN: Secondary Ad-Hoc Network

SAN: Software Adaptable Network

SAR: Specific Absorption Rate

SDR: Software Defined Radio

SDUs: Service Data Units

SER: Symbol Error Rate

SIFS: Short Inter Frame Space

SNMP: Simple Network Management Protocol

SNR: Signal to Noise Ratio

SRP: Stable Routing Protocol

T: Temperatura

TIC: tecnologías de la información y de las comunicaciones

TIM: Traffic Indication Map

TTL: Time to Live

UPV: Universitat Politècnica de València

VV: Velocidad del Viento

WBSAR: Wide Body Averaged SAR

WLAN: Wireless Local Area Network

WSN: Wireless Sensor Network

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE, "Std 802.11™-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007) Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Computer Society, New York, 2012.
- [2] IEEE, «Institute of Electrical and Electronics Engineers,» [En línea]. Available: <https://www.ieee.org/index.html>.
- [3] M. Gast, 802.11 wireless networks: the definitive guide, O'Reilly Media, Inc., 2005.
- [4] IEEE, «IEEE Standards Association,» [En línea]. Available: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>.
- [5] F. Ohrtman y K. Roeder, Wi-Fi Handbook: Building 802.11 b Wireless Networks, vol. 67, McGraw-Hill New York, NY, 2003.
- [6] T. Paul y T. Ogunfunmi, «Wireless LAN comes of age: Understanding the IEEE 802.11 n amendment,» *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 8, nº 1, pp. 28-54, 2008.
- [7] E. Perahia y M. X. Gong, «Gigabit wireless LANs: an overview of IEEE 802.11 ac and 802.11 ad.,» *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 15, nº 3, pp. 23-33, 2011.
- [8] P. Roshan y J. Leary, 802.11 Wireless LAN Fundamentals, Cisco, 2010.
- [9] S. Bararia, S. Ghandeharizadeh y S. Kapadia, «Evaluation of 802.11a for streaming data in ad-hoc networks,» de *Applications and Services in Wireless Networks, 2004. ASWN 2004. 2004 4th Workshop on*, Boston, Massachusetts, USA., 2004.
- [10] D. Vassis, G. Kormentzas, A. Rouskas y I. Maglogiannis, «The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs,» *Network, IEEE*, vol. 19, nº 3, pp. 21-26, May 2005.
- [11] E. Perahia y R. Stacey, Next Generation Wireless LANs: 802.11 n and 802.11 ac, Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- [12] S. Biaz y S. Wu, «Rate adaptation algorithms for IEEE 802.11 networks: A survey and comparison,» de *Computers and Communications, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on*, Marrakech, Morocco, 2008.
- [13] S. L. Tsao y C. H. Huang, «A survey of energy efficient MAC protocols for IEEE 802.11 WLAN,» *Computer Communications*, vol. 34, nº 1, pp. 54-67, 2011.
- [14] G. Bianchi, «Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function,» *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 18, nº 3, pp. 535-547, March 2000.
- [15] E. Bayraktaroglu, C. King, X. Liu, G. Noubir, R. Rajaraman y B. Thapa, «Performance of IEEE 802.11 under Jamming,» *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, nº 5, pp. 678-696, 2013.
- [16] ITU-R, «Recommendation ITU-R P.676-10 Attenuation by Atmospheric Gases,» ITU, Génova, 2013.
- [17] ITU-R, «Recommendation ITU-R P.838-3 Specific Attenuation Model for Rain for use in Prediction Methods,» P Series, Genova, 2005.
- [18] ITU-R, «Recommendation ITU-R P.840-6 Attenuation due to Clouds and Fog,» ITU, Génova, 2013.
- [19] J. Lloret, P. V. Mauri, J. M. Jimenez y D. J. R., «802.11g WLANs Design for Rural Environments Video-surveillance,» de *International Conference on Digital Telecommunications (ICDT'06)*, Cap Esterel, Costa Azul , 2006.
- [20] J. Lloret, J. J. López y G. Ramos, «Wireless LAN Deployment in Large Extension Areas: The Case of a University Campus,» de *Communication Systems and Networks 2003*, Benalmádena, Málaga, 2003.
- [21] J. Lloret, P. V. Mauri, M. Garcia y A. J. Ferrer, «Designing WLANS for Video Transmission in Rural Environments for Agriculture and Environmental Researches and Educational Purposes,» *WSEAS Transactions on Communications*, vol. 5, nº 11, pp. 2064-2070, 2006.
- [22] D. Bri, H. Coll, S. Sendra y J. Lloret, «Providing Outdoor and Indoor Ubiquity with WLANs,» de : *Handbook of Research on Mobility and Computing: Evolving Technologies and Ubiquitous Impacts*, IGI Global, 2011, pp. 1155-1168.
- [23] J. Lloret, D. Bri, M. Garcia y P. V. Mauri, «A content distribution network deployment over WLANs for fire detection in rural environments,» de *The third international workshop on Use of P2P, grid and agents for the development of content networks (UPGRADE '08)*, New York, 2008.

- [24] J. Lloret, M. Garcia, D. Bri y S. Sendra, «A Wireless Sensor Network Deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification,» *Sensors*, vol. 9, nº 11, pp. 8722-8747, 2009.
- [25] A. Canovas, D. Bri, S. Sendra y J. Lloret, «Vertical WLAN handover algorithm and protocol to improve the IPTV QoS of the end user,» de *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, 2012.
- [26] S. Sendra, D. Bri, E. Granell y J. Lloret, «IEEE 802.11g Radio Coverage Study for Indoor Wireless Network Redesign,» *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, vol. 5, nº 3 y 4, pp. 518-532, 2012.
- [27] M. Garcia, D. Bri, C. Turro y J. Lloret, «A User-Balanced System for IP Telephony in WLANs,» de *The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM '08)*, Valencia, 2008.
- [28] D. Bri, S. Sendra, M. Garcia y J. Lloret, «Do Sensed Atmospheric Variables Affect to the Network QoS Parameters in WLANs?,» de *Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Venice, 2010.
- [29] D. Bri, S. Sendra, H. Coll y J. Lloret, «How the Atmospheric Variables Affect to the WLAN Datalink Layer Parameters,» de *The Sixth Advanced International Conference on Telecommunications*, Barcelona, Spain, 2010.
- [30] D. Bri, M. Fernández-Diego, M. Garcia, F. Ramos y J. Lloret, «How the Weather Impacts on the Performance of an Outdoor WLAN,» *IEEE Communications Letters*, vol. 16, nº 8, pp. 1184-1187, 2012.
- [31] D. Bri, F. Ramos, J. Lloret y M. Garcia, «The influence of meteorological variables on the performance of outdoor wireless local area networks,» de *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, 2012.
- [32] D. Bri, M. Garcia, J. Lloret y J. Mistic, «Measuring the weather's impact on MAC layer over 2.4 GHz outdoor radio links,» *Measurement*, vol. 61, pp. 221-233, 2015.
- [33] D. Bri, M. Garcia, J. Lloret y F. Ramos, «A Cognitive Algorithm Based on the Weather Conditions to Enhance Wireless Outdoor Communications,» de *Cognitive Networks Applications and Deployments*, CRC Press, 2014, p. 427–445.
- [34] D. Bri, M. Garcia, F. Ramos y J. Lloret, «Improving Energy-Efficiency with a Green Cognitive Algorithm to Overcome Weather's Impact in 2.4 GHz Wireless Networks,» *Mobile Networks & Applications*, 2015.
- [35] D. Bri, J. Lloret, C. Turro y M. Garcia, «Measuring specific absorption rate by using standard communications equipment,» de *Telemedicine and E-Health Services, Policies and Applications: Advancements and Developments*, IGI Global, 2012, pp. 81-111.

- [36] R. K. Crane, *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, CRC Press, 2003.
- [37] H. Wennerstrom, F. Hermans, O. Rensfelt, C. Rohner y L. A. Norden, «A long-term study of correlations between meteorological conditions and 802.15.4 link performance,» de *10th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, New Orleans, LA, June 2013.
- [38] M. Mafuta, M. Zennaro, A. Bagula, G. Ault, H. Gombachika y T. Chadza, «Successful Deployment of a Wireless Sensor Network for Precision Agriculture in Malawi,» *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, p. 13, 2013.
- [39] R. Marfievici, A. Murphy, G. Picco, F. Ossi y F. Cagnacci, «How Environmental Factors Impact Outdoor Wireless Sensor Networks: A Case Study,» de *IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*, Hangzhou, 2013.
- [40] C. Boano, N. Tsiftes, T. Voigt, J. Brown y U. Roedig, «The Impact of Temperature on Outdoor Industrial Sensor Applications,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, n° 3, pp. 451-459, 2010.
- [41] K. Bannister, G. Giorgetti y S. K. Gupta, «Wireless sensor networking for hot applications: Effects of temperature on signal strength, data collection and localization,» de *Workshop on Embedded Networked Sensors (HotEmNets)*, Charlottesville, Virginia, USA, 2008.
- [42] N. Baccour, A. Koubaa, L. Mottola, M. A. Zuniga, H. Youssef, C. A. Boano y M. Alves, «Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey,» *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, n° 4, p. 34, 2012.
- [43] J. Thelen y D. Goense, «Radio wave propagation in potato fields,» de *Workshop on Wireless Network Measurements (WinMee)*, 2005.
- [44] J. Jeong, S. Kim y A. Broad, «Network reprogramming,» University of California, Berkeley, CA, USA, 2003.
- [45] K. Ohshima, H. Hara, Y. Hagiwara y M. Terada, «Field Investigation of the RadioTransmission Performance and Distance in a Environmental Wireless Sensor Network,» de *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Bali, 2012.
- [46] G. Anastasi, A. Falchi, A. Passarella, M. Conti y E. Gregori, «Performance measurements of motes sensor networks,» de *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Venice, Italy, 2004.

- [47] G. Zhao, «Wireless sensor networks for industrial process monitoring and control: A survey,» *Network Protocols and Algorithms*, vol. 3, nº 1, pp. 46-63, 2011.
- [48] C. Ching Hsiang, C. You Ming, H. Yu Te, R. Carvalho, H. Chiun Chieh y C. Ling Jyh, «Measurement of long-distance Wi-Fi connections: An empirical study,» de *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, 2014.
- [49] F. Nadeem, E. Leitgeb, O. Koudelka, T. Javornic y G. Kandus, «Comparing the rain effects on hybrid network using optical wireless and GHz links,» de *4th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, Rawalpindi, 2008.
- [50] A. Lombardo, C. Panarello y G. Schembra, «EE-ARQ: a Green ARQ-Based Algorithm for the Transmission of Video Streams on Noise Wireless Channels,» *Network Protocols and Algorithms*, vol. 5, nº 1, pp. 43-70, 2013.
- [51] L. Wang y J. Manner, «Energy Consumption Analysis of WLAN, 2G and 3G interfaces,» de *Conference on Green Computing and Communications & Conference on Cyber, Physical and Social Computing (GREENCOM-CPSCOM '10)*, Washington, 2010.
- [52] C. Noda, S. Prabh, M. Alves y T. Voigt, «On Packet Size and Error Correction Optimisations in Low-Power Wireless Networks,» de *IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON)*, New Orleans, USA, 2013.
- [53] Nasaruddin, M. Andriani, Melinda y M. Irhamsyah, «Analysis of Energy Efficiency for Wi-Fi 802.11b,» de *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, Yogyakarta, Indonesia, 2013.
- [54] K. Gomez, R. Riggio, T. Rasheed y F. Granelli, «Analysing the energy consumption behaviour of WiFi networks,» de *Online Conference on Green Communications (GreenCom)*, 2011.
- [55] A. M. Sweedy, A. I. Semeia, S. Y. Sayed y A. H. Konber, «The effect of frame length, fragmentation and RTS/CTS mechanism on IEEE 802.11 MAC performance,» de *10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, Cairo, Egypt, 2010.
- [56] M. Tauber, S. N. Bhatti y Y. Yu, «Application Level Energy and Performance Measurements in a Wireless LAN,» de *IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, Chengdu, China, 2011.
- [57] M. Krishnan, E. Haghani y A. Zakhor, «Packet Length Adaptation in WLANs with Hidden Nodes and Time-Varying Channels,» de *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, Houston, Texas, USA, 2011.
- [58] W. Song, M. N. Krishnan y A. Zakhor, «Adaptive Packetization for Error-Prone Transmission over 802.11 WLANs with Hidden Terminals,» de *the 11th*

international workshop on multimedia signal processing (MMSP'09), Rio de Janeiro, Brazil, 2009.

- [59] G. A. Naydenov y P. S. Stoyanov, «Bit Error Period Determination and Optimal Frame Length Prediction for a Noisy Communication Channel,» *AU Journal of Technology*, vol. 11, nº 1, pp. 7-13, 2007.
- [60] P. Serrano, A. Garcia Saavedra, G. Bianchi, A. Banchs y A. Azcorra, «Per-frame Energy Consumption in 802.11 Devices and its Implication on Modeling and Design,» *IEEE/ACM Transactions on networking*, 2014.
- [61] B. Balaji, B. Tamma y B. Manoj, «A Novel Power Saving Strategy for Greening IEEE 802.11 Based Wireless Networks,» de *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, Miami, USA, 2010.
- [62] J. Zhou, M. Jacobsson y I. Niemegeers, «Link Quality-Based Transmission Power Adaptation for Reduction of Energy Consumption and Interference,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. Open Access, pp. 1-17, 2010.
- [63] B. Le, T. W. Rondeau y C. W. Bostian, «Cognitive radio realities,» *Wireless communications and mobile computing*, vol. 7, nº 9, p. 1037–1048, 2007.
- [64] S. Haykin, «Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201 - 220, 2005.
- [65] Z. Zhang y H. Zhang, «A Variable-Population Evolutionary Game Model for Resource Allocation in Cooperative Cognitive Relay Networks,» *IEEE Communications Letters*, vol. 17, nº 2, pp. 361 - 364, 2013.
- [66] P. Mähönen, M. Petrova, J. Riihijärvi y M. Wellens, «Cognitive Wireless Networks: your network just became a teenager,» de *IEEE INFOCOM*, Barcelona, 2006.
- [67] K. Hamdi, W. Zhang y K. B. Letaief, «Opportunistic Spectrum Sharing in Cognitive MIMO Wireless Networks,» *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, nº 8, pp. 4098-4109, 2009.
- [68] B. Wang, J. Wang, X. Song y F. Liu, «Q-Learning-Based Adaptive Waveform Selection in Cognitive Radar,» *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, vol. 2, nº 7, pp. 669-674, 2007.
- [69] D. Clark, «A New vision for network architecture,» 2002. [En línea]. Available: http://www.isi.edu/know-plane/DOCS/DDC_knowledgePlane_3.pdf. [Último acceso: 04 04 2014].
- [70] D. D. Clark, C. Partridge, J. C. Ramming y J. T. Wroclawski, «A Knowledge Plane for the Internet,» de *SIGCOMM'03*, Karlsruhe, Germany, 2003.

- [71] T. Dietterich y P. Langley, «Machine learning for cognitive networks: Technology assessment and research challenges,» Oregon State University, 2003.
- [72] J. Mitola, *Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*, Sweden, 2000.
- [73] C. Ramming, “Cognitive Networks,» in *DARPATech*, Anaheim, California, 2004.
- [74] P. Kavassalis, «Key Technologies For Europe: Communications,» European Commission DG Research: Key Technologies Experts Group, 2005.
- [75] R. W. Thomas, L. A. DaSilva y A. B. MacKenzie, «Cognitive networks,» de *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, DySPAN, Baltimore, MD, USA, 2005.
- [76] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. DaSilva y A. B. MacKenzie, «Cognitive Networks: Adaptation and Learning to Achieve End-to-End Performance Objectives,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, nº 12, pp. 51-57, 2006.
- [77] R. W. Thomas, D. H. Friend, L. A. DaSilva y A. B. MacKenzie, «Cognitive Networks,» de *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, Springer, 2007, pp. 17-41.
- [78] R. W. Thomas y L. A. DaSilva, «Cognitive Networking,» de *Cognitive Radio Technology (Second Edition)*, Oxford, Bruce A. Fette, Academic Press, 2009, p. 723–741.
- [79] A. Mihailovic, I. P. Chochliouros, E. Georgiadou, A. S. Spiliopoulou, E. Sfakianakis y M. Belesioti, «Situation Awareness Mechanisms,» de *International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops, ICUMT '09*, St. Petersburg, 2009.
- [80] S.-N. E. Project, «Deliverable D2.1 “First Report on Mechanisms for Situation Awareness of Cognitive Network Elements and Decision Making Mechanisms for Goal-oriented Task Planning,» INFISO-ICT-224344, 2009. [En línea]. Available: <https://www.ict-selfnet.eu>. [Último acceso: April 2014].
- [81] P. Sutton, L. E. Doyle y K. E. Nolan, «A reconfigurable platform for cognitive networks,» de *CROWNCOM 2006*, Mykonos Island, Greece, 2006.
- [82] X. Wang, H. Chengb y M. Huang, «QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm,» *Expert Systems with Applications*, vol. 41, nº 11, p. 4513–4528, 2014.
- [83] Y. Zhang, J. Guan, C. Xu y H. Zhang, «The Stable Routing Protocol for the Cognitive Network,» de *IEEE Globecom Workshops*, Anaheim, CA, 2012.

- [84] C. Wang, X. Y. Li, S. Tang y C. Jiang, «Multicast Capacity Scaling for Cognitive Networks: General Extended Primary Network,» de *IEEE 7th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, San Francisco, CA, 2010.
- [85] M. M. Carolina Fortuna, «Advanced access architecture for efficient service delivery in heterogeneous wireless networks,» de *Third International Conference on Communications and Networking, ChinaCom*, China, 2008.
- [86] J. Wang y X. Fu, «Challenges of CAC in Heterogeneous Wireless Cognitive Networks,» *Physics Procedia*, vol. 25, pp. 2218-2224, 2012.
- [87] R. E. Tuggle, «Cognitive Multipath Routing for Mission Critical Multi-hop Wireless Networks,» de *42nd Southeastern Symposium on System Theory (SSST)*, Tyler, TX, USA, 2010.
- [88] B. R. Tamma, B. S. Manoj y R. Rao, «An Autonomous Cognitive Access Point for Wi-Fi Hotspots,» de *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, Honolulu, HI, 2009.
- [89] A. Bahillo, J. Prieto, S. Mazuelas, R. Lorenzo, P. Fernandez y E. Abril, «E-Field Assessment Errors Caused by the Human Body on Localization Systems,» de *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010 IEEE 71st, Taipei, Taiwan, 2010.
- [90] K. Eudon y B. Petersen, «Video Streaming over 802.11b in the Presence of Fading Due to Human Traffic and Bluetooth Interference,» de *Communication Networks and Services Research Conference, 2009. CNSR '09. Seventh Annual*, 2009.
- [91] M. Parazzini, F. Sibella, A. Paglialonga y P. Ravazzani, «Assessment of the exposure to WLAN frequencies of a head model with a cochlear implant,» *Bioelectromagnetics*, vol. 31, n° 7, pp. 546-555, 2010.
- [92] S. Kühn y N. Kuster, «Development of procedures for the EMF exposure evaluation of wireless devices in home and office environments supplement 1: Close-to-body and base station wireless data communication devices,» Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS Foundation), Zurich, 2006.
- [93] IEEE, «IEEE C95.1-2005: Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 KHz to 300 GHz,» IEEE Press, New York, 2005.
- [94] J. L. Ulcek y R. F. Cleveland, «Evaluating compliance with FCCspecified Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields,» Federal Communications Commission, Washington, 1997.

- [95] E. Commission, «Directive 1999/5/EC of the European Parliament and of the Council of 9 March 1999 on radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity,» Official Journal of the European Communities, Geneva, Switzerland, 1999.
- [96] I. Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, «Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields,» *Health Physics*, vol. 74, nº 4, p. 494–522, 1998.
- [97] J. Case, M. Fedor, M. Schoffstall y J. Davin, «RFC 1157: Simple network management protocol (SNMP),» The Internet Engineering Task Force (IETF), 1990.
- [98] K. McCloghrie, D. Perkins, J. Schoenwaelder, J. Case, M. Rose y S. Waldbusser, «RFC 2578: Structure of Management Information Version 2 (SMIv2),» The Internet Engineering Task Force (IETF), 1999.
- [99] K. McCloghrie y M. Rose, «RFC 1213: Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based internets: MIB-II,» The Internet Engineering Task Force (IETF), 1991.
- [100] C. Spearman, «Demonstration of Formulæ for True Measurement of Correlation,» *The American Journal of Psychology*, vol. 18, nº 2, pp. 161-169, 1907.
- [101] IBM, «IBM SPSS Statistics,» [En línea]. Available: <http://www-01.ibm.com/software/es/analytics/spss/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [102] U. Paul, R. Crepaldi, J. Lee, S. J. Lee y R. Etkin, «Characterizing WiFi link performance in open outdoor networks,» de *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on, 2011.
- [103] T. Zahariadis, «Evolution of the Wireless PAN and LAN standards,» *Computer Standards & Interfaces*, vol. 26, nº 3, pp. 175-185, 2004.
- [104] E. Egea-Lopez, A. Martinez-Sala, J. Vales-Alonso, J. Garcia-Haro y J. Malgosa-Sanahuja, «Wireless communications deployment in industry: a review of issues, options and technologies,» *Computers in industry*, vol. 56, nº 1, pp. 29-53, 2005.
- [105] J.-H. Yun, "Performance analysis of IEEE 802.11 WLANs with rate adaptation in time-varying fading channels," *Computer Networks*, vol. 56, no. 5, pp. 1153-1166, 2013.
- [106] S. H. Wong, H. Yang, S. Lu y V. Bharghavan, «Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks,» de *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2006.

- [107] J. C. Bicket, «Bit-rate selection in wireless networks,» Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2005.
- [108] G. Holland, N. Vaidya y P. Bahl, «A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks,» de *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2001.
- [109] Azimut Electronics, «Azimut Electronics,» [En línea]. Available: <http://www.azimutelectronics.es/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [110] Borja ópticos, "meteogandia.com," [Online]. Available: <http://www.meteogandia.com/index.html>. [Accessed Abril 2015].
- [111] S. Choi, Y. Choi y I. Lee, «IEEE 802.11 MAC-Level FEC scheme with retransmission combining,» *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, nº 1, pp. 203-211, Jan 2006.
- [112] M. Schmidt y H. Lipson, «Distilling free-form natural laws from experimental data,» *Science*, vol. 324, pp. 81-85, 2009.
- [113] M. Schmidt y H. Lipson, «Eureqa (Version 0.98 beta),» 2014. [En línea]. Available: <http://www.nutonian.com>.
- [114] M. G. Lawrence, «The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications.,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, pp. 225-233, 2005.
- [115] Ad-hoc Advisory Group Report, "ICT for Energy Efficiency," DG-Information Society and Media, European Commission, Brussels, 2008.
- [116] M. P. Mills, «The Cloud begins with Coal, Big Data, Big Networks, Big Infraestructure and Big Power,» Agosto, 2013.
- [117] J. Rodrigues, "Green Communications and Networking," *Network Protocols and Algorithms*, vol. 5, no. 1, pp. 37-40, 2013.
- [118] P. Serrano, A. de la Oliva, P. Patras, V. Mancuso y A. Banchs, «Greening wireless communications: Status and future directions,» *Computer Communications*, vol. 35, pp. 1651-1661, 2012.
- [119] S. Sendra, J. Lloret, M. Garcia y J. F. Toledo, «Power Saving and Energy Optimization Techniques for Wireless Sensor Networks,» *Journal of Communications*, vol. 6, nº 6, pp. 439-459, 2011.
- [120] V. K. Khanna, H. M. Gupta y S. Maheshwari, «A high throughput and low power ad-hoc wireless LAN protocol,» *Wireless Networks*, vol. 14, nº 1, pp. 1-16, 2008.

- [121] Q. Mahmoud, *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*, Wiley-Interscience, 2007.
- [122] C. Fortuna y M. Mohorcic, «Trends in the development of communication networks: Cognitive networks,» *Computer Networks*, vol. 53, nº 9, pp. 1354-1376, 2009.
- [123] B. A. Fette, *Cognitive Radio Technology*, Academic Press Elsevier, 2009.
- [124] IEEE Std 802.15.2, «Coexistence of wireless personal area networks with other wireless devices operating in unlicensed frequency bands,» IEEE, 2003.
- [125] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [126] IEEE, «802.11a-1999-IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band,» IEEE Computer Society, New York, 2003.
- [127] W. Toorisaka, G. Hasegawa y M. Murata, «Power consumption analysis of data transmission in IEEE 802.11 multi-hop networks,» de *ICNS 2012, The Eighth International Conference on Networking and Services*, St. Maarten, Netherlands Antilles, 2012.
- [128] L. M. Feeney y M. Nilsson, «Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment,» de *IEEE INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings.*, Anchorage, Alaska USA, 2001.
- [129] I. Texas, "CC3000 IEEE 802.11b/g Solution Module," CC3000 IEEE 802.11b/g Solution Module , [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CC3000/technicaldocuments>.
- [130] Riverbed, «Riverbed Modeler Wireless Suite,» [En línea]. Available: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/network-simulation.html>.
- [131] OMS, «Organización Mundial de la Salud. Proyecto Internacional CEM,» [En línea]. Available: <http://www.who.int/peh-emf/project/es/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [132] UE, «Directive 1999/5/EC of the European Parliament and of the council on radio equipment and telecommunications terminal equipment and the mutual recognition of their conformity,» *Official Journal of the European Communities*, March 1999.

- [133] UE, «Council Recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz),» Official Journal of the European Communities, July 1999.
- [134] SAR Values, «SAR Values – The Complete SAR List For All Phones (Europe),» [En línea]. Available: <http://sarvalues.com/the-complete-sar-list-for-all-phones-europe/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [135] Z. M. Wang, R. N. Pierson y S. B. Heymsfield, «The five-level model: a new approach to organizing body-composition research.,» *The American journal of clinical nutrition*, vol. 56, nº 1, pp. 19-28, 1992.
- [136] J. Lin, «Biological bases of current guidelines for human exposure to radio-frequency radiation,» *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 45, nº 3, pp. 182-184, June 2003.
- [137] H. Thom, Introduction to Shortwave and Microwave Therapy, Charles C. Thomas, 1966.
- [138] C. Merckel, «Microwave and Man - The Direct and Indirect Hazards, and the Precautions,» *California medicine*, vol. 117, nº 1, p. 20, 1972.
- [139] X. Li, «RSS-Based Location Estimation with Unknown Pathloss Model,» *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, nº 12, pp. 3626-3633, December 2006.
- [140] M. Karunarathna y I. Dayawana, «Human exposure to RF radiation in Sri Lanka,» *Sri Lankan Journal of Physics*, vol. 6, pp. 19-32, 2005.
- [141] S. Mazuelas, A. Bahillo, R. Lorenzo, P. Fernandez, F. Lago, E. Garcia, J. Blas y E. Abril, «Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks,» *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 3, nº 5, pp. 821-831, Oct 2009.
- [142] H. Hashemi, «The indoor radio propagation channel,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, nº 7, pp. 943-968, Jul 1993.
- [143] Y. Qi, «Wireless geolocation in a non-line-of-sight environment,» Princeton University, 2003.
- [144] R. Valenzuela, «A ray tracing approach to predicting indoor wireless transmission,» de *Vehicular Technology Conference, 1993., 43rd IEEE*, 1993.
- [145] T. Fruhwirth, P. Brisset y J. R. Molwitz, «Planning cordless business communication systems,» *IEEE Expert*, vol. 11, nº 1, pp. 50-55, Feb 1996.

- [146] B. C. Liu, K. H. Lin y J. C. Wu, «Analysis of hyperbolic and circular positioning algorithms using stationary signal-strength-difference measurements in wireless communications,» *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 55, nº 2, pp. 499-509, March 2006.
- [147] A. Taflove, *Advances in Computational Electrodynamics*, Artech House Inc, 1998.
- [148] A. Tinniswood, C. Furse y O. Gandhi, «Computations of SAR distributions for two anatomically based models of the human head using CAD files of commercial telephones and the parallelized FDTD code,» *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 46, nº 6, pp. 829-833, Jun 1998.
- [149] S. Khalatbari, D. Sardari, A. A. Mirzaee y H. A. Sadafi, «Calculating SAR in two models of the human head exposed to mobile phones radiations at 900 and 1800 MHz,» *PIERS Online*, vol. 2, nº 1, pp. 104-109, 2006.
- [150] A. Hirata, O. Fujiwara, T. Nagaoka y S. Watanabe, «Estimation of Whole-Body Average SAR in Human Models Due to Plane-Wave Exposure at Resonance Frequency,» *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 52, nº 1, pp. 41-48, Feb 2010.
- [151] O. P. Gandhi y E. E. Aslan, «Human-equivalent antenna for electromagnetic fields». Patente 5394164, Febrero 1995.
- [152] J. D. Kraus y R. J. Marhefka, *Antennas For All Applications*, McGraw-Hill, 2001.
- [153] Vistumbler, «Vistumbler v10.5,» [En línea]. Available: <https://www.vistumbler.net/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [154] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, John Wiley & Sons, 2012.