

Tesis defendida por

Shiro Tadasuky Kaishi Romero

Y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Director del Comité

Dr. Luis Armando Villaseñor
González

Miembro del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Miembro del Comité

Dr. Raúl Rivera Rodríguez

Miembro del Comité

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Miembro del Comité

Dr. César Cruz Hernández

*Coordinador del Posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

7 de diciembre de 2012

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENDA



Programa de Posgrado en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones

Análisis Wi-Fi Direct, para la transmisión de datos sensible al retardo
de múltiples usuarios sobre redes inalámbricas de área personal

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

ShiroTadasuky Kaishi Romero

Ensenada, Baja California, México, 2012

Resumen de la tesis Shiro Tadasuky Kaishi Romero, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Análisis Wi-Fi Direct, para la transmisión de datos sensible al retardo de múltiples usuarios sobre redes inalámbricas de área personal

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Director de tesis

Dentro de las múltiples tecnologías que ofrecen conectividad inalámbrica, aquellas enfocadas al establecimiento de redes inalámbricas de área personal y área local han alcanzado una gran penetración en aplicaciones de electrónica de consumo y empresarial en los últimos años. Es por esto que los sistemas inalámbricos basados en tecnologías como Bluetooth, DECT y Wi-Fi prácticamente se han adoptado en la mayoría de hogares y/o empresas.

Una de las aplicaciones que más ha impulsado el desarrollo de los sistemas de conectividad inalámbrica de corto alcance, es la transmisión de tráfico sensible al retardo (voz, audio y video en tiempo real) de manera inalámbrica sobre enlaces par-a-par. Soluciones basadas en Bluetooth y DECT cumplen con los requerimientos que imponen las aplicaciones de transmisión de voz, sin embargo no ofrecen el suficiente ancho de banda para la transmisión de audio de alta calidad y video. En el caso de Wi-Fi, el ancho de banda no es una limitante, pero si lo es la dificultad que debe enfrentar un usuario inexperto en el área de las TIC para establecer enlaces par-a-par entre dos dispositivos Wi-Fi.

El estándar Wi-Fi Direct (WFD) además de permitir la creación de enlaces par-a-par de una manera sencilla y transparente para el usuario, permite también la transmisión de información altamente sensible a retardos sobre enlaces par-a-par de mayor velocidad que Bluetooth o DECT, esto la posiciona como la tecnología líder en las redes emergentes de área personal.

En este trabajo de tesis se presenta el análisis, el modelado matemático y la simulación, de la capa de acceso al medio del estándar Wi-Fi Direct. Con esto se busca obtener el número máximo de enlaces par-a-par WFD con transmisión de datos sensibles al retardo, dentro de un área con una alta densidad de usuarios transmitiendo de manera concurrente.

Una de las motivaciones para la realización de este trabajo de tesis es que el estudio de escenarios de enlaces WFD par-a-par para transmisión de audio sensible al retardo no ha sido encontrado en la literatura hasta ahora. También al ser WFD una tecnología de reciente creación, los resultados presentados en esta tesis, servirán para la formulación de recomendaciones de diseño, que permitirán una mejor utilización de esta tecnología.

Palabras clave: Wi-Fi Direct, datos sensibles al retardo, redes inalámbricas de corto alcance, enlaces par-a-par, capa de acceso al medio

Abstract of the thesis presented by Shiro Tadasuky Kaishi Romero, in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Sciences in Electronic and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Wi-Fi Direct analysis for transmission of delay sensitive data from multiple users on wireless personal area networks

Abstract accepted by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes
Thesis Director

Among the many technologies providing wireless connectivity, those focused on the establishment of wireless personal and local area networks have achieved in the recent years a great insight into areas like consumer electronics and industry. Therefore at the present, wireless systems based on technologies like Bluetooth, DECT and Wi-Fi are found in most homes and businesses.

One application that has driven the development of systems for short-range wireless connectivity is the transmission of delay-sensitive traffic (real time voice and video) over peer-to-peer wireless links. For such applications, solutions based on DECT and Bluetooth meet the minimum requirements, but do not provide enough bandwidth. For Wi-Fi, the bandwidth is not a constraint; rather the difficulty faced by an inexperienced user in TICs areas to link two peer-to-peer Wi-Fi devices.

The Wi-Fi Direct (WFD) standard allows the creation of links peer-to-peer in a simple and transparent to the user, it also allows the transmission of highly sensitive information over peer-to-peer links faster than Bluetooth or DECT links, this technology positions it as the emerging leader in the personal area networks

This thesis presents the analysis, mathematical modeling and simulation of medium access layer of Wi-Fi Direct standard. This seeks to obtain the maximum number of peer-to-peer WFD links transmitting delay-sensitive data, within an area with a high density of users transmitting concurrently.

One motivation for the realization of this thesis is that the study of scenarios with peer-to-peer WFD links streaming audio delay sensitive has not been found in the literature so far. Being WFD a technology of newly creation, the results presented in this thesis, will be used to formulate design recommendations, which will allow better use of this technology.

Keywords: Wi-Fi Direct, delay sensitive data, short-range wireless networks, peer-to-peer links, medium access control layer, MAC

*A mis queridos padres, José María y María Teresa
a mis hermanas, Yukary y Zumiko
y a mi amada novia, Lílana
por el amor y apoyo brindado en esta esta etapa
y a lo largo de mi vida, lo que ha hecho posible
la realización de una meta más en mi vida.
De corazón, Gracias.*

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de vivir y aprovechar esta etapa de mi vida con salud y plenitud.

A mis padres, José y María; mis hermanas, Yukary y Zumiko; así como a toda mi familia, por el amor y apoyo incondicional brindado en esta etapa y a lo largo de mi vida, evitando que decayera en los momentos difíciles.

A mi novia, Liliana, por todo el amor y comprensión, por estar ahí en los momentos buenos pero en especial en los malos. Por ser junto a mi familia el pilar que me mantuvo firme a lo largo de esta etapa de mi vida.

Al Dr. Salvador Villarreal Reyes, mi director de tesis, por todos sus consejos y enseñanzas a lo largo de este proceso, y sobre todo por su paciencia. Por ser un gran guía a lo largo de este camino y por sobre todo por brindarme su valiosa amistad.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. David H. Covarrubias Rosales, Dr. Luis Villaseñor González, Dr. Raúl Rivera Rodríguez y Dr. Pedro Negrete Regagnon; gracias por sus consejos y observaciones que me hicieron crecer en el ámbito académico pero más en lo ámbito personal.

A mis compañeros de generación, que sufrieron pero que sobre todo disfrutaron conmigo este proceso, y se han convertido en parte de mi familia: Enrique (Choche), Manuel (Mañe), Arturo (Susti), Rodrigo (Rocko), Ricardo, Raúl, Miriam, Lilia, Montaña, Antonio, Fernando, Héctor, Alberto (Kokie), Armando, Martha, Amparo, Javier, Julio, Chendo, Angulo, Ángel, Fausto, Claudia, Nayeli, Samuel y Adrián. Así como mis compañeros de doctorado y técnicos: Roberto Magaña, Aldo, Alex, Pedro, Christian y Edwin. A todos les deseo todo éxito.

Al CONACyT y proyecto de investigación por su apoyo económico, necesario para el cumplimiento de esta meta.

Tabla de contenido

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen | 2 |
| Abstract | 3 |
| Dedicatoria | 4 |
| Agradecimientos | 5 |
| Lista de Figuras | 9 |
| Lista de Tablas..... | 12 |
| Capítulo 1. Introducción | 14 |
| 1.1 Antecedentes | 14 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 21 |
| 1.3 Objetivo general | 25 |
| 1.3.1 Objetivos específicos | 25 |
| 1.4 Justificación..... | 26 |
| 1.5 Metodología de la tesis..... | 26 |
| 1.6 Organización de la tesis | 27 |
| Capítulo 2. Capa MAC y PHY de Wi-Fi Direct | 29 |
| 2.1 Arquitectura de 802.11 | 29 |
| 2.2 Capa Física (PHY) | 31 |
| 2.3 Protocolo MAC de 802.11 y sus funciones de coordinación..... | 33 |
| 2.4 Función de Coordinación Distribuida (DCF) | 34 |
| 2.4.1 Mecanismo DCF básico | 35 |
| 2.4.2 Mecanismo DCF protegido RTS/CTS | 36 |
| 2.5 Acceso de canal distribuido mejorado (EDCA)..... | 38 |
| 2.6 Procedimiento de desistimiento (<i>backoff</i>)..... | 40 |
| 2.7 Tiempos inter-tramas (IFS)..... | 43 |
| Capítulo 3. Estándar Wi-Fi Direct para redes inalámbricas de área personal.... | 45 |
| 3.1 Arquitectura Wi-Fi Direct | 46 |
| 3.1.1 Componentes de la arquitectura WFD | 46 |
| 3.1.2 Topologías de red WFD | 47 |
| 3.2 Funciones y servicios WFD | 49 |

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 | Funciones y servicios básicos..... | 49 |
| 3.2.2 | Servicios P2P en WFD..... | 50 |
| 3.2.3 | Fases en la formación de una red WFD..... | 50 |
| 3.2.4 | Gestión de Energía P2P | 55 |
| 3.3 | Diferencias entre Wi-Fi tradicional y Wi-Fi Direct | 56 |
| Capítulo 4. | Modelado Capa MAC IEEE 802.11g para Wi-Fi Direct..... | 60 |
| 4.1 | Introducción..... | 60 |
| 4.2 | Modelo de la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct..... | 63 |
| 4.2.1 | Tiempo de servicio de la capa MAC..... | 63 |
| 4.2.2 | Tiempos de los procesos de colisión y transmisión exitosa | 64 |
| 4.2.3 | Proceso de decremento del contador de desistimiento..... | 66 |
| 4.2.4 | Modelo de la cadena de Markov para el procedimiento exponencial de desistimiento | 70 |
| 4.2.5 | Diagrama de transición de estados generalizado para el proceso de transmisión..... | 74 |
| 4.2.6 | Modelado de la estación Wi-Fi Direct como una cola M/G/1..... | 76 |
| 4.2.6.1 | Probabilidades en estado estable de la cola M/G/1 | 77 |
| 4.3 | Algoritmo para la obtención de las métricas de desempeño | 78 |
| 4.4 | Modelado para tráfico heterogéneo con dos grupos de estaciones | 80 |
| 4.5 | Conclusiones..... | 86 |
| Capítulo 5. | Escenario de evaluación y cama de pruebas de simulación..... | 87 |
| 5.1 | Escenario de evaluación | 87 |
| 5.2 | Codificadores de voz..... | 89 |
| 5.2.1 | Codificadores de voz a utilizar | 90 |
| 5.2.2 | Proceso de empaquetamiento de los codificadores de voz | 91 |
| 5.3 | Cama de pruebas de simulación | 92 |
| 5.4 | Simulador ns-2 | 92 |
| 5.4.1 | Escenario de simulación en ns-2 | 93 |
| Capítulo 6. | Resultados..... | 95 |
| 6.1 | Tráfico homogéneo | 96 |
| 6.1.1 | Importancia del cálculo del retardo fuente-destino (end-to-end delay) y el punto de saturación del sistema | 97 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.2 Comparación contra otros modelos matemáticos y simuladores | 99 |
| 6.1.3 Diferencia entre la utilización del mecanismo básico y RTS-CTS..... | 101 |
| 6.1.4 Emulación de tráfico de gran numero de nodos con un número menor de ellos | 105 |
| 6.1.5 Desempeño de diversos codificadores de voz en cuanto a máximo número de nodos en la red | 109 |
| 6.2 Trafico heterogéneo | 117 |
| Capítulo 7. Conclusiones | 121 |
| 7.1 Conclusiones..... | 121 |
| 7.1.1 Modelado de la capa MAC de Wi-Fi Direct mediante cadenas de Markov | 121 |
| 7.1.2 Diferencias entre la utilización del mecanismo de acceso básico o RTS-CTS, y el tamaño de paquete a transmitir | 122 |
| 7.1.3 Posibilidad de la emulación de tráfico de un gran numero de nodos por un grupo pequeño de ellos..... | 123 |
| 7.1.4 Máximo número de nodos activos en el medio para los diferentes <i>vocoders</i> elegidos | 124 |
| 7.1.5 Resultados de la aplicación del modelo a tráfico heterogéneo. | 126 |
| 7.2 Trabajo Futuro..... | 127 |
| Referencias Bibliográficas | 128 |
| Apéndice A. Comparación del máximo caudal eficaz de Bluetooth 3.0+H.S contra Wi-Fi Direct..... | 1 |
| Apéndice B. Instalación de Ns-2 en Ubuntu | 5 |

Lista de Figuras

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Escenario con un alto numero de nodos en un área común..... | 19 |
| Figura 2. Escenario de aplicación con alta densidad de conexiones inalámbricas par-a-par (P2P). | 20 |
| Figura 3. Topología de red VoIP, utilizada en (Stoeckigt & Vu, 2009). | 23 |
| Figura 4. Dispositivos STA y WAP considerados en el estándar IEEE 802.11..... | 29 |
| Figura 5. Modo ad-hoc (<i>IBSS</i>). | 30 |
| Figura 6. a) Modo de operación infraestructura (<i>BSS</i>) y b) extendido (<i>ESS</i>)..... | 31 |
| Figura 7. Arquitectura de la capa MAC del estándar IEEE 802.11. | 33 |
| Figura 8. Mecanismo de acceso DCF Básico. | 35 |
| Figura 9. Nodo Oculto en Wi-Fi..... | 36 |
| Figura 10. Mecanismo de acceso DCF protegido RTS/CTS y NAV..... | 37 |
| Figura 11. Procedimiento de desistimiento para la transmisión de los datos en WFD..... | 42 |
| Figura 12. Aumento en el valor de CW en IEEE 802.11g con DCF. | 42 |
| Figura 13. Relación entre los distintos tipos de IFS, para la transmisión de datos en WFD. | 44 |
| Figura 14. Topologías de red formadas por WFD..... | 47 |
| Figura 15. Ejemplo red WFD P2P y la opción de invitación añadida en WFD. | 48 |
| Figura 16. Ejemplo red WFD con funcionamiento simultáneo. | 48 |
| Figura 17. Red compleja con varios dispositivos invitados a una red concurrente.. | 49 |
| Figura 18. Máquina de estados simplificada para la formación de redes P2P en WFD..... | 50 |
| Figura 19. Tiempos del mecanismo de acceso básico | 65 |
| Figura 20. Tiempos del mecanismo RTS-CTS..... | 65 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21. Diagrama de transición generalizado del proceso de decremento del contador de desistimiento | 69 |
| Figura 22. Cadena de Markov del procedimiento de desistimiento de MAC 802.11g..... | 72 |
| Figura 23. Diagrama de transición de estado generalizado para el proceso de transmisión en 802.11g..... | 75 |
| Figura 24. Modelo cola M/G/1 para el proceso de transmisión de un paquete en una estación Wi-Fi Direct..... | 77 |
| Figura 25. Proceso para la obtención de resultados del modelo matemático para tráfico homogéneo..... | 79 |
| Figura 26. Proceso para la obtención de resultados del modelo matemático para tráfico heterogéneo..... | 85 |
| Figura 27. Escenario de evaluación y representación en forma de nodos..... | 88 |
| Figura 28. Proceso de empaquetado para la transmisión de voz | 91 |
| Figura 29. Jerarquía de simulación en ns-2..... | 93 |
| Figura 30. Escenario de Simulación en ns-2 para 30 nodos..... | 94 |
| Figura 31. Factores que intervienen en el cálculo del <i>end-to-end delay</i> | 97 |
| Figura 32. Probabilidad de colisión para el caso de tráfico homogéneo para 10 nodos comparando el modelo vs simulación ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps..... | 98 |
| Figura 33. Tiempo promedio de servicio de la capa MAC para el caso de tráfico homogéneo para 10 nodos comparando el modelo vs simulación ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps..... | 99 |
| Figura 34. Comparación del modelo presentado en el Capítulo 4, el modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) y la simulación en ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps..... | 100 |
| Figura 35. Esquema de empaquetado considerando una tasa de datos de 64 kbps y la generación de paquetes de 160 bytes..... | 102 |
| Figura 36. Probabilidad de colisión para diferente empaquetado bajo el mecanismo básico y RTS-CTS..... | 103 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 37. Probabilidad de colisión para diferente numero de nodos activos en el medio (modelo). | 106 |
| Figura 38. Probabilidad de colisión para diferente numero de nodos activos en el medio (simulación). | 106 |
| Figura 39. Tiempo promedio de servicio de la capa MAC para distinto número de nodos activos en el medio (modelo matemático). | 107 |
| Figura 40. <i>Vocoder</i> G.722 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. 110 | |
| Figura 41. <i>Vocoder</i> G.726 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. 111 | |
| Figura 42. <i>Vocoder</i> G.723.1 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. 111 | |
| Figura 43. Comparación del empaquetado de 1 para los tres <i>vocoders</i> considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. | 113 |
| Figura 44. Comparación del empaquetado de 2 para los tres <i>vocoders</i> considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. | 113 |
| Figura 45. Comparación del empaquetado de 5 para los tres <i>vocoder</i> considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF. | 114 |
| Figura 46. Probabilidad de descarte de paquete por la capa MAC para un esquema empaquetado de 2, para los tres <i>vocoders</i> | 115 |
| Figura 47. Escenario para el caso de tráfico heterogéneo..... | 117 |
| Figura 48. Probabilidad de colisión para tráfico heterogéneo de 90 nodos (modelo y simulación). | 118 |
| Figura 49. Modelo heterogéneo contra modelo homogéneo. | 119 |
| Figura 50. Escenarios iniciales de evaluación. | 1 |

Lista de Tablas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Comparativa de la capa PHY de las distintas versiones de IEEE 802.11..... | 32 |
| Tabla 2. Parámetros capa PHY 802.11g. | 32 |
| Tabla 3. Parámetros EDCA en 802.11e..... | 40 |
| Tabla 4. Parámetros EDCA para IEEE 802.11g sin compatibilidad. | 40 |
| Tabla 5. Espacios Inter-Trama <i>IFS</i> | 43 |
| Tabla 6. Componentes Wi-Fi Direct..... | 46 |
| Tabla 7. Servicios P2P en WFD..... | 50 |
| Tabla 8. Estado: Escaneo..... | 51 |
| Tabla 9. Fase Encontrar: Estado Escuchar. | 52 |
| Tabla 10. Fase Encontrar: Sub-estado Buscando. | 52 |
| Tabla 11. Fase Encontrar: Sub-estado Descubrimiento de servicios..... | 53 |
| Tabla 12. Fase Procedimiento de Formación del Grupo: Estado WPS Aprovisionamiento Afiliado..... | 53 |
| Tabla 13. Fase Procedimiento de Formación del Grupo: Estado WPS Aprovisionamiento Registrador | 54 |
| Tabla 14. Fase <i>Operacional</i> : Estado Propietario del Grupo <i>P2P</i> | 54 |
| Tabla 15. Fase <i>Operacional</i> : Estado Cliente <i>P2P</i> | 54 |
| Tabla 16. Diferencias entre el modelo de (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) y el de esta tesis..... | 62 |
| Tabla 17. PGF's de los tiempos de transmisión exitosa y colisión..... | 66 |
| Tabla 18. <i>MOS</i> y <i>Bitrate</i> de los codecs a evaluar. | 89 |
| Tabla 19. Parámetros para cálculo del desempeño de los <i>vocoders</i> seleccionados | 90 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 20. Comparación de resultados obtenidos del modelo con resultados de simulación para 10 nodos. | 98 |
| Tabla 21. Número máximo de nodos activos en el medio para diferentes empaquetados, utilizando los mecanismos: básico y RTS-CTS. | 104 |
| Tabla 22. Tiempos promedio de servicio de la capa MAC para diversos números de nodos y tráfico ofrecido. | 108 |
| Tabla 23. Diferencia en probabilidad de colisión tomando como base 10 nodos. | 108 |
| Tabla 24. Diferencia en tiempo promedio de servicio de la capa MAC en milisegundos tomando como base 10 nodos. | 108 |
| Tabla 25. Parámetros de capa MAC y PHY para la transmisión de datos de voz, utilizados para los distintos <i>vocoders</i> considerados. | 110 |
| Tabla 26. Número máximo de sesiones de audio bidireccional sobre enlaces par-a-par WFD que se pueden establecer para cada uno de los <i>vocoders</i> analizados. | 116 |
| Tabla 27. Tiempo promedio máximo de servicio y desviación estándar de la capa MAC para sesiones de audio bidireccional sobre enlaces par-a-par WFD que se pueden establecer para cada uno de los <i>vocoders</i> analizados. | 116 |
| Tabla 28. Parámetros de IEEE 802.11g utilizados para la evaluación inicial. | 2 |
| Tabla 29. Parámetros de los tamaños de paquete para la evaluación inicial. | 2 |
| Tabla 30. Valores de CW para los cálculos del máximo caudal eficaz. | 3 |
| Tabla 31. Caudal eficaz alcanzados por Bluetooth 3.0 para cada escenario. | 4 |
| Tabla 32. Caudal eficaz alcanzados por Wi-Fi Direct para cada escenario. | 4 |

Capítulo 1. Introducción

En el trabajo de tesis presentado a continuación, se analiza el desempeño en la transmisión de datos sensibles al retardo de una red inalámbrica de área personal (WPAN¹, por sus siglas en inglés) basada en la tecnología inalámbrica denominada Wi-Fi² Direct, considerando condiciones de operación con alta densidad de usuarios transmitiendo concurrentemente en un área común.

1.1 Antecedentes

Como resultado de los grandes avances tecnológicos que permitieron pasar de lo analógico a lo digital, ahora la transición se ve reflejada trasladando lo cableado a inalámbrico. Esta revolución inició hace años cuando se introdujeron los primeros teléfonos inalámbricos para hogares, para después seguir con él desarrollo de las diferentes generaciones de telefonía móvil celular, hasta contar en la actualidad con el acceso a diferentes redes de datos de forma inalámbrica.

Dentro de las múltiples tecnologías que ofrecen conectividad inalámbrica, aquellas enfocadas al establecimiento de redes inalámbricas de área personal (WPAN por sus siglas en inglés) y área local (WLAN³ por sus siglas en inglés) han alcanzado una gran penetración en aplicaciones de electrónica de consumo y empresarial en los últimos años. Esto se puede constatar en el gran número de dispositivos de uso común equipados con alguna forma de conectividad inalámbrica. Aún y cuando existen diversas tecnologías y estándares que permiten dicha conectividad, los sistemas inalámbricos basados en tecnologías inalámbricas como Bluetooth, DECT⁴ y Wi-Fi prácticamente se han vuelto ubicuos, debido a su gran aceptación tanto el mercado de la electrónica de consumo como en la

¹ WPAN: *Wireless Personal Area Network*.

² Wi-Fi: *Wireless Fidelity*.

³ WLAN: *Wireless Local Area Network*.

⁴ DECT: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*.

electrónica empresarial. Por ejemplo, el uso de Bluetooth y Wi-Fi ha alcanzado tal penetración, que prácticamente cualquier dispositivo móvil (auriculares inalámbricos, laptops, teléfonos inteligentes, etc.) cuenta con al menos una de las dos tecnologías. En el caso del estándar DECT, es el más utilizado en soluciones de telefonía inalámbrica para hogares u oficinas y se ha convertido en un estándar de facto.

Una de las aplicaciones que más ha impulsado el desarrollo de los sistemas de conectividad inalámbrica de corto alcance es la transmisión de audio de manera inalámbrica. Esto propició el surgimiento del estándar DECT, el cual es el estándar de facto utilizado para teléfonos inalámbricos. Del mismo modo, con el surgimiento de la telefonía celular eventualmente se vio la conveniencia de contar con dispositivos manos libres, los cuales permitieran contestar llamadas utilizando un auricular inalámbrico. Esto propició el surgimiento del estándar Bluetooth, ampliamente adoptado por los fabricantes de teléfonos celulares.

Actualmente Bluetooth es el estándar de facto para la transmisión inalámbrica de aplicaciones que requieren tasas de transmisión medianas/bajas, transmisiones punto a punto, consumo de energía moderado, tráfico sensible al retardo y alcance de alrededor de 10m. Bluetooth permite un máximo de hasta 7 conexiones activas por dispositivo maestro, formando una red con topología tipo estrella donde el maestro es el nodo central (Bluetooth 3.0 + HS Specification, 2009). Esta red de 8 dispositivos (1 maestro y 7 esclavos) es conocida como pico-red Bluetooth. Aun y cuando se pueden habilitar hasta 3 enlaces de audio bidireccional por pico-red Bluetooth, en los sistemas de auriculares Bluetooth comunes lo normal es tener únicamente una conexión de audio bidireccional activa por pico-red. Cada pico-red busca mitigar interferencia proveniente de otras pico-redes Bluetooth y/o dispositivos Wi-Fi al implementar un esquema de saltos de frecuencia pseudo-

aleatorios (conocido como FHSS⁵ por sus siglas en inglés) en la banda de 2.4 GHz. Sin embargo, aun contando con el esquema FHSS, el número de pico-redes Bluetooth que pueden estar transmitiendo de forma concurrente estará limitada por la interferencia mutua entre pico-redes y la interferencia causada por otras tecnologías trabajando en la misma banda de 2.4 GHz (por ejemplo Wi-Fi y los hornos de microondas). La interferencia mutua surge debido a que no existe coordinación entre diferentes pico-redes Bluetooth, degradándose la calidad de las conexiones conforme se incrementa el número de usuarios.

En comparación con Bluetooth, DECT permite mayor número de conexiones inalámbricas dentro de un solo sitio (Plantronics Savi Series, 2009). En el caso de DECT se puede tener un total de hasta 12 usuarios por canal, con un alcance de cobertura de hasta 50m en interiores y 300m en exteriores (el cual es mayor que Bluetooth). Considerando que el estándar DECT define la utilización de hasta 10 canales en diferentes bandas de frecuencia, se podría tener un máximo de 120 usuarios trabajando de manera concurrente siempre y cuando las condiciones de interferencia y ruido permitan hacer uso de todos los canales. Una limitación de DECT es que éste estándar está enfocado principalmente a tráfico de voz con calidad telefónica, dejando de lado el audio de alta calidad y la transmisión de datos. Adicionalmente, existen aplicaciones donde se puede requerir contar con más de 120 usuarios de voz transmitiendo concurrentemente en un área común, lo cual no se podría atender con una solución DECT.

Aún y cuando Bluetooth y DECT han sido exitosos para el diseño y despliegue de soluciones que involucran la transmisión de audio bidireccional con calidad telefónica, en la actualidad existen aplicaciones cuyos requerimientos no pueden ser del todo cubiertos por las versiones más recientes de ambos estándares. Un ejemplo es en la transmisión de audio bidireccional de alta calidad, en el cual DECT no ofrece un ancho de banda adecuado y la solución ofrecida por Bluetooth

⁵ FHSS: *Frecuency Hoping Spread Spectrum*

habilita únicamente enlaces unidireccionales mediante el uso de esquemas de compresión de audio avanzados. Otro ejemplo, es en la utilización de dispositivos inalámbricos para la transmisión de audio telefónico en ambientes empresariales donde se tiene una alta densidad de usuarios, como es el caso de los centros de llamadas u oficinas con un alto número de empleados trabajando en un área común. Una propuesta que ha surgido recientemente para cubrir las demandas impuestas por dichas aplicaciones es la utilización de Wi-Fi para la transmisión inalámbrica de audio en auriculares y/o sistemas de manos libres. Cabe recordar que Wi-Fi es el estándar de facto para el establecimiento de redes inalámbricas de área local de alta velocidad (Zhai, Kwon, & Fang, 2004).

A pesar de las ventajas en ancho de banda que ofrece Wi-Fi comparado con Bluetooth, el principal problema que había inhibido su adopción para el desarrollo de auriculares, teléfonos o sistemas de manos libres inalámbricos, es la relativa dificultad que debe enfrentar un usuario común para establecer comunicaciones de par-a-par entre dos dispositivos Wi-Fi, esto comparado con la relativa facilidad con la cual se establecen este tipo de conexiones entre dispositivos Bluetooth. De hecho, para habilitar este tipo de comunicaciones se debe recurrir al modo de operación ad-hoc del estándar IEEE 802.11, en el cual está basado Wi-Fi. Debido a esto, hasta fechas recientes no había una competencia directa entre los estándares Bluetooth y Wi-Fi, ya que se enfocaban a aplicaciones o nichos de mercado diferentes. Sin embargo, con la liberación de las versiones más recientes de ambos estándares (Bluetooth 3.0 y Wi-Fi Direct respectivamente) esto cambió, al ofrecer ambas tecnologías servicios de conectividad y tasas de transmisión aparentemente similares. En el caso de Bluetooth 3.0, para elevar sus tasas de transmisión de datos se hace uso de la capa AMP (“Alternative MAC/PHY”), la cual le permite utilizar la capa física (comúnmente referida como PHY) y la capa de acceso al medio (referida como MAC) de Wi-Fi (Bluetooth 3.0 + HS Specification, 2009). Para el caso de Wi-Fi Direct (WFD), este estándar trabaja de manera similar a Wi-Fi, solo que ahora ofrece al usuario opciones de conectividad

adicionales que buscan facilitar el establecimiento de redes de área personal y conexiones par-a-par entre dispositivos como auriculares inalámbricos y computadoras portátiles (similar a lo que se puede realizar con Bluetooth). En particular, lo que busca WFD es convertir a un nodo común (por ejemplo un teléfono celular, una laptop, etc.) en un punto de acceso inalámbrico (WAP⁶), con la mayoría de funcionalidades, alcances y limitaciones comúnmente encontradas en este tipo de dispositivos. Esto se buscó con el fin de habilitar las comunicaciones par- a- par (P2P) sin necesidad de habilitar el modo ad hoc del estándar IEEE⁷ 802.11 (el cual define las capas PHY y MAC de Wi-Fi) en interfaces de red (comúnmente referidas como NICs) Wi-Fi. Es importante resaltar que similar a previas versiones del estándar, la versión 3.0 de Bluetooth mantiene la limitación de que el número de usuarios activos conectados por dispositivo maestro o coordinador no puede ser mayor a 7. Por otro lado, al utilizar WFD para “convertir” un nodo común en un WAP, no se define un número máximo de dispositivos que pueden estar conectados simultáneamente al nodo habilitado como WAP. Esto implica que el número de dispositivos conectados por pico-red WFD puede ser mucho mayor a los 8 dispositivos conectados por pico-red Bluetooth. Adicionalmente, tal como se demuestra en el Apéndice A, en términos de caudal eficaz máximo teórico Bluetooth ofrece alrededor de la mitad del caudal eficaz máximo teórico ofrecido por Wi-Fi Direct. Por lo tanto, este trabajo de investigación se enfocará en el análisis de la utilización de Wi-Fi Direct para la creación y mantenimiento de conexiones par-a-par y redes de área personal (WPAN's).

Como se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones que ha motivado el desarrollo de las redes inalámbricas de área personal y local es la transmisión de audio de manera inalámbrica. En este contexto, un aplicación de particular interés donde se prevé se pueda utilizar Wi-Fi Direct es en la transmisión de audio, tanto

⁶ WAP: *Wireless Access Point*.

⁷ IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

de alta calidad como de calidad telefónica de manera bidireccional, lo cual no es cubierto ni por DECT ni por Bluetooth en sus versiones actuales. Esto implica que el audio será digitalizado, siendo la transmisión de este tipo de datos altamente sensible a retardos. La razón de buscar este tipo de soluciones de audio inalámbrico basadas en WFD, surge de las limitaciones en ancho de banda y número de usuarios soportadas por los estándares DECT y Bluetooth. Así, es necesario buscar nuevas soluciones tecnológicas para aplicaciones donde se tenga una alta densidad de usuarios concurrentes con enlaces de audio bidireccional habilitados, como es el caso de los centros de llamadas u oficinas con un alto número de empleados (Figura 1).



Figura 1. Escenario con un alto numero de nodos en un área común.⁸

En particular, el escenario de aplicación que se considera en este trabajo de investigación involucra el establecimiento de una alta densidad de enlaces inalámbricos dentro de un área común de despliegue con dimensiones medianas, los cuales se utilizarán principalmente para la transmisión concurrente de tráfico sensible al retardo. Este tipo de escenarios es común en centros de llamadas u

⁸ Tomada de <http://www.tucumanoticias.com.ar/noticias/upload/upload/call-center.jpg>

oficinas, en los cuales pueden coexistir varios usuarios transmitiendo audio bidireccional de forma concurrente. Es importante mencionar que no se espera que los usuarios transmitan hacia un nodo central o punto de acceso inalámbrico Wi-Fi siguiendo una topología estrella (como es comúnmente utilizado para el acceso a la Internet), ya que los enlaces de audio comúnmente son establecidos directamente con otro tipo de dispositivos como terminales telefónicas, laptops o teléfonos inteligentes, definiendo de esta manera enlaces par-a-par. Por lo tanto, el escenario analizado en esta tesis es similar al mostrado en la Figura 1, en el cual se considera que un auricular (con audífonos y micrófono) está conectado y transmitiendo audio bidireccional de manera inalámbrica con una laptop u otro dispositivo habilitado con una NIC⁹ WFD.

Al plantear el escenario mostrado en la Figura 1, este proyecto de investigación busca evaluar formalmente el desempeño de la tecnología Wi-Fi Direct para la transmisión de flujos de información altamente sensibles a retardos en ambientes con alta densidad de usuarios, determinando las ventajas y desventajas ofrecidas por dicha tecnología para este tipo de aplicaciones. Los resultados obtenidos se utilizarán para generar recomendaciones para el diseño de redes, dispositivos y aplicaciones basadas en el estándar Wi-Fi Direct.

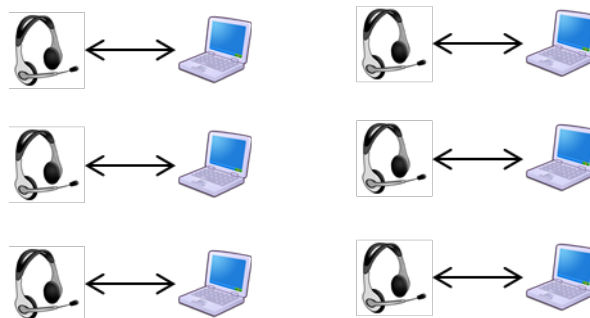


Figura 2. Escenario de aplicación con alta densidad de conexiones inalámbricas par-a-par (P2P).

⁹ NIC: *Network Interface Card*.

1.2 Planteamiento del problema

Tal como se plateó en la sección anterior, todavía existen diversos retos a resolver en el área de la transmisión de audio sobre redes inalámbricas de corto alcance (como serían las redes WPAN y WLAN establecidas por nodos equipados con tecnología DECT, Bluetooth o Wi-Fi). Por lo tanto existe la necesidad de evaluar el alcance de tecnologías nuevas como Wi-Fi Direct para aplicaciones que involucren la transmisión inalámbrica de audio. Son varios los trabajos de investigación que tratan con la transmisión de audio inalámbrico sobre WPANs y WLANs (Wan, Salil S., & Deep, 2005), (Cai, Shen, & Mark, 2006), (Holtmann, July 23rd-36th, 2008), (Stoekigt & Vu, 2009). En particular, dichos trabajos se han enfocado principalmente en el análisis de las prestaciones que ofrecen Bluetooth y Wi-Fi para este tipo de aplicaciones, debido en gran parte a que ambas tecnologías se han convertido prácticamente en estándares de facto para la transmisión inalámbrica de datos a corto alcance (1 a 100 mts). En el caso de DECT los trabajos recientes reportados son pocos, debido a que es una tecnología bien estudiada con un nicho de mercado bien definido: la transmisión de audio bidireccional de calidad telefónica en hogares y oficinas. Las mejoras que de DECT están más enfocadas en buscar nuevas bandas de frecuencia de operación para mitigar interferencia, pero el número máximo de usuarios de voz por canal no ha aumentado de los 12 que se tenían inicialmente. (Momtahan & Hashemi, 2001)

El análisis del desempeño o mejora de la transmisión de audio inalámbricamente es un tema interesante, que ha tomado relevancia en los últimos años, incitando a la realización de trabajos de investigación basados en soluciones Bluetooth (Hermann, Brennan, Sheikhzadeh, & Cornu, 2004), (Wan, Salil S., & Deep, 2005), (Holtmann, July 23rd-36th, 2008), (Singh, Messiter, & Tanyeri, 2005). En (Hermann, Brennan, Sheikhzadeh, & Cornu, 2004) se propone la utilización del códec de subbandas (*subband audio codec*) para la transmisión de audio de alta calidad utilizando Bluetooth. La transmisión de audio sobre una red Bluetooth utilizando el protocolo IP es analizado en (Wan, Salil S., & Deep, 2005). El autor

de (Holtmann, July 23rd-36th, 2008) hacen una propuesta para la transmisión de un flujo continuo de audio a múltiples usuarios ("*audio streaming*") sobre Bluetooth. Otro estudio interesante es el realizado en (Singh, Messiter, & Tanyeri, 2005), donde se propone la transmisión de flujos continuos de audio codificado en el formato MP3 hacia múltiples usuarios sobre Bluetooth (la arquitectura propuesta solo logro comprobarse sobre un enlace punto a punto).

En comparación con Wi-Fi, Bluetooth es más eficiente en costo y consumo de potencia, lo que ayuda a su miniaturización y fácil implementación en dispositivos móviles ligeros. Sin embargo, Wi-Fi provee el caudal eficaz para transmisión robusta de audio/vídeo a través de enlaces inalámbricos, aunque plantea muchos retos, como son las variaciones de ancho de banda, la pérdida de datos, y la heterogeneidad de los receptores (Schaar, Krishnamachari, Choi, & Xu, 2003). Aún con las ventajas en ancho de banda que ofrece Wi-Fi comparado con Bluetooth, el principal problema que había inhibido su adopción para el desarrollo de auriculares, teléfonos o sistemas de manos libres inalámbricos, era la relativa dificultad que debe enfrentar un usuario común para establecer comunicaciones de par-a-par entre dos dispositivos Wi-Fi. Esto se debe a que para establecer este tipo de conexiones se debe de habilitar el modo ad-hoc del estándar IEEE 802.11 (es cual es utilizado por Wi-Fi en sus capas PHY y MAC), lo cual conlleva una dificultad que no es sencilla de resolver para el usuario común (Chaudet, Dhoutaut, & Gu'erin Lassous, 2004). Dado que el estándar Wi-Fi Direct se enfoca en solucionar dicha dificultad, se vuelve relevante revisar el trabajo previo que se ha realizado respecto a la transmisión de audio sobre enlaces Wi-Fi tradicionales, debido a que Wi-Fi Direct utiliza la misma PHY y MAC que Wi-Fi tradicional.

Debido a la dificultad que implica trabajar con el modo ad-hoc del estándar IEEE 802.11, la mayoría de los trabajos que tratan con la transmisión de audio sobre Wi-Fi o IEEE 802.11 como (Cai, Shen, & Mark, 2006), (Cai, Ling, Shen, & Mark, 2007), (Stoekigt & Vu, 2009) y (Stoekigt & Vu, 2010), asumen una topología

estrella en la que se cuenta con un punto de acceso inalámbrico (WAP) al cual están conectados todos los usuarios (esta topología se conoce como “*Basic Service Set*” – BSS en el estándar IEEE 802.11) como se muestra en Figura 3. Estos trabajos desarrollan diversos modelos matemáticos de la capa de acceso al medio, con los cuales se demuestra que el punto de acceso inalámbrico constituye un cuello de botella que limita el número máximo de llamadas activas de voz que puede soportar la red. Por lo tanto una limitante de la topología analizada en estos trabajos, es que para varias aplicaciones importantes de transmisión de audio el conectarse a través de un WAP será altamente ineficiente (Figura 3). Por ejemplo, si se quiere establecer una conexión inalámbrica de audio entre una computadora y un auricular sería necesario comunicarse de forma indirecta a través del WAP, lo cual degradaría el desempeño de toda la red al ser el WAP el principal cuello de botella. Es importante hacer notar que el escenario analizado en estos trabajos es diferente al escenario analizado en esta tesis, el cual considera el establecimiento varios enlaces inalámbricos bidireccionales entre pares de nodos sin la necesidad contar con un WAP.

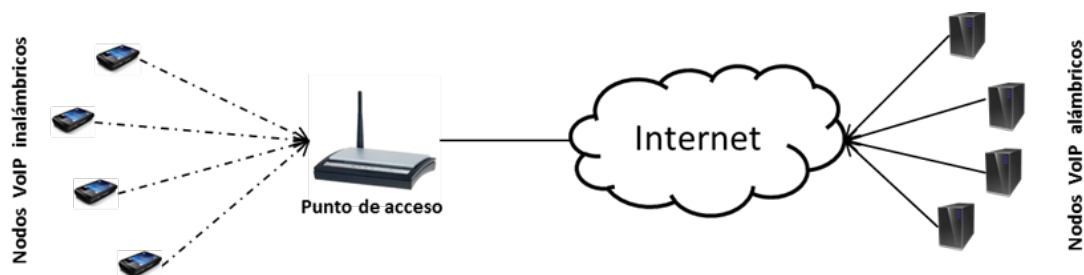


Figura 3. Topología de red VoIP, utilizada en (Stoeckigt & Vu, 2009).

Es por esto y debido a las ventajas que la tecnología WFD parece ofrecer para la creación sencilla de redes de área personal así como de enlaces par-a-par, que ha despertado el interés de utilizar dicha tecnología en el diseño de dispositivos para la transmisión de audio inalámbrico bidireccional en enlaces par-a-par (por ejemplo auriculares, teléfonos y sistemas de manos libres inalámbricos). Debido a lo anterior, ya se obtuvieron resultados importantes en un trabajo de investigación donde trabajaron de manera conjunta CICESE y PLAMEX S.A. de C.V, el cual

trata sobre la densidad máxima de llamadas que se pueden lograr en un área donde se encuentra una gran cantidad de usuarios (CICESE/Plantronics, 2010). Los resultados de ese trabajo fueron importantes en el sentido de que permitieron determinar que valía la pena investigar más a fondo la utilización de WFD para la transmisión de audio bidireccional. Sin embargo, y a pesar de la relevancia de los resultados reportados, quedo pendiente realizar un análisis más profundo de la pertinencia de WFD para este tipo de aplicaciones. En particular es relevante encontrar el número máximo de conexiones de audio bidireccional par-a-par que se pueden soportar cuando se tiene una alta densidad de usuarios compartiendo el mismo medio inalámbrico. Por lo tanto, se vuelve importante analizar el desempeño del mecanismo de acceso al medio utilizado en Wi-Fi y Wi-Fi Direct, ya que el mismo se degrada conforme la cantidad de usuarios se incrementa. En particular, el retardo y la pérdida de paquetes se incrementan conforme se tienen más usuarios en la red, (Zhai, Kwon, & Fang, 2004). Para aplicaciones de transmisión de tráfico sensible al retardo, es muy importante que estos parámetros se mantengan dentro de cotas de operación aceptables.

Basados en la discusión anterior podemos concluir que es necesario caracterizar el tiempo promedio de servicio de la capa MAC, la probabilidad de colisión y el punto de saturación que se tendrá en un nodo WFD cuando se considera un el escenario de aplicación previamente planteado. Esto con el fin de encontrar en número de máximo de usuarios que se pueden atender y generar guías de diseño para el desarrollo de dispositivos y soluciones que hagan el mejor uso posible de la tecnología WFD. Es importante remarcar que el escenario analizado en esta tesis, en donde los enlaces son par-a-par (P2P) con transmisiones de audio bidireccional concurrente, no ha sido reportado en la literatura encontrada hasta ahora.

1.3 Objetivo general

El objetivo de esta tesis es analizar el desempeño de una red inalámbrica de área personal creada con la tecnología Wi-Fi Direct, en áreas donde se tiene una alta densidad de usuarios transmitiendo audio bidireccional o tráfico sensible al retardo de forma concurrente. En el escenario a evaluar, los nodos se encontrarán en un área común transmitiendo en la misma banda de frecuencia.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Estudiar cómo trabaja Wi-Fi Direct principalmente en sus capas inferiores (MAC y PHY).
2. Obtener una modelación matemática de la capa MAC de Wi-Fi Direct mediante cadenas de Markov, para ser utilizado como herramienta para obtener las estadísticas necesarias para la evaluación del sistema.
3. Estudiar los codecs de audio comúnmente utilizados para transmisión de voz, esto con el fin de determinar características como tasa de generación de datos, empaquetamiento, etc.
4. Evaluar analíticamente el desempeño del escenario con los nodos WFD transmitiendo audio inalámbrico bidireccional de manera concurrente.
5. Desarrollar una cama de pruebas para el escenario propuesto utilizando el simulador NS-2, esto con el fin de comparar los resultados obtenidos analíticamente.
6. Basados en los resultados analíticos y simulados, determinar el número máximo de sesiones de audio bidireccional en un escenario con una alta densidad de usuarios activos transmitiendo de manera concurrente.
7. Formular recomendaciones de diseño basadas en los resultados obtenidos.

1.4 Justificación

La justificación de este trabajo de investigación surge de la necesidad de evaluar las limitaciones y alcances ofrecidos por la tecnología Wi-Fi Direct, la cual fue recientemente liberada. En particular se analiza el desempeño de dicha tecnología en lo que se cree será una de las principales aplicaciones de la misma: la transmisión de audio bidireccional con enlaces punto-a-punto. Realizar este análisis permitirá determinar el número máximo de usuarios que se puede tener concurrentemente en un área común, sin que se degrade significativamente la calidad de la transmisión de audio. Es importante remarcar que, con el mejor de nuestro conocimiento, el escenario analizado en esta tesis en donde los enlaces son par-a-par (P2P) con transmisiones de audio bidireccional concurrente, no ha sido reportado en la literatura encontrada hasta ahora.

1.5 Metodología de la tesis

La metodología que se siguió para la elaboración de este trabajo de tesis es la mostrada a continuación:

- ❖ **Estudio bibliográfico de investigaciones previas sobre el tema.** Se verificaron los trabajos referentes a tecnologías como lo son Bluetooth, DECT y Wi-Fi. Además de revisar lo referente a transmisión de audio bajo las tecnologías antes mencionadas.
- ❖ **Estudio bibliográfico de los estándares a utilizar.** En el caso de este trabajo se revisaron a fondo los estándares IEEE 802.11, Wi-Fi y Wi-Fi Direct.
- ❖ **Planteamiento del escenario de aplicación y métricas a utilizar.** Se definió la manera en que se ubicarían los nodos para la simulación, y los parámetros que se utilizarían para el modelo matemático y la simulación. Se determinaron las métricas más importantes a analizar para lograr los objetivos propuestos para este trabajo de tesis.

- ❖ **Desarrollo del modelo matemático de la capa MAC de Wi-Fi Direct.** Siguiendo la metodología previamente reportada en, (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) para el análisis de la capa MAC del estándar IEEE 802.11b, se procedió a desarrollar en este trabajo de tesis un modelo matemático para la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct.
- ❖ **Desarrollo de la cama de pruebas en NS-2.** Se realizó la programación necesaria para tener una cama de pruebas del escenario de aplicación en el simulador NS-2. Asimismo, se realizó la programación necesaria para la recolección y el análisis de las métricas de interés.
- ❖ **Obtención y análisis de resultados.** Se obtuvieron diversas métricas de desempeño para el escenario de aplicación por medio del modelo matemático y la cama de pruebas simulada. Basados en estos resultados, se pudo determinar el número máximo de usuarios soportados en el escenario de aplicación planteados. Adicionalmente, se obtuvieron métricas de desempeño en términos de tiempo promedio de servicio de la capa MAC, probabilidad de colisión en el medio y punto de saturación del sistema.
- ❖ **Conclusiones y recomendaciones.** Después de realizar el análisis de los resultados obtenidos se obtuvieron diversas conclusiones respecto a la utilización de la tecnología WFD en el escenario de aplicación. Basados en estas conclusiones se generaron recomendaciones para utilizar de una mejor forma las ventajas ofrecidas por la tecnología WFD.

1.6 Organización de la tesis

El documento que se presenta está constituido por 7 capítulos. En el Capítulo 1 se contextualizó el problema que se desea resolver, mostrando una breve introducción al trabajo de investigación, los antecedentes, motivación y objetivos del trabajo de tesis. Para el modelado de la capa MAC primero es necesario conocer su funcionamiento, por lo tanto el Capítulo 2 trata sobre el funcionamiento de la

capa PHY y MAC de IEEE 802.11, lo que permitirá más adelante realizar el modelado de la misma. En el capítulo 3 se introduce a la tecnología WFD, definiendo la forma en que se propone formar los enlaces par-a-par y remarcando las diferencias entre WFD y Wi-Fi tradicional. El análisis matemático de la capa MAC de Wi-Fi Direct se presenta en el Capítulo 4. En el Capítulo 5 se introduce el escenario de evaluación, la cama de pruebas simulada y todas las consideraciones que se hicieron para la obtención de resultados. Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se reportan en el Capítulo 6. Por último las conclusiones y el trabajo futuro que surgen de esta tesis son descritas en el Capítulo 7.

Capítulo 2. Capa MAC y PHY de Wi-Fi Direct

Como se mencionó anteriormente Wi-Fi Direct utiliza para la transmisión de datos lo marcado por el estándar IEEE 802.11. En el estándar de la IEEE 802.11 se define la capa de acceso al medio (*MAC*) y la capa (*PHY*) entre otros aspectos para un correcto funcionamiento e interoperabilidad de las WLAN's (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007). En este capítulo se presenta el funcionamiento de la capa MAC, ya que es uno de los objetivos de investigación de este trabajo de tesis, realizar un modelado matemático para esta capa.

2.1 Arquitectura de 802.11

En el estándar 802.11, se considera la existencia de dos tipos de dispositivos dentro de la WLAN:

- Estaciones cliente inalámbrico (*STA*).
- Puntos de acceso inalámbrico (*WAP*).



Figura 4. Dispositivos STA y WAP considerados en el estándar IEEE 802.11.

Las STA consisten en dispositivos de cómputo (*PC's, laptops, netbooks, teléfonos inteligentes*, entre otras) equipados con tarjetas de red inalámbricas que funcionan con el estándar IEEE 802.11.

El punto de acceso inalámbrico (*WAP*) es un dispositivo con la funcionalidad de “puente” como se muestra en la Figura 4. El *WAP* consiste en un transceptor *Wi-Fi*, una tarjeta de red Ethernet y software capa 2 del modelo *OSI* (capa de enlace de datos) para las funciones de interconexión entre los dos tipos de redes.

El alcance típico de las transmisiones de esta tecnología es de alrededor de 100 metros dependiendo de las obstrucciones que encuentre la señal.

Existen en 802.11 tres modos básicos de operación, los cuales son:

- Modo ad-hoc denominado *IBSS* (*Independent Basic Service Set*).
- Modo infraestructura denominado *BSS* (*Basic Service Set*).
- Modo malla, aun en proceso 802.11s.

Características del modo IBSS.

- Modo de operación más básico dado que solo involucra dos o más *STA*'s comunicadas directamente.
- No requiere la presencia de un *WAP* para formar la red, ni la conexión a la red cableada.
- En este modo de operación se pueden utilizar *WAP*'s como repetidores sólo para extender el alcance de la red ad-hoc.

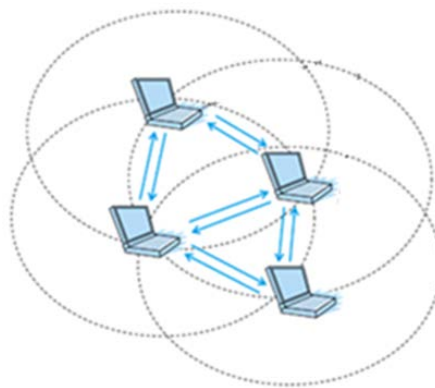


Figura 5. Modo ad-hoc (*IBSS*).

Características del modo BSS.

- En este modo de operación es necesaria la presencia de un *WAP*, ya que ahora las *STA*'s se comunican a través del *WAP*, no directamente.
- La afiliación de las *STA*'s al *BSS* es dinámica (las estaciones se encienden, se apagan, entran al alcance o salen del alcance del *WAP*).
- Para acceder a todos los servicios del modo infraestructura, una *STA* primero debe "asociarse" a través del punto de acceso inalámbrico que otorga las credenciales necesarias.
- Se pueden interconectar o "unir" dos *BSS*, esto puede ser de forma cableada o inalámbrica y se denomina *ESS* (*Extended Service Set*) mostrado en la Figura 6b.

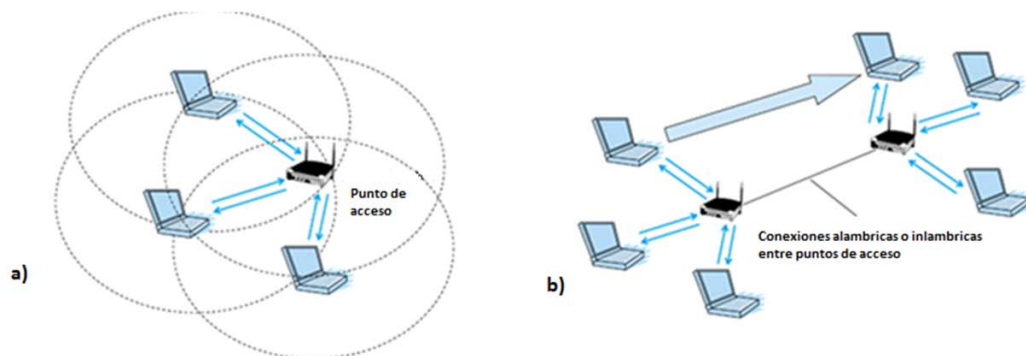


Figura 6. a) Modo de operación infraestructura (*BSS*) y b) extendido (*ESS*).

2.2 Capa Física (PHY)

Es la encargada de la transmisión de los datos así como de proveer a la capa MAC las condiciones del canal inalámbrico, con esto se le indicará a la capa MAC cuando inicia una transmisión y conocer si ésta fue exitosa o no. Dentro de la capa PHY existen diversas funciones para realizar las tareas encomendadas a ella, pero no son parte de ésta investigación, en esta tesis el enfoque es modelar la capa MAC bajo la suposición de ausencia de errores en la capa PHY. Esto no significa que no aporte datos al modelo, ya que los tiempos de transmisión exitosa

y no exitosa, están regidos por varios parámetros especificados en la capa PHY dependientes de la versión de 802.11 que se utilice. En la Tabla 1 se muestran los parámetros para las diferentes versiones del estándar IEEE 802.11.

Tabla 1. Comparativa de la capa PHY de las distintas versiones de IEEE 802.11.

| | 802.11b | 802.11a | 802.11g | 802.11n |
|------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| Tecnología en capa PHY | DSSS/CCK | OFDM | OFDM DSSS/CCK | SDM/OFDM |
| Tasa de datos [Mbps] | 1, 2, 5.5 y 11 | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 | 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 | 6 – 600 |
| Banda de frecuencia | 2.4 GHz | 5 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz y 5 GHz |
| Espaciado de canal | 25 MHz | 20 MHz | 25 MHz | 20 MHz y 40 MHz |

Además de lo mostrado en la Tabla 1, existen otros parámetros que especifica la capa física, (Tabla 2) y que se utilizarán posteriormente al realizar el modelado de la capa MAC, dichos valores corresponden a la versión de IEEE 802.11g que es la utilizada en WFD.

Tabla 2. Parámetros capa PHY 802.11g.

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Longitud de preámbulo | 20µs |
| Longitud encabezado PLCP | 4µs |
| Slot Time (*) | 20µs |
| Slot Time | 9 µs |
| SIFS Time | 10 µs |
| DIFS Time (*) | 50 µs |
| DIFS Time | 28 µs |
| CWmin (*) – CWmax | 31 - 1023 |
| CWmin – CWmax | 15 - 1023 |
| Limite de retransmisiones corto | 7 |
| Limite de retransmisiones largo | 4 |

(*) Modo compatibilidad 802.11 b/g

2.3 Protocolo MAC de 802.11 y sus funciones de coordinación

La capa de control de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.11 está constituido por varias funciones de coordinación, estas son: la Función de Coordinación Distribuida (DCF), la Función de Coordinación Puntual (PCF) y la Función de Coordinación Híbrida (HCF) introducida en el estándar 802.11e. Dentro de la función HCF se encuentran las funciones que ofrecen calidad de servicio (QoS), las cuales son: Acceso de Canal Distribuido Mejorado (EDCA), equivalente a la función DCF; y el Acceso Controlado del Canal HFC (HCCA), equivalente a la función PCF. Para este estudio se tomará en cuenta la función DCF para los dispositivos que no ofrecen calidad de servicio, y su contraparte con calidad de servicio EDCA; la elección radica en que estas son las funciones utilizadas en todos los dispositivos físicos que utilizan Wi-Fi. Es importante mencionar que WFD no cambia el modo de acceder al medio ni las tasas de transmisión ya existentes en Wi-Fi porque utiliza las capas MAC y PHY del estándar IEEE 802.11g.

En la Figura 7 se muestra la arquitectura de la capa de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.11, nótese que para las STA's que no implementan QoS, la Función de Coordinación Híbrida (HCF) no esta presente. En el caso de la implementación en las STA's de QoS, tanto la función DCF como la HCF deben estar presentes. El caso de la función PCF es opcional en todas las STA's (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007).

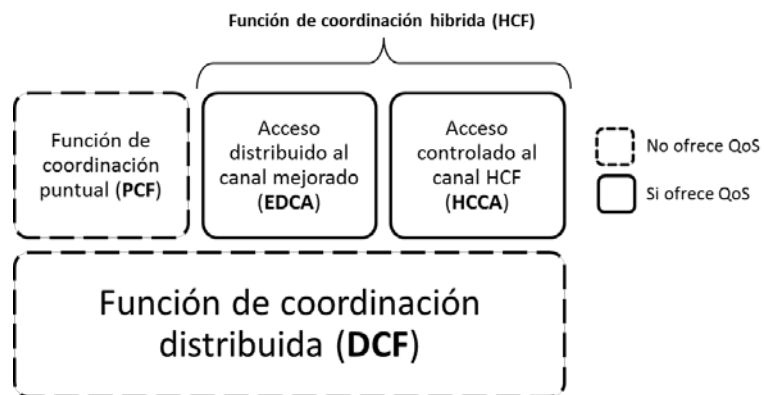


Figura 7. Arquitectura de la capa MAC del estándar IEEE 802.11.

2.4 Función de Coordinación Distribuida (DCF)

Es el método fundamental de acceso al medio del estándar IEEE 802.11, y está basado en el protocolo de control de acceso conocido como Acceso Múltiple por Sensado de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA, por sus siglas en inglés, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

En la versión de CSMA/CA que utiliza IEEE 802.11, si una STA desea transmitir primero debe detectar si el medio inalámbrico está disponible, es decir, verificar que no haya ninguna otra STA transmitiendo. Si se determinó que el medio no está ocupado entonces la transmisión procede. En caso de que se deseen varias transmisiones contiguas el mecanismo de CSMA/CA indica que se debe esperar un espacio de tiempo entre transmisiones, esto con la finalidad de que una STA no se “apodere” del medio, y de oportunidad a las demás, si las condiciones se cumplen de realizar su transmisión.

En caso de que se determine que el medio está ocupado se debe esperar hasta que la transmisión actual termine. Después de esperar dicho tiempo o antes de intentar transmitir de nuevo después de una transmisión exitosa, la STA debe elegir un intervalo aleatorio de desistimiento (*backoff*), este intervalo comprende inicialmente entre $[0, CW_{min}]$, donde CW_{min} varía dependiendo de la versión del estándar IEEE 802.11 que se utilice, para el caso de IEEE 802.11g sin compatibilidad con IEEE 802.11b, el valor de CW_{min} es de 15. Los intervalos están divididos en ranuras denominadas ranuras de tiempo, que para el caso de que sólo se trabaje con el estándar IEEE 802.11g sin compatibilidad IEEE 802.11b, el valor de la ranura de tiempo es de $9 \mu s$.

Entonces una vez que una STA entra en la etapa de desistimiento “escucha” el medio, si determina que el medio está libre, el contador disminuye en uno, después se espera una ranura de tiempo y vuelve a determinar el estado del medio, en caso de estar libre de nuevo el contador se reduce en uno. En caso que

se determine que el medio está ocupado, el contador de desistimiento se detendrá y permanecerá en ese valor por el tiempo que dura la transmisión en el medio ya sea exitosa o fallida.

Dentro de la función DCF existen dos métodos para determinar el estado del medio (llamado *Carrier Sense* ó *CS*), los cuales son el físico (básico) o virtual (RTS/CTS). Estos se explicarán de manera más detallada en las siguientes secciones.

2.4.1 Mecanismo DCF básico

La diferencia entre los mecanismos de la función DCF radica en la forma en que se reserva el medio y como se define si la transmisión es o no exitosa. Bajo el mecanismo básico, una vez que se tienen los datos a transmitir y el contador de desistimiento llegue a cero se inicia la transmisión, terminada la transmisión de los datos se debe esperar un tiempo de inter trama corto (SIFS) y esperar una trama de reconocimiento (ACK). Si la trama ACK es recibida por el transmisor entonces la transmisión se determina como exitosa, en caso de no recibir dicha trama se considera que hubo una colisión en el medio y el intervalo de desistimiento duplica su valor. El proceso de duplicación del intervalo de desistimiento continúa hasta un valor máximo de intervalo que depende de la versión de 802.11 que se utilice, en el caso de IEEE 802.11g hasta un valor de 1024.

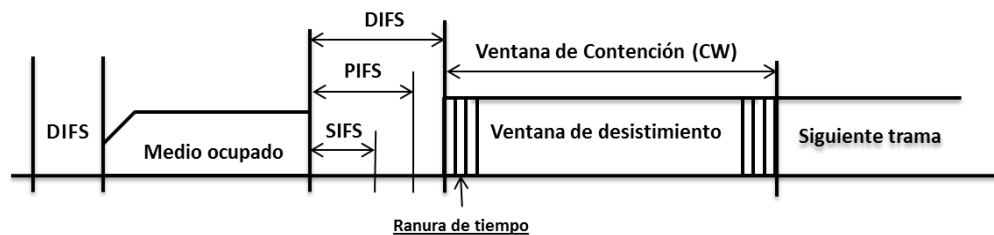


Figura 8. Mecanismo de acceso DCF Básico.

2.4.2 Mecanismo DCF protegido RTS/CTS

Este mecanismo también es denominado CS virtual, y se utiliza para mitigar el problema del “nodo oculto”. Este problema se presenta cuando dos o más estaciones quieren transmitir hacia la misma estación, pero en este caso los transmisores no captan las transmisiones de las demás estaciones que intentan transmitir hacia el mismo receptor. Por lo tanto, el mecanismo CSMA/CA pierde la capacidad de evitar colisiones y estas ocurrirán con más frecuencia.

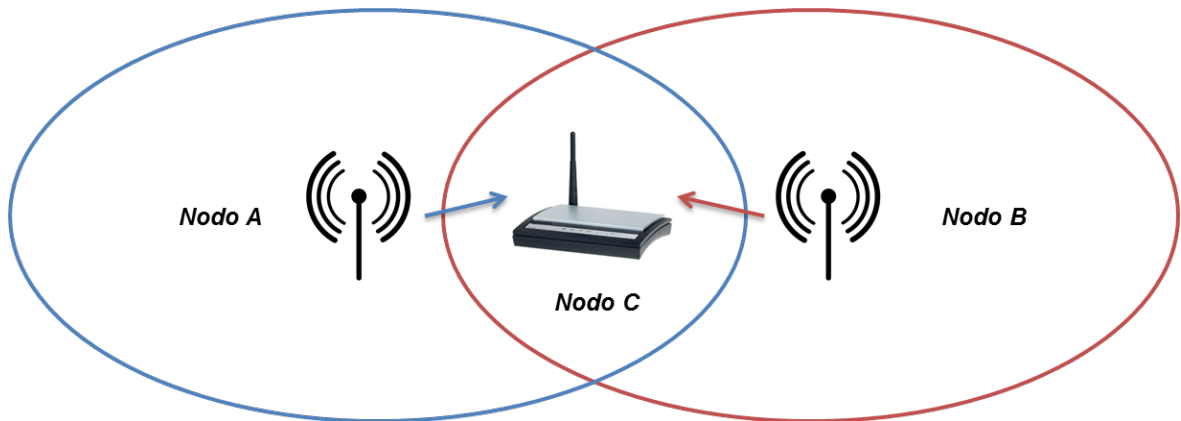


Figura 9. Nodo Oculto en Wi-Fi.

Para explicar de mejor manera el problema del “nodo oculto”, se utiliza la Figura 9 para ejemplificar el problema. En este caso, los nodos A y B desean transmitir al nodo C, pero existe el problema de que el nodo A y el nodo B no pueden detectar las transmisiones entre ellos pero el nodo C si puede escuchar las transmisiones de ambos. Entonces si los nodos A y B desean transmitir al nodo C, en ese momento existe una alta probabilidad de que existan demasiadas colisiones que ni el nodo A ni el nodo B pueden comunicarse con el nodo C.

Esto se debe al hecho de que los nodos A y B al no escuchar las transmisiones entre ellos, siempre van a determinar que el medio está disponible e intentaran enviar los datos, pero lo que sucederá en el nodo C es que éste desechará los paquetes provenientes de cualesquier nodo que haya demorado más en intentar transmitir.

Para resolver este problema existe el denominado mecanismo protegido *RTS/CTS* o *CS* virtual (Figura 10), en este caso cuando una STA cumpla con las condiciones que le permitan iniciar una transmisión: que su contador de desistimiento esté en cero y el medio se determine disponible, entonces el transmisor enviará una trama *RTS*¹⁰. La trama *RTS* contiene la dirección del destinatario así como el tiempo que durará la transmisión del paquete, entonces el transmisor espera recibir una trama *CTS*¹¹ del receptor, esta trama contiene la dirección del transmisor y el tiempo faltante para la transmisión del paquete (ya sin considerar el tiempo que tardó en transmitirse la trama *RTS*).

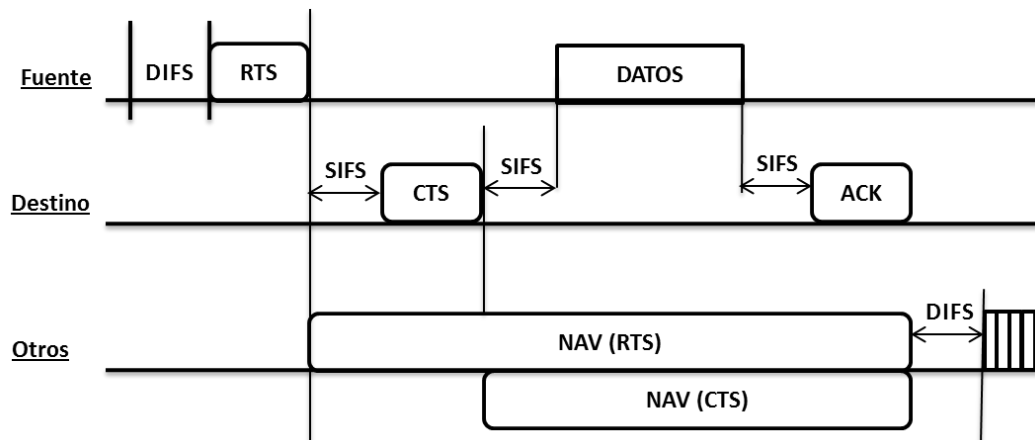


Figura 10. Mecanismo de acceso DCF protegido RTS/CTS y NAV.

Los demás dispositivos no involucrados en la transmisión, podrán determinar el tiempo que el medio estará ocupado utilizando el denominado vector de asignación de red (*NAV*¹², por sus siglas en inglés). El *NAV* concede a las demás estaciones la posibilidad de determinar que el medio estará ocupado (Figura 10). El *NAV* también sirve para ahorrar energía, ya que una vez que una STA sabe que el medio estará ocupado por un determinado tiempo, puede apagar o disminuir su

¹⁰ RTS: *Request-To-Send*

¹¹ CTS: *Clear-To-Send*.

¹² NAV: *Network Allocation Vector*.

potencia hasta que sea necesario determinar de nuevo si el medio está o no ocupado.

Aplicando el mecanismo de acceso de la Figura 10, y volviendo al ejemplo presentado en la Figura 9. Si el nodo *A* desea transmitir al nodo *C* utilizando *RTS/CTS*, entonces las demás estaciones en el alcance del nodo *A* recibirán la trama *RTS* donde se especifica el tiempo que durará la transmisión. Al recibir dicha trama, el nodo *C* responderá con una trama *CTS*, la cual será detectada por los dispositivos dentro del alcance del nodo *C* (donde también se encuentra el nodo *B*), además la trama contiene el tiempo que el nodo *C* estará ocupado recibiendo los datos del nodo *A*. De esta forma el nodo *B* conocerá el tiempo que tiene que detener su transmisión esperando que la transmisión entre el nodo *A* y *C* termine.

2.5 Acceso de canal distribuido mejorado (EDCA)

Con el paso del tiempo las aplicaciones multimedia han cobrado mayor importancia, por tanto, la IEEE se dio a la tarea de proveer a su estándar de comunicación inalámbrica más popular (IEEE 802.11) la capacidad de manejar este tipo de tráfico de una mejor manera. Así surge el estándar IEEE 802.11e que tiene la capacidad de ofrecer calidad de servicio (QoS) y soporte multimedia. Para cumplir con su objetivo IEEE 802.11e introduce un nuevo elemento a la capa MAC llamado Función de Coordinación Híbrida (HCF) que cuenta con dos tipos de acceso: EDCA, que es equivalente a DCF y HCCA, equivalente a PCF.

Anteriormente se analizó el comportamiento de los mecanismo para determinar el estado del medio: Básico y RTS-CTS trabajando bajo la Función de Coordinación Distribuida (DCF). En el caso de EDCA se siguen utilizando dichos mecanismos (Básico y RTS-CTS), con dos variantes, los tiempos antes de la etapa de desistimiento y tamaño de la ventana de contención para distintos tipos de tráfico.

Por tanto, se definen cuatro categorías de datos (Ordenadas de menor a mayor prioridad):

Background (AC_BK); Best Effort (AC_BE); Video (AC_VI); Voice (AC_VO).

La primer variante que se introduce en los mecanismos de acceso al medio de EDCA, es el cambio del tiempo DIFS (DCF Inter Frame Space), por el de Arbitraje de Espacio Entre Tramas AIFS[AC] (Arbitration Inter Frame Spacing [Access Class]) el cual depende del tipo de datos que se desee transportar, dicho tiempo se calcula con la siguiente expresión (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007):

$$AIFS[AC] = AIFSN[AC] \times SlotTime + SIFSTime$$

donde:

AIFSN[AC], denominado AIFS number, dependiente de la clase.

SlotTime, duración slot de tiempo depende de la versión de 802.11.

SIFSTime, duración de un Short Inter Frame Space (SIFS).

Además de los tiempos entre tramas, también se modifica el tamaño de la ventana de contención (CW), modificando los valores mínimos y máximos de la misma dependiendo del tipo de datos. De esta manera al modificar los valores de CW, también se modifica el número de etapas en el proceso de desistimiento (denominado m).

De esta manera al tráfico más prioritario se le otorgan ventanas más pequeñas y menos etapas, para que tome menos tiempo su transmisión (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros EDCA en 802.11e.

| AC | CWmin | CWmax | AIFSN |
|------------|------------------|------------------|-------|
| AC_BK | aCWmin | aCWmax | 7 |
| AC_BE | aCWmin | aCWmax | 3 |
| AC_VI | $(aCWmin+1)/2-1$ | aCWmin | 2 |
| AC_VO | $(aCWmin+1)/4-1$ | $(aCWmin+1)/2-1$ | 2 |
| Legacy DCF | aCWmin | aCWmax | 2 |

Para el estándar IEEE 802.11g sin compatibilidad con IEEE 802.11b los parámetros EDCA se muestran en la Tabla 4. Cabe resaltar que estos parámetros son los mismos utilizados por Wi-Fi Direct.

Tabla 4. Parámetros EDCA para IEEE 802.11g sin compatibilidad.

| AC | CWmin | CWmax | AIFSN | AIFS[AC] | m |
|------------|-------|-------|-------|------------|---|
| AC_BK | 15 | 1023 | 7 | 73 μ s | 6 |
| AC_BE | 15 | 1023 | 3 | 37 μ s | 6 |
| AC_VI | 7 | 15 | 2 | 28 μ s | 1 |
| AC_VO | 3 | 7 | 2 | 28 μ s | 1 |
| Legacy DCF | 15 | 1023 | 2 | 28 μ s | 6 |

2.6 Procedimiento de desistimiento (*backoff*)

A continuación se explica de manera más detallada el procedimiento de desistimiento de la capa MAC de IEEE 802.11. El conocer a fondo este proceso, es lo que permitirá más adelante realizar el modelado matemático de la capa MAC de Wi-Fi Direct, necesario para la obtención de las métricas de desempeño.

En el mecanismo CSMA/CA del estándar IEEE 802.11, si se determina que el medio está ocupado, se invoca el procedimiento de desistimiento por cualquiera de los dos mecanismos (básico ó *RTS/CTS*), así también se invoca cuando un paquete enviado experimenta una colisión o si se desean enviar varios paquetes de forma consecutiva. Al inicio del procedimiento de desistimiento, la STA debe establecer el contador de desistimiento a un tiempo de contador aleatorio, este se determina según el estándar (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007) como:

$$\text{Tiempo de backoff} = \text{Random}() \times a\text{SlotTime}$$

donde:

Random(): valor pseudo-aleatorio obtenido de una distribución uniforme sobre el intervalo [0 , CW].

El valor de CW debe estar dentro del rango de valores característicos que se estipulan en la capa PHY, $aCW_{min} \leq CW \leq aCW_{max}$.

aSlotTime: valor correspondiente al especificado en la capa PHY.

Una vez iniciado el proceso de desistimiento la STA utilizará el método de CS (básico ó *RTS/CTS*) para determinar la actividad durante cada ranura de tiempo (*slot time*) de desistimiento, si no se detecta actividad en el medio, el contador de desistimiento disminuye el tiempo en lo equivalente a una ranura de tiempo.

En caso que se detecte que el medio está ocupado, el contador de desistimiento no disminuirá su valor sino que lo detiene por lo correspondiente a una ranura de tiempo, una vez pasado ese tiempo (el de la ranura de tiempo) la STA utiliza el mecanismo CS para determinar el estado del canal. Si se determina que el medio esta ocupado “congela” de nuevo el contador, en caso que el medio se determine sin actividad se continuará con las ranuras de tiempo restantes del contador de desistimiento (Figura 11).

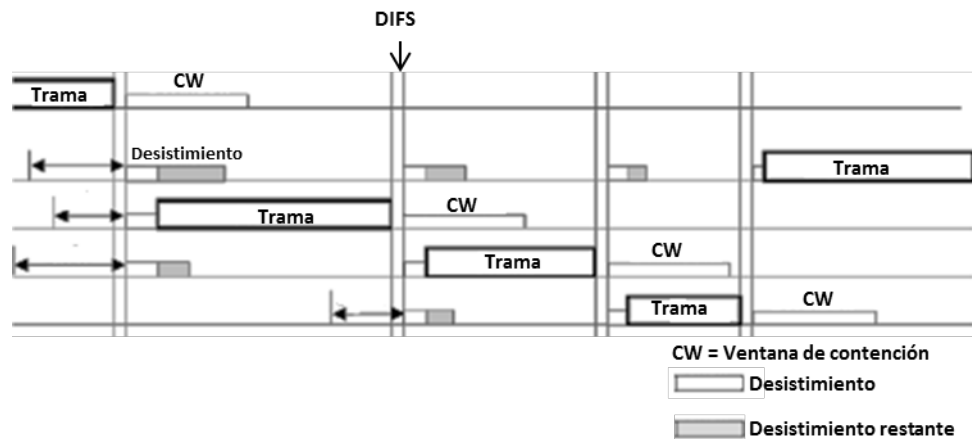


Figura 11. Procedimiento de desistimiento para la transmisión de los datos en WFD.

Inicialmente el intervalo de tiempo de desistimiento es $[0, CW_{\min}]$, donde CW_{\min} para caso de IEEE 802.11g es de 15, dando un total de 16 valores posibles, ya que la STA podría elegir también el valor de cero. Cuando se haya determinado que hubo una colisión o error en los datos, los valores posibles se duplicarán $[0, 31]$, este proceso se repite cada vez que ocurra un error en la transmisión hasta un valor máximo $[0, CW_{\max}]$, donde CW_{\max} para 802.11g es 1023. En IEEE 802.11 se define además un número máximo de retransmisiones, una vez alcanzado el valor de CW_{\max} este no aumentará aun cuando se tengan más retransmisiones (ver Figura 12).

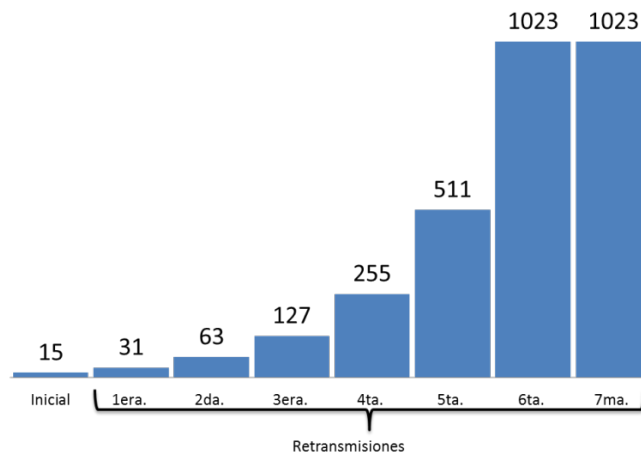


Figura 12. Aumento en el valor de CW en IEEE 802.11g con DCF.

2.7 Tiempos inter-tramas (IFS)

Al intervalo de tiempo entre tramas se le denomina Espacios Entre Tramas (*IFS*, por sus siglas en inglés, *Inter-Frame Space*). Se definen cinco tipos de IFS para dar diferentes niveles de prioridad para acceder al medio inalámbrico en el estándar de IEEE 802.11 (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007) mostrados en la (Tabla 5):

Tabla 5. Espacios Inter-Trama *IFS*.

| Abreviación | Nombre completo | Descripción |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>SIFS</i> | Espacio inter-trama corto (<i>Short InterFrame Space</i>) | Es el más corto de los <i>IFS</i> . Debe utilizarse para priorizar la transmisión de tramas de confirmación (<i>ACK</i> , <i>CTS</i> , etc). Permite al transmisor cambiar a recepción para recibir tramas de confirmación. |
| <i>PIFS</i> | Espacio inter-trama PCF (<i>PCF InterFrame Space</i>) | Debe utilizarse solo por <i>STA</i> 's que estén trabajando bajo el método PCF para priorizar la transmisión de sus paquetes. |
| <i>DIFS</i> | Espacio inter-trama DCF (<i>DCF InterFrame Space</i>) | Debe utilizarse solo por <i>STA</i> 's que estén trabajando bajo el método DCF para la transmisión de tramas de datos (<i>MPDU</i> 's) y de gestión (<i>MMPDU</i> 's). |
| <i>AIFS</i> | Espacio inter-trama arbitrario, utilizado para QoS (<i>Arbitration InterFrame Space</i> , used by the QoS facility) | Debe utilizarse solo por <i>STA</i> 's con QoS para la transmisión de tramas de datos (<i>MPDU</i> 's), de gestión (<i>MMPDU</i> 's) y de control tales como <i>RTS</i> , <i>CTS</i> , entre otras. |
| <i>EIFS</i> | Espacio inter-trama extendido (<i>Extended InterFrame Space</i>) | Tiempo que debe esperar una <i>STA</i> para transmitir en caso ocurra una colisión o error en los datos. |

Como se muestra en la Tabla 5, cada uno de los tiempos IFS tiene una función distinta dentro del mecanismo de control de acceso al medio del estándar IEEE 802.11. Por lo tanto, en la Figura 13 se muestran al relación que existe entre cada uno de ellos, siendo el tiempo más corto el SIFS y el más extendido el EIFS, el cual no se muestra en la figura debido a que depende del mecanismo de CS que se utilice, sea el Básico o el RTS-CTS. Cabe recalcar que los tiempos de AIFS[i] dependen del tipo de tráfico, y la modificación a la ventana de contención que esto

conlleva, por lo tanto, en la Figura 13 se muestra con ventanas de contenciones distintas para ejemplificar dicho comportamiento.

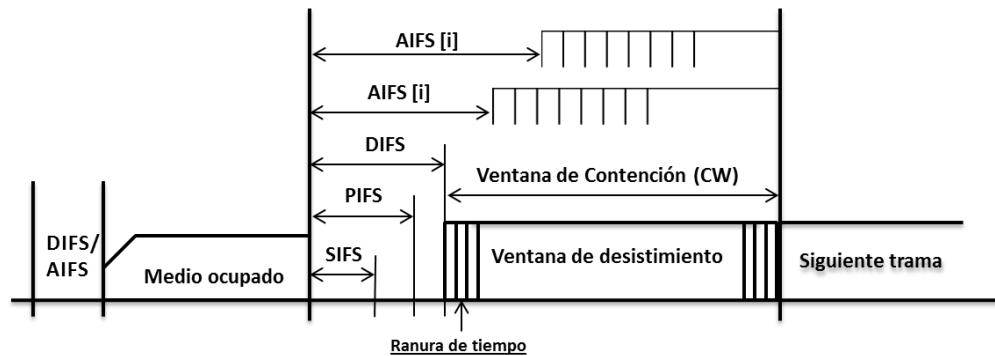


Figura 13. Relación entre los distintos tipos de IFS, para la transmisión de datos en WFD.

Aquí termina lo referente a la capa de control de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.11, así como una introducción breve a su capa física (PHY) del mismo. Cabe resaltar que conocer el funcionamiento de estas dos capas (PHY y MAC), es de vital para realizar el modelado matemático que nos permitirá encontrar las métricas de desempeño necesarias para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo de tesis. Se hizo énfasis en el estándar IEEE 802.11g, debido que es el que define los procesos de la capa PHY y MAC del estándar Wi-Fi Direct (Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00, 2010), estándar que se ocupa en este trabajo de investigación, con el objeto de encontrar sus alcances y limitaciones en el escenario de aplicación propuesto en el Capítulo 1.

Capítulo 3. Estándar Wi-Fi Direct para redes inalámbricas de área personal

Wi-Fi Direct (WFD) es una tecnología de acceso inalámbrico par-a-par (P2P) compatible con las normas Wi-Fi actuales y que básicamente tiene la capacidad de convertir cualquier dispositivo Wi-Fi en un punto de acceso inalámbrico (WAP- Wireless Access Point) virtual. Wi-Fi Direct permite que todos los dispositivos Wi-Fi puedan enlazarse entre sí, logrando comunicaciones directas entre ellos sin la intervención de un WAP o dispositivo similar.

La manera en que Wi-Fi Direct formará las WPAN's será similar a la forma como se hace en Bluetooth (*"push button"* o *PIN*). Las redes de Wi-Fi Direct podrán coexistir con dispositivos que trabajen bajo las versiones de IEEE 802.11 a/b/g/n, ya que las terminales WFD trabajaran en las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz. De esta manera, un dispositivo con Wi-Fi Direct no estará limitado a participar solo en redes WFD, sino que podrá coexistir con dispositivos Wi-Fi tradicionales a los cuales se les denomina clientes heredados ó *"legacy clients"* (Wi-Fi Alliance, 2010). Otro punto importante a destacar, es que con la tecnología de WFD no será necesario desconectarse del AP para crear un enlace WFD, ya que no se está utilizando el modo ad hoc del estándar IEEE 802.11 a/b/g/n (este modo de operación se denomina como *"Independent Basic Service Set"* – IBSS en el estándar IEEE 802.11). En particular, el estándar Wi-Fi Direct propone una extensión de la arquitectura común encontrada en Wi-Fi para permitir que un dispositivo asuma el rol de un AP virtual. De este modo dos dispositivos se pueden comunicar directamente sin la necesidad de hacerlo a través de un AP real. Al mismo tiempo, la extensión de arquitectura permite que los dispositivos WFD con enlaces par-a-par habilitados a través del AP virtual mantengan conectividad con una WLAN a mantener conectividad con un AP tradicional (Wi-Fi Alliance, 2010).

La tecnología WFD utiliza las capas MAC y PHY del estándar IEEE 802.11g (Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00, 2010) para la transmisión y acceso al medio inalámbrico. Esto es de suma importancia, ya que en este trabajo de tesis será posible realizar el estudio del escenario de aplicación descrito en el Capítulo 1, analizando el máximo número de sesiones concurrentes que se pueden establecer en la capa MAC del estándar IEEE 802.11g.

3.1 Arquitectura Wi-Fi Direct

3.1.1 Componentes de la arquitectura WFD

En la especificación técnica (Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00, 2010) se le denomina a los dispositivos WFD como *P2P devices* y pueden desarrollar uno de dos roles: Propietario de Grupo (GO ó *Group Owner*) ó Cliente (*Client*).

Tabla 6. Componentes Wi-Fi Direct.

| | |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dispositivo P2P (P2P Device) | <ul style="list-style-type: none"> • Soportar el rol de P2P Group Owner o P2P Client. • Negociar los roles de P2P Group Owner o P2P Client. • Soportar los mecanismos de WPS y P2P Discovery. • Puede soportar la operación simultánea de P2P y WLAN. |
| Rol de Propietario de grupo P2P (Rol P2P Group Owner) | <ul style="list-style-type: none"> • Es una entidad "AP-like" que provee la funcionalidad y servicios BSS a los clientes asociados (P2P Clients o Legacy Clients) • Provee la funcionalidad de Wi-Fi Protected Setup (WPS) Internal Registrar. • Proveer comunicación entre Clients asociados. • Puede proveer acceso simultáneo a WLAN a los Clients asociados. |
| Rol Cliente P2P (Rol P2P Client) | <ul style="list-style-type: none"> • Implementa la funcionalidad de non- AP STA. • Provee la funcionalidad de WPS Enrollee. |
| Cliente heredado Wi-Fi (Legacy Client) | <ul style="list-style-type: none"> • Son dispositivos Wi-Fi pero que no son WFD. |

3.1.2 Topologías de red WFD

En el estándar de Wi-Fi Direct, se pueden encontrar dos topologías en las redes formadas bajo la tecnología WFD P2P, las cuales son: una red que solo sea P2P y una segunda la cual trabaja en modo simultáneo.

En la red P2P, los dispositivos Cliente P2P están conectados al dispositivo Propietario del Grupo P2P, de forma similar al modo de operación WLAN BSS de Wi-Fi. El establecimiento de la comunicación es similar al de Bluetooth, donde primero se hace un “escaneo” en busca de dispositivos WFD, para luego negociar quien hará el rol de Propietario del Grupo P2P e iniciar las transmisiones en la red. Para el caso de la red en modo simultáneo, el dispositivo que tenga el rol de Propietario de Grupo P2P también está conectado a una WLAN BSS. De esta forma los dispositivos Cliente P2P conectados a la red P2P, pueden contar también con la conexión “hacia afuera”, como por ejemplo a la Internet, a través del dispositivo con el rol de Propietario de Grupo P2P.

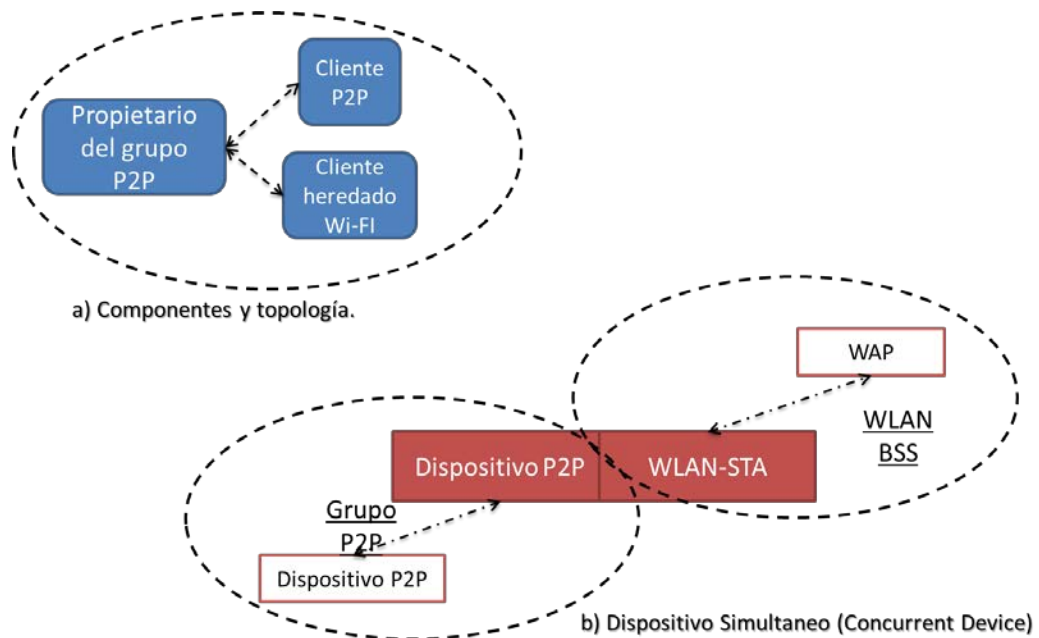


Figura 14. Topologías de red formadas por WFD.

Algunos ejemplos de este tipo de redes y los dispositivos que pueden formarlas se observan en las siguientes figuras (Figura 15, Figura 16 y Figura 17). En la Figura 15 se muestra una red en modo P2P, con un dispositivo Cliente P2P y un Cliente Heredado Wi-Fi, conectados al Propietario del Grupo P2P. Además se observa la forma en que una vez se tiene una conexión par-a-par en WFD, es posible invitar a otros dispositivos a ser parte de la red P2P. En la Figura 16, se muestra un ejemplo de una red que trabaja en modo simultáneo, como se explicó anteriormente. Por ultimo, en la Figura 17 se muestra una red más compleja, donde conviven los dos tipos de topologías de WFD, que son la de par-a-par y la de modo simultaneo, donde algunos dispositivos serán simplemente Clientes P2P o heredados Wi-Fi, mientras que otros trabajarán en modo simultáneo o concurrente.



Figura 15. Ejemplo red WFD P2P y la opción de invitación añadida en WFD.

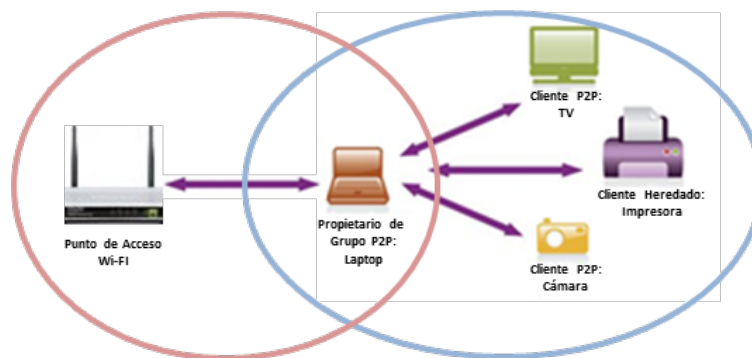


Figura 16. Ejemplo red WFD con funcionamiento simultáneo.



Figura 17. Red compleja con varios dispositivos invitados a una red concurrente..

3.2 Funciones y servicios WFD

3.2.1 Funciones y servicios básicos

Para aspectos como el mejor uso del medio inalámbrico en el estándar de Wi-Fi Direct, se sugieren dos aspectos principalmente:

- Los dispositivos P2P no deberán usar las tasas de IEEE 802.11b (1, 2, 5.5, 11Mbps) para tramas de datos o gestión, excepto por:
 - Tramas Probe Request enviados tanto a dispositivos P2P como los que no lo son.
- Los dispositivos P2P no deberán responder a las tramas Probe Request indicando que solo soportan las tasas de 802.11b.

Además la especificación Wi-Fi P2P supone que los siguientes servicios están implementados en los dispositivos P2P:

- *WPA Certification* para al menos 802.11g, lo que incluye *WPA2*TM
- *Wi-Fi Protected Setup*TM .
- *Wi-Fi Multi-Media*TM .

Otro aspecto importante es que la capa MAC y PHY utilizada en Wi-Fi Direct es la misma que en el estándar IEEE 802.11g, con la posible incorporación en un futuro de lo estipulado en el estándar IEEE 802.11n.

3.2.2 Servicios P2P en WFD

Se definen 4 servicios P2P que deben poseer los dispositivos WFD, tres de ellos de carácter obligatorio y uno opcional, los cuales se enlistan en la Tabla 7.

Tabla 7. Servicios P2P en WFD.

| Servicio | Descripción |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descubrimiento P2P (P2P Discovery) | Provee un conjunto de funciones que permiten al dispositivo identificar y conectarse fácil y rápidamente a otro dispositivo P2P cercano, así como tener acceso a sus servicios. |
| Operación del Grupo P2P (P2P Group Operation) | Se asemeja a la operación de infraestructura BSS como se define en (IEEE 802.11 Wireless local area networks, 2007), y provee unos agregados para la operación de P2P Group. |
| Operación de energía P2P (P2P Power Operation) | Provee un conjunto de funciones para reducir el consumo de energía para los dispositivos P2P. |
| Operación de Gestión de dispositivos P2P (Managed P2P Device Operation) –Opcional- | Describe la habilidad de los dispositivos P2P para operar en ambientes empresariales donde dichos dispositivos pueden ser gestionados por un departamento de informática de la empresa. |

3.2.3 Fases en la formación de una red WFD.

En la Figura 18 se muestra de forma simplificada mediante un diagrama de flujo, los estados y fases que conforman la formación de una red P2P utilizando dispositivos WFD.

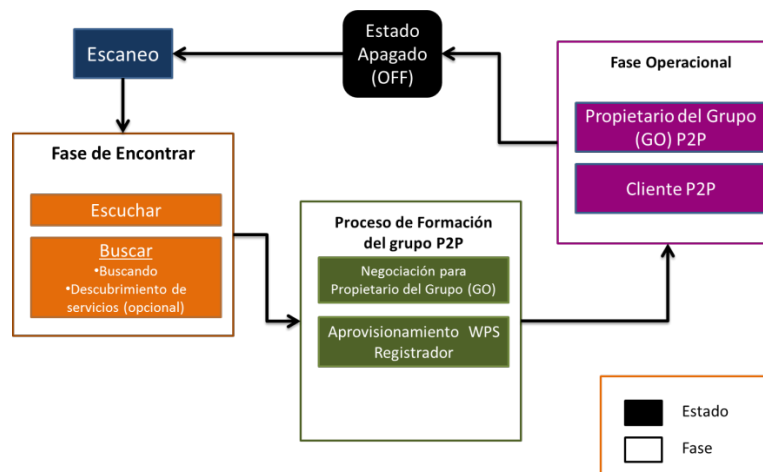


Figura 18. Máquina de estados simplificada para la formación de redes P2P en WFD.

En la Figura 18 se omitieron varias de las transiciones debido a que harían confuso su entendimiento, por tal motivo éstas serán incluidas en la explicación más detallada que se dará de cada uno de los estados de cada fase.

Las tablas que se muestran a continuación describen detalladamente los sucesos dentro de cada uno de los estados y fases en la formación de un grupo WFD. En el apartado de transiciones se muestra en color negro el suceso que provoca una transición y en rojo la fase a la cual se trasciende.

Tabla 8. Estado: Escaneo.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Escanear: Escanea todos, o un conjunto de los canales soportados. Envía tramas <i>Probe Request</i>.</p> | <p>Recibir Probe Response: Después de recibir la respuesta, la información pertinente se almacena para uso futuro.</p> | <p><i>Dispositivo P2P encontrado</i> <i>(Negociación para GO)</i></p> |
| | | <p><i>GO encontrado</i> <i>(WPS Aprovechamiento Afiliado)</i></p> |
| | | <p><i>Encontrar un GO de un grupo persistente al que se estuvo previamente conectado.</i> <i>(Cliente P2P)</i></p> |
| <p>Salir: Almacena la información obtenida para ser usada en Fase Encontrar o algunas de las demás fases.</p> | <p>Recibir Beacon: Se almacena la información pertinente contenida en el <i>Beacon</i>. Y la operación continúa</p> | <p><i>Funcionalidad de GO persistente activada</i> <i>(Propietario del grupo P2P)</i></p> |
| | | <p><i>Escaneo Completo</i> <i>(Fase Encontrar)</i></p> |

Tabla 9. Fase Encontrar: Estado Escuchar.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Elegir un tiempo de permanencia aleatorio: El dispositivo P2P elige un valor aleatorio entre el <code>minDiscoverableInterval</code> y el <code>maxDiscoverableInterval</code>, (los valores default 1 y 3 veces <code>100TU</code>).</p> | <p>Recibir una Probe Request with matching parameters: Si coinciden todos los parámetros se envía un mensaje <code>Probe Response</code>.</p> | Recepción de negociación para Propietario de Grupo (Negociación de Propietario de Grupo) |
| | <p>Recibir un Beacon: Se almacena la información pertinente contenida en el Beacon. Y continua con la operación</p> | Estado Escuchar completado (Estado compuesto Buscar) |
| <p>Escuchar los Canales Sociales: El dispositivo P2P "escucha" el canal social elegido con el valor tiempo de permanencia elegido.</p> | | Recibir una invitación (Fase operacional) |
| | <p>Recibir un Service Discovery Query: Si Descubrimiento de servicios es soportado, un mensaje <code>Service Discovery Response</code> es enviado.</p> | Otros Se puede recibir una invitación para unirse a un Grupo P2P de los cuales no cuenta con credenciales. WPS Afiliado |

Tabla 10. Fase Encontrar: Sub-estado Buscando.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Sub-estado Buscando | | |
| <p>Escaneo de los Canales Sociales: Envía el mensaje <code>Probe Request</code> solamente a los canales sociales. En este mensaje se debe incluir el tipo de dispositivo que se busca o el ID del mismo.</p> | <p>Recibir un Probe Response: Cuando se recibe un mensaje <code>Probe Response</code>, la información pertinente es almacenada para su uso futuro, y la acción de Búsqueda continua.</p> | Encontrado un GO persistente (Cliente P2P) |
| <p>Salir: Almacena la información reunida de Estado Buscar para su uso futuro.</p> | | Completado el Estado Buscar (Inicio de la Fase Encontrar) |

Tabla 11. Fase Encontrar: Sub-estado Descubrimiento de servicios.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sub-estado Descubrimiento de servicios | | Dispositivo P2P encontrado (Negociación para GO) |
| Descubrimiento: Envía mensajes Service Discovery Request a dispositivos P2P previamente encontrados que indicaron que soportan la funcionalidad de Descubrimiento de Servicios. | Recibir un Probe Response: Cuando se recibe un mensaje Probe Response, la información pertinente es almacenada para su uso futuro, y la acción de Búsqueda continua. | GO P2P encontrado (WPS Aproveccionamiento Registrador) |
| Salir: Almacena la información reunida del Estado Descubrimiento de Servicios para su uso futuro. | | Otras Si no se encuentra ningún dispositivo P2P <u>debe</u> cambiar a Fase Escaneo. |

Tabla 12. Fase Procedimiento de Formación del Grupo: Estado WPS Aproveccionamiento Afiliado

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aproveccionamiento WPS: Incluye todo el proceso de Aproveccionamiento WPS en el rol de Afiliado. Da por hecho que ya se ha ingresado el PIN antes de que la Negociación por el rol de GO inicie. | N/A | Aproveccionamiento WPS Completado (Cliente P2P) |
| Salir: Cuando se completa el Aproveccionamiento WPS, y si es un grupo "persistente", las credenciales de este grupo se almacenan para uso futuro. | | Si Aproveccionamiento WPS falla el dispositivo debe cambiar: <u>Fase Escaneo</u> (si el dispositivo NO es un GO de un grupo P2P) <u>Fase Operacional</u> (si es un GO de un grupo P2P. activo) <u>Estado Escuchar</u> (si es un GO de un o varios grupos P2P. que no están activos) Puede reiniciar la Fase de Negociación para el rol de GO con un dispositivo diferente. |

Tabla 13. Fase Procedimiento de Formación del Grupo: Estado WPS Aprovisionamiento Registrador

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Aprovisionamiento WPS: Incluye todo el proceso de Aprovisionamiento WPS en el rol de Registrador. Da por hecho que ya se ha ingresado el PIN antes de que la Negociación por el rol de GO inicie.</p> | N/A | Aprovisionamiento WPS Completado (GO P2P) |
| <p>Salir: Cuando se completa el Aprovisionamiento WPS, y si es un grupo “persistente”, las credenciales de este grupo se almacenan para uso futuro.</p> | | <p>Si Aprovisionamiento WPS falla el dispositivo debe cambiar: <u>Fase Escaneo</u> (si el dispositivo NO es un GO de un grupo P2P) <u>Fase Operacional</u> (si es un GO de un grupo P2P. activo) <u>Estado Escuchar</u> (si es un GO de un o varios grupos P2P. que no están activos) Puede reiniciar la Fase de Negociación para el rol de GO con un dispositivo diferente.</p> |

Tabla 14. Fase Operacional: Estado Propietario del Grupo P2P.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <p>Envío de Beacon: El GO P2P debe enviar tramas Beacon</p> | <p>Recibir una Probe Request: Cuando un mensaje Probe Request es recibido, y el Device Type coincide con el tipo del GO o cualquier otro cliente P2P asociado al grupo, se debe responder con el mensaje Probe Response</p> | Dispositivo P2P apagado (Estado Apagado) |
| | | Sesión del Grupo P2P terminada (Estado Escuchar) |

Tabla 15. Fase Operacional: Estado Cliente P2P.

| Acciones | Comportamiento interno | Transiciones |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <p>Enviar Beacon: El GO P2P debe enviar tramas Beacon</p> | <p>Recibir una Probe Request: Cuando un mensaje Probe Request es recibido, y el Device Type coincide con el tipo del GO o cualquier otro P2P client asociado al grupo, se debe responder con un mensaje Probe Response</p> | Dispositivo P2P apagado (Estado Apagado) |
| | | Sesión del Grupo P2P terminada (Estado Escuchar) |

Con lo mostrado en estas tablas se termina con la parte de la formación de una red P2P, para los dispositivos que trabajen bajo la tecnología de Wi-Fi Direct.

3.2.4 Gestión de Energía P2P

Además de las funcionalidades para la creación de WPAN, en Wi-Fi Direct se añade dos nuevos procedimientos que permite al Propietario del Grupo (GO) estar ausente por periodos de tiempo para ahorro de energía, dichos procedimientos son: Ahorro de Energía Oportunista (*Opportunistic Power Save - OppPS*) y Notificación de Ausencia (*Notice of Abscence*). Los Clientes heredados de Wi-Fi no entienden dichos procedimientos, por lo que consideran al GO como un WAP, esto puede llevar a consecuencias indeseables, por ejemplo consumo innecesario del espectro debido a múltiples retransmisiones, o desasociación de los Clientes Heredados.

Ahorro de Energía Oportunista (*Opportunistic Power Save - OppPS*). En este modo de operación se utiliza la Ventana de Tráfico del Cliente (*Client Traffic Window - CTWindow*). El GO P2P debe indicar si el modo OppPS está activado, a través del bit OppPS.

- En cualquier momento después de terminada la CTWindow, y si el GO determinó que los dispositivos *Clientes P2P* están en estado “Dormitado” (*Doze state*), entonces él también entra en dicho estado, desde ese momento y hasta el siguiente Tiempo de Transmisión de Faro Objetivo, (*TBTT*¹³, por sus siglas en inglés).
- El GO primero debe terminar con todas las transmisiones *broadcast/multicast* antes de entrar en *Doze state*, aun cuando el tiempo que le tome sea mayor al de la duración de la CTWindow.

¹³TBTT: *Target Beacon Transmission Time*.

- El GO debe permanecer en estado “Despierto” (*Awake state*) si el Cliente P2P lo solicita, sujeto a la calendarización de una Notificación de Ausencia (*Notice of Absent*).

Notificación de Ausencia (*Notice of Absence*). Este nuevo método sirve para calendarizar periodos de ausencia, no debe existir más de una notificación en un *Beacon*, *Probe Response* o trama de Notificación de Ausencia (*Notice of Absence Frame*).

- El GO debe indicar su estado de ausencia directamente a los *Cientes P2P* mediante la trama de Notificación de Ausencia.
- La notificación de ausencia consta principalmente de los elementos: Tiempo de Inicio (*Start Time*), Intervalo (*Interval*), Duración (*Duration*) y Cuenta (*Count*).
- Si se desea que el ciclo de ausencia sea continuo se asigna el valor de 255 en el valor de Cuenta (*Count*), así el proceso se detendrá solo cuando se le notifique que lo haga.

3.3 Diferencias entre Wi-Fi tradicional y Wi-Fi Direct

Aun y cuando Wi-Fi es la tecnología de facto para el establecimiento de redes inalámbricas de área local de alta velocidad. En su modo de operación modo ad-hoc presenta problemas para la formación de este tipo de redes, además de una complejidad elevada para usuarios comunes de este tipo de tecnología (Chaudet, Dhoutaut, & Gu'erin Lassous, 2004). Con Wi-Fi tradicional la configuración de los dispositivos (principalmente PC's y laptops) para la formación de redes ad hoc, es tediosa y en algunos casos complicada de realizar, además en la conexión dispositivo-dispositivo se pierden las facultades de acceder inalámbricamente a Internet por parte de ambos dispositivos (ya que es necesario desconectarse de la WLAN para formar una red ad hoc). Para resolver esta situación es en el estándar Wi-Fi Direct existen dispositivos denominados *concurrentes*, los cuales son

capaces de mantener la conexión a Internet sin perder la facultad de conectividad a una red P2P.

Algunos de los puntos clave considerados en Wi-Fi Direct que no se tienen en las versiones de Wi-Fi tradicionales son:

- Esta tecnología Incluye una tecnología conocida como SoftAP.
- Soporta compatibilidad con dispositivos Wi-Fi comunes.
- Seguridad incorporada (WPA2 es obligatorio).
- No es lo mismo que ad-hoc networking.

Estos puntos se discuten en los párrafos siguientes, para tener una idea más clara de las incorporaciones que realiza WFD a los dispositivos en comparación con Wi-Fi tradicional.

Software Habilitador de Punto de Acceso (Software enabled Access Point - SoftAP): Mientras que los WAP son fabricados específicamente para trabajar sólo como puntos de acceso inalámbricos, los dispositivos que cuentan con SoftAP podrán utilizar su enlace para trabajar como WAP y cliente a la vez.

Esto permite que dispositivos como teléfonos móviles puedan proveer acceso a Internet a otros dispositivos como Pc's o laptops de manera inalámbrica. Para lograr esto el teléfono se conecta a Internet utilizando la red telefónica celular y luego se "ata" a la PC para ofrecerle a ésta el acceso a Internet. Las computadoras de escritorio, laptops y dispositivos móviles en las nuevas versiones de sus Sistemas Operativos incluyen también la tecnología de SoftAP.

Algunas características de este software se enlistan a continuación:

- Los dispositivos deben contar con WPA2-PSK/ suite de cifrado AES.
- Está prohibido el puente de capa 2.
- Cuando la computadora se pone en "sleep", "hibernate" o "restart", se detiene el Wireless Hosted Network.

- No provee la resolución de DNS, por lo tanto todos los dispositivos deben marcar la conexión como privada.

Compatibilidad con dispositivos Wi-Fi comunes: En la especificación de WFD se les nombra a los dispositivos Wi-Fi que no son P2P como clientes heredados, es decir, dispositivos Wi-Fi que pueden conectarse solo como clientes dentro de una red WFD. Esto tiene algunas restricciones para hacer el mejor uso del medio inalámbrico, dichas restricciones son:

- Los dispositivos P2P no deberán usar las tasas de 802.11b (1, 2, 5.5, 11Mbps) para tramas de datos o control, excepto por:
 - Tramas *Probe Request* enviados tanto a dispositivos P2P como los que no lo son.
- Los dispositivos P2P no deberán responder a las tramas *Probe Request* indicando que solo soportan las tasas de 802.11b.

Seguridad WPA2 obligatorio: WPA2 es un sistema para proteger las redes inalámbricas (Wi-Fi), creado para corregir las vulnerabilidades detectadas en WPA. Una de las principales razones por las cuales no se adoptó WPA es por su falta de soporte a redes ad-hoc, siendo este tipo de redes lo más parecido a lo que plantea se maneje en los dispositivos WFD.

WPA2 está basada en el nuevo estándar IEEE 802.11i. WPA, por ser una versión previa, que se podría considerar de "migración", no incluye todas las características del IEEE 802.11i, mientras que WPA2 se puede inferir que es la versión certificada del estándar 802.11i.

La nueva arquitectura para las redes inalámbricas se llama *Robust Security Network* (RSN) y utiliza autenticación 802.1X, distribución de claves robustas y nuevos mecanismos de integridad y privacidad. Además de tener una arquitectura más compleja, RSN proporciona soluciones seguras y escalables para la

comunicación inalámbrica. Una RSN sólo aceptará máquinas con capacidades RSN, pero IEEE 802.11i también define una red transicional de seguridad – *Transitional Security Network* (TSN), arquitectura en la que pueden participar sistemas RSN y WEP, permitiendo a los usuarios actualizar su equipo en el futuro.

Diferencia entre ad-hoc networking y las redes formadas con WFD. La principal diferencia radica en la posibilidad que ofrecen las redes formadas por WFD de proporcionar a una WPAN la conectividad conjunta con una WLAN. Esto quiere decir que con WFD, dispositivos denominados “concurrentes” puedan dar a la WPAN el acceso a Internet inalámbrico, siempre y cuando el GO sea un dispositivo de este tipo. Con la tecnología anterior eso no era posible debido a que al formar una red ad-hoc la tarjeta de red inalámbrica se desconectaba de la WLAN.

Con lo anterior queda concluido lo relacionado al estándar para comunicación par-a-par de Wi-Fi, denominado Wi-Fi Direct. Esta nueva tecnología hace posible la creación de redes inalámbricas de área personal de una manera sencilla y transparente para el usuario. Debido a esto, es una tecnología que vale la pena ser estudiada, ya que posee potencial y un fuerte respaldo (Versiones de IEEE 802.11) que seguramente será implementada en un gran número de dispositivos en un futuro muy cercano.

Por lo tanto, es de interés de este trabajo de investigación encontrar sus limitaciones y alcances en lo que se refiere al escenario de aplicación planteado con anterioridad. En dicho escenario, se tendrán enlaces par-a-par WFD en un área con una alta densidad de nodos activos, sobre los enlaces WFD se estará transmitiendo flujos de audio bidireccional de manera concurrente. Para definir las métricas a utilizar para medir el desempeño del sistema, se propone un modelo matemático y un escenario de simulación, los cuales se definen en los capítulos posteriores de este trabajo de tesis.

Capítulo 4. Modelado Capa MAC IEEE 802.11g para Wi-Fi Direct

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis matemático de la capa de acceso al medio (MAC) del estándar Wi-Fi Direct. Debido a que la capas física (PHY) y MAC de dicho estándar son definidas por el estándar IEEE 802.11g (Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00, 2010), el modelo matemático presentado en este capítulo está basado en modelos previamente desarrollados para diferentes versiones del estándar IEEE 802.11.

Uno de los primeros modelos matemáticos desarrollados para el análisis de la capa acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.11 asume condiciones de saturación en la red (Bianchi, 2000). El modelo en saturación supone que cada estación tiene siempre un paquete a transmitir, sin embargo dicho comportamiento no siempre sucede en la realidad ya que existen aplicaciones y condiciones en la cuales no se alcanza a saturar la cola. Por ejemplo, una de estas condiciones se tiene cuando se transmiten flujos de audio de calidad telefónica con una baja densidad de usuarios. Por lo tanto, aun y cuando el modelo introducido en (Bianchi, 2000) es importante ya que fue el primero en analizar matemáticamente la capa MAC de IEEE 802.11, es necesario encontrar un modelo para el caso de no-saturación que sirva como punto de partida para el trabajo presentado en esta tesis.

De los modelos encontrados en la literatura que trabajan en la zona de no saturación de la capa MAC del estándar IEEE 802.11, además del modelo presentado en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004), se encontró el modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007). Este trabajo también utiliza cadenas de Markov bidimensionales, agregando una etapa de desistimiento ("*backoff*") donde se

analiza lo que sucede después de que un paquete ha sido servido por la MAC y no existe ninguno en espera. Un inconveniente del modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) es que no considera un límite en el número de intentos de retransmisión de cada paquete, esto es, el paquete deja de ser servido por la capa MAC del nodo transmisor hasta que sea confirmada la entrega por el receptor. Sin embargo, dicha consideración no está incluida dentro de los parámetros de operación de la capa MAC del estándar IEEE 802.11, ya que en dicho estándar si se establece un número máximo de intentos de retransmisión por paquete, siendo que el paquete es descartado si no se logra una transmisión exitosa en este número de intentos. Otro inconveniente del modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007), es la suposición de un buffer de un solo paquete. Esta suposición es difícilmente sostenible en la actualidad, ya que en la gran mayoría de las interfaces de red inalámbricas actuales el tamaño del buffer es mucho mayor a 1. Por lo anterior, el modelo de (Malone, Duffy, & Leith, 2007) no fue considerado para el análisis que se realiza en este trabajo de investigación. Sin embargo en el Capítulo 6, se si muestran algunos resultados obtenidos con dicho modelo con propósitos de comparación.

Debido a la discusión anterior, en este trabajo de investigación se decidió utilizar como base la metodología presentada por (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) para realizar el modelado del comportamiento de la capa MAC del estándar IEEE 802.11g. Dicho modelo considera condiciones de no saturación para el análisis de la capa MAC del estándar IEEE 802.11b, haciendo un análisis detallado de los procesos que suceden dentro de la capa MAC mediante el uso de cadenas de Markov bidimensionales. Es importante mencionar que el modelo presentado en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) es para tráfico homogéneo, es decir, todas las estaciones a analizar transmiten el mismo tamaño de paquete y tienen la misma tasa de arribo en la cola. Debido a que en la mayoría de las aplicaciones reales el tráfico generado en un ambiente de red no es homogéneo, en este trabajo de investigación se agregaron las consideraciones necesarias para realizar análisis

de tráfico heterogéneo, obteniendo un nuevo conjunto de ecuaciones. Por lo tanto, aun y cuando el modelo introducido en este capítulo está basado en el trabajo presentado en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004), existen diferencias marcadas entre ambos modelos las cuales son mostradas en la Tabla 16.

Tabla 16. Diferencias entre el modelo de (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) y el de esta tesis.

| | Modelo propuesto en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) | Modelo desarrollado para esta tesis |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Modelo de cola | M / G / 1 / K | M / G / 1 |
| Versión de IEEE 802.11 | IEEE 802.11b | IEEE 802.11g |
| Trafico Homogéneo | Si | Si |
| Trafico Heterogéneo | N/A | Si |
| Análisis del desempeño de codificadores de voz | N/A | Si |

El modelo matemático introducido en este capítulo considera a cada estación móvil como un sistema de cola, que puede ser caracterizado por un proceso de arribo y una distribución de tiempo de servicio. Para el caso del modelo propuesto en esta tesis se utiliza el modelo de cola M/G/1, donde el tiempo de servicio se obtendrá del cálculo de tiempo de servicio de la capa MAC del estándar IEEE 802.11g. El caso de saturación es alcanzado una vez que se tenga tráfico "pesado", tal que siempre se tenga un paquete en cola esperando a ser transmitido.

A continuación se presenta el modelado de la capa MAC de IEEE 802.11g propuesto en esta tesis para el análisis de desempeño de Wi-Fi Direct. Primero se muestran todas las ecuaciones utilizadas para modelar matemáticamente el caso de tráfico homogéneo. Una vez obtenidas dichas ecuaciones, éstas servirán de base en el análisis de tráfico heterogéneo, mostrando los ajustes pertinentes para dicho caso.

4.2 Modelo de la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct

Como se mencionó anteriormente, el modelo presentado en esta sección será utilizado para analizar la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct. La derivación del modelo sigue la metodología utilizada en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) para el análisis de la capa MAC del estándar IEEE 802.11b. Dado que las diferencias entre ambos modelos ya se describieron en la Tabla 16, la discusión siguiente se enfocará en detallar el modelo propuesto en este trabajo de investigación y las ecuaciones derivadas del mismo.

4.2.1 Tiempo de servicio de la capa MAC

Como se describió en el capítulo 2, para realizar la transmisión de un paquete existen tres procesos básicos en la capa MAC:

- a) El proceso de decremento del contador de desistimiento.
- b) La transmisión exitosa de un paquete. La cual tarda un tiempo que denominado T_{suc} .
- c) La colisión de un paquete que desea ser transmitido. La cual le toma un tiempo T_{col} al nodo transmisor para determinar que ha colisionado.

El tiempo de servicio de la capa MAC se determina desde que el paquete se encuentra como primero en la cola e inicia su proceso de contención para transmitir, hasta el instante en que el paquete haya sido reconocido como exitoso (mediante el paquete de ACK) o haya sido descartado después del número máximo de retransmisiones.

La distribución del tiempo de servicio MAC es una distribución discreta de probabilidad, debido a que la unidad más pequeña de tiempo en el proceso del contador de desistimiento es una ranura de tiempo ó “*slot*”. Los tiempos que toma una transmisión exitosa o una colisión dependen del tamaño del paquete, del tamaño de los encabezados y de la tasa de transmisión pico utilizada. El tiempo

de transmisión exitosa depende también del esquema de transmisión IEEE 802.11 que se utilice: el esquema básico o el esquema de transmisión protegido RTS-CTS (“*request to send – clear to send*”).

Determinar el tiempo de servicio de la capa de acceso al medio es fundamental en el caso de tráfico sensible al retardo. Esto debido a que si el tiempo de servicio es muy grande, capas superiores tendrán poco tiempo para sus procesos provocando un mal funcionamiento del sistema en general. En tráfico sensible al retardo como la voz y video, dichos procesos son la codificación-decodificación de los datos así como el empaquetamiento de los mismos.

4.2.2 Tiempos de los procesos de colisión y transmisión exitosa

El tiempo que toma una transmisión exitosa o una colisión, depende de varios factores entre ellos el escenario de transmisión: básico o RTS-CTS.

En el caso del escenario de transmisión básico (Figura 19), los tiempos se calculan de la siguiente forma:

$$T_{suc} = l_D + SIFS + ACK + DIFS, \quad (1)$$

$$T_{col} = l_D + SIFS + ACK + DIFS$$

donde:

l_D : Tiempo que tardan en transmitirse los datos. Este dato depende del tamaño de paquete y la tasa de transmisión del mismo.

ACK : Tiempo que tarda en transmitirse una trama ACK de 14 bytes.

$DIFS$ y $SIFS$: Son llamados tiempos inter-tramas En el caso del estándar IEEE 802.11g son de 28 μ s y 10 μ s, respectivamente.

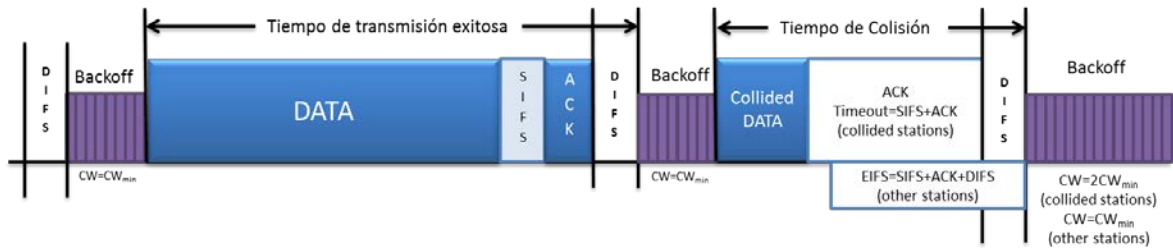


Figura 19. Tiempos del mecanismo de acceso básico

Para el caso del escenario de transmisión RTS-CTS (Figura 20) y retomando lo presentado en el capítulo 2, los tiempos de transmisión exitosa o de colisión se calculan de la siguiente manera:

$$T_{suc} = RTS + CTS + (3 * SIFS) + l_D + ACK + DIFS, \quad (2)$$

$$T_{col} = RTS + SIFS + CTS + DIFS$$

donde

RTS: Tiempo que tarda en transmitirse una trama RTS de 20 bytes.

CTS: Tiempo que tarda en transmitirse una trama CTS de 14 bytes.

l_D : Tiempo que tardan en transmitirse los datos. Este dato depende del tamaño de paquete y la tasa de transmisión del mismo.

ACK: Tiempo que tarda en transmitirse una trama ACK de 14 bytes.

DIFS y *SIFS*: Son llamados tiempos inter-tramas. En el caso del estándar IEEE 802.11g son de 28 μ s y 10 μ s, respectivamente.

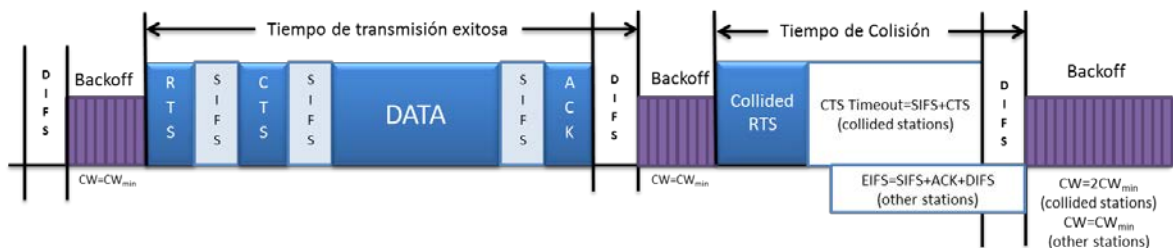


Figura 20. Tiempos del mecanismo RTS-CTS.

De acuerdo a lo mostrado anteriormente, los valores de los tiempos de transmisión exitosa y colisión son variables deterministas, por lo tanto, las funciones generatrices de probabilidades (PGF¹⁴, por sus siglas en inglés) de cada uno de ellos se exponen en la Tabla 17.

Tabla 17. PGF's de los tiempos de transmisión exitosa y colisión

| PGF | Escenario de transmisión | |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| | Básico | RTS – CTS |
| Transmisión exitosa T_{suc} | $S_t(z) = Z^{l_D+SIFS+ACK+DIFS}$ | $S_t(z) = Z^{RTS+3*SIFS+CTS+l_D+ACK+DIFS}$ |
| Tiempo de colisión T_{col} | $C_t(z) = Z^{l_D+SIFS+ACK+DIFS}$ | $C_t(z) = Z^{RTS+SIFS+ACK+DIFS}$ |

Para los casos donde se utiliza la distinción entre diversos tipos de tráfico, los valores $DIFS$ de la Tabla 2, se cambiarán por el valor de $AIFS[AC]$ mostrados en Tabla 4 el Capítulo 2. Este valor depende de la clase de datos que desean transmitir.

4.2.3 Proceso de decremento del contador de desistimiento

En esta subsección se muestran las ecuaciones para el proceso de decremento del contador de desistimiento. Primero se muestran las probabilidades necesarias, para resolver dichas ecuaciones. Dichas probabilidades son, la probabilidad de colisión de un paquete siendo transmitido, p_c , y la probabilidad de transmisión exitosa en el medio, P_{suc} .

Ya que se está analizando el comportamiento para tráfico homogéneo, es posible tomar cualquiera de las n estaciones contendientes para realizar el análisis del comportamiento de la capa MAC de IEEE 802.11g, ya que todas las estaciones presentarán las mismas características. Por lo tanto, si una estación está

¹⁴ PGF: *Probability Generating Function*.

“escuchando” el medio, entonces la probabilidad de que k de un total de $n - 1$ estaciones estén transmitiendo simultáneamente estará dada por

$$P[k \text{ estaciones transmitiendo dado que una esta escuchando}] = \binom{n-1}{k} (P_{Tx})^k (P_{NoTx})^{n-k-1} \quad (3)$$

$k = 0, 1, \dots, n-1$

donde

P_{Tx} , es la probabilidad de que una estación transmita.

P_{NoTx} , es la probabilidad de que una estación no transmita.

Si se consideran n estaciones contendientes en el medio, se define la probabilidad de colisión, p_c , como la probabilidad de que dado que un paquete está siendo transmitido por la estación analizada, al menos una de las otras $n - 1$ estaciones intente transmitir en el medio al mismo tiempo. De acuerdo a lo anterior, se puede definir a la probabilidad de colisión dado que la estación analizada está transmitiendo, p_c , como la probabilidad de que al menos 1 de las $n - 1$ estaciones transmita al mismo tiempo. Entonces, utilizando la Ecuación (3) se obtiene que

$$p_c = 1 - \binom{n-1}{0} (P_{Tx})^0 (P_{NoTx})^{n-1} - \binom{n-1}{1} (P_{Tx})^1 (P_{NoTx})^{n-2} - \binom{n-1}{2} (P_{Tx})^2 (P_{NoTx})^{n-3} - \binom{n-1}{3} (P_{Tx})^3 (P_{NoTx})^{n-4} - \dots - \binom{n-1}{k} (P_{Tx})^k (P_{NoTx})^{n-k-1} \quad (4)$$

en donde las probabilidades de transmisión y no transmisión se pueden definir como

$$P_{Tx} = (1 - p_0) \tau, \quad y \quad P_{NoTx} = 1 - ((1 - p_0) \tau) \quad (5)$$

donde p_0 es la probabilidad de que no exista un paquete en la cola de la estación a considerar listo para ser transmitido por la MAC, y τ es la probabilidad de que una estación transmita en una ranura de tiempo aleatoria dado que tiene un paquete listo para transmitir. Por lo tanto, sustituyendo la Ecuación (5) en la Ecuación (4), se puede definir la probabilidad de colisión como

$$\begin{aligned}
\rho_c &= 1 - \binom{n-1}{0} (Tx)^0 (NoTx)^{n-1}, \\
\rho_c &= 1 - \underbrace{[1 - (1 - \rho_0)\tau]}_{\substack{1 \text{ STA } Tx \\ 1 \text{ STA no } Tx \\ \text{Ninguna de las } n-1 \text{ STA } Tx \\ \text{Al menos una de las } n-1 \text{ STA } Tx}}^{n-1}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Además de ρ_c , es posible definir la probabilidad de que exista una transmisión exitosa entre las otras $n - 1$ estaciones considerando que la estación a analizar no está transmitiendo. A esta probabilidad se le nombrará P_{suc} y estará dada por la expresión

$$\begin{aligned}
P_{suc} &= \binom{n-1}{1} (P_{Tx})^1 (P_{NoTx})^{n-2}, \\
P_{suc} &= \binom{n-1}{1} (1 - \rho_0)\tau (1 - (1 - \rho_0)\tau)^{n-2}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Una vez obtenidas ρ_c y P_{suc} , es posible definir la probabilidad de que exista una colisión entre las otras $n - 1$ estaciones, considerando que la estación a analizar no está transmitiendo. Esta probabilidad se obtiene como la probabilidad de que transmitan 2 o más estaciones simultáneamente, de las $n - 1$ que están conteniendo en el medio. Por lo tanto, siguiendo la metodología utilizada para el cálculo de ρ_c , la probabilidad de que exista una colisión entre las otras $n - 1$ estaciones, considerando que la estación a analizar no está transmitiendo estará dada por:

$$\begin{aligned}
1 - \binom{n-1}{0} (P_{Tx})^0 (P_{NoTx})^{n-1} - \binom{n-1}{1} (P_{Tx})^1 (P_{NoTx})^{n-2} &= \binom{n-1}{2} (P_{Tx})^2 (P_{NoTx})^{n-3} + \\
+ \binom{n-1}{3} (P_{Tx})^3 (P_{NoTx})^{n-4} + \dots + \binom{n-1}{k} (P_{Tx})^k (P_{NoTx})^{n-k-1}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Nótese que resolviendo el lado izquierdo de la Ecuación (8), se obtiene que la probabilidad de que exista una colisión entre las otras $n - 1$ estaciones dado que la estación analizada no está transmitiendo es igual a $p_c - P_{suc}$

$$\underbrace{1 - \binom{n-1}{0} (P_{Tx})^0 (P_{NoTx})^{n-1}}_{p_c} - \underbrace{\binom{n-1}{1} (P_{Tx})^1 (P_{NoTx})^{n-2}}_{P_{suc}} = p_c - P_{suc} \quad (9)$$

Ahora, volviendo al proceso de desistimiento, si se determina que el medio está libre (*idle*), el contador de desistimiento se reducirá en lo correspondiente a una ranura de tiempo. En caso de detectarse que una transmisión exitosa está en proceso, el contador detendrá la cuenta durante un periodo T_{suc} para después continuar el proceso. En caso de detectarse una colisión en proceso, el contador detendrá la cuenta durante un periodo T_{col} .

Entonces, si se considera una ranura de tiempo cualquiera, se puede obtener un diagrama de transición de estados del proceso de decremento del contador de desistimiento tal como se muestra en la Figura 21.

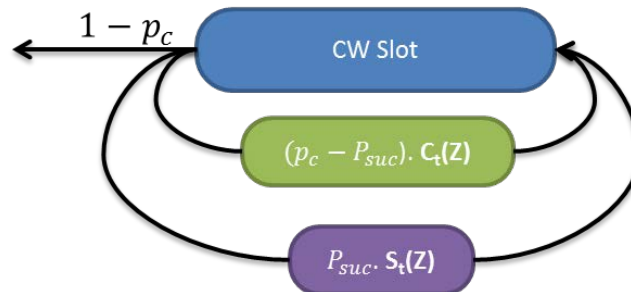


Figura 21. Diagrama de transición generalizado del proceso de decremento del contador de desistimiento

Como se puede observar en la Figura 21, existe la probabilidad de $1 - p_c$ de que el contador reduzca su valor en 1 después de una ranura de tiempo σ cuando se determina que el medio inalámbrico está libre. Además está la probabilidad P_{suc} de permanecer en el estado original por un tiempo T_{suc} , debido a la existencia de una transmisión exitosa en el medio. Y por último, el paquete puede permanecer en el

mismo estado un tiempo T_{col} con una probabilidad de $p_c - P_{suc}$, debido a una colisión en el medio. Por lo tanto, el proceso de decremento del contador de desistimiento es una cadena de Markov. De esta manera, se puede obtener una función de transferencia de acuerdo a la Fórmula de Mason (Lin & Costello, 1983) como sigue:

$$H_d(z) = \frac{(1 - p_c)Z^\sigma}{\left[1 - P_{suc}S_t(Z) - (p_c - P_{suc})C_t(Z)\right]}. \quad (10)$$

Se puede observar que el valor de $H_d(Z)$ depende de la probabilidad p_c , la probabilidad P_{suc} , la probabilidad $p_c - P_{suc}$, y la variable “tonta” Z .

4.2.4 Modelo de la cadena de Markov para el procedimiento exponencial de desistimiento

Una vez que el contador de desistimiento llega al valor de cero se intenta transmitir el paquete. La estación tiene una probabilidad de $1 - p_c$ de determinar que su transmisión fue exitosa después de un tiempo T_{suc} , y la probabilidad p_c de duplicar el tamaño de su ventana de contención después de un tiempo T_{col} . La operación de ir duplicando el tamaño de la ventana cada vez que se presenta una colisión se realiza hasta llegar al número máximo de retransmisiones, tal como se explicó en el Capítulo 2. Al ser el proceso de decremento del contador de desistimiento una cadena de Markov, todo el procedimiento exponencial de desistimiento también será un proceso Markoviano.

Para el caso del estándar IEEE 802.11g, la cadena de Markov que representa el procedimiento exponencial de desistimiento es el mostrado en la Figura 22. Utilizando la notación utilizada en (Bianchi, 2000) se puede definir:

- $s(t)$ es el proceso estocástico que representa una etapa de desistimiento.
- $b(t)$ es el proceso estocástico que representa el contador de tiempo de desistimiento de una estación dada.

Para expresar las probabilidades de transición se utilizará la siguiente notación

$$P[i_1, k_1 | i_0, k_0] = \Pr[s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0].$$

Con esto se pueden escribir las probabilidades de transición de un paso no nulas. En particular, la Ecuación (11) indica la probabilidad de que el contador de desistimiento sea reduzca en 1

$$P[i, k | i, k+1] = 1, \quad k = 0, 1, \dots, W_i - 2; \quad i = 0, 1, \dots, \alpha, \quad (11)$$

en donde W_i esta dado por

$$W_i = 2^i (CW_{min} + 1) \quad \text{para} \quad i = 0, 1, \dots, m, \quad (12)$$

y

$$W_i = CW_{max} + 1 \quad \text{para} \quad i = m, m+1, \dots, \alpha \quad (13)$$

En las Ecuaciones (12) y (13) i representa la etapa de desistimiento actual. El número máximo de etapas de desistimiento está dado por el valor α y es equivalente al número máximo de intentos de transmisión de cada paquete individual. El valor máximo de la ventana de contención está dado por $CW_{max} = 2^m (CW_{min} + 1) - 1$. Cabe destacar que W_i está relacionado con el tamaño de la ventana de contención en cada etapa de la siguiente manera

$$CW_i = W_i - 1. \quad (14)$$

Por lo tanto, nótese que el valor máximo de W_i no está dado por el valor de $2^\alpha (CW_{min} + 1)$, sino que se mantiene a partir de la etapa m en el valor de $2^m (CW_{min} + 1)$, donde m es el número máximo de etapas de desistimiento hasta el cual se duplica el valor de CW. Para el caso del estándar IEEE 802.11g el valor de CW_{min} es de 15.

Ahora, definimos la probabilidad de que el contador de desistimiento inicie en algún estado de la etapa 0 después de una transmisión exitosa como se indica en la Ecuación (15):

$$P[0, k | i, 0] = (1 - p_c) / W_0, \quad k = 0, 1, \dots, W_0 - 1; \quad i = 0, 1, \dots, \alpha - 1. \quad (15)$$

La Ecuación (16), indica la probabilidad de que el contador de desistimiento inicie en algún estado de la siguiente etapa de desistimiento después de una transmisión no exitosa:

$$P[i, k | i - 1, 0] = p_c / W_i, \quad k = 0, 1, \dots, W_i - 1; \quad i = 1, 2, \dots, \alpha. \quad (16)$$

Por último, en la Ecuación (17), se muestra la probabilidad de que la ventana de contención se reinicie y el contador de desistimiento inicie en algún estado de la etapa 0 después de que se alcanza el límite máximo de transmisiones fallidas:

$$P[0, k | \alpha, 0] = 1 / W_0, \quad k = 0, 1, \dots, W_0 - 1. \quad (17)$$

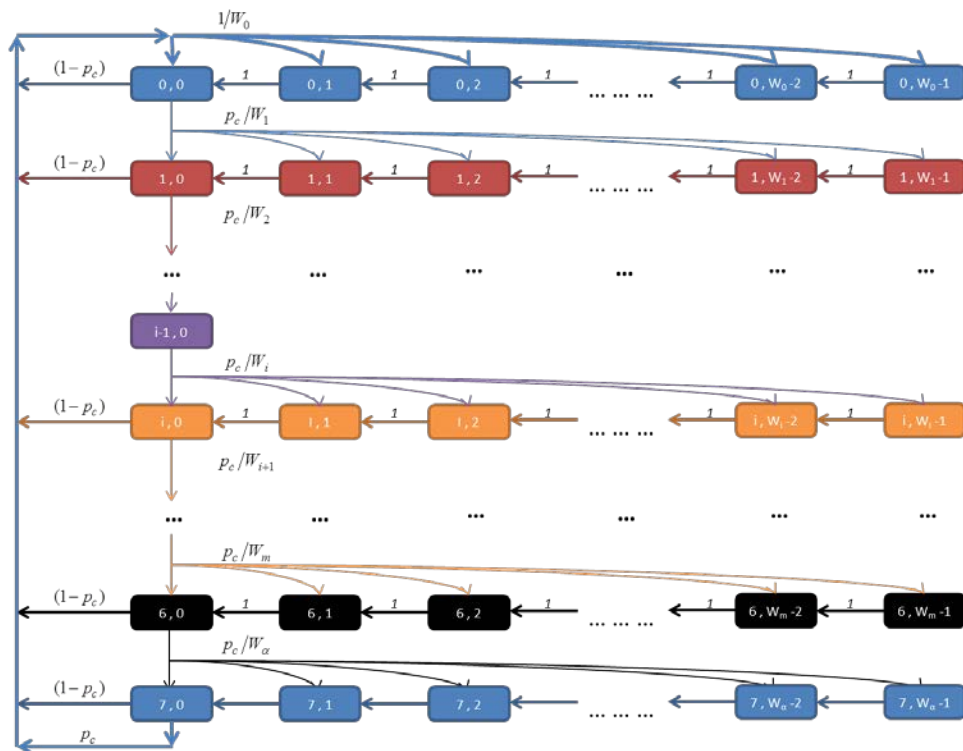


Figura 22. Cadena de Markov del procedimiento de desistimiento de MAC 802.11g.

Ahora, siguiendo la metodología introducida en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004), se puede obtener la distribución estacionaria de la cadena de Markov utilizando

$$b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P[s(t) = i, b(t) = k], \quad 0 \leq i \leq \alpha, 0 \leq k < W \quad (18)$$

donde $W = CW_{\min} + 1$. Para el caso de IEEE 802.11g, $W = 15 + 1 = 16$.

Para obtener una forma cerrada para $b_{i,k}$ note que

$$b_{i-1,0} \cdot p_c = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p_c^i b_{0,0} \quad \text{para } 0 < i \leq \alpha \quad (19)$$

además

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \times \begin{cases} b_{\infty,0} + (1 - p_c) \sum_0^{\alpha-1} b_{j,0} & \text{para } i = 0 \\ p_c \cdot b_{i-1,0} & \text{para } 0 < i \leq \alpha \end{cases} \quad (20)$$

Trabajando con las ecuaciones (19) y (20), se puede obtener

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad \text{para } (0 \leq i \leq \alpha, 0 \leq k \leq W_i - 1). \quad (21)$$

Para encontrar el valor de $b_{0,0}$ se aplica la condición de normalización de la siguiente manera

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{i=0}^{\alpha} \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^{\alpha} b_{i,0} \sum_{k=0}^{W_i-1} \frac{W_i - k}{W_i} = \sum_{i=0}^{\alpha} b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} = b_{0,0} \sum_{i=0}^{\alpha} \frac{W_i + 1}{2} \\ &= b_{0,0} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=0}^{\alpha} p_c^i \frac{2^i W + 1}{2} \\ &\sum_{i=0}^{m-1} p_c^i \frac{2^i W + 1}{2} + \sum_{i=m}^{\alpha} p_c^i \frac{2^m W + 1}{2}. \end{aligned} \right. \quad (22) \end{aligned}$$

Nótese que toda transmisión inicia cuando el contador de desistimiento llega a cero, sin importar en que etapa se esté del proceso. Por lo tanto, la probabilidad de que una estación transmita en una ranura de tiempo aleatoria, dado que tiene un paquete que transmitir, está dada por

$$\tau = \sum_{i=0}^{\alpha} b_{i,0} = \frac{1 - p_c^{\alpha+1}}{1 - p_c} b_{0,0}. \quad (23)$$

Sustituyendo el valor de $b_{0,0}$ en la Ecuación (23) y simplificándola se obtiene que

$$\tau = \begin{cases} \frac{2(1 - p_c^{\alpha+1})}{1 - p_c^{\alpha+1} + (1 - p_c)W \left(\sum_{i=0}^{\alpha} (2p_c)^i \right)}, & \alpha \leq m \\ \frac{2(1 - p_c^{\alpha+1})}{1 - p_c^{\alpha+1} + p_c W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p_c)^i \right) + W(1 - 2^m p_c^{\alpha+1})}, & \alpha > m \end{cases}, \quad (24)$$

donde $W = CW_{min} + 1$. Para el caso de IEEE 802.11g, $W = 15 + 1 = 16$. Para los casos donde se utiliza el modo de operación *EDCA* del estándar IEEE 802.11, los valores de W y m variaran de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4 del Capítulo 2. Note que estos valores dependerán del tipo de datos que se deseen transmitir.

4.2.5 Diagrama de transición de estados generalizado para el proceso de transmisión

Para poder hacer el cálculo del tiempo de servicio de la capa MAC, es posible trazar la cadena de Markov como un diagrama de estados de transición generalizado como se muestra en la Figura 23. De esta manera se puede obtener la métrica del tiempo de servicio de forma más sencilla.

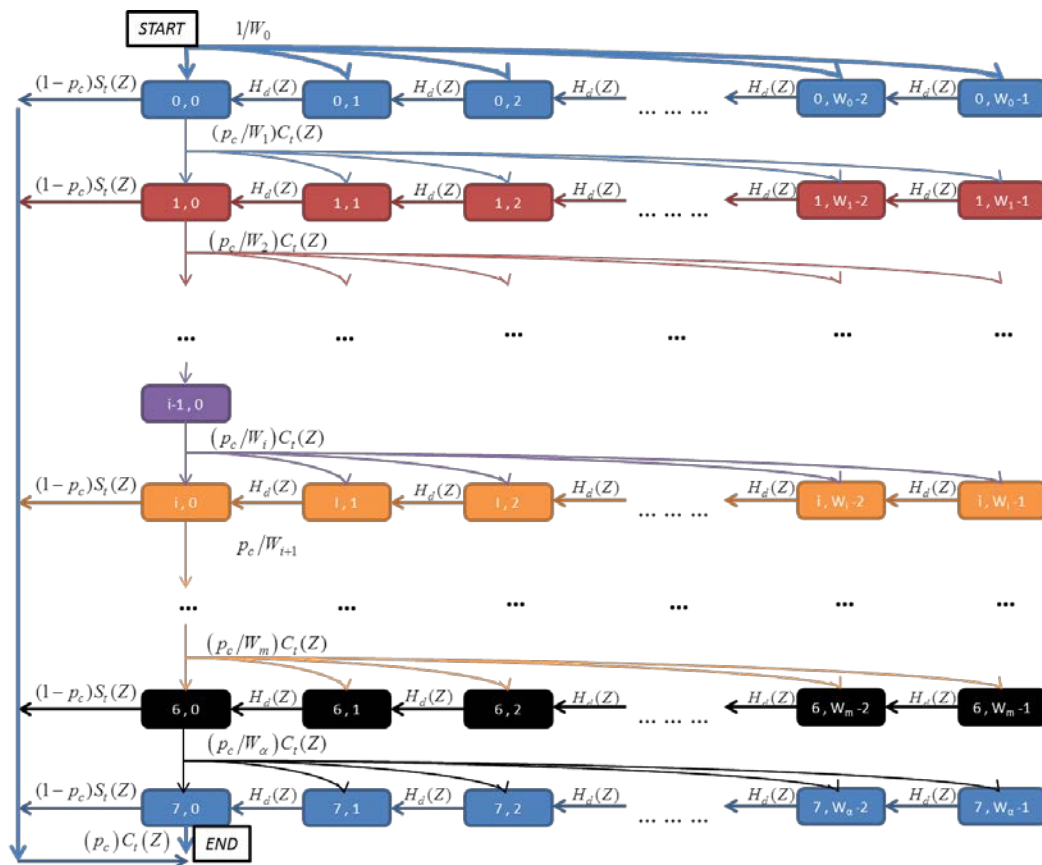


Figura 23. Diagrama de transición de estado generalizado para el proceso de transmisión en 802.11g

Si se denomina T_{MAC} como la variable aleatoria del tiempo de servicio de la capa MAC, se tiene que $B(Z)$ es la PGF de T_{MAC} , y es simplemente la función de transferencia desde el estado de inicio ("start") hasta el estado final ("end") de la Figura 23, la cual está dada por:

$$HW_i(Z) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{2^i W - 1} \frac{H_d^j(Z)}{2^i W}, & (0 \leq i \leq m) \\ \sum_{j=0}^{2^m W - 1} \frac{H_d^j(Z)}{2^m W}, & (m < i \leq \alpha) \end{cases}$$

$$H_i(Z) = \prod_{j=0}^i HW_j(Z), \quad (0 \leq i \leq \alpha) \quad (25)$$

$$B(Z) = (1 - p_c) S_t(Z) \sum_{i=0}^{\alpha} (p_c C_t(Z))^i H_i(Z) + (p_c C_t(Z))^{\alpha+1} H_{\alpha}(Z).$$

Una vez calculado $B(Z)$, es posible calcular el n -ésimo momento de T_{MAC} por diferenciación, donde las unidades de T_{MAC} están dadas en ranuras de tiempo. Por ejemplo, la media estará dada por

$$\mu^{-1} = E[T_{MAC}] = \left. \frac{dB(Z)}{dZ} \right|_{Z=1} \quad (26)$$

donde $E[T_{MAC}]$ es tiempo promedio de servicio de la capa MAC.

4.2.6 Modelado de la estación Wi-Fi Direct como una cola M/G/1

Una vez obtenido el modelo de la capa MAC de cada estación y habiendo obtenido una expresión para el tiempo promedio de servicio MAC, $E[T_{MAC}]$, cada estación se puede modelar como una cola M/G/1 donde el buffer es infinito (ver Figura 24). Esta consideración se realizó ya que en la actualidad es sencillo y barato conseguir un buffer de un tamaño considerablemente grande.

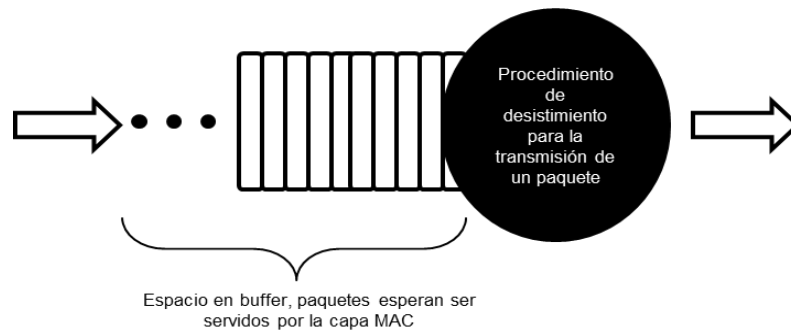


Figura 24. Modelo cola M/G/1 para el proceso de transmisión de un paquete en una estación Wi-Fi Direct.

4.2.6.1 Probabilidades en estado estable de la cola M/G/1

El modelo de cola M/G/1 es bastante conocido y estudiado desde hace tiempo. Por esta razón, en este trabajo únicamente se presentan las ecuaciones de interés para el análisis matemático del comportamiento de la estación bajo diferentes tasas de transmisión. Se refiere al lector a (Gross & Harris, 1998) para encontrar un análisis detallado de este modelo de cola.

Una vez definido el modelo de cola como M/G/1, es de particular interés encontrar la probabilidad de que el buffer esté vacío. Esta probabilidad estará dada por

$$\pi_0 = 1 - \rho = p_0 \quad (27)$$

en donde ρ es el factor de utilización definido como:

$$\rho \equiv \lambda E[T_{MAC}] \quad (28)$$

y λ es igual a la tasa de arribos de paquetes a la cola. En la Ecuación (26) $E[T_{MAC}]$, es el valor esperado del tiempo de servicio de la capa MAC calculado mediante la Ecuación (26). Con la Ecuación (25) se calcula el valor de p_0 utilizado en el análisis del proceso de desistimiento de la capa MAC.

Una vez obtenido el tiempo de servicio promedio de la capa MAC, es posible calcular la longitud promedio de la cola del sistema utilizando

$$L = \rho + \frac{\rho^2 + \lambda^2 * VAR[T_{MAC}]}{2(1 - \rho)} \quad (29)$$

donde la varianza está dada por

$$VAR[T_{MAC}] = \frac{d^2B(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} + \frac{dB(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} - \left\{ \frac{dB(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} \right\}^2. \quad (30)$$

Además, por medio de la formula de Little se obtiene el tiempo de espera promedio en el sistema como:

$$Wait = \frac{L}{\lambda}. \quad (31)$$

Con esta ecuación se concluye el modelado matemático para tráfico homogéneo del comportamiento de la capa de acceso al medio del estándar IEEE 802.11g, y por lo tanto del estándar Wi-Fi Direct. En el siguiente apartado se explica cómo utilizar las ecuaciones derivadas aquí para realizar el análisis de desempeño de la capa MAC mediante la obtención de diversas métricas.

4.3 Algoritmo para la obtención de las métricas de desempeño

Para poder obtener las métricas que permitan evaluar la utilización del estándar Wi-Fi Direct para la transmisión de tráfico sensible al retardo, es necesario introducir un algoritmo iterativo. Este algoritmo es capaz de encontrar los valores de ρ_0 , ρ_c , $E[T_{MAC}]$, la longitud promedio de la cola del sistema, L , y el tiempo promedio que debe esperar un paquete en cola, $Wait$. Los valores son encontrados a partir ciertos valores de tráfico, como lo es la tasa de arribos a la cola, λ , y el número de usuarios contendientes en el medio inalámbrico.

Un diagrama de flujo del algoritmo iterativo se muestra en la Figura 25. Este algoritmo recibe como datos de entrada los valores de λ , n y un valor inicial de ρ_c .

Después de recibir estos valores el algoritmo hace uso de las Ecuaciones (6), (24) y (26) para calcular los valores iniciales de $E[T_{MAC}]$, p_0 y τ . Una vez obtenidos estos valores se vuelve a calcular un nuevo valor de p_c y de $E[T_{MAC}]$. Si la diferencia entre el valor de p_c anterior y el nuevo valor de p_c es mayor a 10^{-7} , se vuelven a calcular los valores de p_0 , τ , un nuevo valor de p_c y un nuevo valor de $E[T_{MAC}]$.

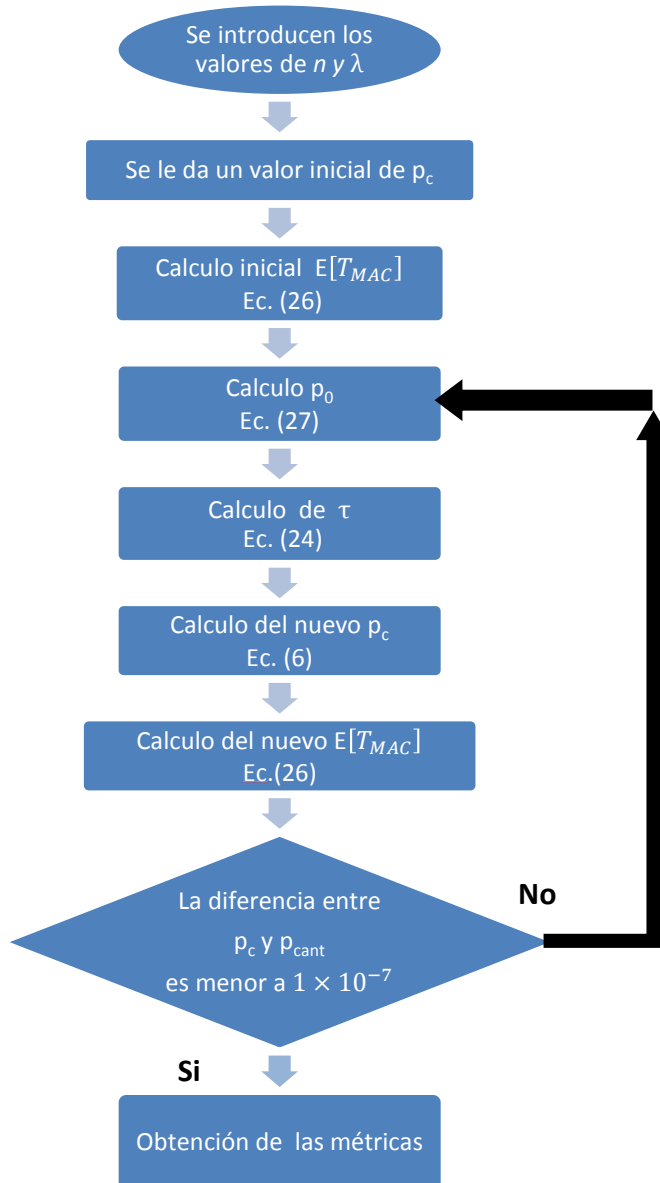


Figura 25. Proceso para la obtención de resultados del modelo matemático para tráfico homogéneo.

Una vez que el algoritmo converge se obtienen las métricas más importantes, las cuales son: la probabilidad de colisión, p_c ; tiempo promedio de servicio de la capa MAC, $E[T_{MAC}]$; y probabilidad de ocupación buffer, p_o , para un valor de λ y n dado.

4.4 Modelado para tráfico heterogéneo con dos grupos de estaciones

Como se mencionó anteriormente, el modelo presentado en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) no considera tráfico heterogéneo. Contemplar el comportamiento de este tipo de tráfico es importante, ya que es posible tener un escenario en donde se transmiten simultáneamente dos o más flujos de tráfico con características y requerimientos de servicio diferentes. En el caso de este trabajo de investigación se exploró solo el caso de dos grupos, pero el análisis puede ser fácilmente extendido a k números de grupos.

Tomando como base las ecuaciones para el análisis de la capa MAC para tráfico homogéneo, se modificaron algunas de ellas para crear un nuevo conjunto de ecuaciones para analizar el caso de tráfico heterogéneo. Debido a que ahora se consideran dos grupos de estaciones se tendrán dos cadenas de Markov que interactúan entre ellas, cada una con un conjunto de ecuaciones particular.

Si se consideran n estaciones que están conteniendo por el medio y se tienen dos grupos de estaciones, entonces la Ecuación (6) para ser utilizada en tráfico heterogéneo se puede reescribir como

$$p_{c_1} = 1 - \left\{ \left(1 - [1 - p_{0_1}] \tau_1 \right)^{n_1-1} \times \left(1 - [1 - p_{0_2}] \tau_2 \right)^{n_2} \right\}, \quad (32)$$

$$p_{c_2} = 1 - \left\{ \left(1 - [1 - p_{0_1}] \tau_1 \right)^m \times \left(1 - [1 - p_{0_2}] \tau_2 \right)^{n_2-1} \right\} \quad (33)$$

donde

p_{c_1} , es la probabilidad de colisión de paquete siendo el transmisor del grupo 1.

p_{c_2} , es la probabilidad de colisión de paquete siendo el transmisor del grupo 2.

τ_1 , es la probabilidad de una estación del grupo 1 de acceder al medio.

τ_2 , es la probabilidad de una estación del grupo 2 de acceder al medio

p_{0_1} , es la probabilidad de que el buffer de una estación del grupo 1 este vacío.

p_{0_2} , es la probabilidad de que el buffer de una estación del grupo 2 este vacío.

Para los cálculos de τ_1, τ_2, p_{0_1} y p_{0_2} se utilizarán las Ecuaciones (24) y (27) haciendo los cambios correspondientes, resultando en las siguientes ecuaciones

$$\tau_1 = \begin{cases} \frac{2(1 - p_{c_1}^{\alpha+1})}{1 - p_{c_1}^{\alpha+1} + (1 - p_{c_1}) W \left(\sum_{i=0}^{\alpha} (2p_{c_1})^i \right)}, & \alpha \leq m \\ \frac{2(1 - p_{c_1}^{\alpha+1})}{1 - p_{c_1}^{\alpha+1} + p_{c_1} W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p_{c_1})^i \right) + W(1 - 2^m p_{c_1}^{\alpha+1})}, & \alpha > m \end{cases}, \quad (34)$$

$$\tau_2 = \begin{cases} \frac{2(1 - p_{c_2}^{\alpha+1})}{1 - p_{c_2}^{\alpha+1} + (1 - p_{c_2}) W \left(\sum_{i=0}^{\alpha} (2p_{c_2})^i \right)}, & \alpha \leq m \\ \frac{2(1 - p_{c_2}^{\alpha+1})}{1 - p_{c_2}^{\alpha+1} + p_{c_2} W \left(\sum_{i=0}^{m-1} (2p_{c_2})^i \right) + W(1 - 2^m p_{c_2}^{\alpha+1})}, & \alpha > m \end{cases}, \quad (35)$$

$$\rho_{0_1} = \pi_{0_1} = 1 - \rho_1, \quad (36)$$

$$\rho_{0_2} = \pi_{0_2} = 1 - \rho_2. \quad (37)$$

La probabilidad de transmisión exitosa en el medio cuando se está analizando un nodo en particular se convierte en dos probabilidades, dependiendo de si la estación que esta “escuchando” el medio es del grupo 1 o del grupo 2. Esto debido a que ahora se tienen dos grupos de estaciones y cada grupo tiene flujos de datos con características diferentes entre grupos. Por lo tanto, las probabilidades para el grupo 1 están dadas por

$$P_{SUC_{1A}} = \left[\binom{n_1 - 1}{1} (P_{TX_1})^1 (P_{NoTX_1})^{n_1 - 2} \right] * \left[\binom{n_2}{0} (P_{TX_2})^0 (P_{NoTX_2})^{n_2} \right], \quad (38)$$

$$P_{SUC_{1B}} = \left[\binom{n_1 - 1}{0} (P_{TX_1})^0 (P_{NoTX_1})^{n_1 - 1} \right] * \left[\binom{n_2}{1} (P_{TX_2})^1 (P_{NoTX_2})^{n_2 - 1} \right], \quad (39)$$

$$P_{SUC_1} = P_{SUC_{1A}} + P_{SUC_{1B}} \quad (40)$$

y las del grupo 2 se definen como

$$P_{SUC_{2A}} = \left[\binom{n_1}{1} (P_{TX_1})^1 (P_{NoTX_1})^{n_1 - 1} \right] * \left[\binom{n_2 - 1}{0} (P_{TX_2})^0 (P_{NoTX_2})^{n_2 - 1} \right], \quad (41)$$

$$P_{SUC_{2B}} = \left[\binom{n_1}{0} (P_{TX_1})^0 (P_{NoTX_1})^{n_1} \right] * \left[\binom{n_2 - 1}{1} (P_{TX_2})^1 (P_{NoTX_2})^{n_2 - 2} \right], \quad (42)$$

$$P_{SUC_2} = P_{SUC_{2A}} + P_{SUC_{2B}} \quad (43)$$

donde

$$\begin{aligned} P_{TX_1} &= 1 - (1 - \rho_{0_1}) \tau_1, & P_{NoTX_1} &= 1 - \left[1 - (1 - \rho_{0_1}) \tau_1 \right], \\ P_{TX_2} &= 1 - (1 - \rho_{0_2}) \tau_2, & P_{NoTX_2} &= 1 - \left[1 - (1 - \rho_{0_2}) \tau_2 \right]. \end{aligned} \quad (44)$$

Se modificó a su vez la función de transferencia $H_d(Z)$, ya que esta también depende del grupo a quien pertenece la estación a analizar. Por lo tanto, modificando la Ecuación (10) se obtiene que para el grupo 1:

$$H_{d_1}(z) = \frac{(1 - p_{c_1})Z^\sigma}{\left[1 - (P_{suc_{1A}} S_{t_1}(Z) + P_{suc_{1B}} S_{t_2}(Z)) - (p_{c_1} - P_{suc_1})C_{t_{promedio}}(Z)\right]} \quad (45)$$

y para el grupo 2

$$H_{d_2}(z) = \frac{(1 - p_{c_2})Z^\sigma}{\left[1 - (P_{suc_{2A}} S_{t_1}(Z) + P_{suc_{2B}} S_{t_2}(Z)) - (p_{c_2} - P_{suc_2})C_{t_{promedio}}(Z)\right]} \quad (46)$$

Donde el término $C_{t_{promedio}}(Z)$, se refiere a la PGF del tiempo promedio de colisión entre un paquete del grupo 1 y uno del grupo 2. Por tener dos valores distintos de $H_d(Z)$, se tienen dos valores distintos de $B(Z)$ y por consiguiente del tiempo promedio de servicio, para el grupo 1 las ecuaciones están dadas por

$$H1W_i(Z) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{2^i W1 - 1} \frac{H_{d_1}^j(Z)}{2^i W1}, & (0 \leq i \leq m1) \\ \sum_{j=0}^{2^m W1 - 1} \frac{H_{d_1}^j(Z)}{2^m W1}, & (m < i \leq \alpha 1) \end{cases}$$

$$H1_i(Z) = \prod_{j=0}^i H1W_j(Z), \quad (0 \leq i \leq \alpha 1) \quad (47)$$

$$B1(Z) = (1 - p_{c_1})S_{t_1}(Z) \sum_{i=0}^{\alpha 1} (p_{c_1} C_{t_1}(Z))^i H1_i(Z) + (p_{c_1} C_{t_1}(Z))^{\alpha 1 + 1} H_{\alpha 1}(Z),$$

$$\boxed{\mu 1^{-1} = E[T_{MAC_1}] = \left. \frac{dB1(Z)}{dZ} \right|_{Z=1}}$$

y para el caso del grupo 2 se definen como

$$H2W_i(Z) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{2^i W2-1} \frac{H_{d_2}^j(Z)}{2^i W1}, & (0 \leq i \leq m2) \\ \sum_{j=0}^{2^m W2-1} \frac{H_{d_2}^j(Z)}{2^{m2} W1}, & (m2 < i \leq \alpha 2) \end{cases}$$

$$H2_i(Z) = \prod_{j=0}^i H2W_j(Z), \quad (0 \leq i \leq \alpha 2) \quad (48)$$

$$B2(Z) = (1 - p_{c_2}) S_{t_2}(Z) \sum_{i=0}^{\alpha 2} (p_{c_2} C_{t_2}(Z))^i H2_i(Z) + (p_{c_2} C_{t_2}(Z))^{\alpha 2+1} H_{\alpha 2}(Z),$$

$$\boxed{\mu 2^{-1} = E[T_{MAC_2}] = \left. \frac{dB2(Z)}{dZ} \right|_{Z=1}}.$$

Debido al cambio de tráfico homogéneo a tráfico heterogéneo, también se realizó una modificación al algoritmo iterativo utilizado para el cálculo de métricas presentado anteriormente en este capítulo (Figura 25). Dichas modificaciones son realizadas por el hecho de tener dos grupos de estaciones conteniendo en el medio inalámbrico y un nuevo conjunto de ecuaciones que resolver. El algoritmo modificado se muestra en la Figura 26. Cabe destacar que las métricas obtenidas con el nuevo modelo heterogéneo son similares a su contraparte homogénea, solo que ahora se obtienen métricas por grupo y métricas promedio (en la cuales se promedian los resultados obtenidos de todos los grupos). Al igual que para tráfico homogéneo, el algoritmo recibe como datos de entrada los valores de λ y n , a continuación se inicializan las variables ρ_{0_1} , ρ_{0_2} , τ_1 y τ_2 , para después calcular los valores iniciales de ρ_{c_1} y ρ_{c_2} . Una vez calculados estos valores, el algoritmo hace uso de las Ecuaciones (47) y (48) para calcular los tiempos promedio de servicio de la capa MAC iniciales de cada grupo. Entonces se vuelven a calcular los valores de ρ_{0_1} , ρ_{0_2} , τ_1 , τ_2 , ρ_{c_1} , ρ_{c_2} , $E[T_{MAC_1}]$ y $E[T_{MAC_2}]$.

Si la diferencia entre los valores de p_c anteriores y los nuevos valores es mayor a 10^{-7} , se vuelven realizar los cálculos.

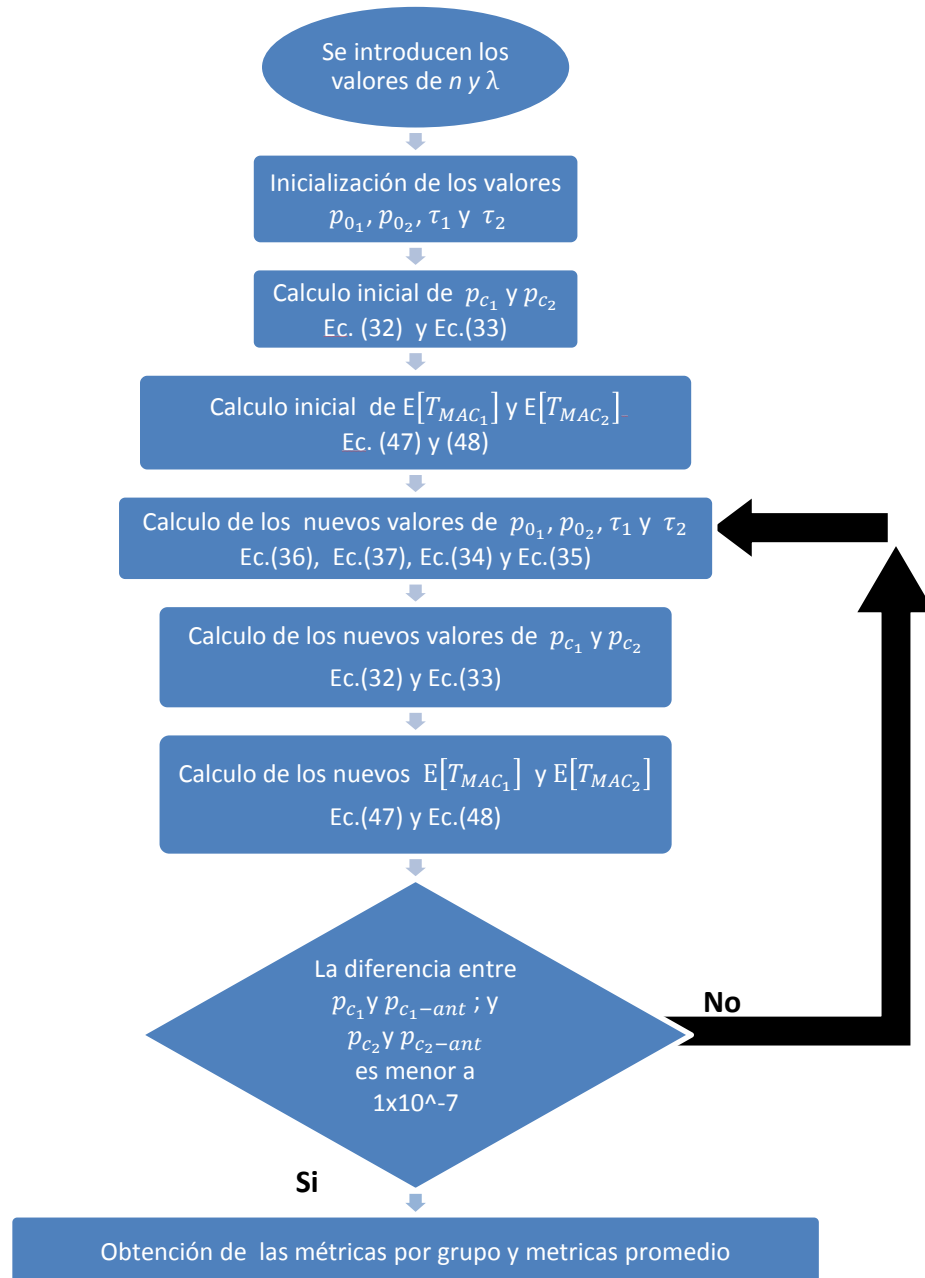


Figura 26. Proceso para la obtención de resultados del modelo matemático para tráfico heterogéneo.

Con este algoritmo se buscan las métricas más importantes del modelo heterogéneo, las cuales son ρ_{0_1} , ρ_{0_2} , ρ_{c_1} , ρ_{c_2} , $E[Ts_1]$ y $E[Ts_2]$. Con estas métricas es posible encontrar las métricas promedio dependiendo del número de estaciones que tenga cada grupo de la siguiente manera:

$$\frac{\text{métrica}}{\text{promedio}} = \frac{[(\# \text{ STAs grupo 1}) \times (\text{métrica del grupo 1})] + [(\# \text{ STAs grupo 2}) \times (\text{métrica del grupo 2})]}{\text{No. estaciones totales contendientes en el medio}} \quad (49)$$

4.5 Conclusiones

En esta sección se presentó el modelo matemático desarrollado en este trabajo de investigación. Este modelo permitirá analizar el escenario de aplicación inicialmente descrito en el Capítulo 1. En particular se busca que el tiempo de servicio de la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct (que utiliza como base IEEE 802.11g) sea lo suficientemente pequeño para no afectar el desempeño del sistema cuando se transmite tráfico sensible al retardo. En el capítulo siguiente se utilizará el modelo para analizar el desempeño del estándar Wi-Fi Direct en la transmisión de tráfico sensible al retardo. Es de particular interés el encontrar el punto en el cual el sistema entra en saturación. Este punto se alcanza cuando siempre se tiene un paquete listo para transmitir en la cola o buffer del dispositivo, esto es, la saturación se alcanza cuando p_0 es igual a cero. Note que esta probabilidad se tiene cuando el tiempo de servicio promedio es menor que la tasa de arribo para el modelo de cola M/G/1.

En el capítulo siguiente se mostrará de manera más detallada el escenario de aplicación. En dicho escenario la principal herramienta para la obtención de métricas de desempeño del sistema será el modelo matemático de la capa MAC de Wi-Fi Direct desarrollado en este capítulo.

Capítulo 5. Escenario de evaluación y cama de pruebas de simulación

5.1 Escenario de evaluación

En este capítulo se introduce el escenario de aplicación considerado en este trabajo de investigación. Tal como se mencionó en la Sección 1.1, una de las aplicaciones que ha motivado el desarrollo de las redes inalámbricas de área personal y local es la transmisión de audio de manera inalámbrica. En este contexto, un aplicación de particular interés donde se prevé se pueda utilizar Wi-Fi Direct es en la transmisión digital de audio sobre enlaces inalámbricos de corto alcance (tanto de alta calidad como de calidad telefónica), esto con el fin de cubrir necesidades y escenarios de aplicación que actualmente no son cubiertos por estándares como Bluetooth y DECT.

En particular, este trabajo se enfoca en evaluar el desempeño de WFD en escenarios y aplicaciones donde se tenga una alta densidad de usuarios concurrentes con enlaces de audio bidireccional habilitados. Este escenario es común encontrarlo en centros de llamadas u oficinas con un alto número de empleados. Es importante mencionar que no se espera que los usuarios transmitan hacia un nodo central o punto de acceso inalámbrico Wi-Fi siguiendo una topología estrella (como es utilizado para el acceso a la Internet), ya que los enlaces de audio comúnmente son establecidos directamente con otro tipo de dispositivos como terminales telefónicas, laptops o teléfonos inteligentes, definiendo de esta manera enlaces par-a-par. Por lo tanto, el escenario analizado en esta tesis es similar al mostrado en la Figura 27.a, en el cual se considera que un auricular (con audífonos y micrófono) está conectado y transmitiendo audio bidireccional de manera inalámbrica con una laptop u otro dispositivo habilitado con una NIC WFD. Este escenario se puede representar como un conjunto de nodos transmitiendo en un área común tal como se muestra en la Figura 27.b. En

este escenario no es necesario que los nodos estén uno al lado de otro, lo importante es que el nodo 1 detecte la transmisión del enésimo nodo y viceversa, es decir, lo importante es que todos puedan detectar las transmisiones de los demás nodos en el área a analizar. Nótese también, que en el escenario presentado en la Figura 27 no se considera la presencia de un AP Wi-Fi, ya que se considera que los nodos establecen conexiones par-a-par siguiendo el estándar Wi-Fi Direct.

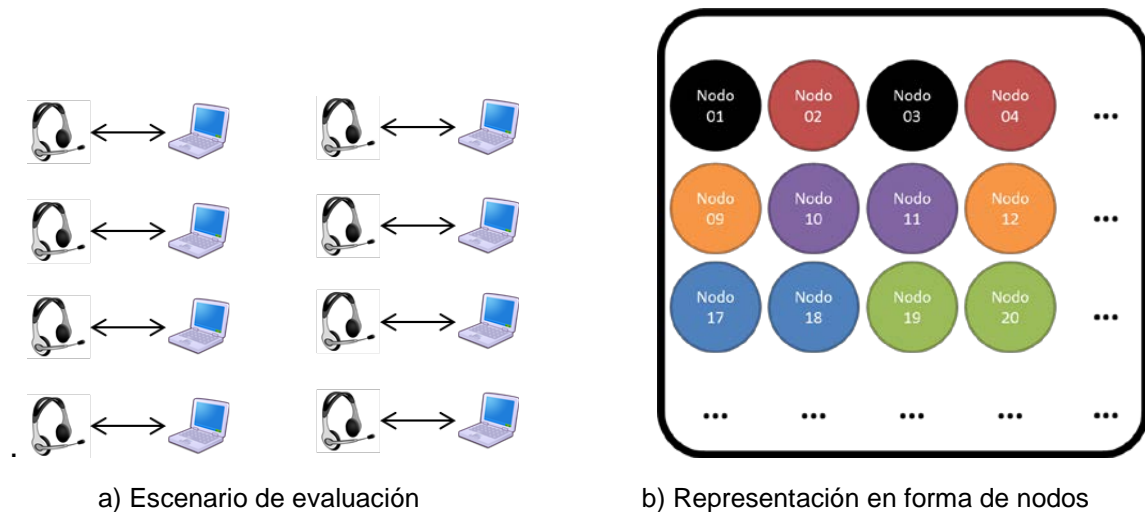


Figura 27. Escenario de evaluación y representación en forma de nodos.

Al plantear el escenario mostrado en la Figura 27, este proyecto de investigación busca evaluar formalmente el desempeño de la tecnología WFD para la transmisión de audio bidireccional en ambientes con alta densidad de usuarios, siendo de particular interés encontrar el máximo número de flujos de audio bidireccional que se pueden establecer y mantener con una calidad aceptable.

Debido a que este proyecto trata con la transmisión de audio bidireccional, en la siguiente sección se hará una breve descripción de los codecs de voz más comúnmente utilizados para este tipo de aplicaciones. Esto permitirá definir más específicamente el escenario de evaluación considerado en esta tesis.

5.2 Codificadores de voz

La codificación de la voz es el proceso en el que una señal de voz es temporalmente comprimida para posteriormente ser descomprimida, mientras se preserva la mayoría del contenido importante. A los codecs de voz se les denomina *vocoders*.

Por tanto, el objetivo primordial de un *vocoder* es disminuir la tasa de bits necesaria para representar una señal de voz mientras se mantiene un nivel adecuado de fidelidad. En la actualidad también se debe de considerar en ocasiones la complejidad computacional.

Para medir la calidad de la voz percibida se utiliza una métrica llamada *MOS* (por sus siglas en inglés, *Mean Opinion Score*) y cuenta con los siguientes grados: 5.- Excelente 4.- Bueno 3.- Razonable 2.- Pobre 1.- Malo

Se considerarán para los cálculos posteriores, el uso de tres *vocoders* (Tabla 18) los cuales son: G.722, G.723.1 y G.726. El primero de ellos es un *wideband* y los otros dos son *narrowband*. En el caso de los *vocoders wideband* son capaces de percibir el sonido en la banda de frecuencia que va desde 50 hasta 7,000 Hz; mientras que los *narrowband* solo van desde 200 a 3,300 Hz.

Tabla 18. MOS y Bitrate de los codecs a evaluar.

| Códec | MOS | Tasa de bits | Complejidad |
|---------|------------|-------------------------------|----------------------|
| G.722 | 4.1 | 64, 54 y 48 Kbits/sec | 5 MIPS ¹⁵ |
| G.723.1 | 3.9 y 3.62 | 6.3 Kbits/sec y 5.3 Kbits/sec | 2 MIPS |
| G.726 | 3.85 | 40, 32, 24 y 16 Kbits/sec | 16 MIPS |

¹⁵ Millones de Instrucciones Por Segundo.

5.2.1 Codificadores de voz a utilizar

En la Tabla 19 se muestran los parámetros de los codecs a utilizar para los cálculos matemáticos del máximo número de nodos activos en la red. Cabe mencionar que se agregó el *vocoder* G.711 solo para comparativa, ya que sus parámetros operación son similares a los códec G.722 con tasa de 64Kbps.

Tabla 19. Parámetros para cálculo del desempeño de los *vocoders* seleccionados

| EMPAQUETADO 1 | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|
| CODEC | Tasa de bits | Carga útil de voz (bytes) | Carga útil de voz (ms) | Paquetes por segundo (PPS) | Tamaño total de paquete* | Ancho de banda |
| G.711 | 64 Kbps | 160 | 20 | 50 | 1872 | 93.60 Kbps |
| G.722@64Kbps | 64 Kbps | 160 | 20 | 50 | 1872 | 93.60 Kbps |
| G.726@24Kbps | 24 Kbps | 60 | 20 | 50 | 1072 | 53.60 Kbps |
| G.723.1@5.3Kbps | 5.3 Kbps | 20 | 30 | 33.125 | 752 | 24.91 Kbps |

| EMPAQUETADO 2 | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|
| CODEC | Tasa de bits | Carga útil de voz (bytes) | Carga útil de voz (ms) | Paquetes por segundo (PPS) | Tamaño total de paquete* | Ancho de banda |
| G.711 | 64 Kbps | 320 | 40 | 25 | 3152 | 78.80 Kbps |
| G.722@64Kbps | 64 Kbps | 320 | 40 | 25 | 3152 | 78.80 Kbps |
| G.726@24Kbps | 24 Kbps | 120 | 40 | 25 | 1552 | 38.80 Kbps |
| G.723.1@5.3Kbps | 5.3 Kbps | 40 | 60 | 16.5625 | 912 | 15.10 Kbps |

| EMPAQUETADO 5 | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|
| CODEC | Tasa de bits | Carga útil de voz (bytes) | Carga útil de voz (ms) | Paquetes por segundo (PPS) | Tamaño total de paquete* | Ancho de banda |
| G.711 | 64 Kbps | 800 | 100 | 10 | 6992 | 69.92 Kbps |
| G.722@64Kbps | 64 Kbps | 800 | 100 | 10 | 6992 | 69.92 Kbps |
| G.726@24Kbps | 24 Kbps | 300 | 100 | 10 | 2992 | 29.92 Kbps |
| G.723.1@5.3Kbps | 5.3 Kbps | 100 | 150 | 6.625 | 1392 | 9.222 Kbps |

*Tamaño total de paquete=Carga útil de voz+IP+UDP+RTP+MAC

5.2.2 Proceso de empaquetamiento de los codificadores de voz

El proceso de empaquetado (Figura 28) consiste en esperar a que el *vocoder* arroje n cantidad de paquetes y de estos formar un solo paquete. A este paquete además se le debe añadir los encabezados necesarios para ser transmitidos, en este caso son: IP de la capa de red, UDP y RTP de la capa de transporte, y el encabezado de la capa MAC de 802.11.

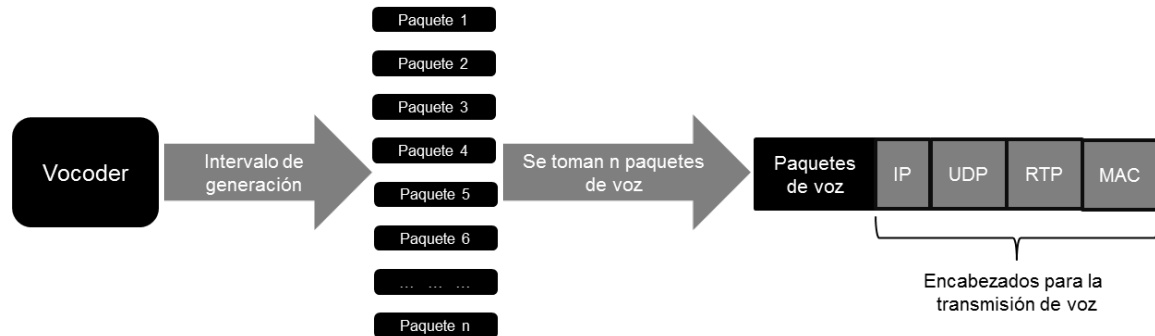


Figura 28. Proceso de empaquetado para la transmisión de voz

Como se observa en la Figura 28, este proceso conlleva un retardo dependiente del intervalo de generación de paquetes del *vocoder*. Por lo tanto, este retardo debe de considerarse a la hora de realizar los análisis de retardo fuente-destino (de aquí en adelante referido como *end-to-end delay*). Ya que para tráfico sensible al retardo como la voz y video, el *end-to-end delay* no debe ser mayor a 150 ms de acuerdo a (ITU-T Study Group 12, 2003), esto si se quiere proveer al usuario de una interactividad esencialmente en tiempo real. Por ejemplo, para el empaquetado de 5 de G.722, se estaría empaquetando el equivalente a 100 ms de audio, lo cual es muy cercano a la cota de 150 ms marcada por la ITU-T para tráfico de voz.

En esta tesis se consideran escenarios de transmisión de audio bidireccional con alta densidad de usuarios, donde se utilizan los codecs G.722, G.726 ó G.723.1.

5.3 Cama de pruebas de simulación

Una vez definidos el escenario de aplicación, los codecs de voz a considerar y sus esquemas de empaquetado, se pueden utilizar los resultados presentados en el Capítulo 4 para obtener analíticamente diversas métricas de desempeño del estándar Wi-Fi Direct en este tipo de escenarios. Sin embargo, un punto importante para evaluar el desempeño de la tecnología WFD en el escenario planteado, es la validación del modelo matemático propuesto en el Capítulo 4. Esto se puede lograr comparando los resultados obtenidos a partir del modelo con métricas obtenidas con alguna otra herramienta. Dichas métricas se pueden obtener realizando mediciones físicas o con la utilización de simuladores de red. En el caso de este trabajo de investigación se decidió utilizar simuladores de red debido a que el escenario plantea la utilización de un alto número de nodos. En particular se decidió utilizar el simulador de redes, *network simulator 2 (ns-2)*, el cual es un programa de código abierto altamente utilizado en la comunidad científica. Antes de introducir los resultados obtenidos con este programa para el escenario de evaluación planteado, es conveniente hacer una pequeña introducción del mismo.

5.4 Simulador ns-2

El ns-2 es un simulador de eventos discretos creado para la investigación de redes de telecomunicaciones y está disponible para múltiples plataformas. Probablemente ns-2 es el simulador de redes gratuito de uso más extendido tanto en investigación como para propósitos docentes.

Entre los usos más habituales que posee ns-2 se pueden destacar los siguientes:

- ✓ Simular estructuras y protocolos de redes de todo tipo (satélite, wireless, cableadas, etc.)
- ✓ Desarrollar nuevos protocolos, algoritmos y comprobar su funcionamiento.
- ✓ Comparar distintos protocolos en cuanto a prestaciones.

Ns-2 es un simulador orientado a objetos, pero éste no provee una interfaz grafica como tal para la programación de las rutinas. Por lo tanto, ns-2 utiliza para la escritura de los scripts de simulación el lenguaje Tcl, pero las librerías y módulos están escritos en su mayoría en C++ y OTcl (Figura 29). Por lo tanto, para realizar una simulación en ns-2, es necesario realizar el *script* en lenguaje Tcl, éste pasa a través del núcleo de ns-2 para obtener un archivo de trazas (.tr). En este archivo se almacena toda la información de los eventos ocurridos durante la simulación. Utilizando el archivo de trazas se pueden obtener animaciones mediante el NAM (*Network Animator*) que provee ns-2, o es posible analizar los datos mediante otros lenguajes (*perl, awk, etc.*) para obtener diversas estadísticas como lo son: el caudal eficaz, paquetes perdidos, retraso de paquetes, entre otras.

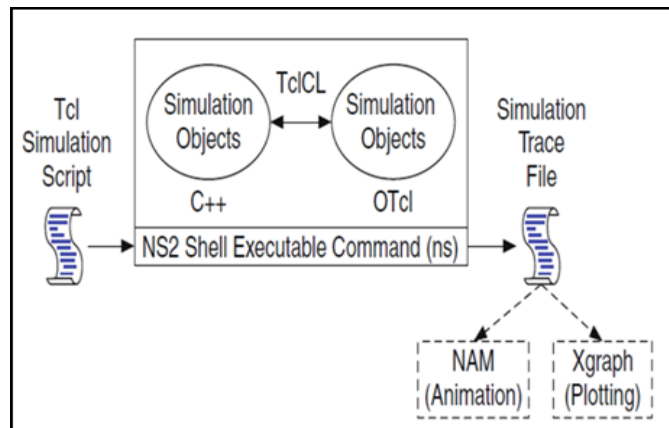


Figura 29. Jerarquía de simulación en ns-2

5.4.1 Escenario de simulación en ns-2

Como se mencionó al inicio de este trabajo de investigación, el escenario que se desea analizar es aquel en que todos los nodos que estén utilizando *WFD*, se encuentren transmitiendo de manera concurrente en un área común. Además se asume que todos los nodos son capaces de “escuchar” las transmisiones de los demás nodos. Este escenario se podría ver como uno de los escenarios de operación más problemáticos para cualquier tecnología, debido a los altos niveles de interferencia mutua entre los dispositivos. Esto hace al escenario muy atractivo para cuestiones de análisis de desempeño, por lo cual al utilizarlo se podrán

determinar las capacidades y limitaciones que ofrece WFD para la transmisión de flujos de audio bidireccional. Una vez programado el escenario en NS-2, se puede visualizar la posición de los nodos utilizando NAM. Por ejemplo, si se quiere simular un escenario de n nodos la animación en NAM se vería como lo mostrado en la Figura 30.

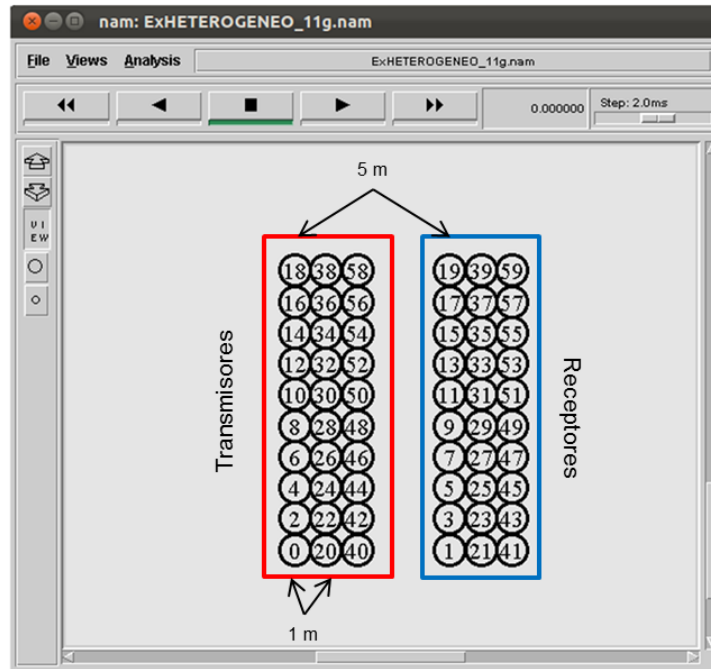


Figura 30. Escenario de Simulación en ns-2 para 30 nodos.

En la Figura 30 los nodos se colocaron en columnas de 10 nodos poniendo frente a frente transmisor y receptor. La distancia entre cada nodo transmisor y receptor es de 5m. mientras que la distancia entre una columna de transmisor y la siguiente es de 1m. Debido a lo anterior en ocasiones se empalmaran transmisores de una columna y receptores de otra columna, pero esto lejos de perjudicarnos, ayuda a simular una extrema interferencia entre los usuarios dentro del área en común que analizaremos. Una vez definido el escenario de simulación y habiendo introducido los simuladores de red utilizados, en el siguiente capítulo se procederá a mostrar los resultados obtenidos tanto con el modelo analítico como con la cama de pruebas simulada.

Capítulo 6. Resultados

Este capítulo se muestra los resultados obtenidos del desempeño del estándar Wi-Fi Direct en el escenario de aplicación para diferentes condiciones de operación. En particular se obtuvieron diversas métricas mediante la utilización del modelo matemático y la cama de pruebas de simulación. Para resolver el modelado matemático se utilizó el programa *Wolfram Mathematica 8.0*; y para realizar las simulaciones se programó la cama de pruebas en *ns-2 (network simulator 2)*. Los resultados mostrados a continuación son para el estándar Wi-Fi Direct, el cual utiliza en su capas PHY y MAC transceptores basados en el estándar IEEE 802.11g (Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00, 2010).

Aun y cuando la métrica de desempeño más importante para este trabajo de investigación es el número máximo de enlaces par-a-par de audio bidireccional que se pueden soportar en el escenario de aplicación propuesto (una alta densidad de usuarios transmitiendo de manera concurrente), para obtener dicha métrica es necesario primero evaluar el comportamiento de la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct. En este sentido, mediante la utilización del modelo matemático y la cama de pruebas de simulación se encontrarán métricas de operación tales como el tiempo promedio de servicio en la capa MAC, la probabilidad de colisión y el punto de saturación del sistema. En particular es necesario conocer el comportamiento de la capa MAC para distintos tamaños de paquete y tasas de transmisión. Además es importante descubrir el comportamiento del punto de saturación del sistema, esto con el objetivo de definir la zona donde las estadísticas se comportaran de manera estable. Una vez definidos los parámetros mencionados anteriormente y las cotas que se deben cumplir para tener una transmisión con calidad aceptable, se puede proceder a calcular el número máximo de transmisiones de audio inalámbrico bidireccional en enlaces par-a-par WFD.

Debido a los diferentes modos de operación que se pueden tener en la capa MAC del estándar IEEE 802.11g, es relevante obtener métricas de desempeño que permitan establecer qué modo de operación es más conveniente utilizar en el escenario de aplicación planteado. Para esto es necesario analizar el comportamiento de la capa MAC de Wi-Fi Direct para el mecanismo de acceso básico y para el mecanismo de acceso protegido RTS-CTS, esto con el objetivo de comparar ambos esquemas de operación. Similarmente, es relevante obtener métricas de desempeño para el caso en el cual se utiliza el mecanismo de EDCA, el cual permite definir diferentes parámetros de capa MAC para diferentes tipos de tráfico (ver Capítulo 2).

Una vez definidos el escenario de aplicación, las características de los codecs a utilizar y el modo de operación de la capa MAC, en las siguientes secciones se proporcionaran las métricas de desempeño para el caso de tráfico homogéneo y para el caso de tráfico heterogéneo. En caso del tráfico homogéneo se obtuvieron resultados para tres *vocoders* distintos: el G.722, G.726 y G.723.1. En caso de tráfico heterogéneo para realizar el análisis del escenario de aplicación se separaron los nodos activos en el medio en dos grupos: a) el primer grupo utilizará los parámetros del *vocoder* G.722, y b) el segundo grupo un tamaño de paquete de 1200 bytes. Con estos valores se encontró el comportamiento de la capa MAC para distintos valores de tráfico ofrecido a la red.

6.1 Tráfico homogéneo

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el caso en que todos los nodos tienen las mismas características en la transmisión de paquetes, como lo son: tamaño de paquete, tasa de transmisión, entre otras. Para la obtener los resultados que se muestran a continuación se utilizó el modelo matemático presentado en el Capítulo 6, así como la cama de pruebas de simulación.

6.1.1 Importancia del cálculo del retardo fuente-destino (end-to-end delay) y el punto de saturación del sistema

Debido a que el objetivo de esta tesis es determinar el desempeño de Wi-Fi Direct en enlaces par-a-par para tráfico sensible al retardo (como sería tráfico voz y video), en el análisis es importante considerar que en transmisiones de voz el retardo fuente-destino (de aquí en adelante referido como *end-to-end delay*) no debe ser mayor a 150 ms de acuerdo a (ITU-T Study Group 12, 2003). Esta consideración de diseño debe ser considerada para que el usuario pueda experimentar una interactividad en tiempo real. Para el cálculo de éste retardo se utilizan los datos mostrados en la Figura 31, donde:

- El tiempo de procesamiento en la fuente de tráfico es el tiempo que tarda en realizar la codificación y/o empaquetado de los datos.
- Para el cálculo del tiempo de servicio de la MAC es necesario realizar un análisis del mecanismo de acceso al medio de Wi-Fi Direct. Esta es la parte donde se hizo el aporte con el modelo matemático para la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct.
- El tiempo de transmisión se calcula a partir del tamaño de paquete y la tasa de transmisión del mismo.



Figura 31. Factores que intervienen en el cálculo del *end-to-end delay*.

Para observar el comportamiento del tiempo promedio de la capa MAC, $E[T_{MAC}]$, se fijó un tamaño de paquete de 800 bytes, el número de nodos activos en el medio en 10, la tasa de transmisión pico en 54 Mbps y se fue modificando el valor λ para cada estación. Con lo anterior, se obtiene cómo se comporta $E[T_{MAC}]$ al ir aumentando el valor de tráfico ofrecido a la red. En la Figura 32 se reporta la

diferencia entre el modelo teórico y la simulación realizada en ns-2 respecto a la probabilidad de colisión. En la Figura 33 se muestra la diferencia entre el modelo teórico y la simulación realizada en ns-2 respecto al valor de $E[T_{MAC}]$. En ambas figuras se observa que el modelo teórico es una cota superior con respecto a la probabilidad de colisión y el valor esperado del tiempo de servicio, esto en comparación con los resultados arrojados por la simulación. También se puede ver que utilizando el modelo se puede establecer una cota inferior respecto al tráfico soportado por la red antes de entrar a saturación. Establecer este punto es importante ya que una vez alcanzada la saturación el tiempo de servicio se desborda tal cual se muestra en la Figura 33. Los datos obtenidos en la gráfica justo antes de alcanzar la saturación de la red son:

Tabla 20. Comparación de resultados obtenidos del modelo con resultados de simulación para 10 nodos.

| Resultado obtenido de | En el punto justo antes de saturación | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|----------|--------------|------------|
| | Trafico | ρ_c | $E[T_{MAC}]$ | σ |
| Modelo | 18.5 Mbps | 0.2098 | 1.01596 ms | 0.1716 ms |
| Simulación | 20 Mbps | 0.1408 | 1.158 ms | 0.32259 ms |

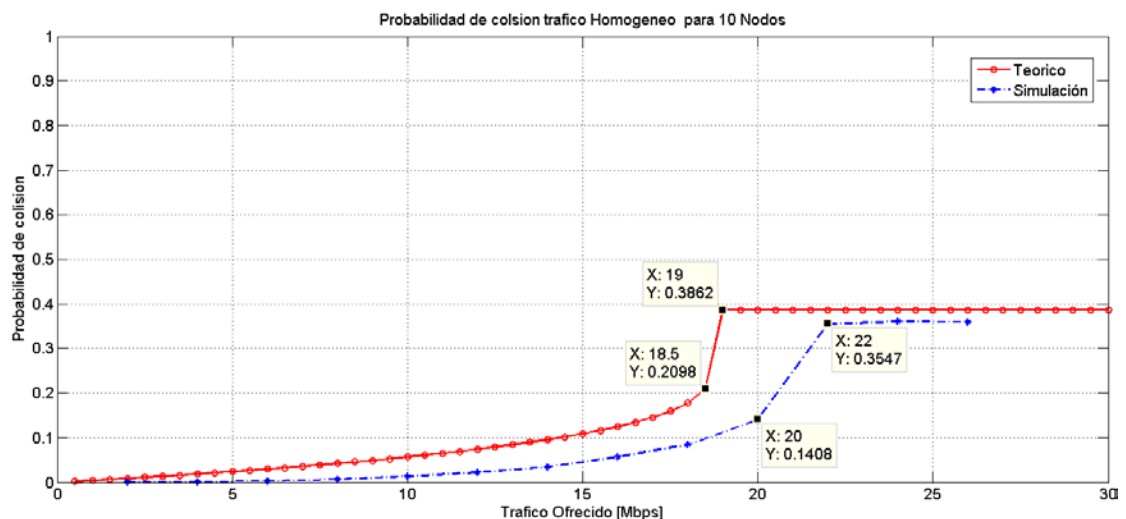


Figura 32. Probabilidad de colisión para el caso de tráfico homogéneo para 10 nodos comparando el modelo vs simulación ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps.

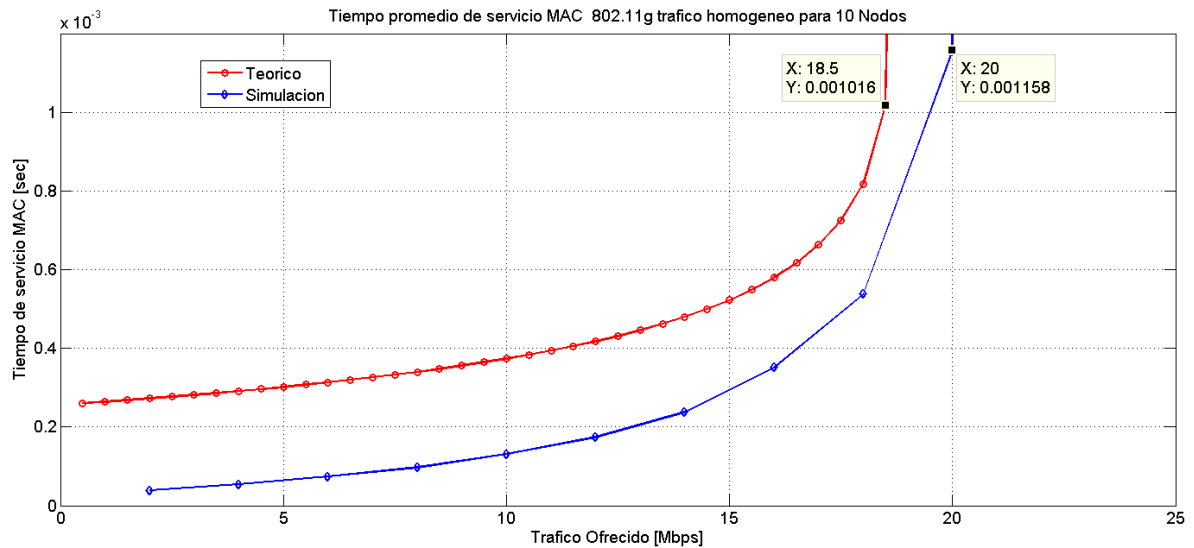


Figura 33. Tiempo promedio de servicio de la capa MAC para el caso de tráfico homogéneo para 10 nodos comparando el modelo vs simulación ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps.

Por lo tanto, a partir de los datos obtenidos se puede observar que antes de entrar en saturación, el valor de $E[T_{MAC}]$ no sobrepasa los 3 ms. Obtener un valor tan pequeño en esta métrica es bueno, ya que deja más tiempo para el procesamiento de los datos en la fuente.

6.1.2 Comparación contra otros modelos matemáticos y simuladores

Aun y cuando se realizó una comparación inicial del modelo matemático con la simulación, es importante mostrar por qué se eligió desarrollar un modelo propio siguiendo la metodología reportada en (Zhai, Kwon, & Fang, 2004) en vez de utilizar otros resultados reportados en la literatura. En particular, en esta sección se compararán los resultados obtenidos con el modelo propuesto en esta tesis con resultados obtenidos con el modelo reportado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007). Cabe mencionar que dicho modelo presenta un inconveniente, el cual es que el modelado hace la consideración de retransmisiones infinitas. Esta consideración no se apega al estándar IEEE 802.11 y por lo tanto tampoco se apega al estándar Wi-Fi Direct. La Figura 34 muestra los resultados para la

probabilidad de colisión obtenidos con el modelo propuesto en esta tesis, el modelo reportado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) y simulación. En esta figura también se incluye el valor de probabilidad de colisión en saturación obtenida con el modelo de (Bianchi, 2000) en forma de cota. Para la obtención de los datos de la Figura 34 se utilizó de nuevo un paquete de 800 bytes, pero ahora se tienen 40 nodos activos en el medio a través de los cuales se va aumentando el tráfico ofrecido a la red. Para esta figura, nuevamente se considera una tasa de transmisión WFD pico de 54 Mbps.

Como se muestra en la Figura 34, el modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) no llega en ningún momento al estado de saturación. Por lo tanto el modelo reportado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) no podría ser utilizado para determinar el número máximo de usuarios en el escenario de aplicación analizado en este trabajo de investigación. Por otro lado, los resultados obtenidos con el modelo introducido en el Capítulo 4 y la simulación llegan al valor de saturación cuando el tráfico ofrecido a la red es lo suficientemente alto, con esto se reafirma el por qué fue necesario desarrollar un modelo específico para el análisis de desempeño de Wi-Fi Direct en escenarios de aplicación con alta densidad de usuarios.

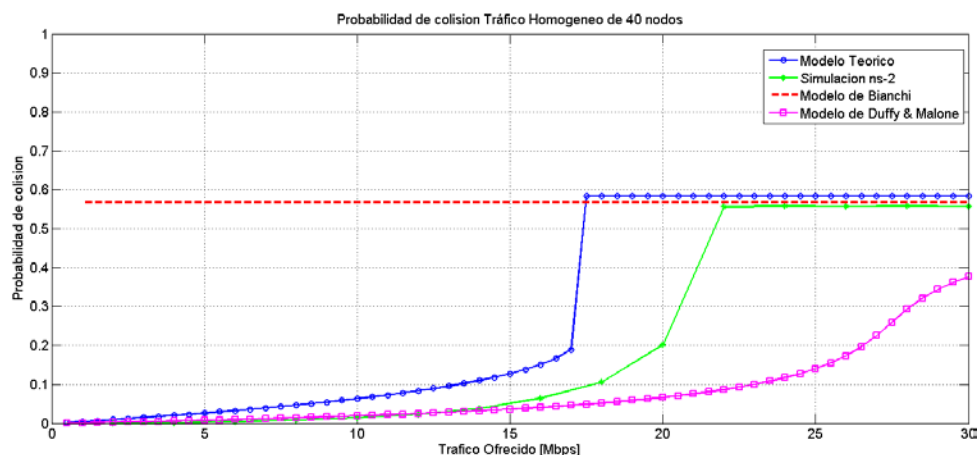


Figura 34. Comparación del modelo presentado en el Capítulo 4, el modelo presentado en (Malone, Duffy, & Leith, 2007) y la simulación en ns-2. La tasa de transmisión pico WFD utilizada fue de 54 Mbps.

En la Figura 34, se puede observar que al aumentar el número de nodos, el modelo matemático propuesto en la investigación presenta su punto de saturación un poco antes (17 Mbps) que lo reportado para 10 nodos (18.5 Mbps). Además de este dato se puede determinar que el valor de p_c es igual a 0.19, mientras que el valor de $E[T_{MAC}]$ es de 0.888311 ms con una desviación estándar de 1.18551 ms.

Por lo tanto, queda demostrado que para 10 y 40 nodos transmitiendo de forma concurrente con paquetes de 800 bytes, que el tiempo de servicio de la capa MAC no rebasa el valor de 3 ms antes de alcanzar el punto de saturación.

Con los resultados reportados en las Subsecciones 6.1.1 y 6.1.2 queda establecido que el modelo matemático puede ser utilizado para obtener cotas superiores para la probabilidad de colisión y el valor esperado del tiempo de servicio. Por lo tanto, a partir de estos resultados se puede establecer una cota inferior respecto al tráfico soportado por la red antes de entrar a saturación. Utilizando estas cotas en la siguiente subsección se procederá a comparar el desempeño de los mecanismos de acceso básico y RTS-CTS del estándar Wi-Fi Direct.

6.1.3 Diferencia entre la utilización del mecanismo básico y RTS-CTS

Tal como se explicó en el Capítulo 2, la capa MAC de Wi-Fi Direct utiliza los modos de operación DCF ó EDCA (para caso de tráfico con requerimientos de QoS) para la transmisión de los datos. Ambos modos de operación consideran la utilización de dos mecanismos de acceso al medio: básico o RTS-CTS. Por lo tanto, en esta subsección se muestran los resultados del comportamiento de los dos mecanismos cuando se consideran diferentes formas de empaquetado de datos.

La Figura 36 se reportan los resultados analíticos obtenidos para la probabilidad de colisión en función de número de nodos activos en el medio, considerando diferentes tipos de empaquetado, diferentes mecanismos de acceso al medio y una tasa pico de transmisión de 54 Mbps. El tráfico ofrecido por nodo se fijo en 64 kbps, por lo cual el tráfico total ofrecido a la red se incrementa conforme se incrementa el número de nodos. Para obtener las graficas de la Figura 36 se utilizó como base un tamaño de paquete de datos de 160 bytes. En vez de transmitir cada paquete de 160 bytes de forma individual, se consideró agrupar (empaquetar) varios de estos paquetes de datos para formar la carga útil de la capa MAC (referida como MPDU), tal como se muestra en la Figura 35.

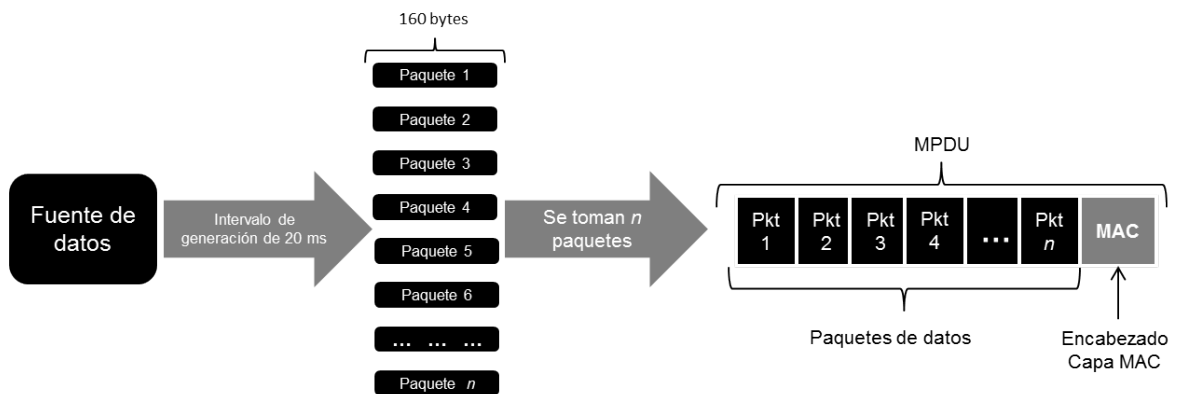


Figura 35. Esquema de empaquetado considerando una tasa de datos de 64 kbps y la generación de paquetes de 160 bytes.

En la Figura 36 se muestran las gráficas de la probabilidad de colisión vs número de nodos para empaquetados de 1, 2, 3, 4, 5 y 14 paquetes por MPDU.

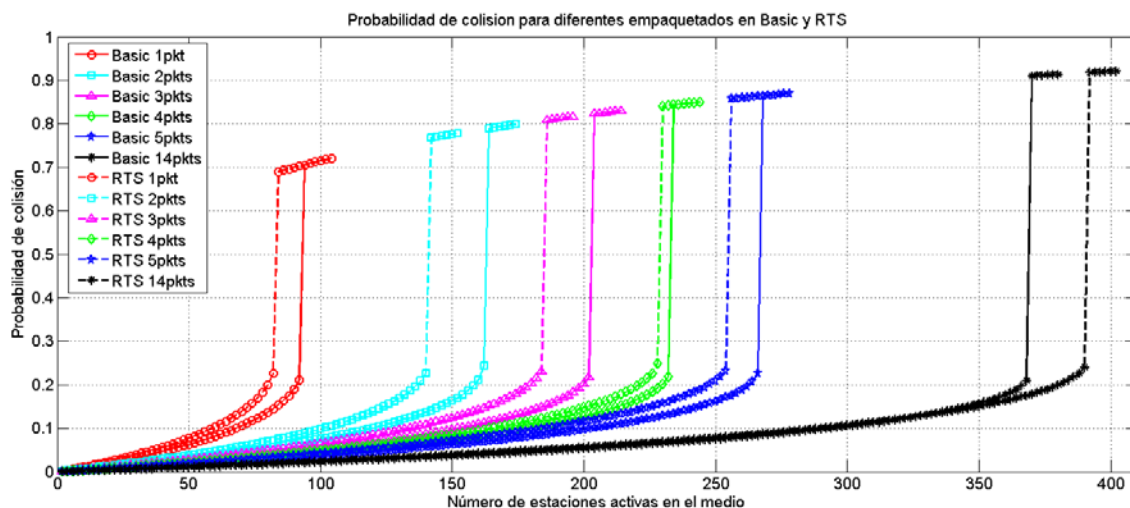


Figura 36. Probabilidad de colisión para diferente empaquetado bajo el mecanismo básico y RTS-CTS.

En la Figura 36 se puede ver que para una tasa fija de generación de datos por nodo, se logra tener un mayor número de usuarios en la red conforme se van agrupando un mayor número de paquetes de datos para formar el MPDU. Se puede observar en la Figura 36, que la diferencia es muy marcada en cuanto si se tiene un empaquetado de 5 a si se tiene el de 14. Lo anterior se debe a que cuando el empaquetado es más grande la tasa de generación de paquetes MPDU es menor, debido a que la tasa de datos de la fuente se mantiene fija en 64 kbps. Por lo tanto, el paquete pequeño satura más rápido el medio al enviar más paquetes por nodo en periodos de tiempo similares.

En la Figura 36 también se puede ver que la utilización del mecanismo de acceso básico para los empaquetados de 1 a 5 (160 bytes a 800 bytes) permite mayor número de nodos activos en el medio, esto en comparación con el mecanismo RTS-CTS. Lo anterior se debe a que el mecanismo RTS-CTS introduce mayor sobrecarga a la red cuando se consideran tamaños de paquete pequeños, ya que se tendrían que transmitir varios paquetes de control muy frecuentemente. Por ejemplo, en el caso de cada estación individual se genera un paquete MAC, un RTS, un CTS y un ACK aproximadamente cada 20 ms para el caso del

empaquetado de 1. Por lo tanto conforme se incrementa el número de estaciones el medio inalámbrico se satura más rápido que con el mecanismo básico (el cual genera tan solo un paquete MAC y un ACK cada 20 ms).

Para el caso de empaquetado de 14 es diferente, debido a que el intervalo de generación de paquetes en la capa MAC es mayor y el MPDU es grande. Con esto se tiene que el tiempo de colisión en el mecanismo RTS-CTS es mucho más pequeño que su tiempo de transmisión exitosa, ya que cuando ocurre una colisión está se da en los paquetes RTS/CTS, los cuales son mucho más pequeños que la MPDU. Esto tiene el efecto de “liberar el medio” mucho más rápido que en el esquema básico, debido a que en el esquema básico los tiempos de colisión y transmisión exitosa son los mismos y relativamente grandes.

Para finalizar con el análisis presentado esta subsección, en la Tabla 20 se presenta el número máximo de nodos activos que se pueden tener en la red antes de entrar en saturación. En esta tabla se muestra que para los empaquetados de 1 a 5 se pueden soportar más usuarios utilizando el esquema básico. Por lo tanto, en los casos en cuales se requiera manejar tamaños de MPDU pequeños y medianos para tasas de generación de datos fijas, se realizará el análisis del desempeño de la red WDF considerando únicamente el mecanismo de acceso al medio básico.

Tabla 21. Número máximo de nodos activos en el medio para diferentes empaquetados, utilizando los mecanismos: básico y RTS-CTS.

| Empaquetado | Mecanismo | |
|-------------|-----------|---------|
| | Básico | RTS-CTS |
| 1 | 92 | 82 |
| 2 | 162 | 140 |
| 3 | 202 | 184 |
| 4 | 232 | 228 |
| 5 | 266 | 254 |
| 14 | 368 | 390 |

6.1.4 Emulación de tráfico de gran numero de nodos con un número menor de ellos

Por lo general si se desean realizar pruebas de desempeño de la red utilizando una cama de pruebas física, es difícil contar con un número muy grande de nodos o terminales. Por lo tanto, en este trabajo de investigación, se consideró importante realizar un análisis donde se muestre hasta donde es posible emular las estadísticas obtenidas a partir de escenarios con un alto número de nodos utilizando un número pequeño de ellos. En particular, las estadísticas a las que se busca obtener son la probabilidad de colisión en el medio, p_c , y el tiempo promedio de servicio de la capa MAC, $E[T_{MAC}]$.

Para este análisis se utilizó un tamaño de paquete fijo de 800 bytes para cada nodo, obteniendo estadísticas de desempeño para diferente número de nodos activos en la red. El tráfico ofrecido a la red se incremento gradualmente al modificar el tiempo de arribo de paquetes a la cola, λ , para cada nodo. Utilizando el modelo matemático se calcularon los valores de p_c y $E[T_{MAC}]$ para diferente número de nodos, $n = 2, 4, 10, 20, 40, 100$ y 200 , y diferentes tasas de tráfico ofrecido. En el caso de simulación se obtuvieron métricas para $n = 4, 10, 20, 40$ y 100 . Los resultados arrojados por el modelo matemático y la simulación son mostrados en la Figura 37 y la Figura 38 respectivamente.

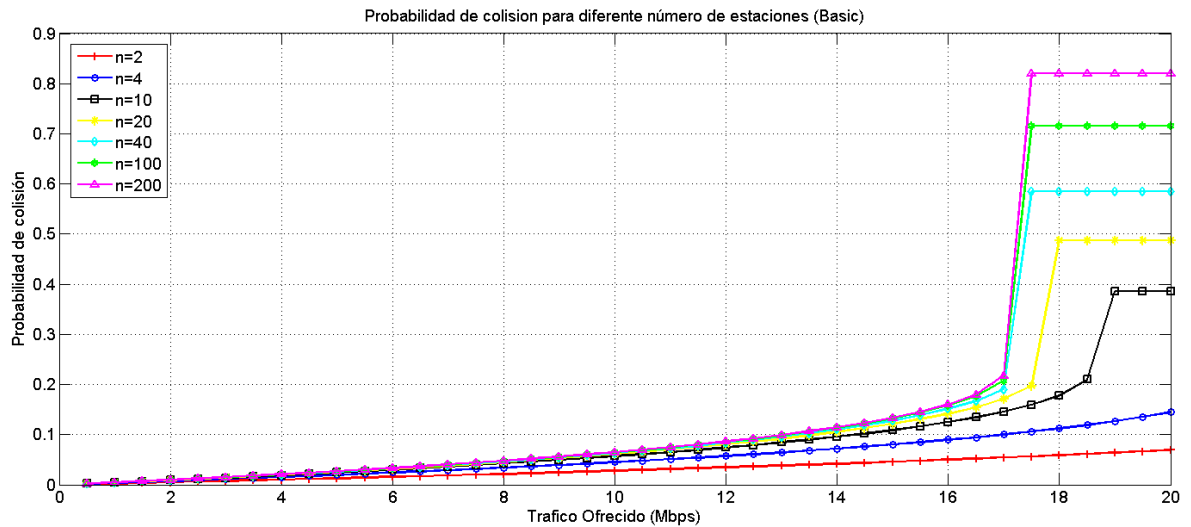


Figura 37. Probabilidad de colisión para diferente numero de nodos activos en el medio (modelo).

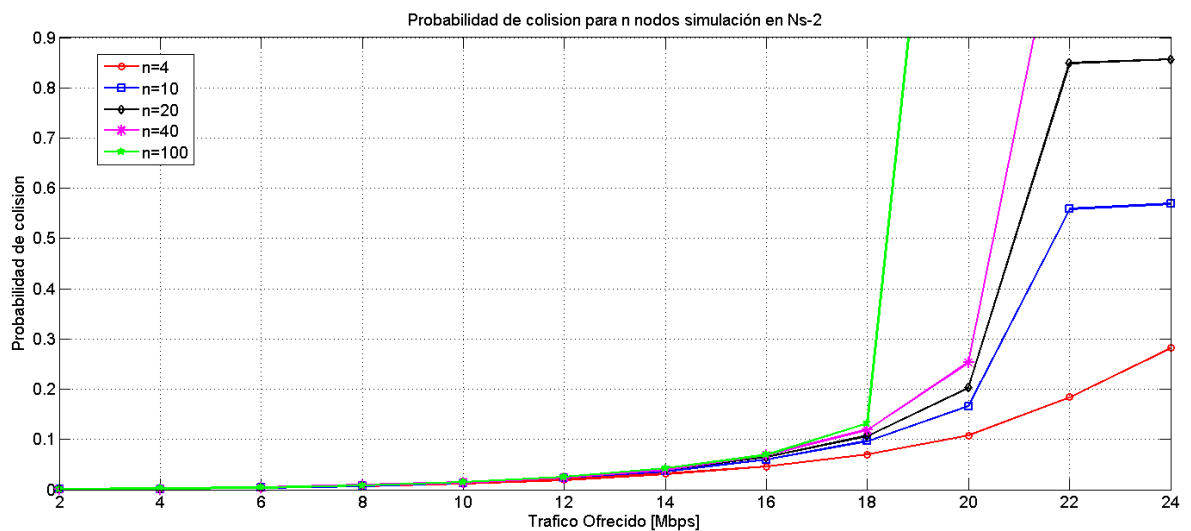


Figura 38. Probabilidad de colisión para diferente numero de nodos activos en el medio (simulación).

Como se observa en la Figura 37 y la Figura 38, tanto el modelo analítico como la simulación presentan un comportamiento similar. En ambas figuras existe una zona donde las gráficas están muy cercanas unas de otras. Esta zona de "similitud" se extiende a lo largo del tráfico ofrecido a la red y termina un poco antes de alcanzar la saturación, lo cual ratifica la importancia de encontrar el punto

de saturación del sistema. Considerando como referencia la probabilidad de colisión, con la utilización de un número de nodos relativamente pequeño (alrededor de 10 o 20 nodos) se podría emular el comportamiento de un gran número de nodos (entre 100 y 200 nodos) para tasas de tráfico ofrecido a la red hasta 14 Mbps.

Con fin de determinar con mayor grado de certeza que dicha emulación es factible, en la Figura 39 se muestran los resultados analíticos obtenidos para el tiempo promedio de servicio de la capa MAC, $E[T_{MAC}]$. Nuevamente, en esta figura existe una zona donde las graficas están muy cercanas unas de otras. En particular esta cercanía se mantiene hasta alrededor de los 14 Mbps de tráfico ofrecido a la red para $n = 10, 20, 40, 100$ y 200 nodos. En la Tabla 22, se reporta el comportamiento del tiempo promedio de servicio de capa MAC para los valores de nodos: 10, 20, 40, 100 y 200. Se observa de primera instancia que los valores son muy similares entre ellos, aun y cuando la diferencia entre el número de nodos puede ser bastante grande.

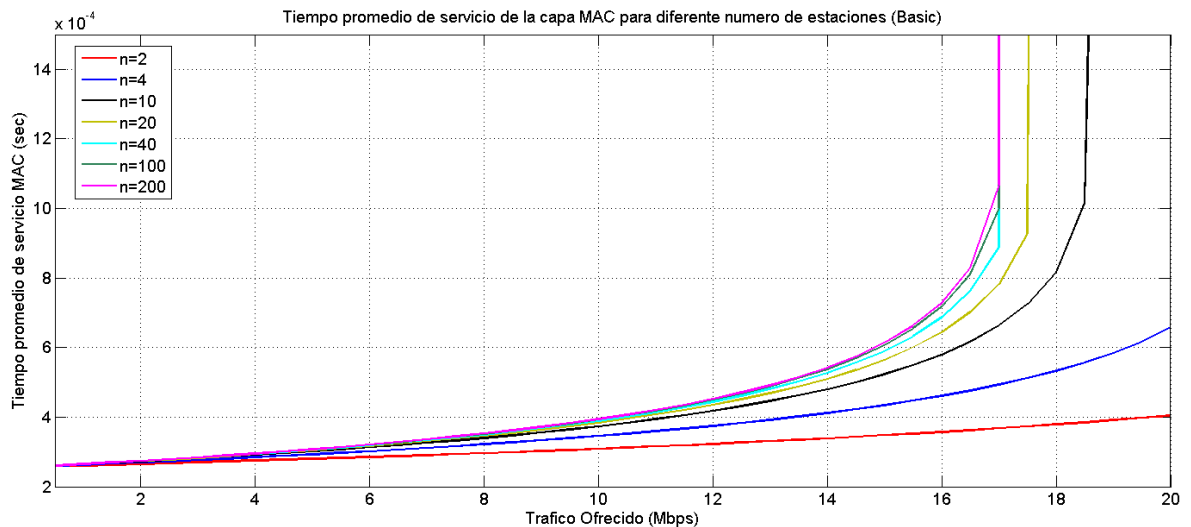


Figura 39. Tiempo promedio de servicio de la capa MAC para distinto número de nodos activos en el medio (modelo matemático).

Tabla 22. Tiempos promedio de servicio de la capa MAC para diversos números de nodos y tráfico ofrecido.

| No. de nodos | Tráfico Ofrecido (Mbps) | | | | |
|--------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 10 | 0.3131 ms | 0.3399 ms | 0.3735 ms | 0.4176 ms | 0.4798 ms |
| 20 | 0.3171 ms | 0.3465 ms | 0.3841 ms | 0.4349 ms | 0.51 ms |
| 40 | 0.3192 ms | 0.3499 ms | 0.3897 ms | 0.4442 ms | 0.5272 ms |
| 100 | 0.3204 ms | 0.352 ms | 0.3931 ms | 0.4501 ms | 0.5383 ms |
| 200 | 0.3208 ms | 0.3527 ms | 0.3943 ms | 0.4521 ms | 0.5422 ms |

Para aclarar lo anterior, se realizó la comparación de las métricas de probabilidad de colisión y tiempo promedio de servicio reportados en la Figura 37 y la Figura 39 respectivamente. En esta comparativa se tomo como base las estadísticas de 10 nodos y se comparó contra las estadísticas obtenidas con 20, 40, 100 y 200 nodos. Los resultados son mostrados en la Tabla 23 para la probabilidad de colisión, y en la Tabla 24 para el tiempo promedio de servicio de capa MAC.

Tabla 23. Diferencia en probabilidad de colisión tomando como base 10 nodos.

| Diferencia entre no. de nodos | Tráfico Ofrecido [Mbps] | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 20 – 10 | 0.00193 | 0.00295 | 0.00432 | 0.00629 | 0.00954 |
| 40 – 10 | 0.00291 | 0.00446 | 0.00655 | 0.00959 | 0.01464 |
| 100 – 10 | 0.00351 | 0.00538 | 0.00791 | 0.01163 | 0.01794 |
| 200 – 10 | 0.00371 | 0.00568 | 0.00837 | 0.01232 | 0.01904 |

Tabla 24. Diferencia en tiempo promedio de servicio de la capa MAC en milisegundos tomando como base 10 nodos.

| Diferencia entre no. de nodos | Tráfico Ofrecido [Mbps] | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 20 – 10 | 0.004 | 0.0066 | 0.0106 | 0.0173 | 0.0302 |
| 40 – 10 | 0.0061 | 0.01 | 0.0162 | 0.0266 | 0.0474 |
| 100 – 10 | 0.0073 | 0.0121 | 0.0196 | 0.0325 | 0.0585 |
| 200 – 10 | 0.0077 | 0.0128 | 0.0208 | 0.0345 | 0.0624 |

Por lo tanto, a partir de los resultados y análisis presentados en esta sección es posible concluir que se puede emular el comportamiento de una red WFD con alta densidad de usuarios utilizando un número relativamente pequeño de entre 10 y 20 nodos, esto para tráficos ofrecidos a la red iguales o menores a 14 Mbps.

6.1.5 Desempeño de diversos codificadores de voz en cuanto a máximo número de nodos en la red

Debido a que el objetivo de esta tesis es:

“Analizar el desempeño de una red inalámbrica de área personal creada con la tecnología Wi-Fi Direct, en áreas donde se tiene una alta densidad de usuarios transmitiendo audio bidireccional o tráfico sensible al retardo de forma concurrente”.

En esta subsección se muestran las métricas de desempeño obtenidas para el escenario propuesto en el Capítulo 5 cuando se utilizan los *vocoders* G.722, G.726 y G.723.1 para la transmisión de audio bidireccional en el escenario aplicación planteado en esta tesis. Los parámetros considerados para cada uno de los *vocoders* fueron reportados en el capítulo 5 para esquemas de empaquetado de 1, 2 y 5 paquetes generados por el códec.

En el escenario planteado para obtener las métricas, los enlaces par-a-par estarán transmitiendo tráfico homogéneo de audio bidireccional de manera concurrente. Además se considera la utilización del modo de operación *EDCA* (que ofrece QoS para voz) de la capa MAC de Wi-Fi Direct, para compararla con el modo de operación estándar, *DCF*, ya que existe una diferencia marcada entre los parámetros de ambos modos de operación. Estos parámetros se se muestran en la Tabla 25. Utilizando el modelo presentado en el Capítulo 4 y los valores de operación mostrados en la Tabla 25, se determinará el número máximo de enlaces par-a-par que puede soportar el estándar Wi-Fi Direct para cada uno de los *vocoders*.

Tabla 25. Parámetros de capa MAC y PHY para la transmisión de datos de voz, utilizados para los distintos vocoders considerados.

| Modo de Operación | CW_{min} | CW_{max} | DIFS/AIFS | m | α |
|-----------------------------|------------|------------|------------|---|----------|
| DCF para todo tipo de datos | 15 | 1023 | 28 μ s | 6 | 7 |
| EDCA para datos de voz | 4 | 7 | 28 μ s | 1 | 7 |

En la Figura 40 se muestran los resultados de la probabilidad de colisión para el vocoder G.722, mientras que en la Figura 41 se muestran los resultados para vocoder G.726. En estas figuras se puede ver que el sistema entra en saturación más rápidamente cuando se utiliza un empaquetado de 1 para ambos vocoders y para ambos modos de operación (EDCA y DCF). Este comportamiento se repite cuando se considera el vocoder G.723.1, tal cual se muestra en la la Figura 42.

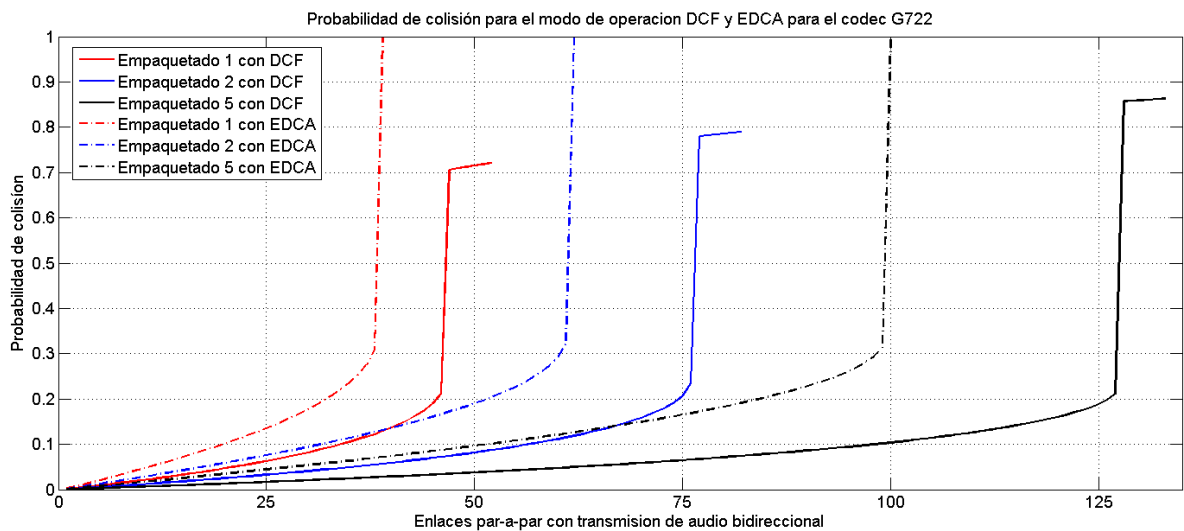


Figura 40. Vocoder G.722 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

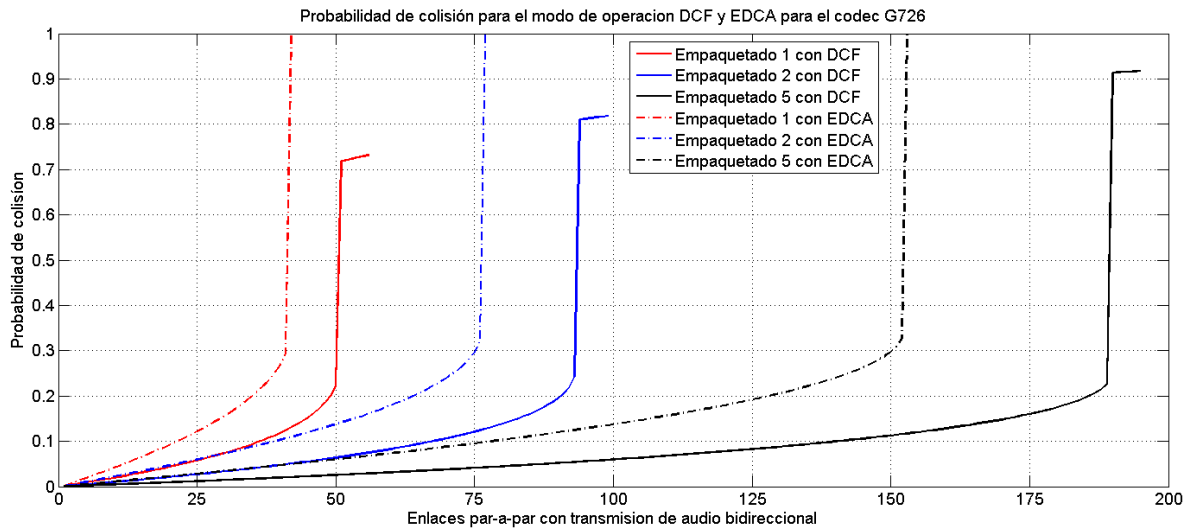


Figura 41. Vocoder G.726 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

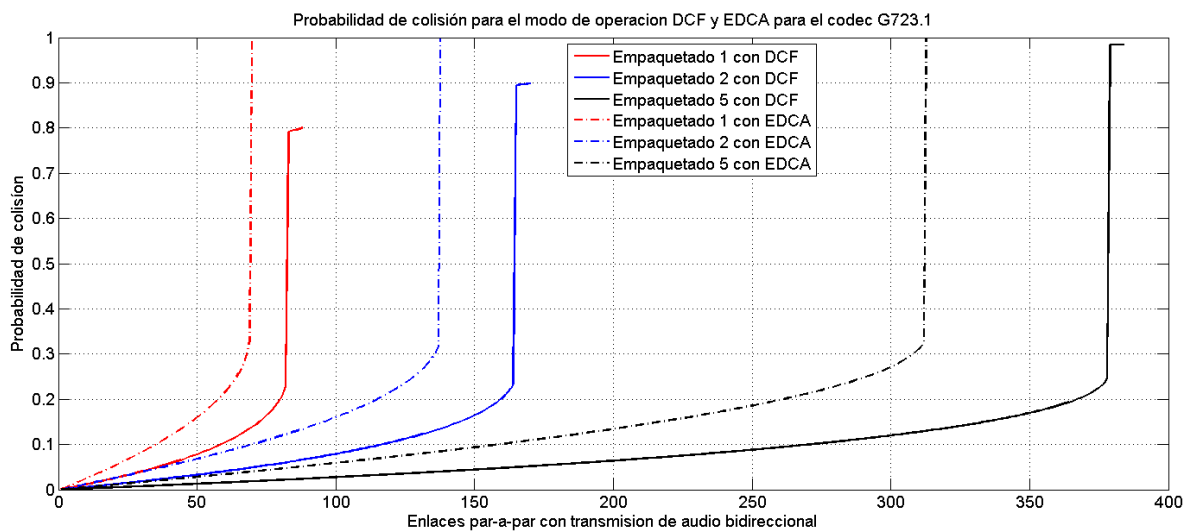


Figura 42. Vocoder G.723.1 para tráfico homogéneo considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 40, la Figura 41 y la Figura 42, se puede concluir que utilizar el mecanismo con QoS de IEEE 802.11 (EDCA) no es recomendable para escenarios donde se contemple tener tráfico homogéneo. Esto debido a que el número de enlaces par-a-par para transmisión de audio bidireccional que se pueden lograr es menor con el modo de operación EDCA que cuando se

utiliza el modo de operación DCF (el cual es el modo común de operación). El comportamiento mostrado por el modo de operación EDCA se debe a que los valores de CW_{\min} y CW_{\max} son menores en comparación con los utilizados en el modo de operación DCF. Lo que provoca esta diferencia, es que al tener ventanas de contención pequeñas en el modo de operación EDCA, los paquetes de voz de todos los nodos buscarán acceder al medio en un periodo de contención reducido (comparado con DCF), con lo cual se provocan más colisiones y una saturación más rápida del medio.

Una vez comparados los modos de operación para cada uno de los *vocoders*, se consideró conveniente mostrar gráficas que permitieran comparar el desempeño obtenido con cada uno de ellos para cada esquema de empaquetado propuesto (empaquetado de 1,2 y 5). En este caso de nuevo se considera la utilización del modo de operación EDCA y DCF para cada uno de los *vocoders*. Los resultados se muestran en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45 de esta subsección. De estos resultados se puede concluir que al utilizar *vocoder* G.723.1 se logra alcanzar mayor número de enlaces par-a-par de audio bidireccional en el medio antes de llegar al punto de saturación. Esto se debe a que el *vocoder* G.723.1 genera un menos paquetes por segundo (PPS) que los generados por los otros dos *vocoders*. Esta es una consideración de diseño importante, que debe de ser tomada en cuenta en el desarrollo y despliegue de soluciones Wi-Fi Direct en ambientes de alta densidad. Adicionalmente, en las Figuras 45, 46 y 47 se puede constatar de nuevo que la utilización del modo de operación EDCA para tráfico homogéneo implica alcanzar el punto de saturación mucho más rápidamente (menor número de estaciones activas) que con el modo de operación DCF.

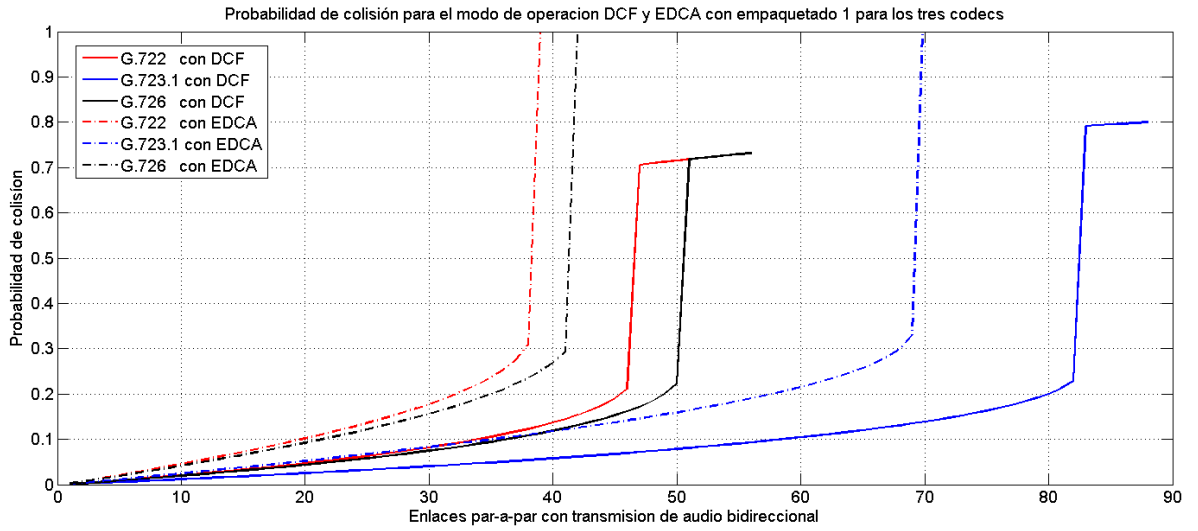


Figura 43. Comparación del empaquetado de 1 para los tres vocoders considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

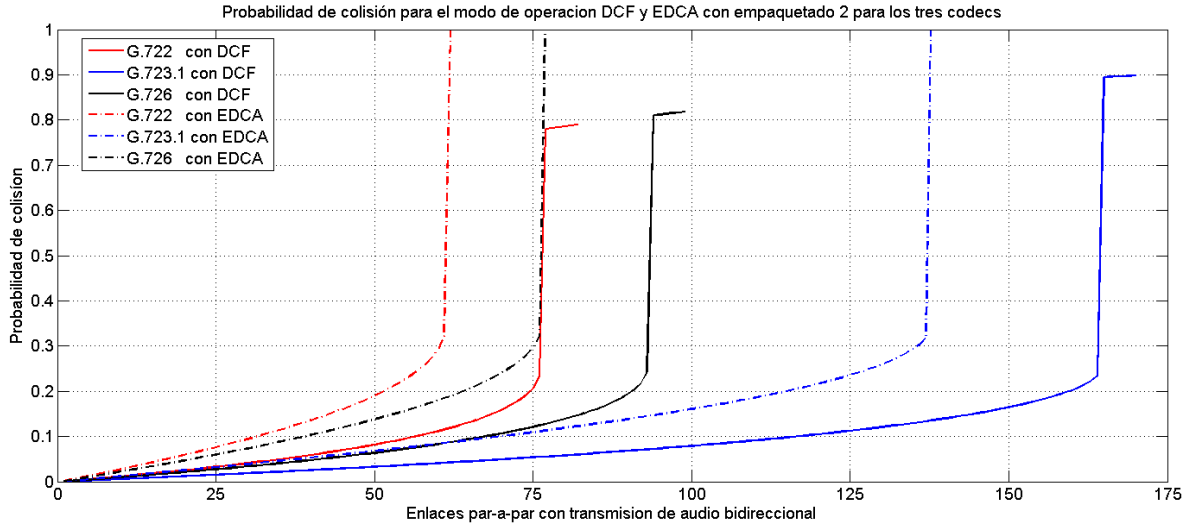


Figura 44. Comparación del empaquetado de 2 para los tres vocoders considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

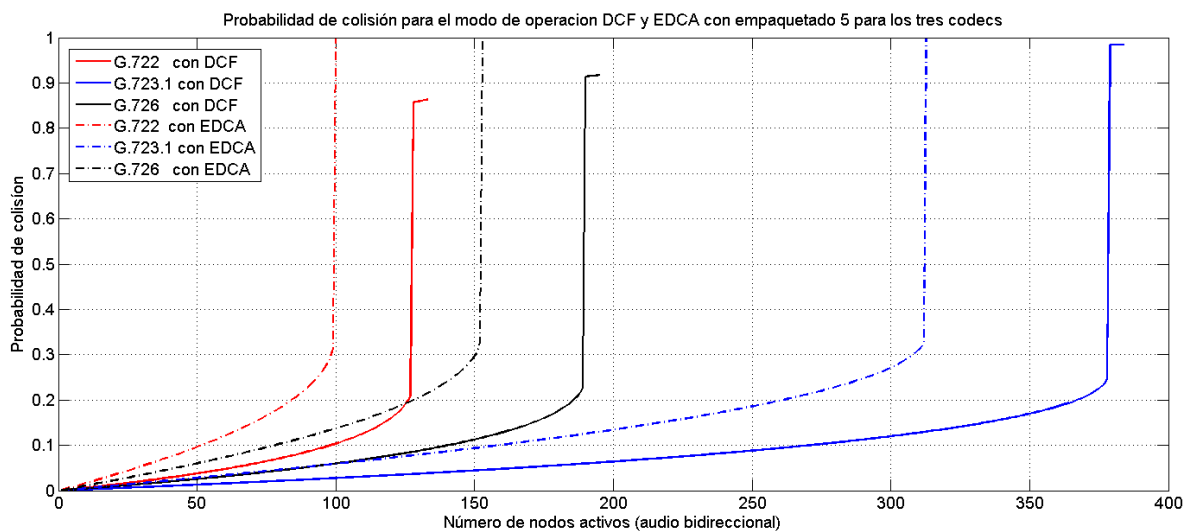


Figura 45. Comparación del empaquetado de 5 para los tres vocoder considerando los parámetros de capa MAC de los modos de operación EDCA y DCF.

Aun y cuando de los resultados mostrados anteriormente se podría concluir que es mejor utilizar un empaquetado de 5, ya que permitiría un mayor número de enlaces antes de entrar a saturación, cabe recordar que como se mencionó en la Sección 5.2.1 si se utiliza un empaquetado de 5, se están empaquetando lo que corresponde a 100 ms de audio. Este valor es muy cercano a la cota de los 150 ms que marca la ITU-T (ITU-T Study Group 12, 2003) para la transmisión de audio en “tiempo real”. Sin embargo, se consideró pertinente analizar este caso debido a que todavía puede considerarse su utilización en algunas aplicaciones tales como como la transmisión de audio de alta calidad entre un reproductor de audio y unos audífonos inalámbricos.

De acuerdo a los resultados mostrados en esta subsección y tomando en consideración la cota de 150 ms marcada por la ITU-T para el *end-to-end delay*, se concluye que el mejor esquema de empaquetado de los que se analizaron en este trabajo es el de empaquetar dos paquetes del codificador de voz. Con el fin de confirmar esta afirmación, en la Figura 46 se muestra la probabilidad de que la capa MAC descarte un paquete para los 3 codecs considerados y para ambos modos de operación MAC. En esta figura se puede ver que antes de alcanzar el

punto de saturación la probabilidad de descarte de paquetes a nivel MAC es mucho menor a 0.01 (de hecho la probabilidad de descarte antes de saturación es de alrededor de 0.0001 para el peor de los casos). Por lo tanto, en el escenario analizado la pérdida de paquetes a nivel capa MAC es lo suficientemente baja antes de saturación para permitir que los tres vocoders analizados trabajen adecuadamente.

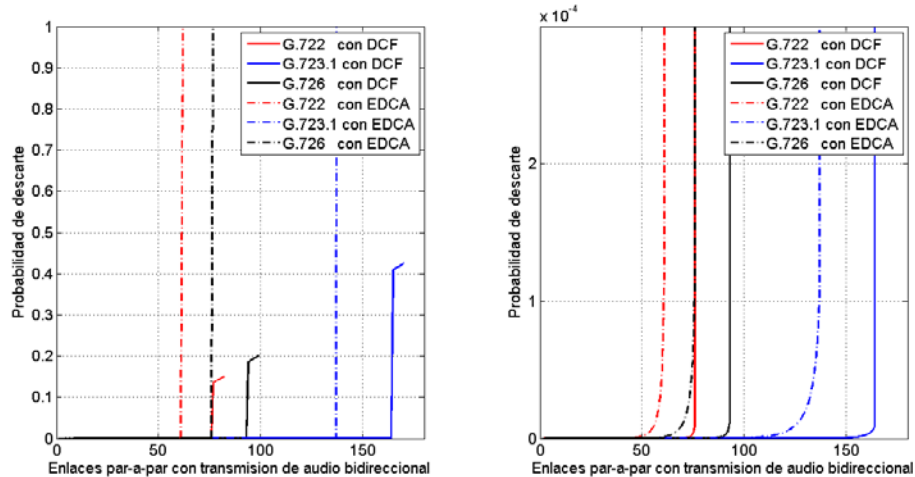


Figura 46. Probabilidad de descarte de paquete por la capa MAC para un esquema empaquetado de 2, para los tres vocoders.

A manera de resumen, en la Tabla 26, se muestran los valores máximos de enlaces par-a-par WFD de audio bidireccional que pueden estar transmitiendo de manera concurrente para cada uno de los *vocoders* analizados. Adicionalmente en la Tabla 27 se muestran los valores máximos del tiempo promedio de servicio de la capa MAC de Wi-Fi Direct para cada uno de los *vocoders* analizados en el punto justo antes de la saturación del sistema. Con estas tabla se puede confirmar que parámetros tales como el empaquetado de los datos, la tasa de generación de paquetes y la utilización del modo de operación EDCA, influyen de manera directa en el número máximo de enlaces par-a-par de audio bidireccional que se pueden soportar en ambientes de alta densidad utilizando la tecnología Wi-Fi Direct. Cabe mencionar que este es el número de usuarios soportados por canal, por lo cual el

total de usuarios concurrentes en un área común podría doblarse e incluso triplicarse utilizando otros canales.

Tabla 26. Número máximo de sesiones de audio bidireccional sobre enlaces par-a-par WFD que se pueden establecer para cada uno de los vocoders analizados.

| Empaquetado \ Vocoder | | Vocoder | | |
|-----------------------|------|---------|-------|---------|
| | | G.722 | G.726 | G.723.1 |
| 1 | DCF | 46 | 50 | 164 |
| | EDCA | 38 | 41 | 69 |
| 2 | DCF | 76 | 94 | 164 |
| | EDCA | 61 | 76 | 132 |
| 5 | DCF | 127 | 189 | 378 |
| | EDCA | 99 | 152 | 312 |

Tabla 27. Tiempo promedio máximo de servicio y desviación estándar de la capa MAC para sesiones de audio bidireccional sobre enlaces par-a-par WFD que se pueden establecer para cada uno de los vocoders analizados.

| Empaquetado \ Vocoder | | G.722 | | G.726 | | G.723.1 | |
|-----------------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | $E[T_{MAC}]$ | σ | $E[T_{MAC}]$ | σ | $E[T_{MAC}]$ | σ |
| 1 | DCF | 0.593559 ms | 0.902905 ms | 0.593921 ms | 0.963548 ms | 0.570062 ms | 0.958543 ms |
| | EDCA | 0.306271 ms | 0.286454 ms | 0.265128 ms | 0.243431 ms | 0.279048 ms | 0.267611 ms |
| 2 | DCF | 0.845646 ms | 1.44356 ms | 0.741632 ms | 1.33941 ms | 0.589709 ms | 1.01777 ms |
| | EDCA | 0.406982 ms | 0.387493 ms | 0.321791 ms | 0.305342 ms | 0.264887 ms | 0.250469 ms |
| 5 | DCF | 1.0699 ms | 1.60446 ms | 0.808072 ms | 1.33302 ms | 0.694925 ms | 1.26917 ms |
| | EDCA | 0.595397 ms | 0.559616 ms | 0.411387 ms | 0.392826 ms | 0.301575 ms | 0.287881 ms |

6.2 Tráfico heterogéneo

Una vez analizado el desempeño de Wi-Fi Direct en ambientes de alta densidad para tráfico homogéneo, en esta sección se utilizará el modelo para tráfico heterogéneo introducido en el Capítulo 4 para evaluar el desempeño de Wi-Fi Direct en este tipo de escenarios. En el análisis del escenario de aplicación planteado en esta tesis, para el caso de tráfico heterogéneo, se considera que un grupo de estaciones estará transmitiendo voz sobre enlaces par-a-par WFD, mientras que el otro grupo estará formado por clientes heredados transmitiendo datos genéricos sobre enlaces par-a-par con Wi-Fi (ver Figura 47).



Figura 47. Escenario para el caso de tráfico heterogéneo.

Los parámetros necesarios para obtener las gráficas mostradas en la Figura 48, donde se muestra el comportamiento del modelo para tráfico heterogéneo, se describen a continuación:

- Se utilizaron dos grupos de estaciones: uno simulando el tráfico de los agentes de voz, utilizando los parámetros del esquema de empaquetado de 1 del *vocoder G.722* (véase Tabla 19), mientras el otro grupo simula tráfico normal de IEEE 802.11g (paquetes de 1200 bytes de carga útil + 30 bytes del encabezado MAC IEEE 802.11).
- En este escenario se consideraron 90 nodos activos en el medio, 60 nodos para voz y 30 para tráfico “genérico”, con lo anterior se consideraron

entonces 30 enlaces par-a-par WFD para audio bidireccional y 15 enlaces par-a-par Wi-Fi para datos genéricos.

- Para obtener los resultados se mantuvo fijo el la tasa de transmisión y tamaño de paquete del *vocoder* para las estaciones del grupo 1, y solo se fue “repartiendo” el tráfico ofrecido a la red restante de cada punto a analizar entre las demás estaciones del grupo 2.
- Los resultados obtenidos del comportamiento del tráfico heterogéneo se compararon con los resultados del modelo presentado en (Bianchi, 2000) a manera de cota.

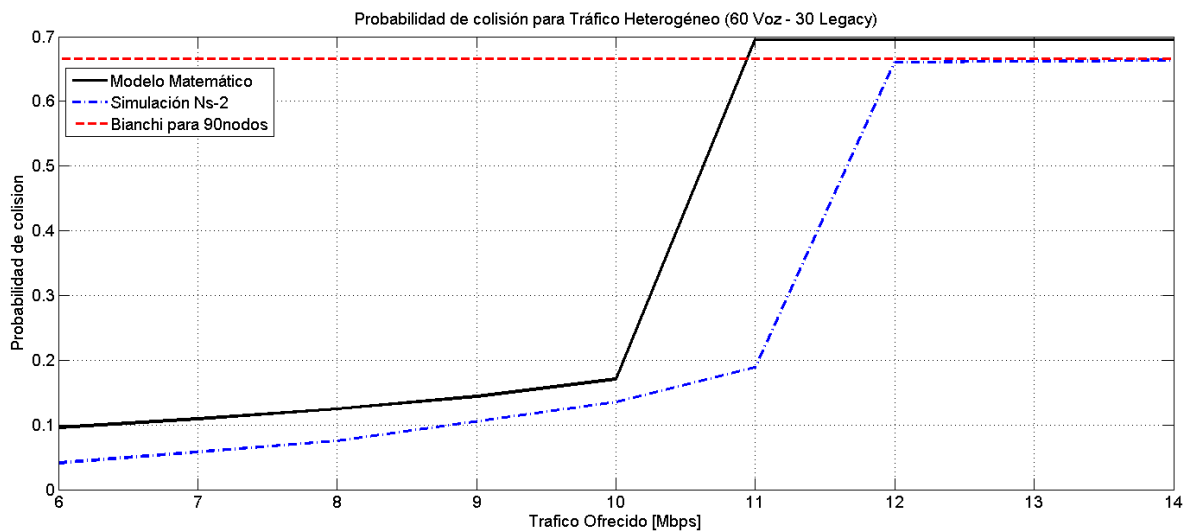


Figura 48. Probabilidad de colisión para tráfico heterogéneo de 90 nodos (modelo y simulación).

El comportamiento del modelo matemático para tráfico heterogéneo comparado contra la simulación realizada en ns-2 es muy similar al obtenido anteriormente para tráfico homogéneo. En este caso de nuevo el modelo presenta una cota superior en cuanto a probabilidad de colisión y una cota inferior en el tráfico ofrecido, todo esto en el punto antes de la saturación. Además se observa que en caso de saturación ambos valores de probabilidad de colisión están muy cercanos a lo obtenido del modelo de (Bianchi, 2000).

A su vez, también se realizó un análisis donde se comparó el comportamiento del modelo heterogéneo comparándolo con el modelo homogéneo. Los parámetros necesarios para obtener el comportamiento del modelo para tráfico heterogéneo, son los mismos utilizados para la grafica de la Figura 48. En el caso del modelo para tráfico homogéneo se consideraron dos casos diferentes, en ambos casos se consideran 90 nodos activos en el medio, la diferencia es el tamaño del paquete:

- Para el primero caso se considera el tamaño de paquete del *vocoder G.722* utilizando un esquema de empaquetado de 1 mostrado en la Tabla 19.
- En el segundo caso se considera un tamaño de paquete genérico de Wi-Fi (1228 bytes).

Los resultados obtenidos del modelo para tráfico heterogéneo comparado con el modelo para tráfico homogéneo, con los parámetros estipulados anteriormente se muestran en la Figura 49.

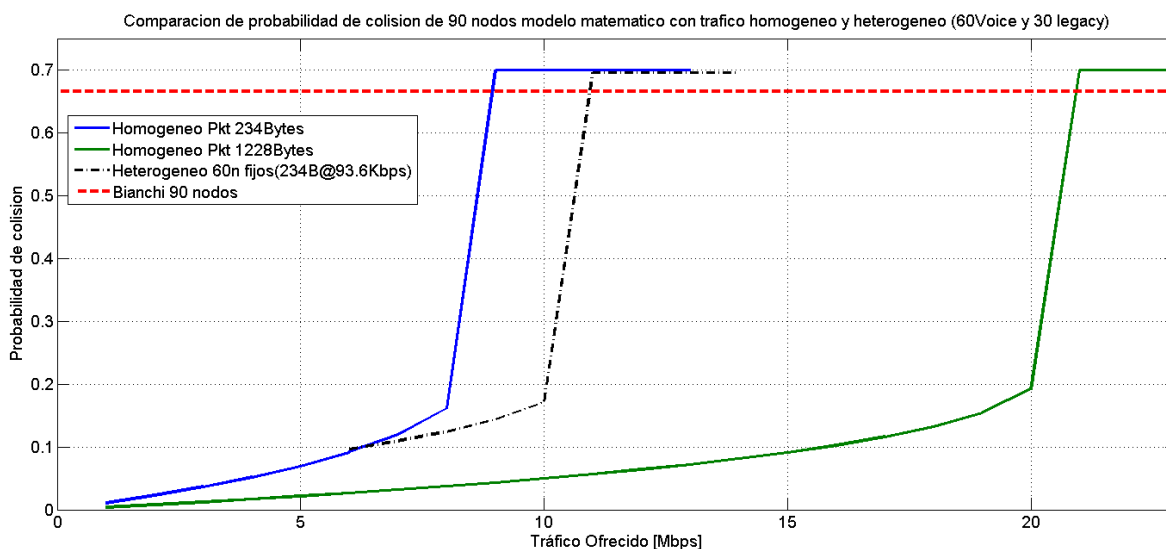


Figura 49. Modelo heterogéneo contra modelo homogéneo.

De los resultados mostrados en la Figura 49, es posible observar que el modelo para tráfico heterogéneo están cercanos a los del modelo homogéneo del grupo de nodos predominante en el medio, que para este caso, es el grupo que

transmite voz sobre WFD (234 bytes – *vocoder* G.722). Otro punto a destacar, es que en saturación las tres graficas presentan el mismo valor de probabilidad de colisión sin importar el tipo de tráfico (homogéneo ó heterogéneo), ó si las características de transmisión son diferentes (tamaño de paquete, tasa de transmisión, entre otras). Lo anterior corresponde a lo presentado en (Bianchi, 2000), donde se define que la probabilidad de colisión en el medio cuando se esta en saturación, depende principalmente del número de nodos contendientes en el medio. Lo único que varía entre las graficas de la Figura 49, es el valor de tráfico ofrecido a la red en que cada caso de análisis alcanza la saturación.

Con esto concluye el capítulo de resultados, donde se presentaron los puntos necesarios para demostrar que el objetivo de esta tesis fue logrado satisfactoriamente. En particular con este capítulo se demuestra que con el modelo matemático desarrollado y la cama de pruebas de simulación (ver Capítulos 4 y 5, respectivamente), es posible calcular el número máximo de enlaces par-a-par con transmisión de audio bidireccional que se pueden soportar en un escenario con alta densidad de usuarios utilizando el estándar Wi-Fi Direct (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44 y Figura 45). Además se presentaron otros análisis que fueron surgiendo durante la realización de este trabajo de investigación. Dentro de estos análisis cabe destacar lo obtenido con respecto a emulación de estadísticas de un gran grupo de nodos por un número reducido de ellos (Figura 37, Figura 38 y Figura 39). Otros puntos importantes que se analizaron que no originalmente planteados dentro de los objetivos iniciales de la tesis fueron: el impacto de los mecanismos de acceso al medio básico o RTS-CTS (Figura 36); la utilización de parámetros DCF ó EDCA (Figura 40, Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44 y Figura 45); y el impacto del esquema de empaquetamiento en el número de usuarios soportado (Tabla 26).

Capítulo 7. Conclusiones

En este capítulo se introducen las conclusiones generales y aportaciones generadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Con esta discusión se demostrará el cumplimiento del objetivo planteado en la introducción de esta tesis, lo cual fue parcialmente expuesto en la parte final del Capítulo 6.

7.1 Conclusiones

Con el fin de dejar en claro la metodología utilizada en esta tesis, las conclusiones y recomendaciones serán introducidas por cada uno de los puntos que se analizaron en este trabajo de investigación siguiendo el orden de presentación de los mismos.

7.1.1 Modelado de la capa MAC de Wi-Fi Direct mediante cadenas de Markov

El análisis del comportamiento de la capa MAC de Wi-Fi Direct provee información que permite calcular diversas métricas de desempeño como: el tiempo promedio de servicio de un paquete en la capa MAC, el número máximo de estaciones contendientes en el medio que puede servir la capa MAC para ciertos valores de tráfico, así como encontrar el punto de saturación del sistema, entre otras. Por tanto a continuación se muestran las conclusiones obtenidas con respecto al modelado de la capa MAC:

- ✓ El modelo matemático presentado en esta tesis es una herramienta que permite evaluar el desempeño de Wi-Fi Direct en ambientes con una alta densidad de usuarios con transmisiones concurrentes sobre enlaces par-a-par. Esto se logra al obtener métricas de desempeño como las mencionadas anteriormente mediante la solución numérica de un conjunto de ecuaciones.

- ✓ Al comparar los resultados del modelo matemático con los resultados de simulación, se puede concluir que el modelo se puede utilizar para obtener cotas inferiores de desempeño respecto al número de usuarios y tráfico ofrecido soportado sin llegar a saturación.
- ✓ El modelo también se puede utilizar para obtener cotas superiores para el retardo promedio en la capa MAC, la probabilidad de colisión y la probabilidad de descarte de paquetes en la capa MAC.
- ✓ El modelo que se utilizó para este trabajo de tesis, presenta aportes importantes como lo son el análisis de la capa MAC del estándar Wi-Fi Direct, el cual no ha sido reportado en la literatura encontrada hasta este punto.
- ✓ El modelo presentado en esta tesis es utilizable para cualquier tipo de tráfico sensible al retardo, ya que una vez encontrado el punto de saturación, es posible definir la zona de no saturación donde el tiempo promedio de servicio de la capa MAC es muy pequeño.
- ✓ Para los escenarios analizados, se demostró que en la zona de no-saturación el tiempo promedio de servicio de la capa MAC de Wi-Fi Direct, no sobrepasa el valor de 2.5 ms. Este valor es muy pequeño, dejando suficiente tiempo a capas superiores para cumplir con el requerimiento de 150 ms de *end-to-end delay* marcado en (ITU-T Study Group 12, 2003).

7.1.2 Diferencias entre la utilización del mecanismo de acceso básico o RTS-CTS, y el tamaño de paquete a transmitir

Dentro de la capa MAC se tienen dos mecanismos de acceso al medio: básico y RTS-CTS (ver Capítulo 2). Por lo tanto se realizó una comparación del comportamiento de ambos mecanismo para distintos tamaños de paquetes. Los resultados fueron presentados en el Capítulo 6 y de ellos se puede concluir que:

- Utilizar paquetes más grandes para un tráfico ofrecido por nodo constante hace posible lograr mayor número de nodos activos en el medio. Esto se

debe a que al tener un tráfico por nodo constante, el utilizar paquetes grandes satura menos el medio.

- Aun cuando se logra mejor desempeño de la red con paquetes grandes, no se debe perder de vista que esto implica que las estaciones esperarán más tiempo para transmitir. También se debe considerar el tiempo que tarda la fuente en generar esos paquetes grandes las capas superiores (Codificación, empaquetamiento, entre otras).
- La utilización del mecanismo de acceso básico para los empaquetados de 1 a 5 (160 a 800 bytes) permite mayor número de nodos activos en el medio que el mecanismo RTS-CTS, con una diferencia promedio de 13 nodos para paquetes de 160 bytes. Esto se debe a que el mecanismo RTS-CTS introduce mayor tráfico a la red, al enviar paquetes de control RTS/CTS con poca diferencia entre ellos, por lo tanto, satura más rápido el medio inalámbrico.
- De los puntos anteriores, se puede concluir que la utilización del mecanismo básico es mejor que el mecanismo RTS-CTS para la transmisión paquetes de datos chicos y medianos. Sin embargo, el mecanismo RTS-CTS es útil para combatir el problema del nodo oculto y en casos en los cuales se manejen paquetes muy cercanos al máximo permitido por la MAC de Wi-Fi Direct (2312 bytes).

7.1.3 Posibilidad de la emulación de tráfico de un gran numero de nodos por un grupo pequeño de ellos.

Si se desean realizar pruebas físicas en ocasiones no siempre es posible contar con un gran número de nodos al momento de realizar dichas pruebas. Por lo tanto, en este trabajo de tesis se busco encontrar la forma de emular el comportamiento de un gran número de nodos con un grupo reducido de los mismos. En particular se buscó obtener resultados consistentes en términos de las estadísticas de desempeño de la red. Lo resultados obtenidos de las pruebas llevaron a las siguientes conclusiones:

- La emulación es posible más allá de lo que se esperaba en un inicio, ya que las graficas presentadas en la Figura 37 del Capítulo 6 presentan estadísticas muy cercanas desde los 10 hasta los 200 nodos (solo las curvas de 2 y 4 nodos están notoriamente alejadas de la demás).
- Si se compara la probabilidad de colisión de 10 nodos en contra de los demás grupos de nodos, se obtiene que la diferencia es muy pequeña. Como se muestra en la Tabla 23, esta diferencia no rebasa el valor de 0.01904 para la probabilidad de colisión.
- Analizando el comportamiento del tiempo promedio de servicio de la capa MAC, se obtiene que hasta los 14 Mbps las variaciones entre 10 y 200 nodos es pequeña. Como se muestra en la Tabla 24 la diferencia máxima entre estos números de nodos es de 0.0624 ms.
- Es posible emular el comportamiento de las métricas de un número grande de nodos (en este caso 100 o 200) con pocos nodos (10 nodos). Esto se concluye de acuerdo a los datos de las tablas mostradas anteriormente (Tabla 22 y Tabla 23).

7.1.4 Máximo número de nodos activos en el medio para los diferentes *vocoders* elegidos

Para analizar el comportamiento de Wi-Fi Direct para tráfico con sensibilidad al retardo de múltiples usuarios, se consideró un escenario con enlaces par-a-par utilizados para la transmisión de voz bidireccional. Por lo tanto, para realizar el análisis de este tipo de tráfico se consideraron tres codificadores de voz (*vocoders*) con diferentes parámetros, cual se muestra en el Capítulo 5 (ver Tabla 19). Una vez obtenidos los resultados para los tres *vocoders* se pueden concluir varios puntos los cuales se enlistan a continuación:

- Al analizar los *vocoders* no se debe perder de vista que aun y cuando el sistema se desempeña mejor con un empaquetado mayor, esto conlleva un compromiso con el tiempo de empaquetado de voz.
- Lo presentado en este trabajo es una aportación en la estimación del número máximo de sesiones de audio sobre enlaces inalámbricos par-a-par WFD que no ha sido reportado literatura encontrada hasta ahora.
- Si se utiliza el mecanismo *EDCA* en lugar del mecanismo *DCF* para tráfico homogéneo, entonces el desempeño del sistema disminuye. Esto debido a que los paquetes en el modo de operación *EDCA* acceden más rápido al medio ya que la ventana de contención es pequeña. Con esto se alcanza el punto de saturación más rápidamente que con el modo de operación *DCF*.
- La utilización del modo de operación *EDCA* para tráfico homogéneo de voz, degrada el funcionamiento del sistema en cuanto al número de sesiones de audio bidireccional sobre enlaces par-a-par entre un 7.5% y un 12.5%, esto en comparación con el modo de operación *DCF*.
- De los esquemas de empaquetado considerados en este trabajo de investigación el que presentó mejor desempeño fue el empaquetado de 2. Esto debido a que aun y cuando el tiempo de servicio promedio MAC de los tres *vocoders* es muy pequeño, este esquema cumple de mejor manera con la cota de la (ITU-T Study Group 12, 2003). En contraste, el esquema de empaquetado de 5 provee tiempos demasiado cercanos a dicha cota.
- Para el esquema de empaquetado de 2, la probabilidad de que la capa MAC de Wi-Fi Direct descarte un paquete no rebasa el 0.015% para cualquier modo de operación (*DCF* ó *EDCA*) y *vocoder* (G.722, G723.1 y G.726) en el punto antes de la saturación del sistema.
- De los tres *vocoders* analizados el que permite mayor número de enlaces par-a-par con audio direccional en el códec G.723.1. Sin embargo, para su utilización debe considerarse que el algoritmo de este códec tiene el mayor

número de MIPS¹⁶ de los tres analizados, consecuentemente la utilización de este códec introducirá un retraso por algoritmo más alto.

- Los resultados mostrados en esta tesis asumen que solo se está utilizando un canal Wi-Fi Direct en la banda de 2.4 GHz. Por lo tanto, el número de enlaces par-a-par con audio bidireccional que se soporta con Wi-Fi Direct reportado en Tabla 25 se puede duplicar y hasta triplicar utilizando otros dos canales.

7.1.5 Resultados de la aplicación del modelo a tráfico heterogéneo.

En escenarios reales la mayoría de los dispositivos no transmiten solo un tipo de datos (tráfico homogéneo), sino que se transmiten por el medio inalámbrico una variedad de datos provenientes de fuentes diferentes (tráfico heterogéneo). Por lo tanto, de los resultados obtenidos para el comportamiento para tráfico heterogéneo del estándar Wi-Fi Direct presentados en el Capítulo 6 se concluye que:

- ✓ El desempeño del sistema para tráfico heterogéneo depende en gran medida del grupo que tenga mayor número de estaciones contendientes en el medio. Además depende de los parámetros de tamaño de paquete y tasa de transmisión de dichas estaciones.
- ✓ El modelo para tráfico heterogéneo provee una cota superior en cuanto a probabilidad de colisión y una cota inferior en el tráfico ofrecido antes de que el sistema entre en saturación.
- ✓ Para el caso de tráfico heterogéneo, el comportamiento del modelo se acerca al comportamiento observado para tráfico homogéneo del cual se tiene un mayor número de nodos (en el escenario heterogéneo.)

¹⁶ Millones de instrucciones por segundo.

7.2 Trabajo Futuro

Después de realizado éste trabajo de investigación y con el conocimiento adquirido durante la duración del mismo, además de la revisión continua de la literatura y noticias relacionadas al tema. Se presenta las siguientes propuestas para el trabajo futuro, ya sea para mejorarlo o comprobar algunos de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación. Dichas propuestas son:

- Implementación física para validar lo obtenido por el modelo teórico y software de simulación.
- Refinamiento del modelo matemático para obtener estadísticas más cercanas a las obtenidas en las simulaciones, y en su momento a lo que se obtenga de la implementación física.
- Aplicación del mecanismo *EDCA* para el modelo para tráfico heterogéneo. Además de analizar la incorporación del parámetro *TXOP*, en los cálculos con el mecanismo *EDCA*.
- Generación de un perfil WFD para la transmisión inalámbrica de audio telefónico bidireccional. Algo similar a lo que se tiene en Bluetooth con los perfiles como *Advanced Audio Distribution Profile (A2DP)* y *Headset Profile (HSP)*.
- Creación de módulos para el simulador ns-2 que implemente, el mayor número de las rutinas del estándar Wi-Fi Direct.

Referencias Bibliográficas

Bianchi, G. (2000). Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on selected areas in Communications* 2000, 18(3), 535-547.

Bluetooth 3.0 + HS Specification. (21 de April de 2009). *Bluetooth SIG. Vol. 0*. Retrieve from: <http://www.bluetooth.org/Technical/Specifications/adopted.htm>.

Cai, L. X., Ling, X., Shen, X., & Mark, J. W. (2007). Supporting voice and video applications over 802.11n WLANs. *Wireless Netw* (2009), 15, 443-454.

Cai, L. X., Shen, X., & Mark, J. W. (May de 2006). Voice Capacity Analysis of WLAN With Unbalanced Traffic. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 55(3), 752-761.

Chaudet, C., Dhoutaut, D., & Gu'erin Lassous, I. (2004). *Performance issues with IEEE 802.11 in ad hoc networking*. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.

CICESE/Plantronics. (2010). *Wi-Fi Direct: Call Density Simulations*. (Circulacion Restringida).

Gross, D., & Harris, C. M. (1998). Single-server queues with poisson input and general service (M/G/1). In: *Fundamentals of Queueing. Theory 3rd. edition* (págs. 209-214). Wiley Incorporated.

Hermann, D., Brennan, R. L., Sheikhzadeh, H., & Cornu, E. (2004). Low-power implementation of the bluetooth subband audio codec. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP '04)*. , 5, págs. 365-8.

Holtmann, M. (July 23rd-36th, 2008). Audio streaming over Bluetooth. BlueZ Project. *Linux Symposium, 1*. Ottawa.

IEEE 802.11 Wireless local area networks. (2007). IEEE Std. 802.11-2007, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.

ITU-T Study Group 12. (2003). *ITU-T Recommendation G.114. One-way transmission time*. Retrieve from: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-l/en>.

Lin, S., & Costello, D. (1983). *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall.

- Malone, D., Duffy, K., & Leith, D. (Febrary de 2007). Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions. *IEEE Transactions on networking*, 15(1), 159-172.
- Momtahan, O., & Hashemi, H. (May de 2001). A Comparative Evaluation of DECT, PACS, and PHS Standards for Wireless Local Loop Applications. *IEEE Communications Magazine*, 7(3), 35-41.
- Plantronics Savi Series. (2009). *Wireless density*. (Circulacion Restringida).
- Schaar, M. V., Krishnamachari, S., Choi, S., & Xu, X. (2003). Adaptive Cross-Layer Protection Strategies for Robust Scalable Video Transmission Over 802.11 WLAN. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 21(10), 1752–1763.
- Singh, M., Messiter, T., & Tanyeri, G. (2005). *MP3 streaming over Bluetooth to multiple users*. TCS/Clarinox.
- Stoeckigt, K. O., & Vu, H. L. (2009). VoIP Capacity Analysis in IEEE 802.11 WLAN. *2009 IEEE 34th Conference on Local Computers Networks*, (págs. 116-123). Zürich, Switzerland.
- Stoeckigt, K. O., & Vu, H. L. (2010). VoIP Capacity-Analysis, Improvemets, and Limits in IEEE 802.11 Wireless LAN. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 59(9), 4553-4563.
- Wan, K. L., Salil S., K., & Deep, S. (2005). Performance of a Bluettoh IP Network for Streaming High Quality Audio. *Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary*, 619-620.
- Wi-Fi Alliance. (2010). *Wi-Fi CERTIFIED Wi-Fi Direct™ Frequently Asked Questions*. Retrieve from: <http://www.wi-fi.org/discover-and-learn/wi-fi-direct>.
- Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification Version 1.00. (2010). *Wi-Fi Alliance Technical Committee P2P Task Group*. (Circulacion Restringida).
- Zhai, H., Kwon, Y., & Fang, Y. (2004). Performance analysis of IEEE 802.11 MAC protocols in wireless LANs. *Wireless Communications and mobile computing*, 4, 917-931.

Apéndice A. Comparación del máximo caudal eficaz de Bluetooth 3.0+H.S contra Wi-Fi Direct

Para verificar si era factible el análisis de las dos tecnologías, se realizó una evaluación inicial basándose en el máximo caudal eficaz ofrecido por Bluetooth 3.0+H.S contra el ofrecido por IEEE 802.11g. Para esto se plantearon 4 escenarios de evaluación mostrados en la Figura 50.

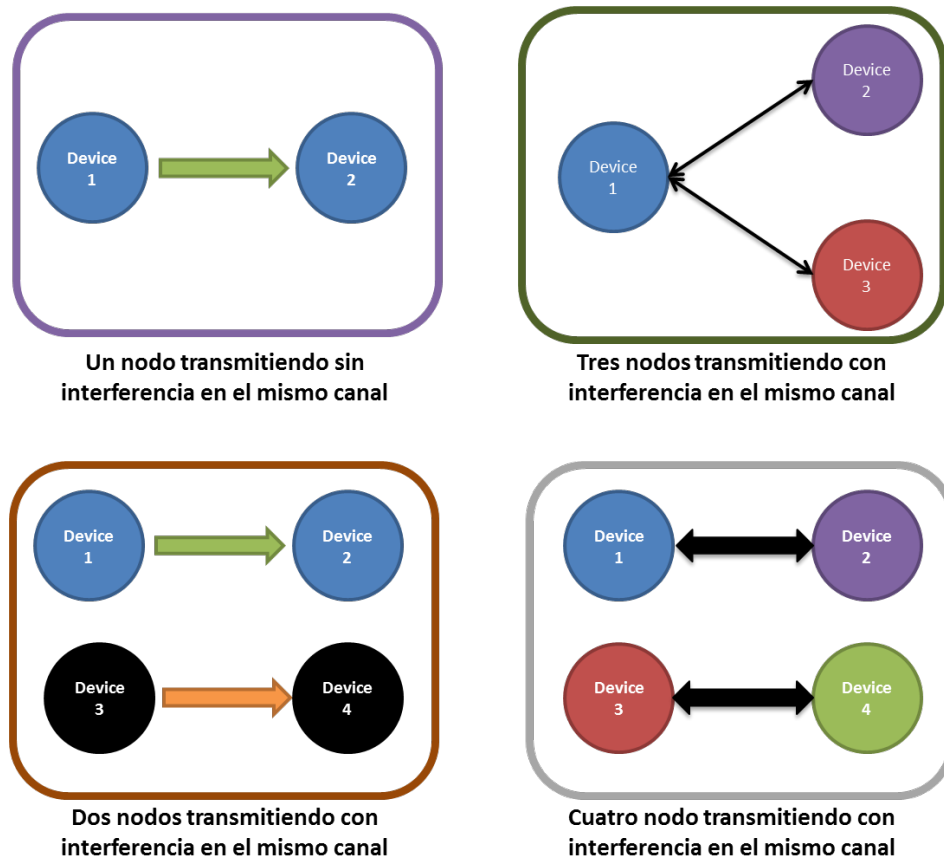


Figura 50. Escenarios iniciales de evaluación.

Debido a que Wi-Fi Direct utiliza los parámetros de la capa MAC y PHY marcados en los estándares IEEE 802.11 a/b/g, y que Bluetooth 3.0 mediante la AMP también utiliza la capa MAC y PHY de IEEE 802.11 para la transmisión de sus

paquetes. Se utilizan para los cálculos, los valores estipulados para IEEE 802.11g para encontrar el máximo caudal eficaz de ambas tecnologías (ver Tabla 28):

Tabla 28. Parámetros de IEEE 802.11g utilizados para la evaluación inicial.

| | |
|------------------|------------|
| SIFS | 10 μ s |
| CW Slot Time | 9 μ s |
| DIFS | 28 μ s |
| ACK | 14 bytes |
| Velocidad máxima | 54 Mbps |
| Acceso al medio | CSMA/CA |

En lo referente a los paquetes a enviar para la evaluación, se consideraron los parámetros mostrados en la Tabla 29, cabe destacar que se utilizó el máximo tamaño de paquete que permite cada una de las tecnologías:

Tabla 29. Parámetros de los tamaños de paquete para la evaluación inicial.

| | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datos (DATA) | IEEE 802.11g -> <u>2346 bytes</u> = 2312 payload + 30 MAC Header + 4 CRC Bluetooth 3.0 -> 1 pkt 3-DH5= <u>1023 bytes</u> = 1021 bytes + 2 bytes Header |
| RTS | 20 bytes para ambas tecnologías |
| CTS | 14 bytes para ambas tecnologías |

Para el cálculo del máximo caudal eficaz, se utilizan distintos valores de tamaño de ventana, CW, los valores fueron elegidos de forma que después de un cierto tiempo la secuencia de transmisión se repita, de esta manera se define la ventana de análisis como el tiempo en que toma en repetirse la secuencia. Defina de la ventana de análisis el cálculo del caudal eficaz se obtiene por:

$$\text{Caudal eficaz máximo} = \frac{\text{Bits de carga util transmitidos exitosamente en la ventana de analisis}}{\text{Tiempo que toma la transmision de los datos}}$$

(50)

En la Tabla 28 ya se introdujeron los valores para los tiempos entre tramas, IFS, por lo tanto, solo falta definir el tiempo que toma transmitir cada paquete. El tiempo de transmisión de un paquete esta dado por:

$$\text{Tiempo de transmision de un paquete} = \frac{\text{Tamaño del paquete en bits}}{54\text{Mbps}} \quad (51)$$

Nótese que todos se dividen entre la velocidad máxima de 54 Mbps, esto debido a que ambas tecnologías utilizan la misma capa MAC y PHY para la transmisión de sus paquetes. Pero aun y cuando utilizan las mis capa MAC y PHY, en el estándar de Bluetooth 3.0 se marca como obligatorio la utilización del mecanismo RTS-CTS, mientras que en Wi-Fi Direct no esta marcado como tal.

Solo falta definir los valores de CW para tener todos los parámetros necesarios para el cálculo del máximo caudal eficaz, estos valores se definen en la Tabla 30:

Tabla 30. Valores de CW para los cálculos del máximo caudal eficaz.

| Escenario | | Secuencia de valores de CW |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Un nodo transmitiendo en medio sin interferencia | | <i>Device 1: CW constante en 15.</i> |
| Dos nodos transmisores con sus respectivos nodos receptores. | | <i>Device 1: 15 - 9 - 6 - 30...</i> <i>Device 3: 20 - 14 - 18 - 8...</i> |
| Cuatro nodos transmitiendo: En parejas de nodos Tx/Rx. | | <i>Device 1: 15 - 9 - 6 - 30 ...</i> <i>Device 2: 20 - 14 - 18 - 8 ...</i> <i>Device 3: 4 - 21 - 24 - 11 ...</i> <i>Device 4: 6 - 29 - 24 - 1 ...</i> |
| Un nodo transmitiendo hacia dos nodos y recibiendo de los mismos. | Nodo central envía más que los otros dos | <i>Device 1: 1-3-4-2-8-5-7...</i> <i>Device 2: 3-8-15-4...</i> <i>Device 3: 7-10-2-11...</i> |
| | Los tres nodos envían lo mismo | <i>Device 1: 22 - 23 - 7 - 8 ...</i> <i>Device 2: 14 - 20 - 0 - 26 ...</i> <i>Device 3: 2 - 25 - 31 - 2 ...</i> |

Además se utilizaron valores aleatorios de CW, obtenidos a través de un programa de MATLAB que cumplía con los requisitos de periodicidad de transmisiones. Con

ambas secuencias de CW se obtuvieron los valores de caudal eficaz para cada escenario de la Figura 50, utilizando ambas tecnologías, son mostrados en la Tabla 31 y la Tabla 32.

Tabla 31. Caudal eficaz alcanzados por Bluetooth 3.0 para cada escenario.

| Escenario | | Sec. CW fijas | Sec. CW aleatorias |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|--------------------|
| Un nodo transmitiendo en medio sin interferencia | | 22.03 Mb/s | 22.03 Mb/s |
| Dos nodos transmisores con sus respectivos nodos receptores. | | 12.41 Mb/s | 12.8 Mb/s |
| Un nodo transmitiendo hacia dos nodos y recibiendo de los mismos. | Nodo central envía más que los otros dos | 14.83 Mb/s | N/A |
| | | 7.41 Mb/s | N/A |
| | Los tres nodos envían lo mismo | 9.56 Mb/s | 9.58 Mb/s |
| Cuatro nodos transmitiendo: En parejas de nodos Tx/Rx. | | 7.41 Mb/s | 7.25 Mb/s |

Tabla 32. Caudal eficaz alcanzados por Wi-Fi Direct para cada escenario.

| Escenario | | Sec. CW fijas | Sec. CW aleatorias |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|--------------------|
| Un nodo transmitiendo en medio sin interferencia | | 35.39 Mb/s | 35.39 Mb/s |
| Dos nodos transmisores con sus respectivos nodos receptores. | | 19.17 Mb/s | 19.98 Mb/s |
| Cuatro nodos transmitiendo: En parejas de nodos Tx/Rx. | | 10.63 Mb/s | 10.66 Mb/s |
| Un nodo transmitiendo hacia dos nodos y recibiendo de los mismos. | Nodo central envía más que los otros dos | 21.26 Mb/s | N/A |
| | | 10.63 Mb/s | N/A |
| | Los tres nodos envían lo mismo | 13.67 Mb/s | 14.19 Mb/s |

Apéndice B. Instalación de Ns-2 en Ubuntu

El software ns-2 utilizado en la simulación se puede ejecutar en cualquier versión del sistema operativo Linux. Para el presente proyecto se utilizó la versión Linux Ubuntu 11.10 de 64 bits, pero también fue probado en Ubuntu 10.04, 10.10 y 11.04.

Es importante mencionar que para una correcta instalación del ns-2 se requiere que Linux sea instalado con la opción EVERYTHING (total), de esta manera se copian las librerías necesarias para el correcto desempeño de ns-2, caso contrario, se necesitará un conocimiento avanzado acerca de la programación en Linux, para obtener dichas librerías y adjuntarlas en el entorno de trabajo. Para lograr esto se necesita el archivo *ns-allinone-versionX.tar.gz*, donde la X indica la versión más nueva disponible en la página <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-build.html>.

Una vez descargado el archivo este se coloca de preferencia en la carpeta de *home/nombre_de_usuario* y se siguen los siguientes pasos:

1. Utilizando el comando *cd* navegar hasta la carpeta donde se encuentra el archivo *tar.gz* que acabamos de descargar.
2. Luego utilizar los siguientes comandos uno por uno:
 - *tar zxvf ns-allinone-2.35.tar.gz*
 - *sudo apt-get update*
 - *sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev*
 - *cd ns-allinone-2.35*
 - *./install*
3. Una vez terminada la instalación se mostrará la información *PATH* que deberá agregarse al archivo *bashrc*.

4. En una nueva terminal utilizamos el comando `gedit ~/.bashrc` y copiamos al final las siguientes líneas:

```
export PATH=$PATH:<Place your paths here>
```

```
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH: <place the LD_LIBRARY_PATHS>
```

5. Guardamos el archivo, cerramos la ventana y ejecutamos en la terminal el comando `source ~/.bashrc`.
6. Para verificar si instalamos correctamente, en una terminal nueva introducimos el comando `ns` y nos deberá aparecer el símbolo `%`, luego solo le damos `exit`.
7. Para información consultar: <http://mynewtec.blogspot.mx/2012/04/install-ns2-ns-235-in-ubuntu-1110.html>