

Modelo de asignación multicanal con
equidad para la movilidad espectral
en redes de radio cognitiva

Modelo de asignación multicanal con equidad para la movilidad espectral en redes de radio cognitiva

César Augusto Hernández Suárez
Hans Raúl Márquez Ramos
Luis Fernando Pedraza Martínez



Este libro está dedicado a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y a todas aquellas personas que cada día se esfuerzan por hacer de este mundo un mejor lugar para vivir.

César Augusto Hernández Suárez

Este libro está dedicado a mi madre, quien me ha apoyado y siempre ha tenido una voz de aliento en todo momento. También a Sandra por su compañía y respaldo en este camino.

Hans Raúl Márquez Ramos

Agradecimientos

A Dios por darme la sabiduría necesaria para tomar las decisiones correctas, la fortaleza para no desfallecer ante las dificultades y la inteligencia para encontrar las soluciones que llevaron a feliz término este proyecto académico.

Finalmente, también quiero agradecer a las instituciones que fueron un soporte fundamental durante esta investigación. A Colciencias por la financiación de los recursos para el desarrollo de este proyecto; a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por brindarme el apoyo y tiempo necesario para ejecutar este proyecto; al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico por financiar los recursos necesarios para la divulgación y publicación de los resultados de investigación alcanzados; a la Universidad Nacional de Colombia por el acceso completo a los recursos bibliográficos pertinentes.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UD
Editorial

E2
ESPACIOS

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© César Augusto Suárez Hernández, Hans Raúl Márquez
Ramos, Luis Fernando Pedraza Martínez
Primera edición, abril de 2017
ISBN: 978-958-5434-26-4

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
María Elvira Mejía

Corrección de estilo
Julián Andrés Pacheco

Diagramación
Sónia Montaño Bermúdez

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Hernández Suárez, César Augusto

Modelo de asignación multicanal con equidad para movilidad espectral en redes de radio cognitiva / César Augusto Hernández Suárez, Hans Raúl Márquez Ramos, Luis Fernando Pedraza. – Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.

120 páginas : gráficas ; 17 x 24 cm.

ISBN 978-958-5434-26-4

1. Telecommunicaciones 2. Espectro electromagnético 3. Espectro radioeléctrico - Mediciones 4. Sistemas de amplificación multicanal.

I. Márquez Ramos, Hans Raúl, autor II. Pedraza, Luis Fernando, autor III. Tít.

384 cd 21 ed.

A1568842

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Todos los derechos reservados.

Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.

Hecho en Colombia

Contenido

Introducción	19
Problema y Motivación del Proyecto de Investigación	20
Objetivos del Proyecto de Investigación	22
Alcance y Limitaciones del Proyecto de Investigación	22
Propuesta de modelo de asignación multicanal con equidad	23
Metodología del Proyecto de Investigación	23
Contribuciones del Proyecto de Investigación	24
Financiamiento del Proyecto de Investigación	25
Organización del Libro de Investigación	25
Fundamentos Teóricos	27
Radio Cognitiva	27
Características de la radio cognitiva	28
Ciclo cognitivo	29
Redes Multicanal	29
Esquemas de Trasmisión Multicanal	30
<i>Aloha</i>	30
<i>Aloha Puro</i>	30
<i>AlohaRanurado</i>	30
<i>SMC-CR-MAC</i>	31
Criterio <i>Fairness</i>	32
<i>Índice de Jain</i>	33
<i>Proportional Fairness</i>	33
<i>Max-Min Fairness</i>	34
<i>Algoritmo MaxChop</i>	34
<i>Least Congested Channel Search - LCCS</i>	35
Trabajos Relacionados	35

<i>Investigaciones sobre modelos multicanal sin criterio Fairness</i>	39
<i>Investigaciones sobre el criterio Fairness sin modelos multicanal</i>	38
<i>Investigaciones sobre modelos multicanal con criterio Fairness</i>	39
Herramientas de Simulación	41
Metodología y Diseño	43
Selección del Software y Equipos	43
Metodología de Evaluación	44
Captura de los Datos de Ocupación Espectral	45
Procesamiento de la Información Espectral	46
Criterios de Decisión	47
Diseño del Modelo Propuesto para Asignación Multicanal	47
<i>Escenario 1: recursos de la red mayores a las demandas de los SU</i>	49
<i>Escenario 2: recursos de la red menores a las demandas de los SU</i>	49
Demanda de Ancho de Banda de los SU	50
<i>Clasificación de demandas por servicios de Streaming</i>	51
<i>Clasificación de demandas por servicios de videoconferencia</i>	53
<i>Clasificación de demandas por servicio web</i>	55
<i>Clasificación de demandas por servicios de voz</i>	55
<i>Clasificación de demandas por servicios de multimedia</i>	56
<i>Consolidado del número de canales requeridos por tipo de servicio</i>	57
Algoritmos del Modelo Propuesto	58
Localización de Bandas Multicanal Disponibles	59
Algoritmo de Ranking Multicanal	60
Algoritmo de Asignación Multicanal Equitativa MFA-CRN	62
MFA-CRN para Oferta de Espectro Menor a Demanda de SU	62
MFA-CRN para Oferta de Espectro Mayor a Demanda de SU	65
Selección de las Métricas de Desempeño para el Modelo Multicanal	66
Diseño de la Herramienta de Simulación	67
Resultados de Investigación	69
Resultados del Modelo MFA-CRN	70
Handoff Promedio Acumulado	72
Handoff fallido promedio acumulativo	77
Ancho de banda promedio	82
Retardo promedio acumulativo	87
Throughput promedio acumulativo	92
Fairness	97

Evaluación comparativa	98
Simulador de Asignación Multicanal en CRN	99
Discusión	101
Conclusiones	105
Contribuciones del Proyecto de Investigación	106
Trabajo Futuro	107
Referencias	109

Listado de Figuras

Figura 2-1: Ciclo cognitivo.	29
Figura3-1: Configuración experimental para medir la ocupación espectral	45
Figura 3-2: Estructura general del algoritmo MFA-CRN propuesto	48
Figura 3-3: Diagrama de flujo de búsqueda de multicanal	59
Figura 3-4: Proceso de ranking multicanal	60
Figura 3-5: Algoritmo FFAHP seleccionado.	61
Figura 3-6: Proceso de asignación con demanda mayor a recursos disponibles	64
Figura 3-7: Proceso de asignación con demanda menor a recursos disponibles	65
Figura 3-8: Diagrama básico del simulador desarrollado	67
Figura 4-1: AAH para SU1	72
Figura 4-2: AAH para SU2	73
Figura 4-3: AAH para SU4	74
Figura 4-4: AAH para SU10	75
Figura 4-5: AAFH para SU1	77
Figura 4-6: AAFH para SU2	78
Figura 4-7: AAFH para SU4	79
Figura 4-8: AAFH para SU10	80
Figura 4-9: ABW para SU1	82
Figura 4-10: ABW para SU2	83
Figura 4-11: ABW para SU4	84
Figura 4-12: ABW para SU10	85
Figura 4-13: AAD para SU1	87
Figura 4-14: AAD para SU2	88
Figura 4-15: AAD para SU4	89
Figura 4-16: AAD para SU10	90
Figura 4-17: AAT para SU1	92
Figura 4-18: AAT para SU2	93
Figura 4-19: AAT para SU4	94
Figura 4-20: AAT para SU10	95
Figura 4-21: Fairness en cada escenario	97
Figura 4-22: Entorno principal del simulador de SH “MFA para CRN”	100

Listas de Tablas

Tabla 3-1: Especificaciones de los equipos para la monitorización del espectro.	44
Tabla 3-2: Especificaciones del equipo de cómputo	44
Tabla 3-3: Configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro	45
Tabla 3-4: Escenarios de demanda de canales por usuario	50
Tabla 3-5: Demanda de servicios de Streaming modulación 16 QAM	52
Tabla 3-6: Demanda de servicios de Streaming modulación GMSK	53
Tabla 3-7: Demanda de servicios de videoconferencia modulación 16 QAM	54
Tabla 3-8: Demanda de servicios de videoconferencia modulación GMSK	54
Tabla 3-9: Demanda de servicios por servicio web 16 QAM	55
Tabla 3-10: Demanda de servicios por servicios web GMSK	55
Tabla 3-11: Demanda de servicios de voz 16 QAM	56
Tabla 3-12: Demanda de servicios de voz GMSK	56
Tabla 3-13: Demanda de servicios de multimedia modulación 16 QAM	56
Tabla 3-14: Demanda de servicios de multimedia modulación GMSK	57
Tabla 3-15: Consolidado de canales necesarios por tipo de servicio para 16 QAM	57
Tabla 3-16: Tipos de demanda	66
Tabla 4-1: Tipo de demandas y clases de usuarios para tráfico bajo y alto	69
Tabla 4-2: Resumen de figuras por tipo de demanda	70
Tabla 4-3: Valores absolutos de AAH para red GSM por clase de SU	76
Tabla 4-4: Valores relativos de AAH para red GSM por clase de SU	76
Tabla 4-5: Valores absolutos de AAFH para red GSM por clase de SU	81
Tabla 4-6: Valores relativos de AAFH para red GSM por clase de SU	81
Tabla 4-7: Valores absolutos de ABW para red GSM por clase de SU	86
Tabla 4-8: Valores relativos de ABW para red GSM por clase de SU	86

Tabla 4-9: Valores absolutos de AAD para red GSM por clase de SU	91
Tabla 4-10: Valores relativos de AAD para red GSM por clase de SU	91
Tabla 4-11: Valores absolutos de AAT para red GSM por clase de SU	96
Tabla 4-12: Valores relativos de AAT para red GSM por clase de SU	96
Tabla 4-13: Valores absolutos de Fairness para red GSM	98
Tabla 4-14: Valores relativos de Fairness para red GSM	98
Tabla 4-15: Evaluación comparativa global por EM para red GSM por clase de SU	98
Tabla 4-16: Evaluación comparativa global por escenario para red GSM por clase de SU	99
Tabla 4-17: Evaluación comparativa global por clase de SU para red GSM	99
Tabla 4-18: Evaluación comparativa global de Fairness para red GSM	99

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
AAD	Retardo Promedio Acumulado
AAFH	Handoff Fallidos Promedio Acumulado
AAH	Handoff Promedio Acumulado
AAT	Throughput Promedio Acumulado
ABW	Ancho de Banda Promedio
ANS	Puntaje Promedio Normalizado
AP	Probabilidad de Disponibilidad
BE	Mejor-Esfuerzo
BER	Tasa de Error de Bit
BS	Estación Base
BW	Ancho de Banda
BWM	Ancho de Banda Multicanal
CCC	Canal de Control Común
CR	Radio Cognitiva
CRAHN	Redes de Radio Cognitiva Ad Hoc
CRN	Redes de Radio Cognitiva
DC	Criterios de Decisión
DCF	Función de Coordinación Distribuida
DMA	Demanda A
DMB	Demanda B
DMC	Demanda C
DMD	Demanda D

DSA	Acceso Dinámico al Espectro
EM	Métrica de Evaluación
ETA	Tiempo Medio de Disponibilidad
FAHP	Fuzzy Analytical Hierarchical Process
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones
FFAHP	Feedback Fuzzy Analytical Hierarchical Process
GSM	Sistema Global para Comunicaciones Móviles
HT	Tráfico Alto
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LCCS	Least Congested Channel Search
LT	Tráfico Bajo
MANET	Redes Móviles Ad-hoc
MCDM	Toma de Decisiones Multi-Criterio
MFA-CRN	Multichannel Fairness Allocation for CRN
NTIA	Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
PPS	Puntos Por Span
PU	Usuario Primario
QoE	Experiencia del Usuario
QoS	Calidad de Servicio
RBW	Resolución de Ancho de Banda
RT	Tiempo-Real
SA	Asignación Espectral
SH	Handoff Espectral
SINR	Relación Señal a Ruido más Interferencia
SMS	Servicio de Mensajes Cortos
SO	Oportunidad Espectral
SU	Usuario Secundario
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo

Introducción

Actualmente, la cantidad de tráfico transportado por las redes inalámbricas está creciendo constantemente, debido al aumento del número de usuarios y al incremento de las aplicaciones inalámbricas (López, García & Herrera, 2015). Lo anterior, junto con una política de asignación fija de frecuencias, ha producido una escasez en bandas de frecuencia disponibles. Sin embargo, los resultados de estudios realizados demuestran que ciertas bandas(por ejemplo, las de 50 MHz a 700 MHz) están siendo subutilizadas, ya que sus ciclos útiles son prácticamente nulos: en algunos casos, los tiempos de utilización espectral son inferiores al 10% (Forero, 2012), en contraste con otras bandas como las asignadas a la red celular que actualmente se encuentran saturadas.

La Radio Cognitiva (CR), definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) como “una radio o sistema que detecta y está al tanto de su entorno y se puede ajustar de forma dinámica y autónoma de acuerdo con sus parámetros de funcionamiento de radio”, plantea como solución el Acceso Dinámico al Espectro (DSA), haciendo un uso oportunista e inteligente del espectro de frecuencia. Lo anterior permite que un usuario no licenciado(usuario de radio cognitiva) o Usuario Secundario (SU) pueda utilizar un canal de una banda licenciada disponible, pero tan pronto llegue el usuario licenciado o Usuario Primario (PU) a ocupar dicho canal, o si la calidad del canal ocupado por el SU se degrada, o si el SU interfiere al PU, o si la movilidad del SU provoca que quede fuera del área de cobertura, el SU deberá liberar dicho canal y buscar uno nuevo que esté disponible (también denominado oportunidad espectral, hueco espectral o espacio blanco) para continuar con su transmisión, a esto se le denomina movilidad espectral o *Handoff Espectral* (SH) (Ahmed, Gani, Abolfazli, Yao & Khan, 2016; Akyildiz, Lee, Vuran & Mohanty, 2008; Akyildiz, Won-Yeol, Vuran & Mohanty, 2006; Ozger & Akan, 2016; Tsiropoulos, Dobre, Ahmed & Baddour, 2016). Lo anterior le confiere a la CR la capacidad de proveer un gran Ancho de Banda (BW) al SU, mediante arquitecturas inalámbricas heterogéneas.

Las Redes de Radio Cognitiva (CRN) imponen retos en la gestión del espectro, debido a la naturaleza fluctuante del espectro disponible y a los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS) de varias aplicaciones. Las cuatro principales funciones en la gestión del espectro son: 1) detección del espectro, 2) decisión de espectro, 3) compartición de espectro y 4) movilidad de espectro; las cuales conforman el ciclo cognitivo (Akyildiz, Lee & Chowdhury, 2009; Akyildiz *et al.*, 2008). El ciclo cogni-

tivo inicia con la detección del espectro, aquí los usuarios de radio cognitiva monitorizan el espectro para detectar las Oportunidades Espectrales (SO), con el fin de no interferir con los PU (Akyildiz *et al.*, 2009). En la decisión de espectro, después de que las SO han sido identificadas, los SU deben seleccionar la más adecuada, de acuerdo con sus requerimientos de QoS; para tomar esta decisión se han desarrollado algoritmos que tienen en cuenta las características del canal de radio y el comportamiento estadístico de los PU, entre otros factores (2009). Debido a que múltiples SU pueden intentar acceder al espectro, la función de compartición de espectro proporciona la capacidad de compartir este recurso con múltiples SU, coordinando sus transmisiones para evitar colisiones e interferencias (2009). Finalmente, la movilidad espectral se da cuando el SU debe dejar el canal de frecuencia que está utilizando y continuar su comunicación en otra SO, debido a la llegada de un PU, o porque el SU está interfiriendo al PU o por la degradación de la calidad del canal (Akyildiz *et al.*, 2009; Tsipopoulos *et al.*, 2016).

En la movilidad espectral, el SH se desarrolla a partir de las tres fases principales: medición, decisión y ejecución (Ahmed, Boulahia & Gaïti, 2014). En la fase de medición se realiza el descubrimiento de redes inalámbricas y la detección de SO en dichas redes. Lo anterior se puede lograr a través de un enfoque centralizado o distribuido. En la fase de decisión—como su nombre lo indica— se toma la decisión del “cuándo” y “dónde” realizar el SH, con base en los múltiples criterios y métricas que se hayan seleccionado. En la fase de ejecución se realiza la transferencia de la actual conexión a la nueva, teniendo en cuenta los requerimientos del SH, mencionados anteriormente. De acuerdo con el modelo de SH que se configure, el desempeño de las CRN puede ser afectado por factores como latencia, throughput, señalización, interferencia, BW, Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) y Tasa de Error de Bit (BER), entre otros (Kumar, Prakash & Tripathi, 2016; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

La presente investigación pretende desarrollar un modelo que permita aprovechar las SO por parte de los SU, incluso mediante un enfoque de transmisión multicanal, siempre que el número de SO y de SU lo permita. El modelo planteado permite que a los SU, que requieran un mayor BW para aplicaciones de tiempo-real (RT), se les asignen varios canales de frecuencia para su transmisión. Sin embargo, lo anterior solo será posible si el número de SU que requieren el recurso espectral es menor que la cantidad de SO. Para evaluar lo anterior, el modelo propuesto incorporará un criterio de equidad (*fairness*) para garantizar una asignación equitativa de las SO a los SU. El modelo propuesto se ha denominado Asignación Multicanal con Equidad para Redes de Radio Cognitiva (MFA-CRN).

Problema y motivación del proyecto de investigación

La utilización ineficiente y esporádica del espectro, junto con el incremento en el uso del mismo, han hecho que se degrade la QoS en varias redes y aplicaciones inalámbricas, como la red celular. Lo anterior ha motivado el desarrollo de investigaciones recientes que han encontrado en la DSA una posible solución al problema, materializada a través de la CR (Federal Communications Commission, 2003; Hoven, Tandra & Sahai, 2005; IEEE COMSOC, 2008). Lo anterior le confiere a la CR la capacidad

de aumentar significativamente la eficiencia espectral, debido a que permite que SU comparten el espectro con PU de manera oportunista (Ozger & Akan, 2016).

De acuerdo con investigaciones actuales (Ahmed *et al.*, 2016; Akyildiz *et al.*, 2009, 2008, 2006; Christian, Moh, Chung & Lee, 2012; Marinho & Monteiro, 2012; Tsiropoulos *et al.*, 2016; C. W. Wang & Wang, 2009; L.C. Wang, Wang & Chang, 2012), el SH, y particularmente el modelo de SH, es la característica clave para habilitar la transmisión continua de datos del SU, ya que a partir de este se podría reducir el número de cambios de canal durante la transmisión de un SU, así como su latencia, minimizando la degradación del canal (Christian *et al.*, 2012). Actualmente existen varias propuestas de modelos de SH, sin embargo, es importante analizar que la aplicación de un modelo de SH depende fuertemente de las características de la red del PU (Akin & Fidler, 2016; Yingxi Liu & Tewfik 2014; Rahimian, Georghiades, Shakir & Qaraqe, 2014).

Durante el SH es inevitable que la comunicación se rompa temporalmente, debido a que es necesario realizar un proceso de descubrimiento de nuevas SO. Por lo tanto, se requiere de un modelo de SH que permita cambiar la actual transmisión del SU a una nueva banda espectral con la mínima degradación de calidad, reconfigurando sus parámetros de comunicación (Akyildiz *et al.*, 2009; López, Trujillo & Gualdrón, 2015).

Cuando no se selecciona adecuadamente la SO es posible que la transmisión de datos deba pausarse, esto provoca un aumento significativo del retardo que finalmente incide de forma directa en el nivel de desempeño y QoS de la comunicación del SU (Akyildiz *et al.*, 2009). En virtud de lo anterior, encontrar un canal con las características requeridas, sobre el cual un SU pueda continuar su sesión de transmisión de datos, es un asunto apremiante en movilidad espectral (Christian *et al.*, 2012). La selección del canal depende de muchos factores, tales como la capacidad del canal, la disponibilidad del canal durante el SH y la probabilidad de que el canal siga libre en el futuro, entre otros. Una pobre selección de canal puede causar múltiples SH, degradando el desempeño de todo el conjunto. El enfoque más común para la selección de canal es usar una lista de canales de respaldo (BCL) (Christian *et al.*, 2012; Pedraza, Hernández, Galeano, Rodríguez-Colina & Páez, 2016).

Cabe anotar que sería deseable utilizar trasmisiones multicanal para aplicaciones en RT, en tanto que las trasmisiones tolerantes a retardos podrían hacerse sobre canal simple. No obstante, el hecho de asignar varios canales a un único SU podría llegar a afectar significativamente el criterio de equidad en los SU interesados en utilizar estos recursos, ya que estos también desean trasmitir su información. En este punto sería conveniente que el modelo MFA-CRN garantice un trato justo a todos los SU, de forma que cada uno de ellos tenga derecho a las SO, bajo los mismos parámetros de equidad y de acuerdo con el tipo de aplicación que realizan: RT o mejor-esfuerzo (BE).

Bajo este panorama, este proyecto plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo se podría mejorar el desempeño de la movilidad espectral del usuario secundario, de acuerdo con el contexto de la comunicación en desarrollo, y sin degradar la calidad de servicio del enlace del usuario primario? Para resolver la anterior pregunta, la presente investigación propone el uso de la asignación multicanal, para enviar

la información por medio de varios canales, aumentando el BW de la trasmisión, pero teniendo en cuenta el uso del criterio Fairness para realizar una asignación equitativa de los recursos disponibles entre todos los SU, teniendo en cuenta la clase de aplicación (RT o BE).

Objetivos del proyecto de investigación

El objetivo general de este proyecto de investigación es desarrollar un modelo adaptativo de *handoff* espectral encaminado a incrementar el desempeño y la eficiencia en redes de radio cognitiva. Este objetivo general se alcanzó por medio de los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un algoritmo que modifique dinámicamente las características del modelo de *handoff* espectral.
2. Diseñar un modelo adaptativo de *handoff* espectral que integre las características y el comportamiento de la movilidad espectral en una red móvil de radio cognitiva.
3. Validar el modelo de *handoff* espectral propuesto, a través de simulaciones que integren las características de la movilidad espectral y su posterior confrontación.

Dentro del proyecto de investigación: “Desarrollo de algoritmo adaptativo de *Handoff* espectral encaminado a incrementar el desempeño y la eficiencia en redes móviles”, se desarrollaron dos modelos adaptativos de *handoff* espectral para redes móviles de radio cognitiva: MAPFF y MFA-CRN. El modelo MAPFF se encuentra documentado en el libro de investigación principal de este proyecto, titulado: *Modelo adaptativo multivariable de handoff espectral para incrementar el desempeño en redes móviles de radio cognitiva*; mientras que el modelo MFA-CRN, el cual es un resultado adicional que no se encontraba dentro de los resultados esperados del proyecto de investigación, se presenta en este libro de investigación titulado, *Modelo de asignación multicanal para la movilidad espectral en redes de radio cognitiva*. Debido a la extensión y calidad de los resultados adicionales alcanzados, se decidió realizar este segundo libro de investigación del mismo proyecto, el cual cuenta con la aprobación del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. A pesar de que este libro no es el resultado principal del proyecto de investigación, cumple también con los objetivos planteados en dicho proyecto.

Alcance y limitaciones del proyecto de investigación

Esta investigación no considera aportes en el re-enrutamiento de los SU, en caso de que se rompa la ruta de estos, y asume la existencia de un mecanismo de Canal de Control Común (CCC) que permite que todos los nodos establezcan un vecindario lo suficientemente grande. Lo anterior debido a que los dos temas por sí solos dan para otro proyecto de investigación.

La validación del modelo adaptativo multivariable de SH propuesto se realizará mediante simulaciones y su posterior confrontación con otros modelos de SH. Esta simulación integra únicamente las características necesarias para evaluar el modelo adaptativo multivariable de SH propuesto.

Propuesta de modelo de asignación multicanal con equidad

Esta investigación propone un modelo de Asignación Multicanal con Equidad (MFA) para CRN, denominado MFA-CRN. *Fairness* es una propiedad especial de algunos algoritmos de asignación, que le permite a una red inalámbrica, con recursos insuficientes, asignar los recursos de una manera equitativa entre los usuarios de esta. El modelo MFA-CRN adapta su funcionamiento de acuerdo con el comportamiento de la demanda y la oferta de SO en la banda espectral seleccionada. En la banda seleccionada se pueden dar dos tipos de escenarios: 1) que la oferta de SO sea mayor a la demanda de los SU, y 2) que la oferta de SO sea menor a la demanda de los SU. El modelo propuesto selecciona de forma dinámica e inteligente las mejores SO con base en los siguientes Criterios de Decisión (DC): Probabilidad de Disponibilidad (AP) del canal, Tiempo Estimado de Disponibilidad (ETA) del canal, SINR y BW.

La selección de las SO se realizará mediante la clasificación de estas dentro de un ranking, determinado por medio de un algoritmo de Toma de Decisiones Multi Criterio (MCDM), denominado FFAHP, propuesto en por Hernández, Pedraza y Rodríguez-Colina (2016). El criterio *Fairness*, que permite proporcionar un acceso equitativo al recurso de espectro por parte de los SU, se implementará a través de una adaptación de los algoritmos Min-Max *Fairness* (Max-Min) y *Proportional Fairness* (*Proportional*). El modelo de asignación multicanal propuesto permitirá hacer un uso más eficiente del ancho de banda frente a los modelos tradicionales de asignación de único canal.

Para evaluar el nivel de desempeño de los algoritmos desarrollados se realiza un análisis comparativo entre estos y los algoritmos de SH más relevantes en la literatura actual con MFA: *Proportionaly Max-Min*. A diferencia de los trabajos relacionados, la evaluación comparativa se validó por medio de una traza de datos reales de ocupación espectral capturados en la banda de frecuencia *Global System for Mobile Communications* (GSM) (Pedraza *et al.*, 2016; Cárdenas-Juarez, Diaz-Ibarra, Pineda-Rico, Arce & Stevens-Navarro, 2016), que modelan el comportamiento real de los PU (Chen & Hee-Seok, 2016). La evaluación y validación del desempeño del modelo MFA-CRN se realizó en una red GSM, considerando tres aplicaciones de RT: Voz (SU1), Videoconferencia (SU4) y *Streaming* (SU10), y una aplicación de BE: Web (SU2), en ocho escenarios diferentes, que resultan de considerar cuatro tipos de demanda: Sobreasignación Fuerte (DMA), Sobreasignación Leve (DMB), Subasignación Leve (DMC) y Subasignación Fuerte (DMD), y dos niveles de tráfico: Tráfico Alto (HT) y Tráfico Bajo (LT), para los cuales se tuvieron en cuenta seis Métricas de Evaluación (EM): número de *Handoff* Promedio Acumulado (AAH), número de *Handoff* Fallidos Promedio Acumulado (AAFH), Ancho de Banda Promedio (ABW), Retardo Promedio Acumulado (AAD), *Throughput* Promedio Acumulado (AAT) y *Fairness*.

Metodología del proyecto de investigación

El desarrollo del presente proyecto de investigación se realizó secuencialmente, empleando cuatro enfoques metodológicos: el primero, de tipo descriptivo, permitió detallar cada una de las características de las estrategias de interés; el segundo, de tipo analítico, permitió definir la influencia de cada uno de los modelos de interés en el desempeño de la movilidad espectral; el tercero, de tipo predictivo, buscó apli-

car soluciones de otras situaciones al contexto de interés, y finalmente, el enfoque experimental permitió la realización de pruebas de comprobación y validez a los desarrollos efectuados (Hernández-Sampieri, Fernández-Collado & Baptista, 2006).

La metodología de la presente investigación se estructuró de la siguiente forma. Primero, se realizó un estudio del estado del arte que permitió identificar los aspectos más importantes para el tema de SH en las CRN, así como sus algoritmos más relevantes en la literatura actual con MFA. Segundo, con base en el análisis de la información anterior se diseñó una metodología para la evaluación del desempeño de la movilidad en redes móviles de CR. Tercero, se realizó la captura de datos de ocupación espectral reales en la banda GSM para analizar el comportamiento de dicha banda y del PU. Cuarto, se realizó un procesamiento a los datos capturados para construir bases de datos de información organizada sobre el comportamiento del PU y las características de los recursos espectrales de la banda GSM; dichas bases de datos fueron clasificadas por nivel de tráfico (HT y LT). Quinto, se determinaron los DC para la selección de las mejores SO y se calculó los valores históricos de estos a partir de la información de las bases de datos, complementándolas. Sexto, se seleccionaron y se desarrollaron los algoritmos de SH más relevantes en la literatura actual con MFA. Séptimo, se diseñó y desarrolló el modelo MFA-CRN propuesto. Octavo, con base en el análisis del estado del arte del SH en CRN se diseñaron seis EM para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto en esta investigación, así como los seleccionados de la literatura actual, y se propusieron ocho escenarios de evaluación, al considerar cuatro tipos de demanda: DMA, DMB, DMC y DMD; y dos niveles de tráfico: HT y LT, para cuatro diferentes clases de aplicaciones: SU1, SU2, SU4 y SU10. Noveno, con base en toda la información anterior se diseñó y desarrolló un simulador que permite evaluar cuantitativamente el desempeño de los algoritmos de SH con MFA, considerando el comportamiento real del PU. Decimo, con los resultados obtenidos de los simuladores se realizó una evaluación comparativa de su desempeño en cada una de las EM.

Contribuciones del proyecto de investigación

- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con datos de ocupación espectral reales capturados en una campaña de medición realizada en la ciudad de Bogotá, D.C., Colombia.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH con MFA desarrollados, en una red GSM.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH con MFA desarrollados, para cuatro clases de aplicación, tres con enfoque de RT: voz, videoconferencia y streaming, y una con enfoque de BE: web.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con dos niveles de tráfico de PU: alto y bajo.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, en ocho diferentes escenarios de evaluación: DMA-LT, DMA-HT, DMB-LT, DMB-HT, DMC-LT, DMC-HT, DMD-LT y DMD-HT.

- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, bajo seis EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT y *Fairness*.
- Determinación de cuatro DC seleccionados cuidadosamente mediante el método Delphi modificado, para elegir la mejor SO. Todos los algoritmos desarrollados trabajaron con los mismos cuatro DC. Cada DC es calculado a partir de los datos de ocupación espectral reales.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH híbrido basado en la asignación multicanal que aumenta el BW y el nivel de *throughput* en las comunicaciones del SU, denominado MFA-CRN. El algoritmo MFA-CRN es especialmente útil en las aplicaciones que requieren un mayor BW como la videoconferencia y el *streaming*.
- Inclusión del criterio de *Fairness* en el algoritmo MFA-CRN con el objetivo de hacer un uso eficiente y equitativo de las SO.
- Clasificación más específica de la clase de aplicación que puede ejecutar el SU, tales como: voz, web, videoconferencia y *streaming*; denotadas por SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente.
- Análisis y evaluación del desempeño de cada una de las cuatro clases de aplicación en cuatro diferentes niveles de demanda de SU.
- Desarrollo de dos algoritmos de SH relevantes con MFA, relacionados en la literatura actual, y modificados apropiadamente para evaluar su desempeño en las aplicaciones de RT(SU1, SU4 y SU10) y BE(SU2). Así como su comparación con los algoritmos propuestos.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación para evaluar el desempeño de algoritmos de SH híbridos con asignación multicanal, basada en los datos de ocupación espectral reales, que permite modificar varios parámetros de interés para analizar el comportamiento del desempeño de cada algoritmo bajo diferentes situaciones, como por ejemplo el número de SU y su correspondiente demanda, denominado “asignación multicanal *Fairness* para CRN”.

Financiamiento del proyecto de investigación

El presente libro de investigación es producto de los resultados alcanzados en el proyecto de investigación “Desarrollo de algoritmo adaptativo de *Handoff* espectral encaminado a incrementar el desempeño y la eficiencia en redes móviles”, financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, mediante la convocatoria 8 de 2014. También se reconoce el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia y de Colciencias.

Organización del libro de investigación

El resto del libro está estructurado como sigue. En el capítulo 2 se realiza una descripción de los fundamentos teóricos. En el capítulo 3 se describe la metodología de la investigación realizada. En el capítulo 4 se presentan los resultados alcanzados en la investigación. En el capítulo 5 se realiza la discusión sobre los resultados obtenidos. Y finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones.

Fundamentos teóricos

El desarrollo de este proyecto de investigación está totalmente enfocado en el área de la CR, por esta razón, el presente capítulo está estructurado en siete secciones principales. La primera tiene por objetivo presentar los fundamentos de la CR, la segunda se enfoca en los aspectos teóricos del SH, la tercera presenta los algoritmos más relevantes de la SA, la cuarta expone algunos aspectos de la SA multicanal, la quinta se centra en los aspectos teóricos de las series de tiempo, la sexta presenta una revisión de la literatura actual sobre modelos de SH para CRN, y finalmente, la séptima muestra algunas herramientas de simulación de SH.

Radio cognitiva

En años recientes la tecnología en telecomunicaciones ha evolucionado para ofrecer mayores servicios a los usuarios, ese es el caso de la telefonía móvil. Sin embargo, debido al aumento de estos servicios, el sector de las telecomunicaciones se ha visto enfrentado a un problema creciente, la saturación del espectro. Esta saturación se ha dado por una asignación fija de frecuencias, por lo que se ha planteado como solución la DSA, la cual se ha materializado a través de la tecnología de CR (Akyildiz *et al.*, 2006).

Se han propuesto varias definiciones de CR, las cuales se enfocan en su capacidad de autorreconfiguración, interacción con su entorno y demás atributos (Haykin, 2005; IEEE, 2007; Maldonado, Hugine, Rondeau & Bostian, 2005; Nolan & Grosspietsch, 2005). A continuación se exponen las definiciones más sobresalientes sobre CR.

En 1999 el doctor Joseph Mitola III acuñó el término CR y lo definió, en su artículo “Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications”, como “a radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains” (Mitola, 1999).

Por su parte, la FCC realizó la definición de CR enfocada al modo de operación de los transmisores de acuerdo a los estímulos externos: “a radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which it operates” (FCC, 2005).

De acuerdo con las definiciones anteriores, se infiere que la CR debe tener una serie de características que permitan ser autoreconfigurable, en respuesta a la interacción con el medio que le rodea. En la siguiente sección se describe en detalle las características de la CR.

Características de la radio cognitiva

Ya sea directa o indirectamente, el dispositivo con CR debe ser capaz de adquirir la información del ambiente en el que opera. De acuerdo con esta característica, la CR puede seleccionar la frecuencia de operación y el formato de trasmisión, o también puede actuar como un puente entre dos sistemas, de forma que reciba la señal en una frecuencia y formato específicos y la retransmita en la frecuencia y formato adecuados para que sea reconocida por el sistema receptor de la información (Neel, 2006). A continuación se mencionan las principales características de la CR.

- Modulación adaptativa: modifica las características de trasmisión para explotar las SO que se presentan en el espectro. CR puede seleccionar la modulación más apropiada para una trasmisión permitiendo la interoperabilidad entre los sistemas. También se puede pensar en nuevos tipos de modulación, como la posibilidad de dividir una señal para que ocupe bandas de frecuencias no contiguas simultáneamente (Seidel, Breinig & Berezdivin, 2002).
- La CR puede estar diseñada en arquitecturas de red centralizada, distribuida, *ad-hoc* y *Mesh*, estando en capacidad de ser usada tanto para aplicaciones licenciadas como las que no lo son (Santi, 2005; Sgora, Vergados & Chatzimisios, 2009).
- Capacidad de cambiar rápidamente la frecuencia de operación, así como los procesos de negociación e intercambio del espectro que se puede dar entre PU y SU, con lo cual se contribuye de manera directa en la eficiencia del espectro y en la reducción de interferencia co-canal con otros usuarios que hacen uso del espectro.
- Control de Potencia en la Transmisión (TPC): es otra característica que le permite a un dispositivo de CR configurar dinámicamente los niveles de potencia, de acuerdo con las exigencias en el proceso de trasmisión. Bajo estas condiciones, los dispositivos deben tener en cuenta la cercanía con otros dispositivos vecinos, la máxima potencia permitida en la localización geográfica y la cantidad mínima de potencia que se requiere en el proceso de trasmisión (Gast, 2005).
- La CR puede incorporar un mecanismo que permita conocer su ubicación con respecto a la de otros trasmisores y con ello seleccionar parámetros adecuados para las trasmisiones como la potencia y frecuencia permitida para su localización. Una opción para determinar su ubicación es la geolocalización, que hace uso del GPS para poder determinar la posición geográfica e introducir esta información a la base de datos que maneja la red (Karmakar, 2010).
- Un mecanismo que permite compartir el espectro con el SU son las licencias de servicios no públicos de radio inalámbrica; sin embargo, se está sujeto a un costo sustancial por el uso del espectro. La CR, en este sentido, posibilita compartir el espectro incurriendo en el menor costo posible por la transacción, automatizando todos o parte de los procesos requeridos para negociar los términos de arrendamiento del espectro. Estos términos se refieren a las frecuencias disponibles, niveles de potencia y tiempo de permanencia en el espectro (FCC, 2003).

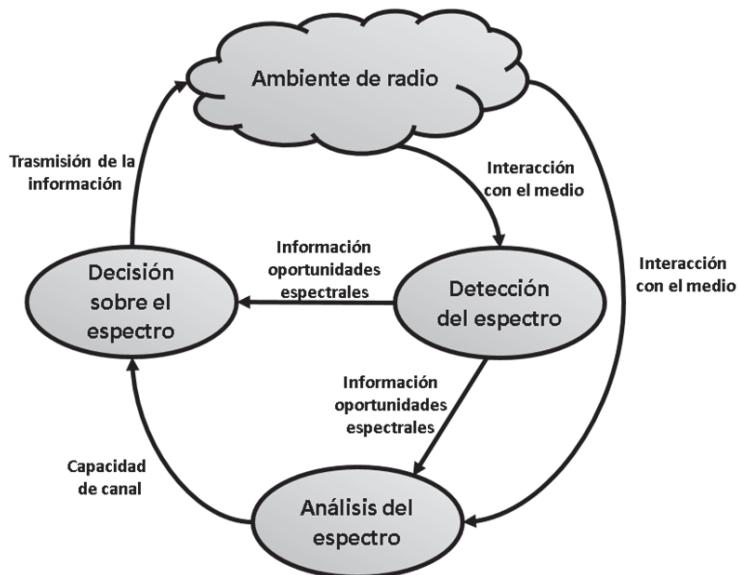
Ciclo cognitivo

Gracias a sus características de reconfigurabilidad e interacción dinámica con el ambiente que le rodea, la CR está en capacidad de adaptar sus parámetros de radio. Para conseguir este nivel de adaptación al medio, debe tener en consideración una serie de tareas que son condensadas en lo que se ha denominado ciclo cognitivo. Dentro de este ciclo cognitivo se destacan tres funciones de gestión de espectro (Haykin, 2005).

1. Detección del espectro: en esta fase la CR cumple la tarea de realizar la detección del espectro, para monitorear las SO en frecuencia, tiempo o código, entre otros.
2. Análisis del espectro: con base en los datos obtenidos en la fase de detección del espectro, se analiza las características de las SO obtenidas.
3. Decisión sobre el espectro: de acuerdo con el análisis del espectro se selecciona un SO y se configuran los parámetros de tasa de transferencia, modo de transmisión y BW apropiado para el tipo de datos a trasmisir.

En la figura 2-1 se muestra las fases del ciclo cognitivo con sus respectivas interacciones.

Figura 2-1. Ciclo cognitivo



Fuente: adaptada de Haykin (2005).

Redes multicanal

Las redes de comunicación de paquetes multicanal son expansiones de un canal simple de trasmisión de paquetes. En un sistema multicanal, existen M canales indepen-

dientes. De acuerdo con lo anterior, el usuario puede recibir o trasmisir desde alguno de los M canales. Esto toma en consideración las técnicas de diseño en el dominio de la frecuencia, las cuales reasignan el BW del sistema (Simon & Alouini, 2008a; Yang, Lou, Fu, Xie & Yu, 2016).

Para lograr dicha comunicación multicanal se divide todo el BW disponible en partes iguales, usando el mismo protocolo de acceso para cada canal. Esto permite esencialmente el intercambio completo de los canales en toda la población de usuarios. Cada usuario al que le llega un paquete, lo puede trasmisir en un canal seleccionado aleatoriamente (Simon & Alouini, 2008b).

En tales sistemas multicanal la suma de los múltiples BW de cada canal es igual al BW de un canal simple, de forma que todos los M canales tienen el mismo BW_v en Hz, donde $v=V/M$, siendo V el ancho de banda total disponible en el sistema y M el número total de canales usados.

El tamaño de la ventana de tiempo τ sobre un canal con BW_v es dado por $\tau=M\tau_0$, donde τ_0 es el tamaño de la ventana de tiempo en un canal con BW V . Por lo tanto, como el número de canales cambia, el BW de cada canal debe cambiar para satisfacer la restricción de BW fijo.

En general, las redes de radio multicanal tienen ventajas sobre los canales simples en los siguientes puntos (Xiao & Hu, 2008; W. Yue & Matsumoto, 2002):

- Alta efectividad de la utilización del canal.
- Baja tasa de retardo debido a la distribución de carga del tráfico en múltiples canales.
- Gran capacidad total por el incremento de canales y también por la habilidad de fácil expansión.
- Fácil organización debido a la tecnología de multiplexación por división de frecuencia.
- Alta confiabilidad y tolerancia a fallos.

Esquemas de trasmisión multicanal

Aloha

Aloha es un simple protocolo de *broadcast*, cuyo objetivo es proveer otra alternativa para el diseñador del sistema y determinar en qué situaciones la comunicación de radio es más apropiada frente a las comunicaciones alambradas. Este protocolo fue creado en la Universidad de Hawái, debido al desafío que se les presentó al tratar de comunicar sus seis campus, localizados en diferentes lugares dentro de un rango de 300 Km del campus principal de Honolulú (Leiner *et al.*, 2009).

La necesidad de compartir recursos entre los diferentes campus, impulsó la creación de las redes Aloha para permitir la comunicación entre los diferentes campus con el menor retardo posible. Estas redes hacen uso de TDMA como protocolo de acceso al medio (Leiner *et al.*, 2009).

Se distinguen 2 clases de redes Aloha: Aloha Puro y Aloha Ranurado.

Aloha Puro

En este tipo de red Aloha, los usuarios pueden iniciar las trasmisiones al mismo tiempo, de una manera completamente desincronizada. Cualquier estación puede trasmisir un paquete sin tener en cuenta si otras estaciones están trasmisitendo. Si dentro de un tiempo de finalización de trasmisión se recibe un mensaje de confirmación del receptor, la trasmisión fue exitosa. En caso que este mensaje de confirmación no sea recibido, la estación asumirá que el paquete enviado se perdió. De acuerdo con esto, la estación espera un tiempo para volver a retransmitir el paquete (Leiner *et al.*, 2009).

Una característica útil de las redes aloha puro es la relación entre el *throughput* T y la carga ofrecida GC. Se asume que el tiempo de inicio de trasmisión de los paquetes en el canal comprende un proceso de Poisson (ver ecuación 2-1) con parámetro λ paquetes/s (Abramson, 1970).

$$\text{Prob} [k \text{ llegadas en } \tau \text{ segundos}] = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau} \quad (2-1)$$

Donde: k es el número de llegadas, λ es el número de paquetes/s que se espera que lleguen durante el intervalo de tiempo y τ es el tiempo de ocurrencia del evento.

Si cada paquete dura τ segundos, se puede definir el tráfico de canal normalizado GC como se muestra en la ecuación (2-2).

$$GC = \lambda\tau \quad (2-2)$$

En términos generales, el aloha puro alcanza un máximo *throughput* de 0,184 con un tráfico de canal normalizado GC de 0,5 (Awerbuch & Mishra, 2015).

Aloha Ranurado

En respuesta a las múltiples colisiones que se generaban con el enfoque aloha puro, aloha ranurado divide el acceso al medio en ranuras de tiempo. De acuerdo con este cambio, el *throughput* máximo se incrementa a 0,368 con GC=1. Esto implica que en promedio 36,8 % de las ranuras son trasmitidas satisfactoriamente, 36,8 % están libres y el resto contienen colisiones (Awerbuch & Mishra, 2015).

SMC-CR-MAC

En Chih-Yung, Hung, Chang, Wang y Wang (2013) se propone un protocolo MAC para CR, denominado SMC-CR-MAC. Las investigaciones sobre este protocolo han planteado dos escenarios de estudios que se describen a continuación.

SMC-CR-MAC sin aparición del PU

En este modelo de negociación, un nodo SU_i trata de realizar la conexión con un nodo destino, denominado SU_j para el intercambio de información. De acuerdo con esto, el nodo SU_i aplica la regla FR (*Finding Receptor*), la cual permite que los nodos

puedan conectarse en un intervalo de tiempo haciendo uso de una ventana de negociación NW. Dentro de esta ventana de negociación existe un periodo de declaración de recepción (RDP), durante el cual el nodo SU_i recibe un mapa de bits B_j enviado por SU_j . Basado en este mapa de bits, el nodo SU_i determina la ranura de control CPbm para negociar con SU_j . En CPbm, el nodo SU_i compite por transmitir el paquete *Request-To-Send* (RTS) al nodo SU_j en la ranura CPbm, utilizando un mecanismo aleatorio *backoff*. Al recibir el paquete RTS, el nodo SU_j inmediatamente responde al nodo SU_i con un paquete *Clear-To-Send* (CTS) para confirmar que la ranura de datos DWbm está reservada. Se asume que los nodos SU_i y SU_j negocian con éxito la RTS/CTS en la ranura CPbm. Después de la CP, el nodo SU_i intercambia datos con SU_j en la ranura de datos designada DWbm. Si el nodo SU_j recibe con éxito los datos transmitidos desde el nodo SU_i , responde al nodo SU_i con el paquete ACK (Chih-Yung, Hung, Chang, Wang & Wang, 2013).

SMC-CR-MAC con aparición del PU

En el escenario que durante la transmisión de paquetes entre dos nodos se detecte la aparición de un PU, se pueden presentar dos casos:

1. Situación de Detección Homogénea (HOSS)
2. Situación de Detección Heterogénea (HESS)

El caso HOSS se trata de una situación en la cual tanto el nodo que transmite como el que recibe los paquetes se encuentran en una situación de bloqueo de su comunicación por un PU. Este bloqueo puede aparecer durante la Ventana de Negociación (NW) o, por el contrario, en la Ventana de Transmisión de la Información (DW). En cualquiera de los dos escenarios los SU nodos deben abandonar el canal, sin embargo, existen para estos casos las siguientes soluciones (Chang Chih-Yung, Li-Ling, Chao-Tsun, Tzu-Lin & Tzu-Chia, 2013):

- *Contiguous Channel Switching Approach* (CCSA): tanto el nodo transmisor como el nodo receptor, comutan de canal repetidamente al canal próximo y en el proceso detectan si un PU está en el canal. Este proceso se repite hasta encontrar un canal libre.
- *Sender-Receiver Channel Swap Approach* (SRCSA): tanto el nodo transmisor como el nodo receptor, comutan a un canal b para intercambiar paquetes de control en una ranura de control, para reservar una ranura de datos que les permita continuar su intercambio inconcluso.

En el caso HESS, si en el momento de la comunicación del nodo transmisor con el nodo receptor parece un PU, puede que solamente el nodo receptor o transmisor sea el que detecte al PU (Chih-Yung *et al.*, 2013).

Criterio Fairness

El criterio *Fairness*, o criterio de equidad, es una propiedad especial de los algoritmos de asignación de recursos, en la cual, si una red inalámbrica posee recursos insuficientes para satisfacer la demanda, esta puede repartir los recursos de manera equitativa a los usuarios de la red. Debido al uso de este criterio en distintas áreas

del conocimiento, como la economía y las redes, entre otras, su definición suele ser subjetiva; sin embargo, en su forma más básica se puede definir el *Fairness* como la igualdad de recursos entre usuarios con base en un acuerdo prestablecido (Jain, Chiu & Hawe, 1984; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

En las redes inalámbricas este criterio se enfrenta a desafíos como la asignación equitativa de los recursos por el hecho de que, cuando un cierto monto de recursos está disponible en el medio y es asignado equitativamente, no hay garantía que estos recursos vayan a ser usados eficientemente. Las posibles causas de esta falta de eficiencia en el uso de los recursos, pueden estar dadas por factores como el ruido, la interferencia o el solapamiento, que conllevan un aumento de la BER y, por tanto, la degradación de la QoS (Jain *et al.*, 1984).

Índice de Jain

El criterio *Fairness* puede ser medido a través del índice de Jain, el cual identifica los canales infrautilizados a partir de la ecuación (2-3) (Jain *et al.*, 1984; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (2-3)$$

Donde n es el número de usuarios y X_i es el rendimiento de la i-esima conexión.

A continuación se describen los algoritmos de *Fairness* relacionados en la literatura actual.

Proportional Fairness

El algoritmo *Proportional* tiene como objetivo tomar en cuenta tanto el balance del throughput entre usuarios como el throughput total de todos los usuarios (Georgios, Antonis, Ahmad, Neophytos & Mohamed, 2011; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

La definición formal de *Proportional* es: “una asignación de la tasa X es proporcionalmente equitativa si y solo si para cualquier otra asignación, la siguiente inecuación se mantiene” (ver ecuación 2-4). (Georgios *et al.*, 2011).

$$\sum_{su=1}^{NSU} \frac{y_x - x_x}{x_{su}} \leq 0 \quad (2-4)$$

En otras palabras, cualquier cambio en la asignación debe tener un cambio de promedio negativo.

Proportional es un ejemplo de un concepto más general de *Fairness*, llamado el enfoque de utilidad, en el cual cada fuente SU tiene una función de utilidad $u_x y u_x(x_{su})$ que indica el valor de la fuente SU con una tasa x_{su} . Cada enlace l (o recurso de red en general) tiene una función de costo g_p donde $g_l(f)$ indica el costo de la red para

soportar un monto de flujo f en el enlace l (Anbunami & Nedunchezhian, 2010). Entonces una asignación equitativa de utilidad de tasas es una asignación que maximiza $H(x)$, definida por la ecuación (2-5) (Anbunami & Nedunchezhian, 2010).

$$H(x) = \sum_{su=1}^{NSU} u_x(x_{su}) - \sum_{l=1}^L g_l(f_l) \quad (2-5)$$

Con $f_l = \sum_{su=1}^{NSU} A_{l,x} x_{su}$ sobre un conjunto de asignaciones factibles, donde NSU es el número de fuentes y $A_{l,i}$ es la fracción de tráfico de la fuente i en el enlace l .

Max-Min Fairness

Max-Min Fairness es reconocido como una definición de equidad de *throughput* óptima, usado para definir la equidad en redes de datos. Si se define NSU como un conjunto de usuarios activos, se puede decir que el mecanismo de asignación de recursos asigna a cada uno de los NSU usuarios un recurso R_s , tal que $\sum_{su \in NSU} R_{su} \leq R$, donde R es el recurso total disponible del sistema (Wayne & Pan, 2006).

De acuerdo con lo anterior, una asignación factible a los usuarios del conjunto NSU, es Max-Min Fair, si para cada usuario SU, R_s no puede ser incrementado sin decrementar R_s' donde $R_s' \leq R_s$ (Wayne & Pan, 2006).

Para utilizar Max-Min Fairness sobre un medio de comunicación con restricciones de capacidad de compartición, se usa el *fairqueueing* (espera equitativa). Los algoritmos que usan este criterio están basados en la noción de cuellos de botella. Por tanto, este tipo de criterio requiere información del estado global de todos los nodos en la red (Wayne & Pan, 2006).

Existen ciertos algoritmos mostrados en la literatura que hacen uso de los criterios descritos anteriormente, al momento de realizar la asignación de recursos, los cuales se describen a continuación.

Algoritmo MaxChop

MaxChop es un algoritmo distribuido que utiliza la información de AP vecinos, o aquellos que puedan interferir, para trazar una buena secuencia de saltos y mejorar el criterio *Fairness* (Mishra, Shrivastava, Agrawal, Banerjee & Ganguly, 2006).

Para permitir esto, el punto de acceso en cada ranura utiliza una asignación específica de canal calculada usando algoritmos distribuidos. En las diferentes ranuras, los AP utilizan distintas asignaciones de canal; de esta forma, la asignación de un canal en una ranura difiere de la asignación en otro canal (Mishra *et al.*, 2006).

MaxChop habilita los AP para que utilicen todas las asignaciones de canal, de manera que se divide uniformemente el BW entre los AP. En consecuencia, este enfoque asegura que a largo plazo el *throughput* que cada AP posee es promediado sobre diferentes asignaciones de canales múltiples. Los experimentos muestran que tanto para canales parcialmente sobrelapados como para los canales sin sobrelapamiento, este algoritmo mejora tanto el *Fairness* como el *throughput* (X. Yue, Wong & Chan, 2010).

Least Congested Channel Search – LCCS

Mediante el uso de *Least Congested Channel Search* (LCCS) cada AP busca de manera autónoma el canal que tenga la menor carga de tráfico. Bajo este criterio se realiza la conmutación de canales, operando sobre el canal actual hasta encontrar uno con menores niveles de congestión. Para lograr este objetivo, el AP busca canales publicados por AP vecinos. Después de escanear todos los canales disponibles, el AP reconoce cuántos clientes están asociados con cada canal, y por tanto, selecciona el canal con menor número de usuarios (Mishra, Banerjee & Arbaugh, 2005).

Sin embargo, este algoritmo tiene algunas desventajas descritas a continuación (Mishra *et al.*, 2005):

- LCCS falla al capturar ciertos escenarios de interferencia. Por ejemplo, cuando un cliente está asociado a dos AP distintas causando interferencia. Esto se presenta con frecuencia en la práctica, por lo cual algunas AP experimentan un tipo de sobrelapamiento en su cobertura.
- LCCS carece de capacidad para mejorar la reutilización de canales con base en la distribución de clientes. Debido a que no puede capturar la interferencia experimentada en los clientes, no puede aprovechar las oportunidades de reutilización de canales creados por las distribuciones de los clientes.

Trabajos relacionados

A continuación se describen las principales investigaciones desarrolladas en el campo de los modelos multicanal y del criterio *Fairness*. Estas investigaciones se clasificaron en tres subsecciones:

1. Investigaciones sobre modelos multicanal pero en las cuales no se tuvo en cuenta el criterio *Fairness* para garantizar el uso equitativo de recursos por parte de los usuarios de la red.
2. Investigaciones enfocadas en aplicar el criterio de equidad en la asignación de recursos de la red, pero no bajo modelos multicanal.
3. Investigaciones sobre modelos multicanal aplicando el criterio *Fairness*, el cual es el enfoque de la presente investigación.

Investigaciones sobre modelos multicanal sin criterio Fairness

Fairness es un criterio que se ha ido incorporando en distintas áreas del conocimiento, no siendo la excepción las redes inalámbricas. Pese a que se ha suscitado un gran interés en usar este criterio de equidad, aún existen ambigüedades entre los diferentes investigadores sobre la definición de *Fairness* y los aspectos que deben tenerse en cuenta para que la equidad sea aceptada en una red. Un ejemplo de esto se puede ver en la investigación realizada por Elliot (2002), la cual describe que el *Fairness* es alcanzado si todos los usuarios consumen el mismo promedio de recursos.

Por su parte Cao, Li y Cao (2003) explican que el *Fairness* solo es alcanzado si la diferencia de *throughput* para dos usuarios es proporcional a la diferencia de capacidad promedio del canal para los mismos dos usuarios.

En tanto Park y Caire (2008) definen un tipo de *Fairness*, denominado *Hard Fairness*, el cual indica que el sistema alcanza el *Fairness* si todos los usuarios tienen la misma tasa de transferencia de datos.

En virtud de lo anterior, la definición y atributos que se deben tener en cuenta para alcanzar el criterio de equidad son muy subjetivos, por lo cual no existe un consenso general sobre *Fairness*.

Cohen y Leshem (2013) consideran el problema de la maximización del *throughput* distribuido para redes Aloha multicanal. Los autores se enfocan en redes que contienen un gran número de usuarios que transmiten sobre un número reducido de canales. Se considera inicialmente la maximización de la tasa distribuida, donde las tasas de usuario están sujetas a las restricciones de probabilidad de transmisión total. Se propone un algoritmo de mejor respuesta para resolver el problema de maximización de tasa, donde cada usuario actualiza su estrategia usando su canal de información de estado y monitoreando la utilización de canal. Se considera el caso en el que los usuarios no están restringidos por las probabilidades de transmisión. La optimización distribuida de la red bajo incertidumbre es obligatoria debido a que las probabilidades de transmisión de otros usuarios son desconocidas. En consecuencia, se propone un esquema distribuido para resolver el problema de optimización del *throughput* bajo incertidumbre, en el que los usuarios ajustan su probabilidad de transmisión para maximizar sus tasas, pero manteniendo la carga deseada en los canales, haciendo uso de algoritmos secuenciales y paralelos.

Peng, Xiao, Zhong, Li y Zhou (2013) analizan el problema del acceso cognitivo a los canales por parte de los PU en una red con múltiples canales variantes en el tiempo. La estrategia de acceso propuesta no solo se basa en la detección de la ocupación del canal por un PU, sino también en el estado del canal ocupado por el SU. Así, se establece una nueva y más significativa métrica de rendimiento para medir el *throughput* de los SU entre canales, más que solo la tasa de ocupación del canal. El objetivo de la optimización del acceso cognitivo es diseñado para maximizar el *throughput* total entre múltiples canales sujetos a restricciones de colisión usados para la protección de los PU. Se demuestra que el algoritmo propuesto puede mejorar el *throughput* bajo restricciones severas de colisión.

Wu y Yang (2010) proponen una nueva estrategia de transmisión multicanal para el acceso dinámico del espectro en CRN. Dicha estrategia tiene un mecanismo de protección para PU que mejora la eficiencia del espectro y estudia su rendimiento bajo detección perfecta e imperfecta. Los resultados numéricos revelan que el rendimiento de la estrategia propuesta tiene superioridad con respecto al rendimiento en capacidad de usuarios cognitivos y la protección de PU.

La investigación de Li, Song, Wang, Tao & Zhang (2013) plantea un nuevo modelo aloha, teniendo en cuenta que, ante la ausencia de un canal de control, la utilización del canal vacante es determinada por la estrategia de detección del espectro y el protocolo de acceso a los paquetes en una red distribuida de CR. De acuerdo con esto, se investiga una red de CR de acceso aleatorio multicanal bajo una detección de espectro imperfecta, en la que cada SU aleatoriamente selecciona un número fijo de canales libres para transmitir. Basado en este modelo, se desarrolla un protocolo aloha para acceso aleatorio multiusuario y se obtiene la distribución de las

transmisiones de paquete satisfactorias, y a partir de esta la expresión de la utilización de canal libre promedio.

Otros trabajos enfocan sus esfuerzos en investigar la multicanalización en redes tipo *Mesh* y sus propiedades heterogéneas. Al respecto, Almasaeid y Kamal (2014) definen que una de las potenciales propiedades de la CR es la heterogeneidad en canales disponibles entre SU. Por lo tanto, el *throughput multicast* puede sufrir una significativa degradación debido a que una trama puede alcanzar solo un pequeño subconjunto de destinos que son capaces de recibir en el mismo canal. La investigación se enfoca en las Redes Inalámbricas *Mesh* de CR (CR-WMN) debido a su naturaleza heterogénea. Esta investigación propone una estrategia de asistencia para reducir el efecto de la propiedad heterogénea del canal en un *throughput multicast* en redes *Mesh* inalámbricas de CR. Esta estrategia de asistencia está compuesta por dos tareas principales: primero, permitir a los receptores *multicast* asistir la fuente en la entrega de datos y, segundo, permitir la transmisión de paquetes codificados de tal forma que los diferentes grupos *multicast* puedan decodificar y extraer sus datos concurrentemente. Se plantean los distintos niveles de asistencia catalogados como intragrupo e intergrupo.

Konishi, Masuyama, Kasahara y Takahashi (2013) estudian los subcanales disponibles en CR, los cuales son asignados dinámicamente a los SU. Sin embargo, cuando el PU accede a un canal primario, que consiste en múltiples subcanales, los transmisores de datos del SU, que están usando los canales, deben terminar su transmisión. Esta investigación analiza el rendimiento del esquema de *handoff* de espectro dinámico con la vinculación del canal, en el cual el número de subcanales usados por los SU es variable. Se modela una CRN multicanal como un sistema multiservidor de prioridad de colas sin instalación, derivando la probabilidad de bloqueo, la probabilidad de terminación forzada y el *throughput* para los SU. En caso de la terminación forzada, se consideran dos políticas: en una los SU que están usando el más alto número de subcanales son forzados a terminar sus transmisiones, y en la otra, los SU que están usando el más pequeño número de subcanales son escogidos para la terminación.

Qin *et al.* (2013) usan la técnica de optimización de Lyapunov para desarrollar políticas de señalización para redes cognitivas de multiradio y multicanal, con el fin de optimizar, conjuntamente, el *throughput* y el retardo promedio de la red secundaria con interferencia limitada para las transmisiones de los PU. Particularmente se consideran tres escenarios, que incluyen redes secundarias de saltos simples, redes secundarias de saltos múltiples y redes secundarias móviles. Considerando la movilidad general y los modelos de interferencia, se diseñan algoritmos de señalización eficiente y de asignación de canal basados en el concepto de Lyapunov. Además, este análisis teórico demuestra que los algoritmos propuestos pueden lograr una compensación entre el *throughput* y el *backlog* promedio usando la técnica de optimización de Lyapunov.

Xu, Li, Zhao, Zou & Vasilakos (2011) consideran una red de CR, modelada a partir de Cadenas de Markov de Tiempo Continuo (CTMC), donde hay múltiples PU independientes y un SU con ranuras que puede acceder a múltiples canales simultáneamente. Para maximizar la utilización de canal temporal del SU, mientras se limita la interferencia a los PU, se propone una estrategia de Acceso Selectivo y Detección

Selectiva (SS-SA). Con la estrategia SS, cada canal es detectado periódicamente y de acuerdo al parámetro T_c , el cual refleja el máximo periodo en que cada canal debe ser sondeado. El efecto del periodo de detección también es considerado. Cuando el periodo de detección es el adecuado, la estrategia SA puede ser considerada con una estrategia de acceso codicosa. Simulaciones numéricas muestran que el parámetro T_c es una medición valida que indica cuan frecuentemente el canal debe ser detectado, y con la estrategia SS-SA los SU pueden utilizar efectivamente los canales y consumir menos energía y tiempo para la detección.

Como se observa de los párrafos anteriores se ha venido trabajando intensivamente en el desarrollo de modelos que hagan uso simultáneo de múltiples canales para la trasmisión de datos, aprovechando sus ventajas como el envío de datos sobre un mayor número de canales y la baja interferencia al tener canales contiguos. Sin embargo, ninguna de las investigaciones anteriores incluye el criterio de *Fairness*.

Investigaciones sobre el criterio Fairness sin modelos multicanal

La investigación realizada por Le, Ma, Cheng, Cheng & Chen (2013) parte de un algoritmo distribuido para control de acceso al medio, el cual realiza la compartición equitativa de los recursos para las redes inalámbricas 802.11. Los autores argumentan que la noción de *Fairness* no es universal y, por tanto, hay carencia en cuanto al tratamiento riguroso. Debido a la ambigüedad en la definición de este criterio, los autores prueban la conexión matemática entre cuatro tipos diferentes de criterios de *Fairness* y asimismo proponen un algoritmo eficiente de control de acceso al medio que trata de lograr el *Fairness* en tiempo y *throughput* de manera distribuida. El propósito de este algoritmo radica en que cada estación necesita seleccionar un tamaño apropiado de ventana de contención, de forma que se pueda maximizar el *throughput* bajo las restricciones de tiempo.

Por su parte, Huang, Wang & Xiao (2015) proponen un protocolo denominado RC-MAC que integra sin problemas el ciclo útil y la tarea de asignación del receptor central, suministrando alto *throughput* sin sacrificar la eficiencia energética. Este protocolo aprovecha la recopilación de datos en forma de árbol subyacente en las redes de sensores inalámbricas y de la técnica multicanal soportada por dispositivos de radiofrecuencia bajo el estándar IEEE 802.15.4. El *throughput* es mejorado en dos fases con la planificación del acceso al medio del receptor central y la asignación distribuida de canal. En primer lugar, en un árbol de recogida de datos, un receptor es capaz de coordinar el acceso al medio de múltiples remitentes con el fin de reducir las colisiones y lograr un alto *throughput*. En segundo lugar, diferentes receptores coordinan sus remitentes en diferentes canales y el rendimiento se mejora aún más, por lo que permite la recopilación de datos en paralelo. Observando el tiempo de procesamiento de paquetes en los nodos de sensores de bajo costo, se diseñó un modelo de planificación que garantiza el *Fairness* entre los nodos de origen sin sacrificar el *throughput*. Finalmente, se demuestra que el *throughput* y el *Fairness* son significativamente mejorados bajo una gran cantidad de carga de datos con la planificación del receptor central.

Ghorbanzadeh, Abdelhadi & Clancy (2015) abordan el problema existente en sistemas de comunicaciones celulares, respecto a la optimización en la asignación de bloques de recursos de radio, con usuarios tanto tolerantes al retardo como aquellos

que exigen trasmisiones en RT, los cuales fueron modelados como funciones de utilidad logarítmica y sigmoidea. La optimización se realizó bajo el criterio *Proportional* con la finalidad de maximizar la utilidad en esta clase de redes, mientras que la asignación de los recursos se realizó teniendo en cuenta los requerimientos de QoS de la aplicación. En el algoritmo desarrollado se explica la forma en la que este algoritmo prioriza las aplicaciones en RT por encima de las aplicaciones tolerantes a retardos, garantizando QoS mínimos.

Qin y Zhao (2015) presentan el estudio de una red inalámbrica *Mesh* conformada por un número de diferentes AP, que proveen comunicaciones a estaciones móviles (MS). Distintos AP pueden compartir un mismo canal de frecuencia, por lo que este estudio busca la manera de suministrar un *throughput* equitativo de largo término para todas las MS, mientras usan eficientemente los recursos de canal a mediante una administración efectiva del *handoff* y asignación de canales basado en línea de tiempo, donde el tiempo en el canal se asigna en dos niveles: primero entre los AP y luego entre las MS. La solución óptima planteada se basa en la suposición de tener la información global de las condiciones de todos los canales. En virtud de lo anterior se propone el esquema HO-CA, el cual desarrolla decisiones de *handoff* heurísticas, basado en sus ganancias de enlace a los AP cercanos y luego optimiza la asignación de canales de tiempo por medio de un proceso iterativo. El segundo esquema, denominado CA-HO, asigna canales de tiempo a AP individuales basado en la relación de interferencia de los AP, y luego les permite a las MS realizar decisiones de *handoff* basado en las posibles utilidades de las AP cercanas.

Tan, Yin y Ma (2014) se enfocan en la relación existente entre la agregación del espectro y la inequidad de los SU, causada por posiciones de desventaja. La equidad o *Fairness* en el BW puede ser mejorada tanto como sea posible después de considerar los parámetros de posición y los datos en cola restantes de cada SU. Los resultados muestran que el esquema de manejo propuesto toma ventaja del *Fairness* para el BW. Asimismo, se muestra que el esquema propuesto tiene un menor retardo de BW con el fin de asegurar la equidad entre los SU y mejorar la eficiencia del sistema.

Investigaciones sobre modelos multicanal con criterio *Fairness*

En la investigación realizada por Liu y Knightly (2003) se desarrolla un *framework* para la administración oportunista sobre canales inalámbricos múltiples. Con un modelo de canal realista cualquier subconjunto de usuarios puede ser seleccionado para trasmitir en cualquier momento, aunque con diferentes *throughput* y requerimientos de recursos del sistema. Se realiza una selección de los mejores usuarios y tasas de transferencias, de un complejo problema de optimización a una formulación desacoplada y tratable: la planificación del problema de usuarios múltiples que maximiza el *throughput* total del sistema y el problema del control de actualización que asegure las restricciones de un *Fairness* probabilístico o un *Fairness* de largo periodo determinístico. Luego se diseñan planificadores prácticos que se puedan aproximar a estos objetivos.

Por otra parte, Laddomada, Mesiti, Mondin y Daneshgaran (2010) centran su interés en el estudio de las redes inalámbricas LAN multitasa 802.11, empleando la Función de Coordinación Distribuida (DCF). Su objetivo es triple: primero, a partir

del modelo de transición de estados de Markov multi-dimensionales caracteriza el comportamiento del protocolo IEEE 802.11 en la capa de control de acceso al medio, en la cual se presenta una extensión que representa las fallas de transmisión de paquetes debido a errores de canal; segundo, se establecen las condiciones de la red constituida por N estaciones, cada estación de transmisión con su propia velocidad de bits $R_d(s)$, y tasa de paquetes λ_S , puede suponerse con carga. Por último, se propone una modificación del criterio *Proportional*, que, según los investigadores, es adecuada para mitigar el problema de la carga en redes LAN inalámbricas con multitarea haciendo uso de DCF. Los resultados de simulación se presentan para algunos escenarios de ejemplo, lo que confirma la eficacia del criterio propuesto para la asignación de rendimiento optimizado.

El trabajo de Liew y Chang (2008) corresponde a la primera parte de una serie de resultados en el estudio del uso de la función de utilidad de *Proportional* como base para la asignación de recursos y la planificación en redes inalámbricas de múltiples velocidades multicanal. Se presentan las propiedades fundamentales y la interpretación física-económica de la optimización de *Proportional*. Asimismo, se encuentran características de soluciones óptimas para *Proportional* útiles para la construcción de algoritmos *Proportional*. Se encuentra que una solución para *Proportional*, en general, consiste de muchas asignaciones de cero durante el tiempo en el aire, cuando la diferencia entre el número de usuarios y de canales es grande. Se presentan varios algoritmos de optimización de *Proportional*, incluyendo un algoritmo rápido que permite una implementación paralela. Finalmente, se estudia el uso de la utilidad de *Proportional* para la asignación de recursos en las redes Wi-Fi a gran escala que consta de muchas redes de área local inalámbricas adyacentes.

En la segunda parte de la investigación (Zhang & Liew, 2008), descrita en el párrafo anterior, se estudia el uso de la función de utilidad para *Proportional* como base para la asignación de recursos y la programación en redes inalámbricas de múltiples velocidades multicanal. En esta segunda parte se estudia la asignación de subportadora y la programación de la modulación *Orthogonal Frequency Multiplexing Modulation* (OFDM) en redes inalámbricas celulares. Se introduce el concepto de una frecuencia Doppler W-normalizada para captar el grado en que la programación oportuna puede ser explotada para lograr el aumento de rendimiento de la ganancia de la relación *throughput-Fairness*.

Dadas las investigaciones, descritas en párrafos anteriores, se puede observar que algunas de estas han centrado su interés en el manejo de transmisiones multicanal, sin tener en cuenta el criterio de equidad, en tanto que otras investigaciones solo se han enfocado en aplicar el criterio *Fairness* en distintas redes inalámbricas como Wimax, 802.11, entre otras, sin incluir modelos multicanal. Finalmente, las pocas investigaciones (tres, de acuerdo con el estado del arte) que se enfocan en las dos temáticas (modelo multicanal y criterio *Fairness*) tienen en común que no se han aplicado sobre CRN.

Si bien las investigaciones planteadas hacen un tratamiento riguroso en cuanto a modelos multicanal y criterio *Fairness*, esta propuesta busca determinar el impacto que podrían tener estas dos temáticas en la asignación del recurso de ancho de banda en CRN, y validar los resultados con datos de ocupación espectral reales. Lo anterior no se ha propuesto en el estado del arte de la literatura sobre CRN.

Herramientas de simulación

Actualmente existen diversas investigaciones técnicas y analíticas que realizan aportes significativos a la función de SH en las CRN (Pedraza, López & Salcedo, 2011). Los estudios analíticos son muy estrictos en las metodologías matemáticas y pueden presentar múltiples grados de dificultad en el proceso de compresión de la temática y de análisis de resultados. En esta área, como en muchas otras, se utiliza una estrategia, bastante común en la ingeniería, que consiste en el desarrollo de simulaciones (Jiménez, 2015) que permiten analizar y sintetizar lo complejo y extenso que pueda llegar a ser la evaluación de los algoritmos y soluciones propuestas.

En el área de las telecomunicaciones existen diversos *software* de simulación, algunos de distribución gratuita como OMNET++, NS-2, J-Sim, y otros con costos por licencia como OPNET. Los simuladores OMNET y NS-2 son los de mayor uso en el área académica por su robustez y tipo de licencia (Fonte & Mora, 2008; OMNet++, 2015); con base en estos se han desarrollado un gran porcentaje de trabajos de investigación. OPNET está más orientado hacia la industria (Fonte & Mora, 2008).

OMNET++ (*Objective Modular Network testbed in C++*) es un simulador basado en lenguaje C++, que permite modelar y simular eventos discretos de redes, orientado a objetos, usado habitualmente para modelar el tráfico de redes de telecomunicaciones, protocolos, sistemas multiprocesadores y distribuidos (Fonte & Mora, 2008; OMNet++, 2015).

NS-2 es un simulador muy popular, con el cual se pueden simular redes alámbricas e inalámbricas. Utiliza eventos discretos para proporcionar apoyo en simulaciones como enrutamiento y protocolos *multicast*; al igual que OMNET++, es un simulador basado en lenguaje C++ (Paez & Ortiz, 2010).

J-Sim está desarrollado en Java, basado en componentes independientes, y está construido sobre la noción del modelo de programación de componentes autónomos. J-Sim no se utiliza a menudo en proyectos de investigación, por lo que uno puede cuestionar la validez de sus modelos antes de empezar a trabajar con dicha herramienta (Köksal, 2008; Paez & Ortiz, 2010).

OPNET (*Optimized Network Engineering Tools*) es un *software* comercial líder en el mercado, al igual que OMNET++ y NS-2 es un simulador de eventos discretos. El simulador proporciona un entorno para el diseño de protocolos y tecnologías, así como pruebas con diseños en escenarios realistas. Es un *software* muy usado en la industria de las telecomunicaciones, por ejemplo en el desarrollo de proyectos gubernamentales y militares (Páez & Ortiz, 2010; Universidad Politécnica de Cataluña, 2004).

La selección del *software* depende de las características y la plataforma a utilizar (Unix o Windows). Sobre estos programas se ha trabajado ampliamente en el desarrollado de múltiples investigaciones, algunas sobre casos de estudio puntuales y otras con el objetivo de realizar análisis comparativos entre los *software* para determinar ventajas y desventajas sobre temas específicos (Xian, Shi & Huang, 2008). A continuación se describen algunos trabajos realizados hacia la caracterización general de estos *software*.

En Khan, Bilal y Othman (2012) el objetivo es comparar los simuladores NS-2, NS-3, OMNET++, SWAN, OPNET, Jist y GloMoSim, con un protocolo de enruta-

miento para Redes Móviles Ad-hoc (MANET) para identificar el simulador óptimo. El análisis comparativo se realiza bajo parámetros como la utilización de la unidad central de procesamiento, uso de memoria, tiempo de cómputo, y escalabilidad mediante la simulación.

En Köksal (2008) se realiza una descripción de simuladores para el modelo de redes inalámbricas. El objetivo de la investigación fue lograr identificar un simulador fiable y con niveles de complejidad bajos. Se trabaja con cuatro simuladores conocidos en la academia, J-Sim, OMNET ++, NS-2 y OPNET Modeler. Finalmente, el documento presenta los simuladores que mejor se ajustan a las necesidades de las redes inalámbricas.

En Fonte y Mora (2008) se describen con detalle los simuladores NS-2 y OMNET++, mediante sus lenguajes de programación, herramientas e implementaciones de la naturaleza orientada a objetos de estos simuladores.

A pesar de la variedad de herramientas de *software*, mencionadas anteriormente, la mayoría de ellas no incluyen un módulo para trabajar con CRN, o no permiten una configuración flexible de los algoritmos para la toma de decisiones durante un SH. Más aún, dichas herramientas presentan resultados basados en datos aleatorios, generados por algoritmos predefinidos. Debido a lo anterior, la presente investigación decidió diseñar y desarrollar un simulador propio para la evaluación del desempeño del SH en CRN.

Metodología y diseño

La metodología de la presente investigación se estructuró de la siguiente forma. Primero, se realizó un estudio del estado del arte que permitió identificar los aspectos más importantes para el tema de SH en las CRN, así como sus algoritmos más relevantes en la literatura actual con MFA. Segundo, con base en el análisis de la información anterior, se diseñó una metodología para la evaluación del desempeño de la movilidad en redes móviles de CR. Tercero, se realizó la captura de datos de ocupación espectral reales en la banda GSM para analizar el comportamiento de dicha banda y del PU. Cuarto, se realizó un procesamiento a los datos capturados para construir bases de datos de información organizada sobre el comportamiento del PU y las características de los recursos espectrales de la banda GSM; dichas bases de datos fueron clasificadas por nivel de tráfico (HT y LT). Quinto, se determinaron los DC para la selección de las mejores SO y se calcularon los valores históricos de estos a partir de la información de las bases de datos, complementándolas. Sexto, se seleccionaron y desarrollaron los algoritmos de SH más relevantes en la literatura actual con MFA. Séptimo, se diseñó y desarrolló el modelo MFA-CRN propuesto. Octavo, con base en el análisis del estado del arte del SH en CRN, se diseñaron seis EM para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto en esta investigación, así como los seleccionados de la literatura actual, y se propusieron ocho escenarios de evaluación, al considerar cuatro tipos de demanda: DMA, DMB, DMC y DMD, y dos niveles de tráfico: HT y LT, para cuatro diferentes clases de aplicaciones: voz (SU1), web (SU2), videoconferencia (SU4) y *Streaming* (SU10). Noveno, con base en toda la información anterior se diseñó y desarrolló un simulador que permite evaluar cuantitativamente el desempeño de los algoritmos de SH con MFA, considerando el comportamiento real del PU. Decimo, con los resultados obtenidos a partir de los simuladores, se realizó una evaluación comparativa de su desempeño en cada una de las EM.

Selección del software y equipos

Para desarrollar la presente investigación se utilizaron los siguientes recursos. Un sistema de monitorización del espectro, descrito en la tabla 3-1, para realizar el proceso de captura de los datos de potencia espectral en las bandas GSM y Wi-Fi, dentro de los cuales se destaca el analizador de espectro MS2721B Anritsu. Múltiples

bases de datos electrónicas para realizar la consulta y construcción de la revisión literaria sobre SH para CRN. El *software* Matlab para desarrollar el simulador y los correspondientes algoritmos de SH. Y finalmente, un computador de escritorio, cuyas características están descritas en la tabla 3-2, para realizar el procesamiento de la información, el diseño del modelo propuesto, el desarrollo de la experimentación, el análisis de los resultados y la documentación de esta investigación.

Tabla 3-1. Especificaciones de los equipos para la monitorización del espectro

Equipo	Especificaciones	
	Rango de frecuencia	Referencia
Antena tipo discono	25 MHz – 6 GHz	Super-M Ultra Base
Cable de banda ancha	DC – 18 GHz	CBL-6FT SMNM+
Amplificador de bajo ruido	20 MHz – 8 GHz	ZX60-8008E-S+
Analizador de espectro	9 kHz– 7.1 GHz	MS2721B Anritsu

Fuente: Pedraza, Forero y Páez (2014).

Tabla 3-2. Especificaciones del equipo de cómputo

Característica	Valor de referencia
Procesador	AMD FX 9590 de 8 núcleos y 4.71 GHz
Memoria RAM	DDR 3 de 16 GB
Disco de estado sólido	Kingston SV300S37A de 240 GB
Tarjeta de video	AMD Radeon R7 200
Tarjeta de red	10 / 100 / 1000 Mbps
Monitor	LG IPS Full HD
Sistema operativo	Windows 7 de 64 bits

Metodología de evaluación

Con base en el análisis de la información obtenida, mediante la revisión literaria sobre SH con MFA para CRN, se diseñó una metodología para la evaluación del desempeño de la movilidad en redes móviles de CR.

Esta evaluación consistió en un análisis comparativo del desempeño entre los algoritmos de SH con MFA para CRN más relevantes en la literatura actual y para el desarrollado de esta investigación. La evaluación del desempeño se realizó para seis EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT y *Fairness*, en ocho escenarios diferentes: DMA-LT, DMA-HT, DMB-LT, DMB-HT, DMC-LT, DMC-HT, DMD-LT, DMD-HT, producto de la combinación de dos parámetros de interés: el tipo de demanda (DMA, DMB, DMC y DMD) y el nivel de tráfico (LT y HT). En cada uno de los ocho escenarios de evaluación, mencionados anteriormente, se evaluó el desempeño de las cuatro clases de aplicación, tres aplicaciones de RT: SU1, SU4 y SU10, y una aplicación de BE: SU2.

Para obtener la información de evaluación de cada algoritmo en las seis EM, para los ocho escenarios descritos, se desarrolló una herramienta de simulación que reconstruye progresivamente el comportamiento de la ocupación del espectro a partir del

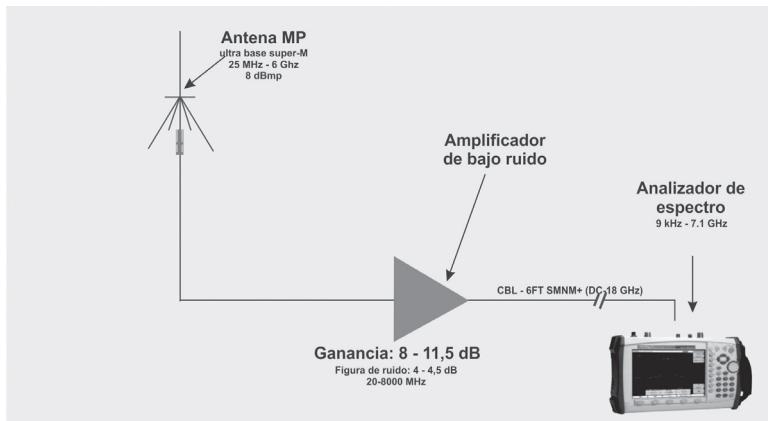
uso de trazas de datos experimentales capturadas en las bandas GSM y Wi-Fi. Esto permite considerar, dentro de la simulación, una aproximación al comportamiento real del PU y, por ende, obtener una validación más exacta del desempeño real de cada algoritmo. Los datos de ocupación espectral corresponden a un mes de observación, capturados en la ciudad de Bogotá, D.C., Colombia (Pedraza *et al.*, 2016).

Captura de los datos de ocupación espectral

Esta sección describe el procedimiento realizado para obtener la información de ocupación espectral, la cantidad de información almacenada y su posterior procesamiento para servir de insumo a la herramienta de simulación.

La figura 3-1 describe la configuración de los equipos para realizar el proceso de medición de la ocupación espectral en la banda GSM (824 MHz – 874 MHz). Las especificaciones de los equipos utilizados se muestran en la tabla 3-1 y la configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro para la banda GSM se pueden observar en la tabla 3-3.

Figura 3-1.Configuración experimental para medir la ocupación espectral



Fuente: Hernández *et. al.* (2015).

Tabla 3-3.Configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	824 MHz a 874 MHz
Sistema de comunicación	Móvil
Tecnología de comunicación	GSM
Técnica de detección	Detección de energía
Tiempo de captura	1 Mes
Tiempo de barrido	290 ms
Resolución de BW (RBW)	100 kHz
Span	50 MHz
Puntos Por Span (PPS)	500

Fuente: Hernández *et. al.* (2015).

“Los rangos de medición de las bandas se basaron en aspectos como el tiempo de barrido, la Resolución de Ancho de Banda (RBW) y el Span, con el fin de garantizar una adecuada medida en función del piso de ruido y el BW del canal de la tecnología a medir” (Pedraza *et al.*, 2016). La técnica de detección utilizada fue la de energía debido a su factibilidad de implementación. La campaña de medición se realizó durante un mes en total, desde marzo hasta abril de 2012. Una explicación más detallada de la configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro se pueden consultar en el capítulo tres del estudio de Pedraza *et al.* (2016).

El valor del Span corresponde al rango de frecuencia que está siendo analizado, en este caso 50 MHz (874 MHz – 824 MHz), y PPS determina el número de canales de frecuencia (división uniforme de una porción de espectro) para los cuales el analizador de espectro midió el correspondiente nivel de potencia durante cada barrido. De acuerdo con lo anterior, en cada barrido, el analizador de espectro entrega la información del valor de potencia medido en dBm correspondiente a 500 canales de frecuencia (potenciales SO), con un BW de 100 kHz (50MHz / 500) cada uno.

El número de barridos que realiza el analizador de espectro depende del tiempo de barrido (290 ms) y la duración de la campaña de medición (1 mes). De acuerdo con el tiempo de barrido, se tiene aproximadamente 3,448 barridos en un segundo. Por tanto, el número total de barridos realizados en un mes corresponde a 8.937.216 (barridos/mes) = 3,448 (barridos/segundo) × 60 (segundos/minuto) × 60 (minutos/hora) × 24 (horas/día) × 30 (días/mes), y el número total de datos de potencia es 4.468.608.000 (dato de potencia del canal/mes) = 8.937.216 (barridos/mes) × 500 (dato de potencia del canal/barrido).

A partir de la información anterior se construyó una matriz de potencia de $8.937.216 \times 500$, que contiene el valor de potencia de cada uno de los 500 canales (comprendidos entre 824 MHz y 874 MHz) para 8.937.216 tiempos de paso (cada tiempo de paso equivale a 290 ms). Sin embargo, debido a la gran cantidad de filas, dicha matriz tuvo que segmentarse en 240 matrices de 37.238×500 , para poder trabajar con esta.

Procesamiento de la información espectral

Los datos de ocupación espectral reales corresponden a la banda GSM de 824 MHz - 874 MHz. Para determinar la ocupación o disponibilidad de cada uno de los canales de la banda GSM, se calculó un umbral de decisión. El valor de la potencia del umbral de decisión se calculó a partir la ecuación (3-1) con una probabilidad de falsa alarma del 1% (Pedraza, et al., 2016), el cual fue de -109 dBm.

$$P_{fa} = \frac{\Gamma\left(m, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(m)} \quad (3-1)$$

Con la información de disponibilidad ('1') y ocupación ('0') de cada canal de frecuencia en función del tiempo, se realizó un análisis del nivel de tráfico en función de la

hora y el día. De acuerdo con el número promedio de PU activos simultáneamente en los canales de frecuencia, se seleccionaron dos sub-trazas de información espectral correspondientes a 70 minutos cada una, con un nivel de PU activos bajo y alto, respectivamente.

Los primeros 60 minutos de cada subtraza se utilizaron para calcular el valor promedio de los cuatro criterios de decisión seleccionados: AP, ETA, SINR y BW, y los últimos 10 minutos para realizar la evaluación y validación de los tres algoritmos seleccionados: *Proportional*, Max-Min y MFA-CRN, propuesto en esta investigación.

Estos datos de ocupación espectral conforman la base de datos de ocupación espectral (matriz) que contienen los niveles de potencia de 500 canales de frecuencia en intervalos de tiempo de 290 ms, de acuerdo con los parámetros de configuración seleccionados en el analizador de espectro.

Criterios de decisión

Con la matriz de potencia, y a partir de un procesamiento de esta, se obtienen las matrices de AP, ETA, SINR y BW. Para calcular los valores promedio de cada uno de los criterios de decisión sobre los primeros 60 minutos, se procedió de la siguiente manera. Para la magnitud de la variable AP se calculó el ciclo de trabajo normalizado de los canales de frecuencia. Para la variable ETA, se calcularon los tiempos en que cada canal permaneció disponible de forma continua y sobre estos se tomó el promedio. La variable SINR se calculó a partir del promedio de la diferencia entre la potencia de la señal y el valor promedio del piso de ruido. Finalmente para la variable BW, debido a que cada canal GSM tiene un valor fijo de ancho de banda igual a 200 kHz, se decidió tomar el ancho de banda de todos los canales adyacentes que estuvieran disponibles.

Como variables de entrada adicionales a los cuatro criterios de decisión ya mencionados se tuvieron en cuenta los siguientes:

- Asignación efectiva: es un parámetro que indica la cantidad de canales asignados a un usuario respecto a lo que solicito inicialmente.
- Oferta disponible: número de canales disponibles en la banda GSM.
- Demanda de canales: esta se describe en la siguiente sección.

Con estos parámetros se tiene un insumo de entrada para poder seleccionar los mejores canales para una asignación, tratando —en lo posible— de hacerlo de manera justa para todos los usuarios.

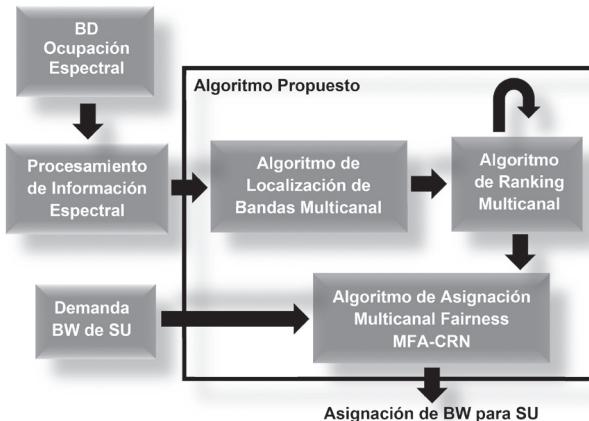
Diseño del modelo propuesto para asignación multicanal

La figura 3-2 describe, de forma general y mediante diagrama de bloques, el algoritmo propuesto. El primer bloque, denominado “base de datos de ocupación espectral”, contiene los datos de ocupación espectral reales correspondientes a la banda GSM (de 824 MHz - 874 MHz). Este bloque es el insumo de entrada para el bloque “procesamiento de información espectral”, el cual tiene la tarea de determinar la

ocupación o disponibilidad de cada uno de los canales de la banda GSM, de acuerdo con la ecuación de probabilidad de falsa alarma. Por otra parte, el bloque denominado “demanda ancho de banda de SU” contiene la información de la cantidad de usuarios que demandan 10 canales, 4 canales, 2 canales y 1 canal. Este bloque tendrá 4 tipos de demanda para evaluar el algoritmo MFA-CRN frente a los algoritmos *Proportional* y *Max-Min* (tabla 3-4).

El área rectangular corresponde al algoritmo propuesto, compuesto por tres bloques. El bloque, denominado “algoritmo de localización de bandas multicanal”, recibe las demandas de canales por parte de los SU, tanto para aquellos que solicitan un único canal como para aquellos usuarios que solicitan múltiples canales para transmisión, y localiza las bandas multicanal. Luego, el bloque “algoritmo de ranking multicanal” realiza un ranking de las mejores SO. Finalmente, el bloque “algoritmo asignación multicanal *Fairness MFA-CRN*” realiza la asignación de canales tratando de satisfacer las demandas de manera justa.

Figura 3-2. Estructura general del algoritmo MFA-CRN propuesto



En las siguientes secciones se realizará una descripción detallada de cada uno de los bloques que componen el modelo de asignación multicanal propuesto (figura 3-2) y la forma como cada bloque realiza una función específica en pro de la asignación equitativa de los recursos disponibles en el medio y asumiendo las problemáticas que se puedan generar como la escasez de recursos para la cantidad de usuarios que demanda de estos.

Para realizar la validación del algoritmo MFA-CRN se realizó una evaluación comparativa con los algoritmos *Max-Min* y *Proportional*, debido a que son los más relevantes en la literatura actual para realizar una asignación equitativa de canales (Lertsinsrubtaveec & Malouch, 2016). La descripción de estos algoritmos se mencionó en los apartados *Proportional Fairness* y *Max-Min Fairness*; estos algoritmos, en términos generales, tratan de realizar una distribución equitativa de los recursos entre todos los usuarios de la red, con el fin de lograr un balance del *throughput* entre ellos.

El algoritmo MFA-CRN adapta su procedimiento de acuerdo con el comportamiento de la demanda y oferta de canales en la banda espectral seleccionada. En

consecuencia se tuvieron en cuenta los dos posibles escenarios al momento de la asignación de recursos:

- Recursos espectrales mayores a la demanda de usuarios.
- Recursos espectrales menores a la demanda de usuarios.

Escenario 1: recursos de la red mayores a las demandas de los SU

En un sistema los recursos como el BW puede ser utilizado por cualquier usuario que requiera trasmisir información; sin embargo, los usuarios que utilizan aplicaciones en RT demandan mayor BW. De acuerdo con esto sería preferible, para este tipo de usuarios, usar trasmisiones multicanal. No obstante, para que el sistema permita satisfacer las demandas de todos los usuarios, tanto en aplicaciones RT como BE, se tiene que cumplir la condición de la ecuación (3-2).

$$\sum_{i=1}^N BW_i \leq \sum BW_s \quad (3-2)$$

Donde BW_i corresponde a la demanda de BW por los N usuarios disponibles en el sistema y BW_s corresponde al BW del sistema.

Teniendo en cuenta la ecuación 3-2, es de esperarse que la demanda de cada usuario sea satisfecha para cada ranura de tiempo durante la trasmisión, como se muestra en la ecuación 3-3.

$$\sum_{t=1}^T BW_t = BW_i \quad (3-3)$$

Es importante resaltar que cuando se cumple la condición mostrada en la ecuación 3-3, el algoritmo MFA-CRN revisa la oferta excedente y acorde a esta realiza una reserva de canales. La reserva de canales se hace con el objetivo de dejar una porción de canales disponibles para los futuros usuarios que puedan llegar en un tiempo cercano.

Una vez realizada la reserva de canales, se cuentan cuántos canales excedentes quedan disponibles y se hace una distribución equitativa de estos entre todos los SU, logrando una sobre asignación en todos los SU.

Escenario 2: recursos de la red menores a las demandas de los SU

Bajo este escenario hay que tener en cuenta que no todas las demandas de los usuarios se pueden satisfacer completamente, debido a que la oferta es menor que la demanda; sin embargo, bajo un criterio de equidad, se debe garantizar que todos los usuarios van a poder hacer uso de los recursos de la red, aunque no se haga en la misma ranura de tiempo sino en ranuras siguientes. Teniendo en cuenta la premisa anterior se puede inferir la ecuación 3-4.

$$H(x) = \sum_{s=1}^S (Ux) - \sum_{t=1}^L Cx \quad (3-4)$$

Donde U_x es la probabilidad de trasmisión del usuario x del sistema, al cual se le asigna un costo C_x que se refiere a la posibilidad de tener que seguir trasmitiendo en una ranura de tiempo posterior debido a las limitaciones del recurso del sistema.

En las secciones siguientes se explicará en detalle cómo funcionan los dos escenarios planteados anteriormente en el simulador de SH multicanal desarrollado.

Demanda de ancho de banda de los SU

La demanda de BW de los SU se cuantificó, a partir del número de canales requeridos (demanda de canales) y de acuerdo con el tipo de aplicación que este ejecutando cada SU. La demanda de canales establece el número de canales que está solicitando los SU. Estas demandas pueden ser de un solo canal (simple) o de múltiples canales (multicanal). Como parte del análisis para la presente investigación se formularon cuatro tipos de demandas (tabla 3-4) para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto bajo diferentes escenarios.

Tabla 3-4. Escenarios de demanda de canales por usuario

Demandada	Descripción	Usuarios 10 Canales	Usuarios 4 Canales	Usuarios 2 Canales	Usuarios 1 Canal	Total de Usuarios
DMA	Sobreasignación fuerte	5	5	10	20	40
DMB	Sobreasignación leve	10	10	15	30	65
DMC	Castigo leve	25	15	25	35	100
DMD	Castigo fuerte	40	15	20	25	100

Las características de cada uno de los cuatro tipos demandas de la tabla 3-4 son las siguientes:

- Demanda A (DMA): en este tipo de demanda la oferta es mucho mayor que la demanda, de forma que no solo se puede realizar una reserva de canales para futuros usuarios, sino que también permite realizar una asignación de canales adicionales para cada uno de los 40 usuarios. Esta asignación adicional puede ser de uno o más canales por usuario.
- Demanda B (DMB): en este tipo de demanda la oferta es ligeramente mayor que la demanda y, pese a que se puede realizar una reserva de canales para futuros usuarios, la asignación adicional para cada uno de los usuarios llega a ser de máximo un canal.
- Demanda C (DMC): en este tipo de demanda la oferta es menor que la demanda, por lo cual no se puede realizar una reserva de canales, y adicionalmente no se pueden asignar todos los canales demandados por los usuarios, reduciendo su BW (castigo). Lo anterior obliga al algoritmo propuesto a castigar a todos o algunos usuarios pero, pese a dicho castigo, todos los usuarios cuentan con al menos un canal para transmitir, por lo que no hay perdida de servicio.

- Demanda D (DMD): en este tipo de demanda la oferta es mucho menor que la demanda, por lo que, al igual que en la demanda C, no se puede realizar reserva de canales ni asignar los canales demandados por los usuarios. La diferencia de esta demanda con la demanda C, radica en que el castigo en la demanda D es mucho más fuerte, produciendo incluso la pérdida del servicio.

Las cuatro clases de SU que se muestran en la tabla 3-4, las cuales demandan 10, 4, 2 o 1 canal, se determinaron mediante un análisis de tasas de transferencia correspondientes a cinco tipos de servicios o aplicaciones que un SU utiliza comúnmente en la actualidad y cuya demanda es creciente. Dichos servicios son:

- Servicios de *streaming*.
- Servicios de videoconferencia.
- Servicios web.
- Servicios de voz.
- Servicios multimedia.

A pesar de que en GSM los canales de frecuencia tienen un BW fijo de 200 kHz, la herramienta de simulación trabajó con canales de 100 kHz para hacer una asignación más eficiente del espectro. Con base en un BW de 100 kHz se determinó el número de canales necesarios para satisfacer la demanda de usuarios, según el tipo de aplicación que estén utilizando.

Posteriormente, para determinar el número de canales de frecuencia (de 100 kHz) que se necesitan para cada tipo de aplicación, se realizó un análisis de acuerdo con el tipo de modulación usado en GSM, el cual corresponde a GMSK, y al tipo de modulación 16 QAM, comúnmente utilizada por su eficiencia espectral (Sklar, 2001).

A continuación se muestra el análisis hecho para cada uno de los tipos de aplicaciones, describiendo el número de canales necesarios tanto para la modulación GMSK como para 16 QAM.

Clasificación de demandas por servicios de streaming

Este tipo de servicio tiene la característica de optimizar la descarga y reproducción de archivos de audio o video que pueden llegar a tener un tamaño considerable. Para realizar este proceso el cliente se conecta con el servidor remoto que es el encargado de enviar la información, para que mediante un buffer el cliente vaya almacenando la información recibida hasta completar la capacidad del buffer, tras lo cual se empieza a reproducir el contenido (Wu, Hou, Zhu, Zhang & Peha, 2001).

Los datos restantes se irán enviando desde el servidor hacia el cliente, en la medida que el buffer vaya teniendo la disponibilidad de recepción de archivos. Este proceso se realizará en segundo plano, por lo cual, el cliente no lo percibe.

Uno de los puntos a tener en cuenta en este tipo de servicio es que si la conexión experimenta descensos de velocidad o capacidad de transmisión durante la reproducción, del lado del cliente se seguiría mostrando el contenido disponible en el buffer. En el evento en que se llegue a consumir toda la información contenida en el buffer, la reproducción se detendría hasta que el buffer pueda disponer de nueva información.

Existen muchos servicios por *streaming*, sin embargo, se puede clasificar a su vez por contenido musical y video, como es el caso de Spotify y Pandora, entre otros, para contenido musical, y Netflix para películas y videos Netflix (2016) y Sclater (2016).

En virtud de lo anterior, se realizó el análisis de canales necesarios para soportar las tasas de trasmisión, tanto para la modulación 16 QAM (tabla 3-5) como para la modulación GMSK (tabla 3-6), en la cual la primera tiene una mayor eficiencia espectral.

Tabla 3-5. Demanda de servicios de *streaming* modulación 16 QAM

Aplicación / Servicio		Tasa de trasmisión (kbps)	16 QAM		
			Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (Canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Música por streaming	Spotify	96	24	0,24	1
	Pandora	160	40	0,4	1
		320	80	0,8	1
Películas por streaming	Netflix	500 (Mínimo)	125	1,25	2
		1.500 (Calidad estándar)	375	3,75	4
		3.000 (Calidad SD)	750	7,5	8
		5.000 (Calidad HD)	1.250	12,5	13
		25.000 (Ultra HD)	6.250	62,5	63

Fuente: Netflix (2016) y Sclater (2016).

Tabla 3-6. Demanda de servicios de *streaming* modulación GMSK

Aplicación / Servicio		Tasa de trasmisión (kbps)	GMSK		
			Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (Canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Música por streaming	Spotify	96	71,11	0,71	1
	Pandora	160	118,52	1,19	2
		320	237,04	2,37	3
Películas por streaming	Netflix	500 (Mínimo)	370,37	3,7	4
		1500	1111,11	11,11	12
		3000 (Calidad SD)	2222,22	22,22	23
		5000 (Calidad HD)	3703,7	37,04	38
		25.000 (Ultra HD)	18.518,52	185,2	186

Fuente: Netflix (2016) y Sclater (2016).

Clasificación de demandas por servicios de videoconferencia

El servicio de videoconferencia tiene como principal característica el ser un sistema que permite establecer una comunicación virtual entre un grupo de personas, mediante trasmisiones en RT de video y audio, a través de Internet.

En general este tipo de servicio es usado para sesiones de capacitación, reuniones de trabajo colaborativo, soporte y atención al cliente. Derivado de estas características se desprenden las siguientes ventajas:

- Mejora los sistemas de comunicación de una empresa.
- Mejora el proceso de toma de decisiones.
- Elimina las barreras de distancia y mejoras los tiempos de resolución de problemas.

Pese a que puedan existir muchos servicios de videoconferencia, Skype es la herramienta más conocida y usada para este tipo de servicios, por lo cual el análisis de la velocidad de trasmisión y capacidad de canal se realizaron mediante los datos ofrecidos por esta aplicación. En la tabla 3-7 se muestra el análisis realizado para la modulación 16 QAM y los canales necesarios, dependiendo del tipo de llamada a ser realizada por el usuario. Mientras en la tabla 3-8 se hizo el análisis para la modulación GMSK, la cual es usada en redes GSM.

Tabla 3-7. Demanda de servicios de videoconferencia modulación 16 QAM

Aplicación / Servicio	Velocidad recomendada-down/up (kbps)	Modulación 16 QAM		
		Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Skype	Llamada	100 / 100	25	0,25
	Videollamada (Compartir pantalla)	300 / 300	75	0,75
	Videollamada (Alta-calidad)	500 / 500	125	1,25
	Videollamada (HD)	1500 / 1500	375	3,75
	Video grupal (3 personas)	2000 / 512	500	5
	Video grupal (5 personas)	4000 / 512	1000	10
	Video grupal (7+ personas)	8000 / 512	2000	20

Fuente: Skype (2016).

Tabla 3-8. Demanda de servicios de videoconferencia modulación GMSK

Aplicación / Servicio	Velocidad recomendada-down / up (kbps)	Modulación GMSK		
		Anchobanda (kHz)	Canales necesarios (Canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Skype	Llamada	100 / 100	74,07	0,74
	Videollamada (compartir pantalla)	300 / 300	222,22	2,22
	Videollamada (alta-calidad)	500 / 500	370,37	3,7
	Videollamada (HD)	1500 / 1500	1111,11	11,11
	Video grupal (3 personas)	2000 / 512	1481,48	14,81
	Video grupal (5 personas)	4000 / 512	2.962,96	29,63
	Video grupal (7+ personas)	8000 / 512	5925,93	59,26

Fuente: Skype (2016).

Clasificación de demandas por servicio web

Los servicios web tienen diferentes contenidos de información, por ejemplo: información plana (solo texto), como el Servicio de Mensajes Cortos (SMS), hasta información dinámica (animaciones y texto). Generar una uniformidad en los contenidos es difícil debido a la naturaleza heterogénea de los sitios web existentes en la red; sin embargo, se puede establecer un rango variado de tipo de sitios web para establecer un rango de velocidades de transmisión para consultas http (Pingdom, 2016). En virtud delo anterior, se muestra en la tabla 3-9 el análisis para modulación QAM, y en la tabla 3-10 el análisis para la modulación GMSK.

Tabla 3-9. Demanda de servicios por servicio web 16 QAM

Aplicación / Servicio		Tasa de trasmisión (kbps)	16 QAM		
			Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
SMS	SMS	2	0,5	0,005	1
Web	Hotmail	265,95	66,4	0,664	1
	U. Distrital	247	61,75	0,6175	1
	El espectador	472,9	118,22	1,18	2
	El Tiempo	856,7	214,18	2,14	2

Fuente: Pingdom (2016).

Tabla 3-10. Demanda de servicios por aplicaciones web GMSK

Aplicación / Servicio		Tasa de trasmisión (kbps)	GMSK		
			Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
SMS	SMS	2	1,48	0,01	1
Web	Hotmail	265,95	197	1,97	2
	U. Distrital	247	182,9	1,83	2
	El espectador	472,9	350,3	3,5	4
	El Tiempo	856,7	634,59	6,35	7

Fuente: Pingdom (2016).

Clasificación de demandas por servicios de voz

La demanda de servicios de voz, por ejemplo la telefonía, requieren velocidades de 64 kbps para tener una calidad mínima; valores más grandes garantizan una calidad significativa. A pesar de requerir de una tasa de transferencia relativamente baja y por consiguiente de un BW menor, es un servicio con gran demanda. En la tabla 3-11 se realiza un análisis de los canales necesarios para satisfacer la demanda de voz en modulación QAM, y en la tabla 3-12 para la modulación GMSK.

Tabla 3-11. Demanda de servicios de voz 16 QAM

Aplicación / Servicio			Velocidad recomendada down / up (kbps)	16 QAM		
				Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Voz	Skype	Llamada de voz	64 / 100	25	0,25	1

Fuente: Skype (2016).

Tabla 3-12. Demanda de servicios de voz GMSK

Aplicación / Servicio			Velocidad recomendada down / up (kbps)	GMSK		
				Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (Canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Voz	Skype	Llamada de voz	64 / 100	135	1,35	2

Fuente: Skype (2016).

Clasificación de demandas por servicios de multimedia

Los servicios multimedia permiten la transmisión de diferentes contenidos de interés, mediante distintos formatos; de acuerdo con el tipo de contenido se pueden destacar juegos en línea, videos y música, entre otros. Para el análisis realizado se escogió juegos en línea y YouTube como proveedor de contenidos multimedia para establecer el nivel de trasmisión y número de canales necesarios, teniendo en cuenta el tipo de modulación. En la tabla 3-13 se muestra el análisis para la modulación 16 QAM y en la tabla 3-14 el análisis para la modulación GMSK.

Tabla 3-13. Demanda de servicios de multimedia modulación 16 QAM

Aplicación / Servicio		16 QAM					
Aplicación	Resolución	Tasa mínima (kbps)	Tasa recomendada (kbps)	Tasa máxima (kbps)	Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Juegos online			3.000		750	7,50	10
YouTube	240p	300	400	700	175	1,75	2
	360p	400	750	1000	250	2,50	3
	480p	500	1000	2000	500	5,00	5
	720p	1500	2500	4000	1000	10,00	10
	1080p	3000	4500	6000	1500	15,00	15

Fuente: Google (2016) y Microsoft (2016).

Tabla 3-14. Demanda de servicios de multimedia modulación GMSK

Aplicación / Servicio		GMSK					
Aplicación	Resolución	Tasa mínima (kbps)	Tasa recomendada (kbps)	Tasa máxima (kbps)	Ancho de banda (kHz)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Juegos online			3.000		2222,2	22,22	23
Youtube	240p	300	400	700	518,52	5,19	5
	360p	400	750	1000	740,74	7,41	8
	480p	500	1000	2000	1482	14,81	14
	720p	1500	2500	4000	2963	29,63	30
	1080p	3000	4500	6000	4444	44,44	45

Fuente: Google (2016) y Microsoft (2016).

Consolidado del número de canales requeridos por tipo de servicio

Con base en los análisis descritos anteriormente (tabla 3-15) se presenta un consolidado de los datos más representativos, teniendo en cuenta la clase de servicio, y únicamente para la modulación 16 QAM en razón a que tiene una mejor eficiencia espectral que GSMK.

Tabla 3-15. Consolidado de canales necesarios por tipo de servicio para 16 QAM

Aplicación / Servicio			Tasa recomendada (kbps)	Canales necesarios (canal=100 kHz)	Canales completos requeridos
Voz	Skype	Llamada	64	0,25	1
Web	SMS	SMS	2	0,005	1
	Páginas web	El Tiempo	856,7	21,418	2
Películas Streaming	Netflix		1500	3,75	4
Video-Conferencia	Skype	Video grupal (5 personas)	4000 / 512	10	10
Multimedia	Youtube	720p	4000	10	10

Fuente: Google (2016), Netflix (2016), Pingdom (2016) y Skype (2016).

En el caso del servicio web, en el cual se encuentran los SMS y los servicios web, se decidió seleccionar el número máximo de canales requeridos, el cual, según la tabla 3-9, es de dos canales.

Para el caso de *streaming*, se tenían los servicios de música por *streaming* y películas por *streaming*. De estos dos servicios, el que mayor número de recursos demanda es el servicio de películas por *streaming* (tabla 3-5). Con el objetivo de optimizar los recursos disponibles y en razón a que el SU no paga por ellos, se decidió seleccionar

la calidad estándar correspondiente a una tasa de transferencia de 1500 kbps, la cual requiere de cuatro canales.

En el caso de videoconferencia y multimedia, se tomaron en cuenta los mismos argumentos del caso *streaming*, por lo que se seleccionó la opción de videoconferencia grupal de cinco personas (tabla 3-7) en el primer caso y una calidad estándar de 720p (tabla 3-13) en el segundo caso. Los canales requeridos en ambos casos fueron 10.

Con la información consolidada de la tabla 3-15 se realizó una selección de canales necesarios, de acuerdo con el tipo de aplicación. De este análisis se observa que la clase de servicio que exige un mayor número de canales es la videoconferencia y los servicios multimedia con 10 canales. A su vez, las películas por *streaming* demandan cuatro canales, seguida por servicios Web con dos canales, y por último, servicios de voz con un canal.

De acuerdo con el análisis hecho se definieron cuatro clases de usuarios, los cuales se listan a continuación:

- SU que demandan 10 canales (SU10).
- SU que demandan 4 canales (SU4).
- SU que demandan 2 canales (SU2).
- SU que demandan 1 canal (SU1).

Algoritmos del modelo propuesto

Para realizar la validación del algoritmo MFA-CRN se realizó una evaluación comparativa con los algoritmos Max-Min y *Proportional* debido a que son los más relevantes en la literatura actual para realizar una asignación equitativa de canales. La descripción de estos algoritmos se mencionó en los apartados *Proportional Fairness* y *Max-Min Fairness*; estos algoritmos, en términos generales, tratan de realizar una distribución equitativa de los recursos entre todos los usuarios de la red, con el fin de lograr un balance del *throughput* entre ellos. Sin embargo, también es necesario contar con un algoritmo que organice las bandas de frecuencia multicanal disponibles y otro que permita seleccionar las mejores canales en términos de los criterios de decisión seleccionados. En otras palabras, el modelo está conformado por tres algoritmos: 1) algoritmo de localización de bandas multicanal disponibles, 2) algoritmo de ranking de bandas multicanal y 3) algoritmo de Asignación Multicanal con Equidad (MFA-CRN). El primero tiene la función de organizar los canales disponibles en bandas de frecuencia multicanal; el segundo se encarga de realizar un ranking de las bandas multicanal, en términos de los criterios de decisión seleccionados; el tercero y más importante se encarga de determinar cuántos y cuáles canales se asignarán a cada SU de acuerdo con su solicitud de demanda de canales y la oferta disponible de estos.

Localización de bandas multicanal disponibles

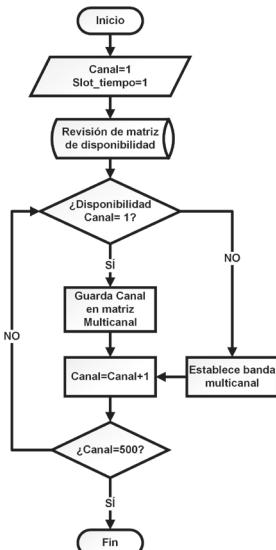
El algoritmo propuesto necesita tener la capacidad de establecer, dentro de cada franja de tiempo, los canales contiguos que se encuentran disponibles y aquellos que se encuentren dispersos dentro del espectro pero que también están disponibles. La

razón por la cual es deseable encontrar canales contiguos es porque permite asignar dichos canales a los SU que demandan un mayor BW, y reducir de esta forma el tiempo de procesamiento en la asignación de canales múltiples y la complejidad en la transmisión multicanal, evitando tener que utilizar varios transceptores; mientras que para los usuarios que demandan canales sencillos, es indistinto si el canal asignado hace parte de un conjunto continuo de canales disponibles o se encuentra aislado.

La figura 3-3 describe el comportamiento del algoritmo para la localización de bandas multicanal disponibles. Este algoritmo empieza cargando una matriz de disponibilidad que contiene los datos históricos de los canales de estudio durante los primeros 60 minutos. Luego el algoritmo revisa, de forma ordenada, todos los canales (empezando por el primer canal) para determinar si está disponible, de ser así, guarda dicho canal en una matriz denominada Multicanal, la cual lleva un registro de las bandas de canales contiguos, así como los canales dispersos en el espectro. Es importante resaltar que el algoritmo va llevando un registro de los canales contiguos hasta que encuentra un canal que no tiene disponibilidad, en ese punto el algoritmo marca el conjunto de canales como una banda de canales contiguos y prosigue con el proceso de búsqueda. En caso de que el algoritmo encuentre un canal disponible y el siguiente no lo sea, creará un registro de dichos canales simples, los cuales estarán destinados a suplir la demanda de usuarios que solicitan un solo canal.

Una vez el algoritmo termine de analizar todos los canales, entregará la matriz multicanal completa, que denominaremos Ancho de Banda Multicanal (BWM), como insumo de entrada para el bloque de ranking de bandas multicanal y, posteriormente, al proceso de asignación de recursos a los usuarios que demanda canales simples como múltiples canales.

Figura 3-3. Diagrama de flujo de búsqueda de multicanal

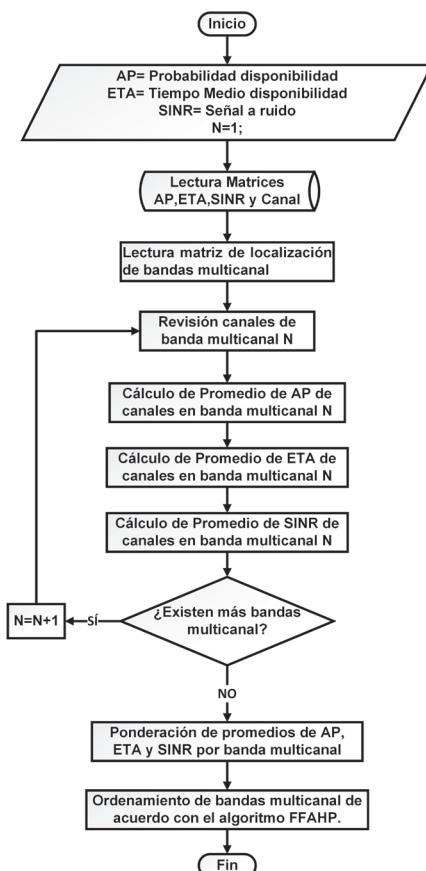


Algoritmo de ranking multicanal

El proceso de ranking multicanal tiene especial relevancia, en el sentido que el algoritmo encuentra los mejores canales y los ordena de mejor a peor, de acuerdo con los criterios de decisión y le proporciona esta información al algoritmo MFA-CRN para que este último decida cuántos y cuáles canales asignar a cada SU. El algoritmo de ranking multicanal tiene la capacidad de estimar, a partir de la información histórica (60 minutos) de los DC, los mejores canales disponibles.

Este proceso se describe en la figura 3-4, el cual tiene como insumo de entrada las matrices AP, ETA, SINR y BWM. Una vez se han cargado las matrices mencionadas anteriormente, el algoritmo calcula el valor promedio de cada matriz por canal, a excepción de BWM que no está por canal sino por banda. Posteriormente calcula el promedio de los resultados anteriores para cada banda de frecuencia y canal único, según la matriz de localización de bandas multicanal, obteniendo un vector de promedios de cada DC por banda y canal único.

Figura 3-4. Proceso de ranking multicanal



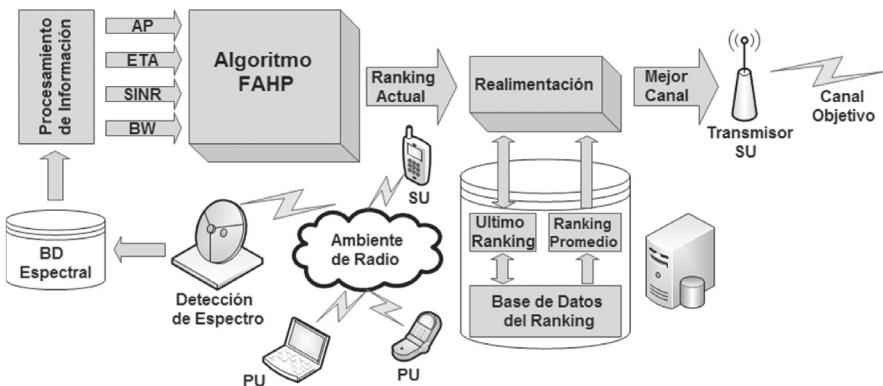
Luego, el algoritmo de ranking multicanal calcula un valor ponderado por cada banda y canal único con los valores del vector de promedios calculado anteriormente, obteniendo de esta forma un puntaje para cada banda y canal único. Finalmente, el algoritmo de ranking multicanal ordena de mayor a menor puntaje cada una de las bandas y canales únicos, generando así un vector de ranking multicanal, el cual entregará como insumo de entrada al algoritmo de Asignación de Multicanal Equitativa (MFA-CRN).

Para este trabajo de investigación se utilizó como algoritmo para la selección de canales de frecuencia, el algoritmo FFAHP, propuesto en Hernández, Pedraza, y Rodríguez-Colina (2016), el cual se describe a continuación.

El algoritmo FFAHP tiene por objetivo incrementar la precisión en la selección de la oportunidad espectral. Para lograr esto, FFAHP realimenta la información de las evaluaciones realizadas anteriormente. La selección de la oportunidad espectral se realiza con base en la evaluación de la información actual y las evaluaciones pasadas (Hernández *et al.*, 2016).

La figura 3-5 describe el comportamiento del algoritmo FFAHP. Inicialmente, el proceso de detección de espectro captura la información de frecuencia, potencia y tiempo. La cantidad de datos capturados dependerá de los parámetros de ancho de banda de resolución, *span* y tiempo de barrido, configurados en el analizador de espectro. Los datos capturados son almacenados en una base de datos. Periódicamente, la unidad de procesamiento de información calcula el valor de los criterios de decisión: AP, ETA, SINR y BW, y los normaliza sobre una base de 100. El algoritmo FAHP, descrito en Hernández, Salgado, Lopez y Rodríguez-Colina (2015), recibe los valores actualizados de cada criterio de decisión y procede a evaluar cada oportunidad espectral disponible, asignándole un *score i*. El rango del puntaje de evaluación puede estar entre 0 y 100, siendo 100 el mejor puntaje posible (Hernández *et al.*, 2016).

Figura 3-5. Algoritmo FFAHP seleccionado



Fuente: Hernández *et al.* (2016).

Hasta aquí se tiene un ranking de cada una de las oportunidades espirituales disponibles con base, únicamente, en la información actual de los criterios de decisión. Sin embargo, la oportunidad con la mejor evaluación, hasta el momento, puede no

ser la seleccionada finalmente, debido a que este valor de evaluación se ponderará con las evaluaciones realizadas en el pasado. El proceso de realimentación recibe las Evaluaciones Actuales (PS) de cada oportunidad espectral y las pondera con el valor de la Última Evaluación (LS) y el Promedio de las Evaluaciones (AS) realizadas en la última hora. Esta ponderación da como resultado el ranking definitivo de las oportunidades espectrales. El procedimiento anterior se describe en la ecuación 3-5 (Hernández *et al.*, 2016).

$$\text{Final Score}_i = \alpha \times PS + \beta \times LS + (1 - \alpha - \beta) \times AS \quad (3-5)$$

Donde α y $\beta \in [0,1]$, y Final Score_i es el valor de la evaluación final de la oportunidad espectral i.

La oportunidad espectral con la mejor evaluación final es la seleccionada para realizar la transmisión de los datos del SU. Posteriormente, el bloque de realimentación transfiere el valor de PS a LS y actualiza el valor de AS de acuerdo con el nuevo valor de LS. Si la oportunidad espectral seleccionada finalmente, se encuentra ocupada, el algoritmo FFAHP sobrescribe el valor de LS en cero para la respectiva oportunidad espectral (Hernández *et al.*, 2016).

Para determinar los valores de α y β , se realizó un análisis experimental autorregresivo con diferentes combinaciones de α y β , para un conjunto de datos predeterminado. Se tomaron los valores de α y β para los cuales la precisión en la selección de la oportunidad espectral fue más alta. Dichos valores corresponden a $\alpha=0.60$ y $\beta=0.35$, con una precisión experimental del 87% (Hernández *et al.*, 2016).

Algoritmo de Asignación Multicanal Equitativa MFA-CRN

Un algoritmo de asignación equitativa es un algoritmo que tiene en cuenta el criterio *Fairness* o criterio de equidad. Esta equidad es una propiedad especial de los algoritmos de asignación, la cual, en una red inalámbrica con recursos insuficientes, trata de asignar los recursos de una manera equitativa a los usuarios. Como se explicó en el apartado “Criterio *Fairness*”, existen varios algoritmos con esta propiedad, aunque, de acuerdo con la literatura actual, sobresalen dos, *Proportional* y *Max-Min* (Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016). Estos dos algoritmos *Fairness* se utilizarán como marco de referencia para evaluar y validar el algoritmo MFA-CRN propuesto.

Como se explicó anteriormente, el algoritmo MFA-CRN adapta su procedimiento de acuerdo con el comportamiento de la demanda y oferta de canales en la banda espectral seleccionada, en el cual se pueden dar dos tipos de escenarios: 1) recursos espectrales mayores a la demanda de los SU, y 2) recursos espectrales menores a la demanda de los SU. En consecuencia se describirá a continuación el funcionamiento del algoritmo MFA-CRN, en cada uno de los dos escenarios planteados.

MFA-CRN para oferta de espectro menor a demanda de SU

El proceso de asignación multicanal, cuando la oferta de los recursos espectrales disponibles es menor que la demanda de canales por parte de los SU, requiere un tratamiento especial (figura 3-6) debido a que, si se quiere tener un criterio de equi-

dad con todos los usuarios al momento de la asignación, se debe garantizar que si bien los usuarios no van a tener todos los recursos que solicitaron, se tratará de que todos tengan recursos para trasmitir sin que ninguno salga castigado en el proceso de asignación.

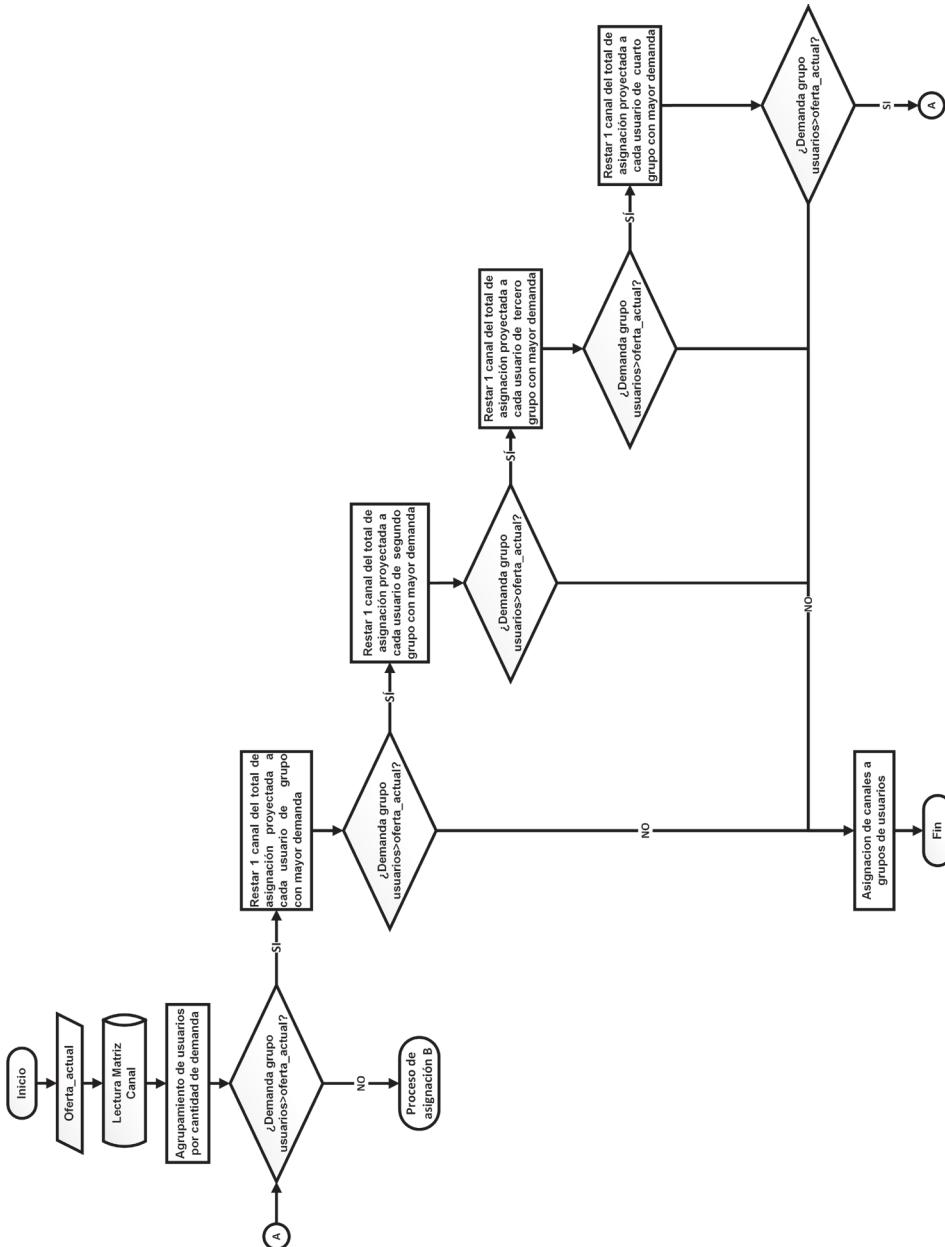
Para cumplir con este propósito se tiene en cuenta la oferta actual derivada de la cantidad de canales disponibles encontrados en la matriz multicanal y de acuerdo con esto se realiza una proyección ideal de las demandas de cada uno de los usuarios. Una vez realizado esto se procede a agrupar los usuarios de acuerdo con la cantidad de demanda de recursos.

El algoritmo revisa si la oferta actual satisface la demanda de recursos de los diferentes usuarios y, en el caso de que no sea así, entonces revisa el grupo de usuarios con mayor demanda de recursos y empieza a restar un canal de la asignación deseada. Realiza este proceso para cada uno de los usuarios hasta que la demanda global sea igual a la oferta disponible; en caso de no ser así, el algoritmo pasa al segundo grupo con mayor demanda de recursos y realiza el mismo proceso de resta de un canal por usuario revisando que la demanda se iguale con la oferta.

Este proceso se realiza de manera consecutiva con el tercer grupo de mayor demanda hasta encontrar que la demanda se iguale con la oferta; si el algoritmo ha restado un canal a cada usuario del tercer grupo de demanda (último grupo ya que el grupo de SU1 solo se le resta en la última iteración) y aun así no se logra establecer el equilibrio entre oferta y demanda, el algoritmo nuevamente irá al primer grupo con mayor demanda y realizará el mismo proceso hasta encontrar el equilibrio requerido de oferta y demanda de recursos.

Se observa de la figura 3-6 que la política de castigo en la asignación de canales empieza con el grupo de mayor demanda y termina con el grupo de menor demanda, hasta que la demanda por parte de todos los usuarios sea menor o igual a la oferta ofrecida. Aquí existe la posibilidad de que la oferta sea mucho menor en comparación con la demanda de los usuarios, en dicho caso, es posible que después de castigar a todos los grupos la condición de demanda menor o igual a oferta, aun no se cumpla, y sea necesario continuar castigando a todos los usuarios.

Figura 3-6. Proceso de asignación con demanda mayor a recursos disponibles

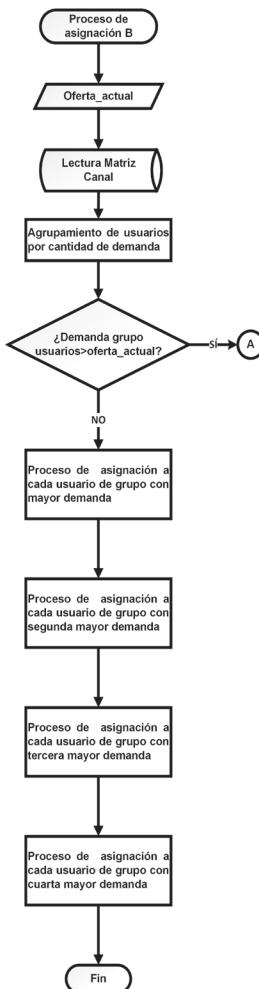


En caso de que ocurra el evento descrito anteriormente, puede suceder que todos los usuarios terminen con un solo canal, o incluso deban ser retirados del proceso (no asignarles ningún canal). En el caso de tener que retirar SU del proceso se empieza por los que demandan más canales (SU10), dejando de ultimas los que demanda menos canales (SU1), este orden de castigo se fijó para beneficiar a los usuarios de un canal que tendrían mayor probabilidad de transmitir su información y que representan el porcentaje más significativo en términos de cantidad de SU.

MFA-CRN para oferta de espectro mayor a demanda de SU

El proceso de asignación multicanal, cuando la oferta de los recursos espectrales disponibles es mayor que la demanda de canales por parte de los SU, es más sencillo (figura 3-7).

Figura 3-7. Proceso de asignación con demanda menor a recursos disponibles



Para cumplir con este propósito se tiene en cuenta la oferta actual derivada de la cantidad de canales disponibles encontrados en la matriz de localización multicanal disponible y de acuerdo a eso se realiza una proyección ideal de las demandas de cada uno de los usuarios (figura 3-7). Una vez realizado esto se procede a agrupar los SU, con base en la clase a la que pertenecen (SU10, SU4, SU2, SU1).

Como el algoritmo revisó que la oferta es mayor que la demanda, entonces empieza de manera consecutiva a realizar la asignación de recursos al grupo con la mayor demanda; luego al grupo con la segunda mayor demanda, y así sucesivamente hasta finalizar con el grupo de la menor demanda.

En el caso de que la oferta sea mucho mayor que la demanda, el algoritmo MFA-CRN realiza una sobreasignación de recursos para todos los SU, es decir, les asigna un mayor número de canales que los que demandan originalmente. Lo anterior se realiza una vez se reserven los canales correspondientes a SU/PU futuros, y de acuerdo con el número de canales disponibles y el número de SU demandantes.

La evaluación del algoritmo MFA-CRN tuvo en cuenta cuatro tipos de demanda: DMA, DMB, DMC y DMD, caracterizadas por el número de SU y la clase de aplicación que ejecutan: SU1, SU2, SU4 y SU10. La tabla 3-16 muestra los cuatro tipos de demanda, su descripción, la cantidad de SU en cada tipo de demanda, el número de SU que demandan 10, 4, 2 y 1 canales, y la demanda total de canales.

Tabla 3-16. Tipos de demanda

Demanda	Descripción	Cantidad de SU10	Cantidad de SU4	Cantidad de SU2	Cantidad de SU1	Cantidad Total de SU	Demandas totales de canales
A	Sobreasignación fuerte	5	5	10	20	40	110
B	Sobreasignación leve	10	10	15	30	65	200
C	Castigo leve	25	15	25	35	100	395
D	Castigo fuerte	40	15	20	25	100	525

Selección de las métricas de desempeño para el modelo multicanal

El algoritmo de asignación multicanal, planteado en la presente investigación, utiliza una serie de métricas para medir el desempeño de los algoritmos seleccionados y el propuesto, tanto en términos de asignación efectiva de canales a los diferentes usuarios, como en los parámetros de QoS en la transmisión de datos, como *handoffs*, ancho de banda, retardo y tasa efectiva de datos.

Las métricas seleccionadas para realizar la evaluación y validación respectiva de los tres algoritmos son las siguientes:

- *Handoffs*: determina la cantidad de saltos efectivos que tuvo que realizar el algoritmo durante la transmisión del SU en los 10 minutos.
- *Handoffs fallidos*: determina el número de saltos que realizó el algoritmo a frecuencias que ya se encontraban ocupadas por algún usuario, durante la transmisión del SU en los 10 minutos.

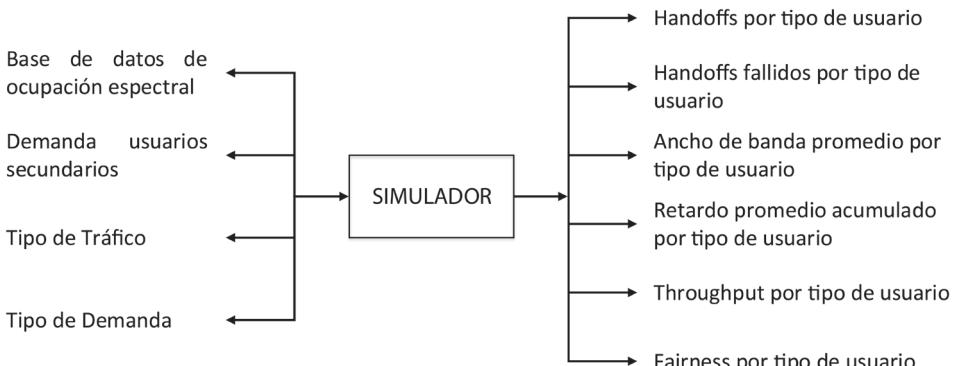
- Ancho de banda: permite medir el ancho de banda efectivamente asignado y utilizado por el usuario.
- Retardo: cantidad de tiempo total utilizada por el SU para transmitir determinada cantidad de información.
- *Throughput*: determina el promedio de la tasa efectiva de datos que los diferentes usuarios utilizaron para trasmisitir la información.
- *Fairness*: establece el nivel de equidad entre los diferentes usuarios en la asignación de canales.

Diseño de la herramienta de simulación

De acuerdo con el tipo de servicio, la trasmisión de información multicanal debe satisfacer determinados niveles de calidad en el servicio; sin embargo, también es necesario evaluar el nivel de equidad (*Fairness*) en la asignación de canales de frecuencia, tanto para usuarios que demandan un solo canal como para aquellos que demandan múltiples canales. Por tanto, es necesario contar con una herramienta de simulación que tengan en cuenta la interacción entre varios SU con diferentes demandas de canales, y al mismo tiempo los canales que han sido ocupados por los PU, los cuales están inherentes en las trazas de ocupación espectral capturadas. Con el objetivo de tener demandas heterogéneas de SU se analizaron cinco tipos de servicios y su correspondiente BW requerido, el cual se transformó en su equivalente en número de canales de frecuencia. En este orden de ideas, se tienen cuatro clases de SU (tabla 3-15) que demandan 10, 4, 2 o 1 canales. Adicionalmente, se tuvo en cuenta dos tipos de escenarios, uno donde la oferta es menor a la demanda y otro donde la oferta es mayor a la demanda, lo cual generó cuatro tipos de demandas.

El simulador desarrollado fue una adaptación de Hernández y Giral (2015), para permitir asignaciones de múltiples canales con criterio de equidad. Dicha adaptación produjo un simulador de gran valor agregado, al permitir la interacción de múltiples SU en lugar de uno solo, cuya estructura básica está representada en la figura 3-8.

Figura 3-8. Diagrama básico del simulador desarrollado



El modelo tiene como datos de entrada, una matriz con datos de ocupación espectral para las bandas de frecuencia GSM, realizando una diferenciación importante en cuanto al nivel de tráfico. Esta diferenciación se refiere al volumen de información y ocupación mostrada en cada uno de los canales, obteniendo datos de HT y LT. Esta diferenciación permite realizar la evaluación del modelo en dos escenarios distintos, con características propias.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el volumen de información de la ocupación espectral del PU se genera por 2 matrices clasificadas en HT y LT. Por esta razón, existe en el simulador una entrada denominada tipo de tráfico, la cual —como su nombre lo indica— permite seleccionar con cuál tipo de tráfico se desea realizar la simulación.

La entrada, denominada tipo de demanda, se refiere a diferentes tipos de demanda por parte de los SU. Tal tipo de demanda se clasifica en 4 escenarios: demanda A (sobreasignación fuerte), demanda B (sobreasignación leve), demanda C (subasignación leve) y demanda D (subasignación fuerte), como se ha explicado anteriormente. Esto para evaluar el desempeño de la asignación de recursos en diferentes ambientes de radio.

De acuerdo con la selección del algoritmo a ser analizado, el simulador genera las salidas que miden el desempeño del algoritmo en 6 diferentes métricas de evaluación:

1. *Handoffs.*
2. *Handoffs fallidos.*
3. Ancho de banda.
4. Retardo.
6. *Throughput.*
7. Índice de *Fairness*.

Cada una de estas métricas son matrices de información sintetizadas en gráficas para un mejor análisis; cada una se discrimina por clase de SU de acuerdo con la demanda de canales preestablecida en el simulador.

Resultados de la investigación

Para evaluar el desempeño del algoritmo MFA-CRN propuesto, se realizó un análisis completo que tuvo en cuenta los siguientes parámetros: 1) dos tipos de tráfico: Tráfico Alto (HT) y Tráfico Bajo (LT); 2) cuatro tipos de demandas: Sobreasignación Fuerte (DMA), Sobreasignación Leve (DMB), Subasignación Leve (DMC) y Subasignación Fuerte (DMD); 3) cinco clases de servicio: voz, web, videoconferencia, *streaming* y multimedia, que identifican a cuatro clases de usuarios: 10 canales (SU10), 4 canales (SU4), 2 canales (SU2), 1 canal (SU1). La tabla 4-1 resume los parámetros de tipo de demanda y clase de usuario, los cuales son idénticos para HT y LT.

Tabla 4-1. Tipo de demandas y clases de usuarios para HT y LT

Demanda	Descripción	Clases de SU	Cantidad de SU	Cantidad Total de SU	Total Demanda	Oferta/ Demanda
DMA	Sobreasignación fuerte	SU10	5	40	110 canales	HT=240% LT=312%
		SU4	5			
		SU2	10			
		SU1	20			
DMB	Sobreasignación leve	SU10 canales	10	65	200 canales	HT = 132% LT = 171%
		SU4	10			
		SU2	15			
		SU1	30			
DMC	Castigo leve	SU10	25	100	395 canales	HT = 67% LT = 87%
		SU4	15			
		SU2	25			
		SU1	35			
DMD	Castigo fuerte	SU10	40	100	525 canales	HT = 50% LT = 65%
		SU4	15			
		SU2	20			
		SU1	25			

De acuerdo con el tipo de tráfico y demanda se tiene un total de 8 escenarios distintos sobre los cuales se realizó la evaluación del algoritmo MFA-CRN. Para cada uno de los 8 escenarios se analizaron las seis métricas de evaluación propuestas: número de *Handoff* Promedio Acumulado (AAH), número de *Handoff* Fallidos Promedio Acumulado (AAFH), Ancho de Banda Promedio (ABW), Retardo Promedio Acumulado (AAD), *Throughput* Promedio Acumulado (AAT) y *Fairness*. Cada una de estas métricas fueron evaluadas en cada clase de usuario, generando un total de 192 gráficas ($8 \times 6 \times 4 = 192$); la tabla 4-2 resume las gráficas (figuras) generadas en la evaluación del algoritmo MFA-CRN.

En cada una de las figuras, descritas en la tabla 4-2, se grafican los tres algoritmos: *Proportional*, Max-Min y MFA-CRN (propuesto), con el objetivo de realizar una evaluación comparativa de su desempeño en cada escenario y para cada clase de servicio. En cada una de las figuras siguientes siempre se conservará el mismo formato y color para identificar cada algoritmo: *Proportional* con una línea negra continua, Max-Min con una línea azul segmentada y MFA-CRN, denotada como propuesto con una línea verde punteada.

Tabla 4-2. Resumen de figuras por tipo de demanda

Tráfico	Demanda	SU10	SU4	SU2	SU1
HT	DMA, DMB, DMC, DMD	AAH	AAH	AAH	AAH
		AAFH	AAFH	AAFH	AAFH
		ABW	ABW	ABW	ABW
		AAD	AAD	AAD	AAD
		AAT	AAT	AAT	AAT
		<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>
LT	DMA, DMB, DMC, DMD	AAH	AAH	AAH	AAH
		AAFH	AAFH	AAFH	AAFH
		ABW	ABW	ABW	ABW
		AAD	AAD	AAD	AAD
		AAT	AAT	AAT	AAT
		<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>	<i>Fairness</i>

Resultados del modelo MFA-CRN

Las figuras 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4 describen el AAH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10 minutos, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT, para cada clase de aplicación: SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente. La tabla 4-3 muestra los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de SU, y la tabla 4-4 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de SU.

Las figuras 4-5, 4-6, 4-7 y 4-8 describen el AAFH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10 minutos, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT, para cada clase de aplicación: SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente. La tabla 4-5 muestra

los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de SU, y la tabla 4-6 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de SU.

Las figuras 4-9, 4-10, 4-11 y 4-12 describen el ABW que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10 minutos, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT, para cada clase de aplicación: SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente. La tabla 4-7 muestra los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de SU, y la tabla 4-8 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de SU.

Las figuras 4-13, 4-14, 4-15 y 4-16 describen el AAD que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10000 kB, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT, para cada clase de aplicación: SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente. La tabla 4-9 muestra los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de SU, y la tabla 4-10 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de SU.

Las figuras 4-17, 4-18, 4-19 y 4-20 describen el AAT que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10 minutos, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT, para cada clase de aplicación: SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente. La tabla 4-11 muestra los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de SU, y la tabla 4-12 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de SU.

La figura 4-21 describe el nivel de *Fairness* que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10 minutos, en una red GSM, con cuatro diferentes tipos de demanda (DMA, DMB, DMC, DMD), en HT y LT. La tabla 4-13 muestra los valores absolutos de cada algoritmo, por tipo de escenario, y la tabla 4-14 muestra los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos, por tipo de escenario.

Handoff promedio acumulado

Figura 4-1. AAH para SU1

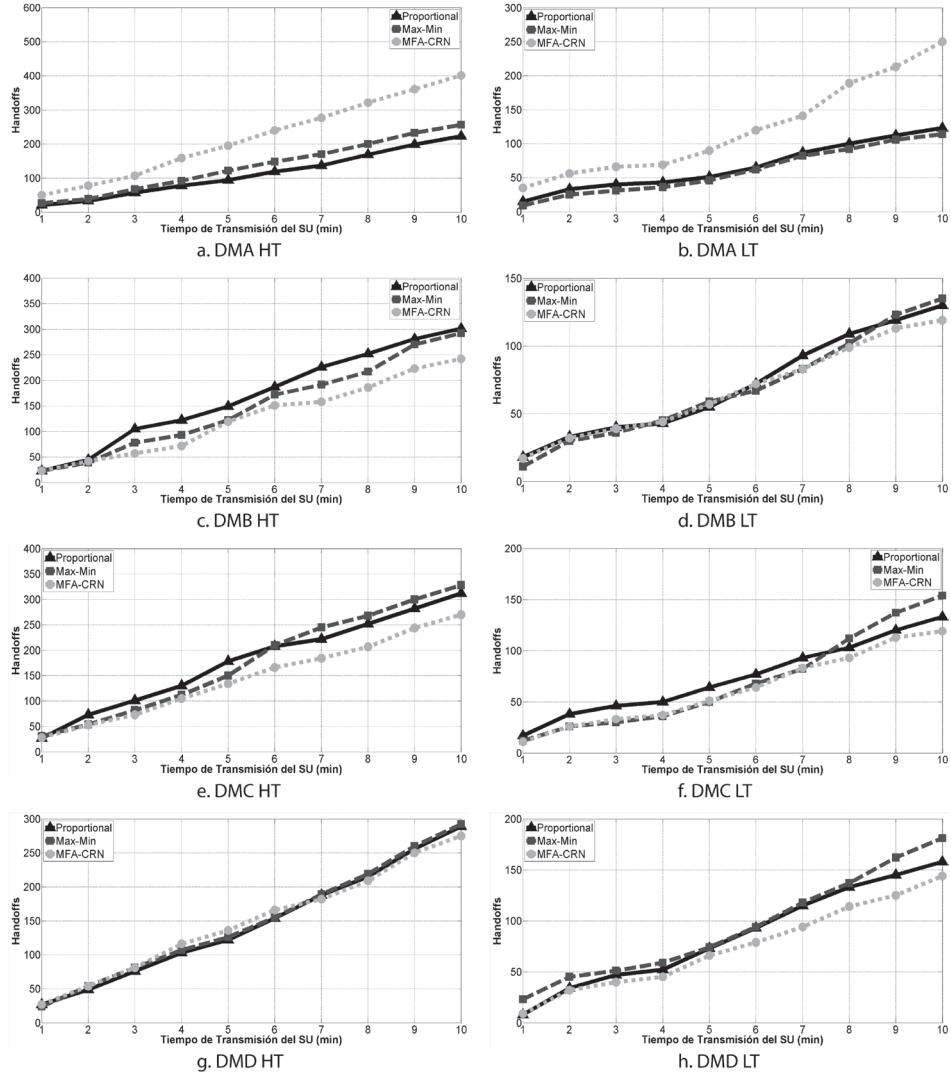


Figura 4-2. AAH para SU2

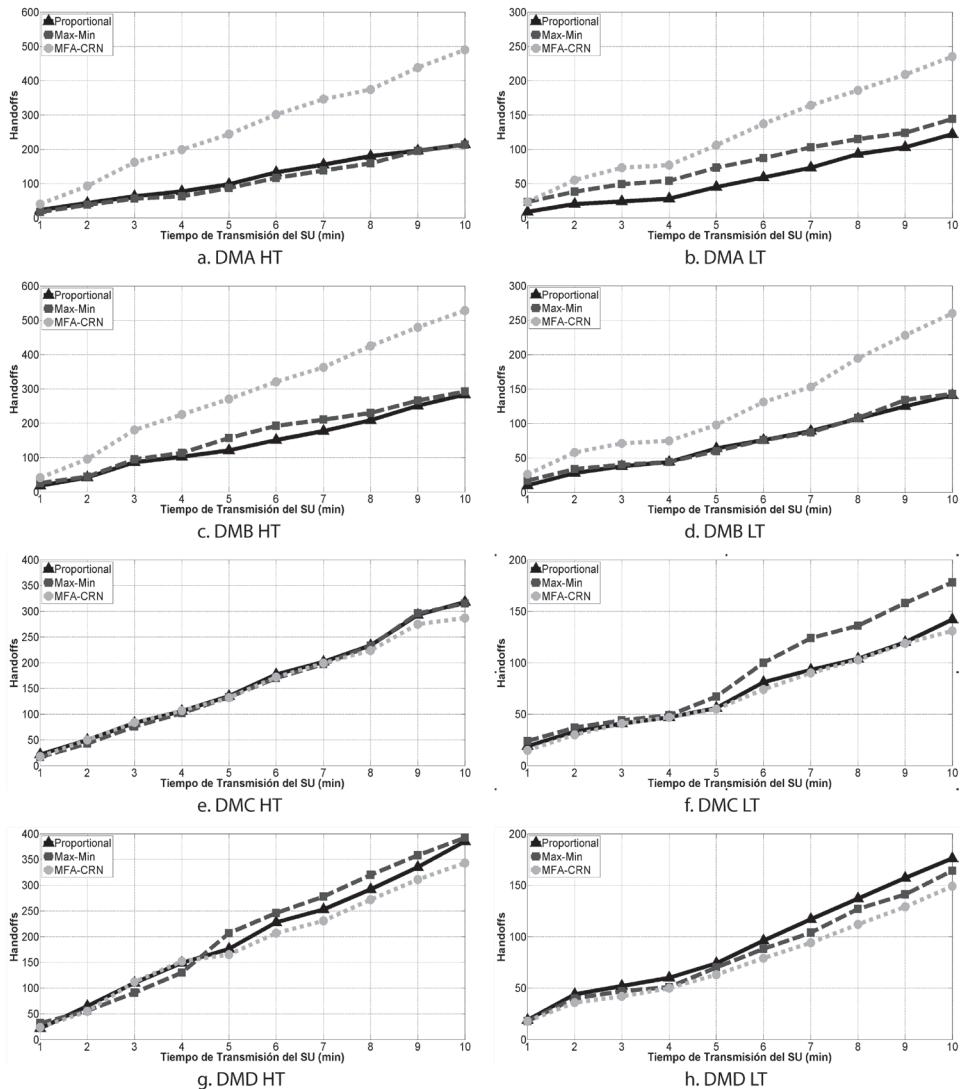


Figura 4-3. AAH para SU4

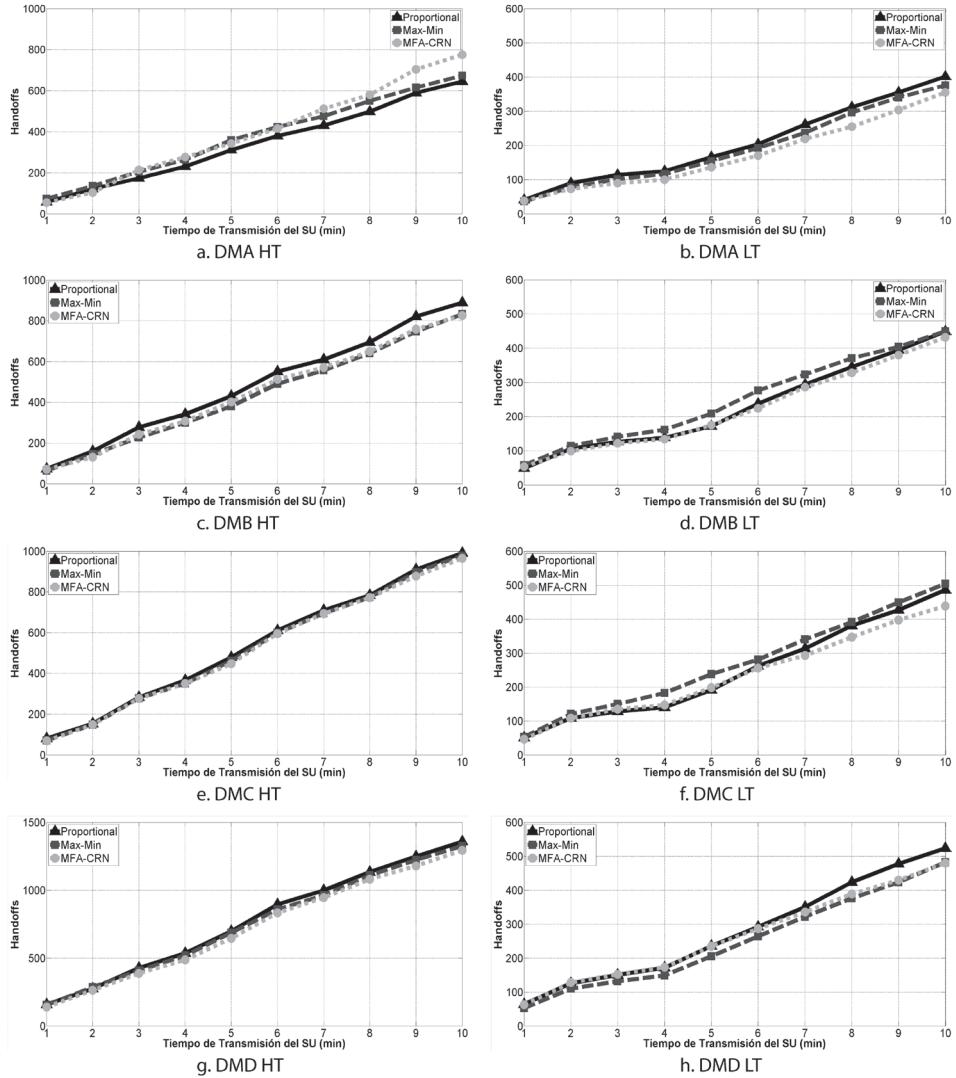


Figura 4-4. AAH para SU10

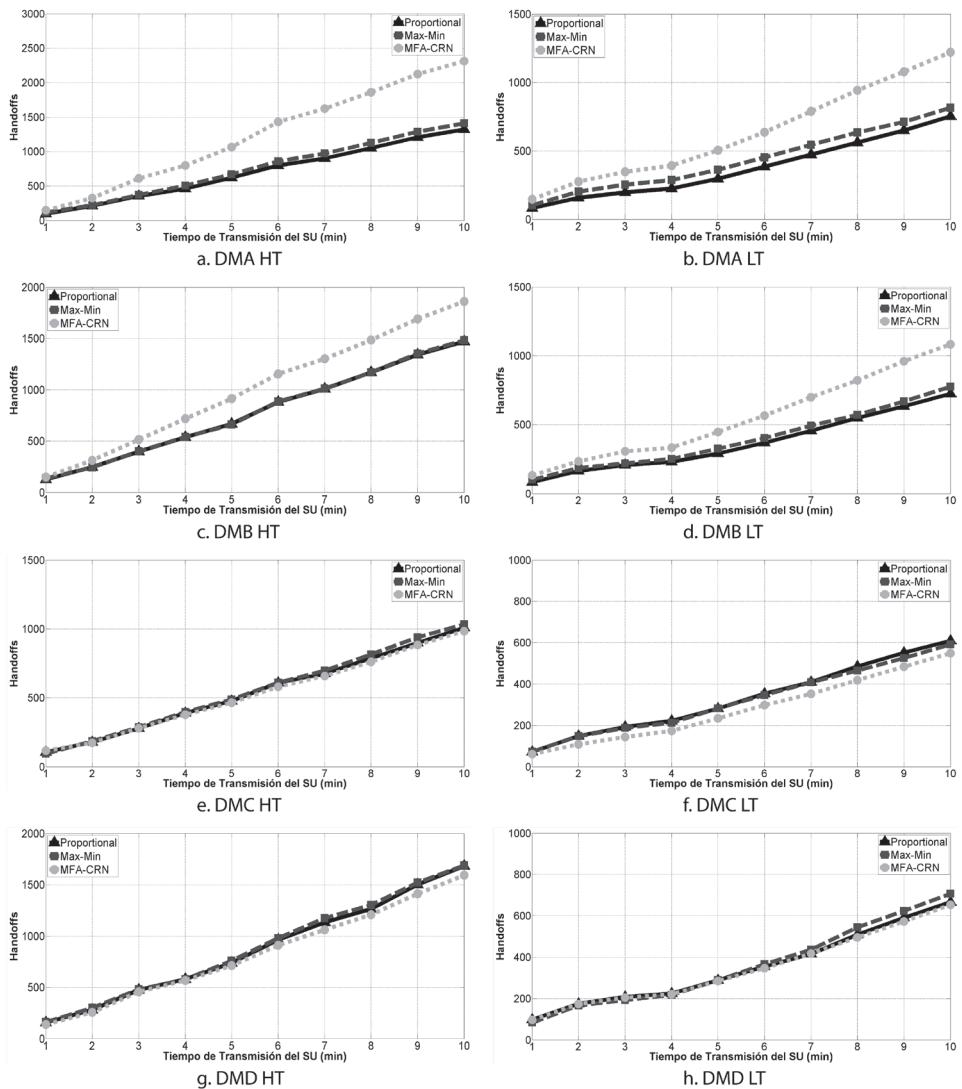


Tabla 4-3. Valores absolutos de AAH para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.
DMA LT	250	114	123	235	144	122	355	376	401	1220	815	752
DMA HT	401	256	223	490	213	214	776	673	645	2312	1409	1320
DMB LT	119	135	130	260	143	141	432	450	449	1083	776	724
DMB HT	242	292	301	528	292	283	827	833	889	1861	1483	1471
DMC LT	119	154	133	131	178	142	439	504	486	549	592	610
DMC HT	270	328	312	287	315	318	965	978	991	984	1033	1008
DMD LT	144	181	158	149	164	176	480	482	524	654	707	667
DMD HT	275	292	289	343	392	385	1295	1327	1359	1592	1688	1683

Tabla 4-4. Valores relativos de AAH para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	45,6	100	92,68	51,91	84,72	100	100	94,41	88,53	61,64	92,27	100
DMA HT	55,61	87,11	100	43,47	100	99,53	83,12	95,84	100	57,09	93,68	100
DMB LT	100	88,15	91,54	54,23	98,6	100	100	96	96,21	66,85	93,3	100
DMB HT	100	82,88	80,4	53,6	96,92	100	100	99,28	93,03	79,04	99,19	100
DMC LT	100	77,27	89,47	100	73,6	92,25	100	87,1	90,33	100	92,74	90
DMC HT	100	82,32	86,54	100	91,11	90,25	100	98,67	97,38	100	95,26	97,62
DMD LT	100	79,56	91,14	100	90,85	84,66	100	99,59	91,6	100	92,5	98,05
DMD HT	100	94,18	95,16	100	87,5	89,09	100	97,59	95,29	100	94,31	94,59
Puntaje AAH	87,65	86,43	90,87	75,4	90,41	94,47	97,89	96,06	94,05	83,08	94,16	97,53

Handoff fallido promedio acumulativo

Figura 4-5. AAFH para SU1

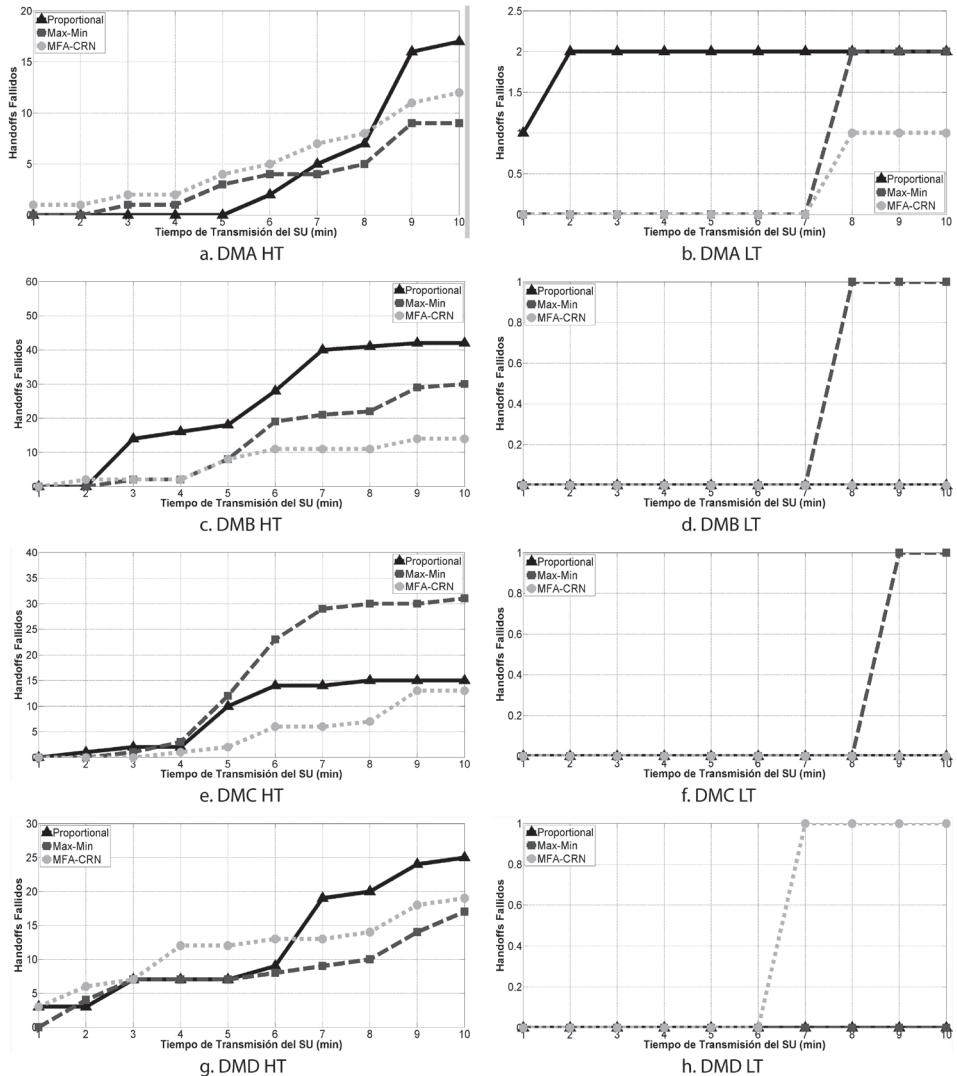


Figura 4-6. AAHF para SU2

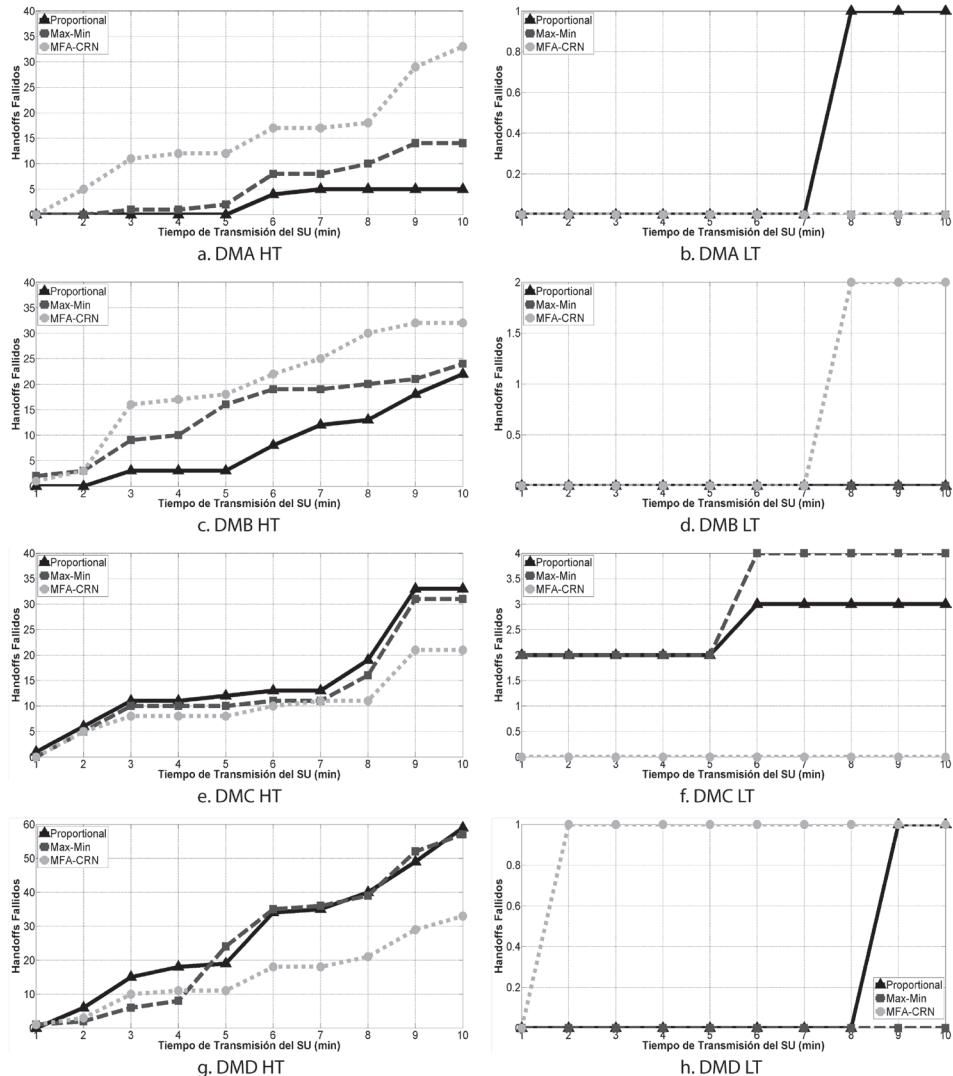


Figura 4-7. AAFH para SU4

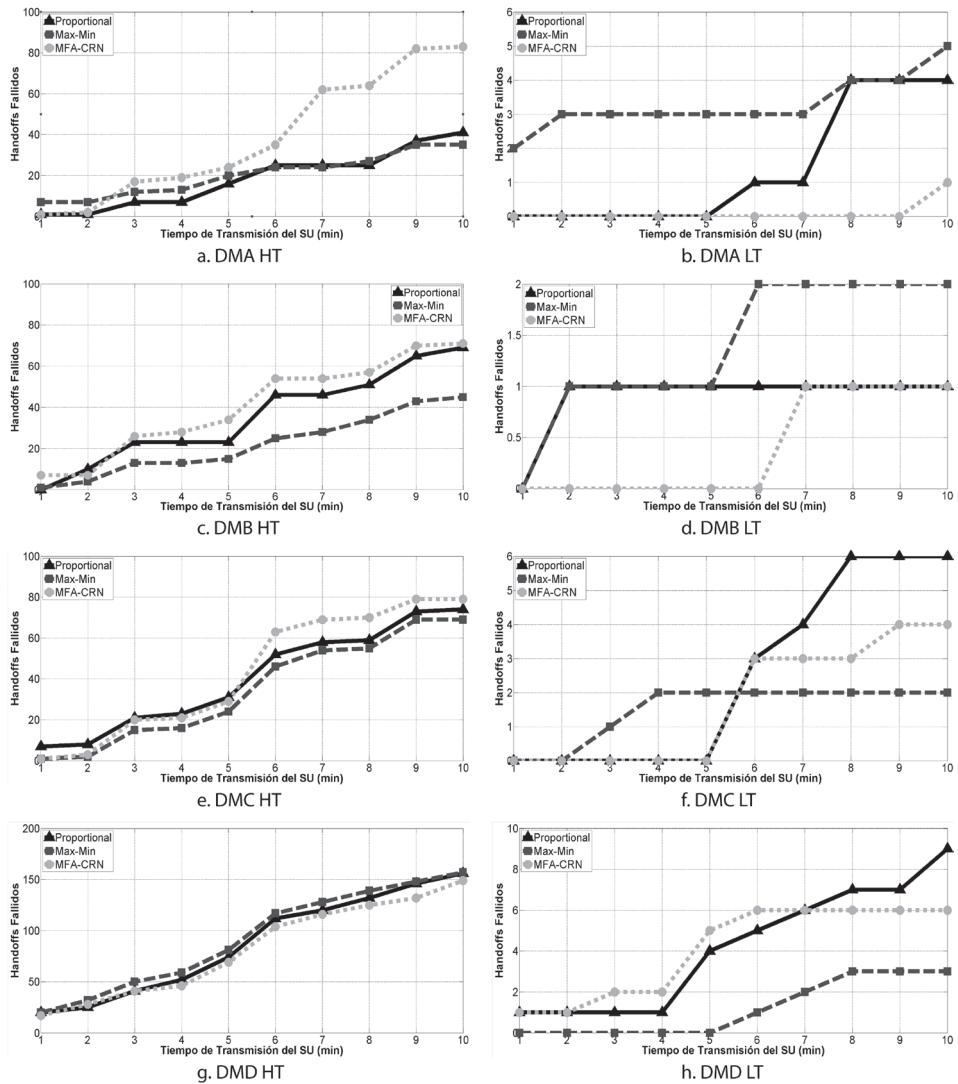


Figura 4-8. AAFH para SU10

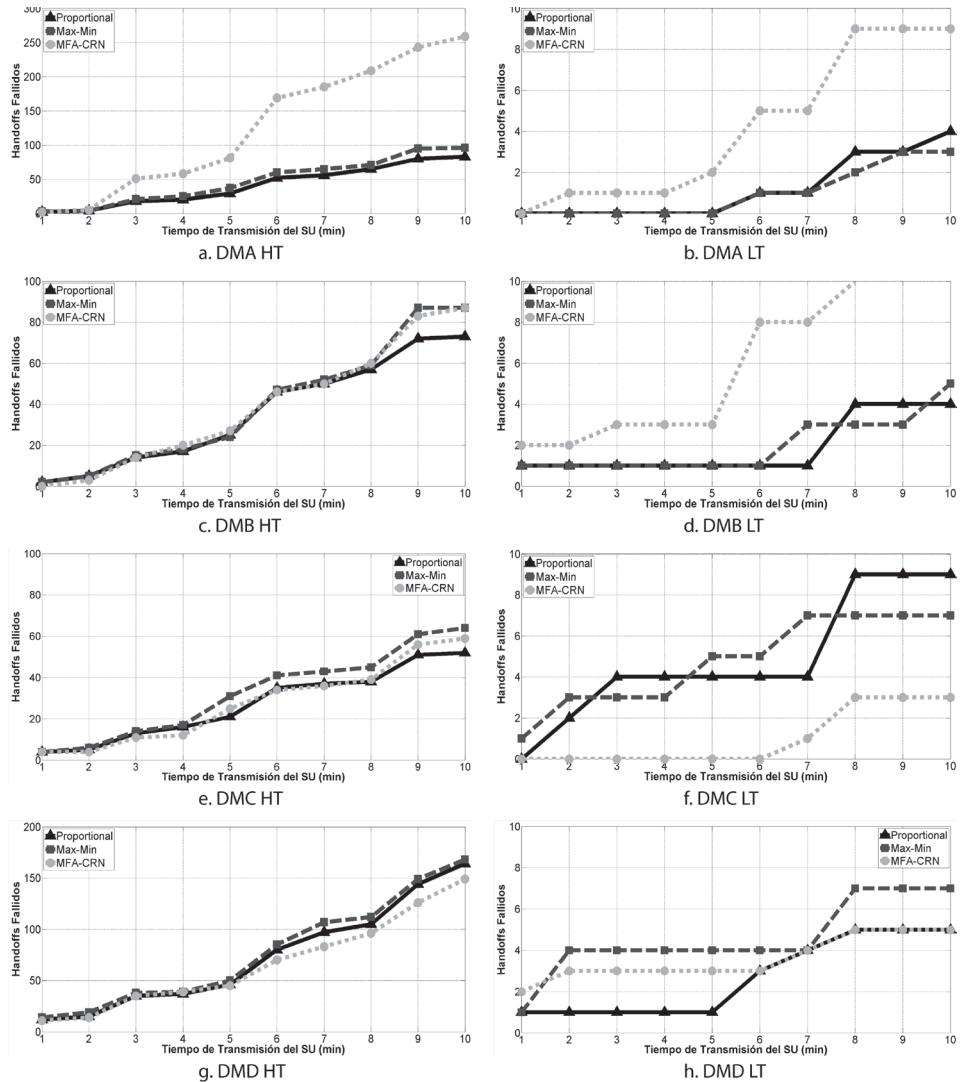


Tabla 4-5. Valores absolutos de AAHF para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.
DMA LT	1	2	2	0,5	0,5	1	1	5	4	9	3	4
DMA HT	12	9	17	33	14	5	83	35	41	259	96	83
DMB LT	0,5	1	0,5	2	0,5	0,5	1	2	1	10	5	4
DMB HT	14	30	42	32	24	22	71	45	69	87	87	73
DMC LT	0,5	1	0,5	0,5	4	3	4	2	6	3	7	9
DMC HT	13	31	15	21	31	33	79	69	74	59	64	52
DMD LT	1	0,5	0,5	1	0,5	1	6	3	9	5	7	5
DMD HT	19	17	25	33	57	59	149	157	156	149	168	164

Tabla 4-6. Valores relativos de AAHF para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	100	50	50	100	100	50	100	20	25	33,33	100	75
DMA HT	75	100	52,94	15,15	35,71	100	42,17	100	85,37	32,05	86,46	100
DMB LT	100	50	100	25	100	100	100	50	100	40	80	100
DMB HT	100	46,67	33,33	68,75	91,67	100	63,38	100	65,22	83,91	83,91	100
DMC LT	100	50	100	100	12,5	16,67	50	100	33,33	100	42,86	33,33
DMC HT	100	41,94	86,67	100	67,74	63,64	87,34	100	93,24	88,14	81,25	100
DMD LT	50	100	100	50	100	50	50	100	33,33	100	71,43	100
DMD HT	89,47	100	68	100	57,89	55,93	100	94,9	95,51	100	88,69	90,85
Puntaje AAHF	89,31	67,33	73,87	69,86	70,69	67,03	74,11	83,11	66,38	72,18	79,33	87,4

Ancho de banda promedio

Figura 4-9. ABW para SU1

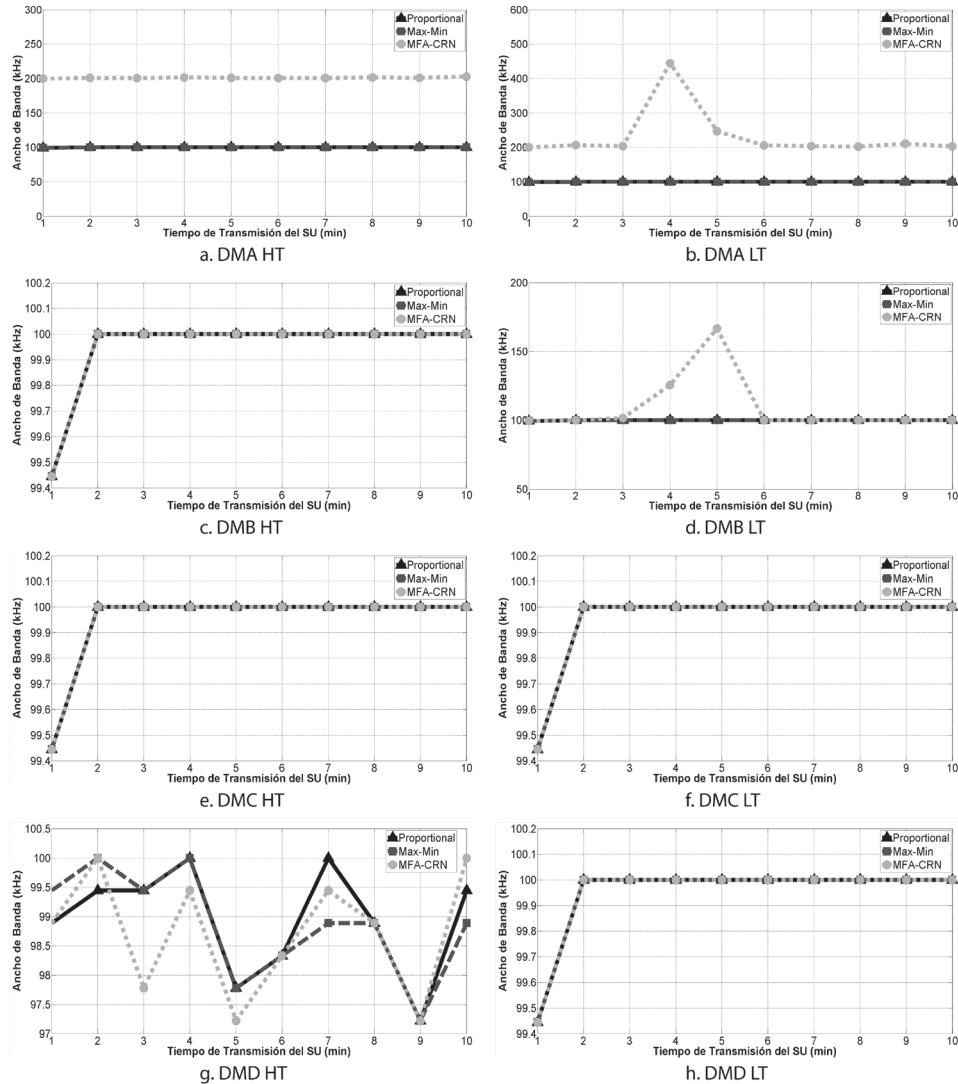


Figura 4-10. ABW para SU2

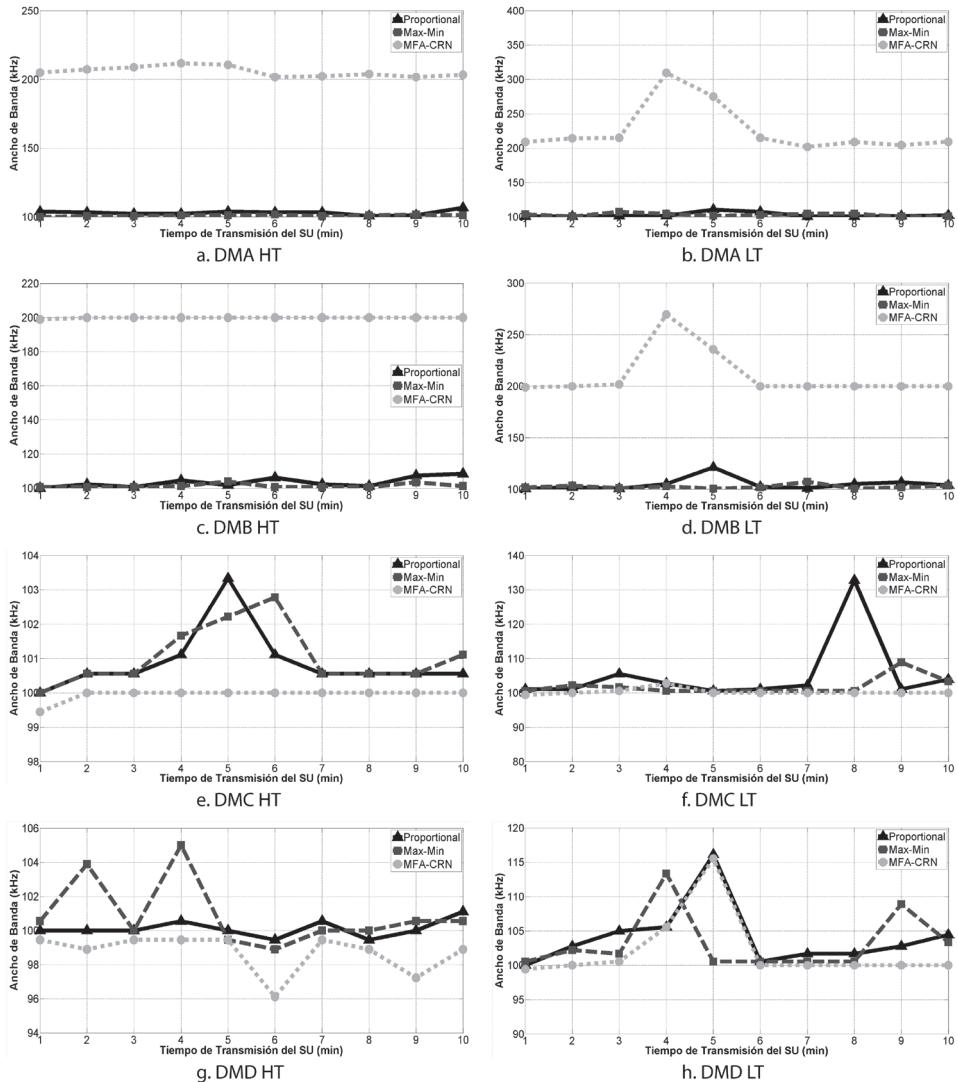


Figura 4-11. ABW para SU4

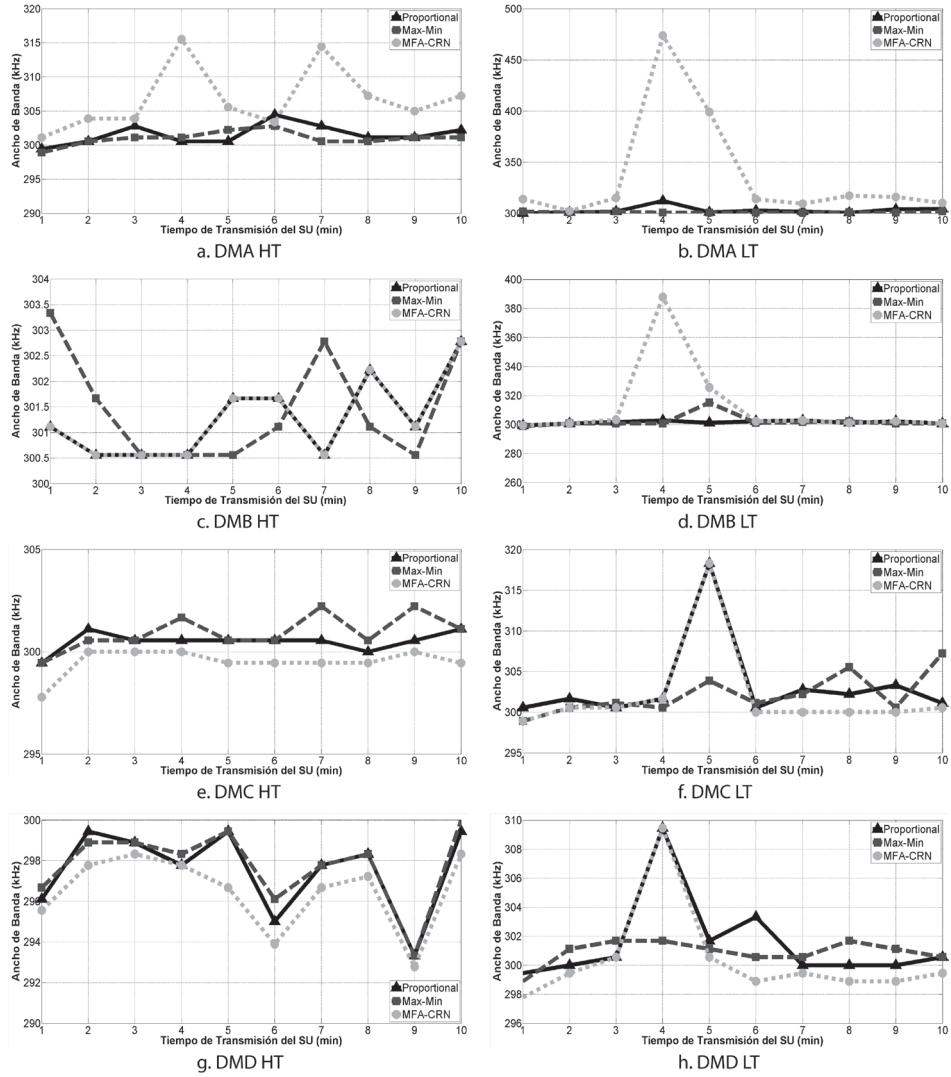


Figura 4-12. ABW para SU10

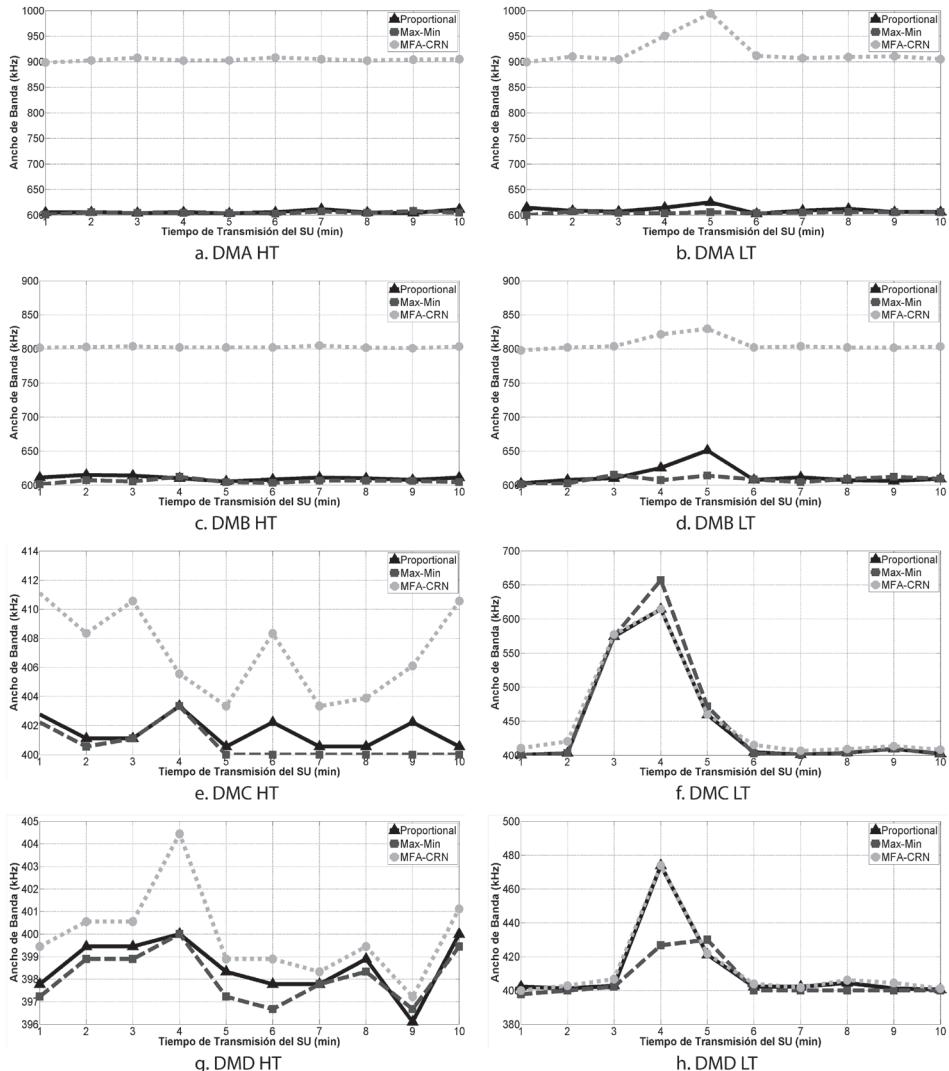


Tabla 4-7. Valores absolutos de ABW para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	232,8	99,9	99,9	226,2	103,1	102,6	337,1	301	302,9	920,2	604,5	610,5
DMA HT	201,1	99,9	99,9	205,6	100,9	103,1	306,7	301	301,6	903,8	604,3	606,1
DMB LT	109,3	99,9	99,9	210,6	102,4	104,8	315,7	302,8	301,8	806,8	608,3	613,9
DMB HT	99,9	99,9	99,9	199,9	101,3	103,4	301,3	301,5	301,3	802,6	605,8	610,4
DMC LT	99,9	99,9	99,9	100,3	101,9	105,2	302,1	302,2	303,3	453,5	452,7	447,3
DMC HT	99,9	99,9	99,9	99,9	101,1	100,9	299,5	300,9	300,5	407,1	400,7	401,5
DMD LT	99,9	99,9	99,9	102,1	103,2	104,1	300,3	300,9	301,5	412,2	405,7	411,2
DMD HT	98,7	98,9	98,9	98,7	100,9	100,1	296,5	297,8	297,6	399,9	398,1	398,6

Tabla 4-8. Valores relativos de ABW para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.
DMA LT	100	42,92	42,92	100	45,56	45,36	100	89,3	89,88	100	65,69	66,34
DMA HT	100	49,69	49,69	100	49,09	50,12	100	98,14	98,32	100	66,86	67,05
DMB LT	100	91,41	91,41	100	48,63	49,76	100	95,91	95,6	100	75,4	76,1
DMB HT	100	100	100	100	50,67	51,72	99,93	100	99,93	100	75,48	76,05
DMC LT	100	100	100	95,31	96,88	100	99,6	99,63	100	100	99,82	98,64
DMC HT	100	100	100	98,89	100	99,83	99,52	100	99,85	100	98,43	98,62
DMD LT	100	100	100	98,13	99,19	100	99,61	99,8	100	100	98,41	99,75
DMD HT	99,78	99,95	100	97,85	100	99,23	99,57	100	99,93	100	99,55	99,67
Puntaje ABW	99,97	85,5	85,5	98,77	73,75	74,5	99,78	97,85	97,94	100	84,96	85,28

Retardo promedio acumulativo

Figura 4-13. AAD para SU1

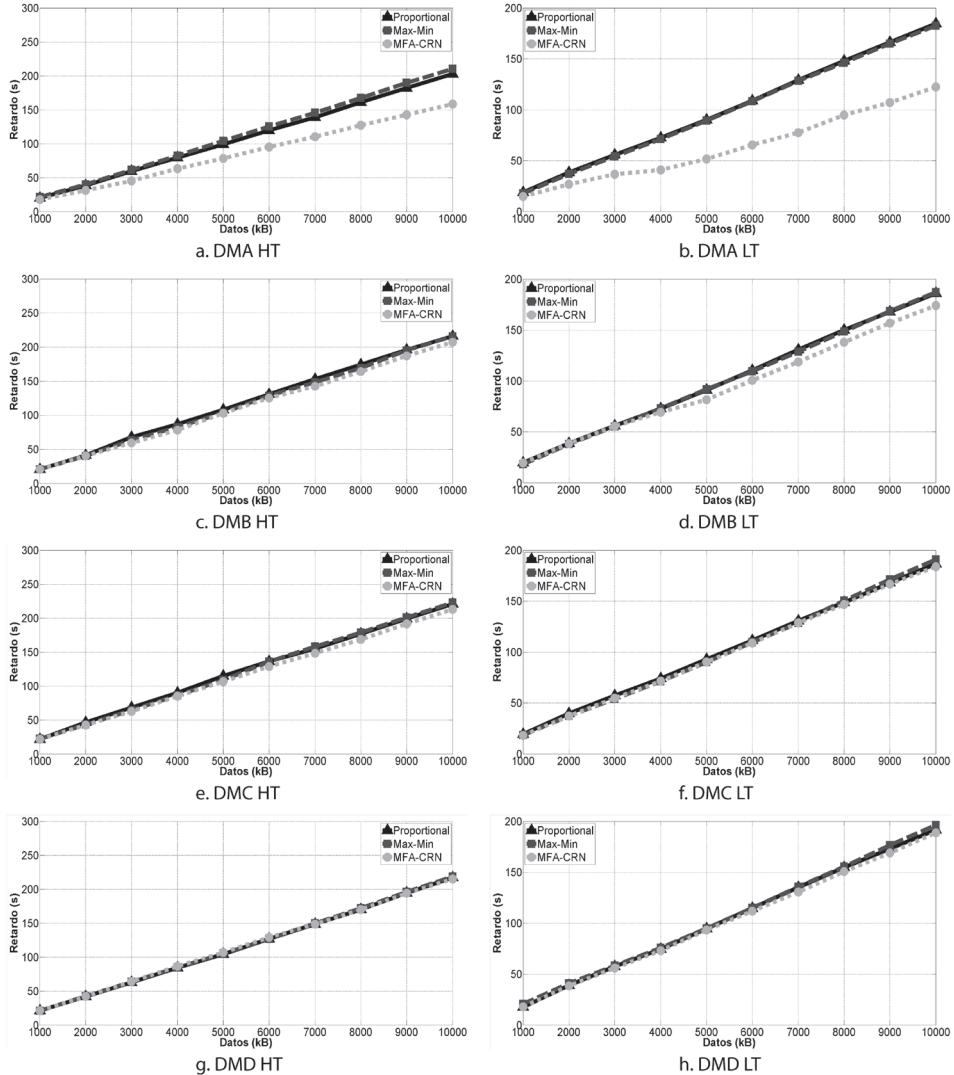


Figura 4-14. AAD para SU2

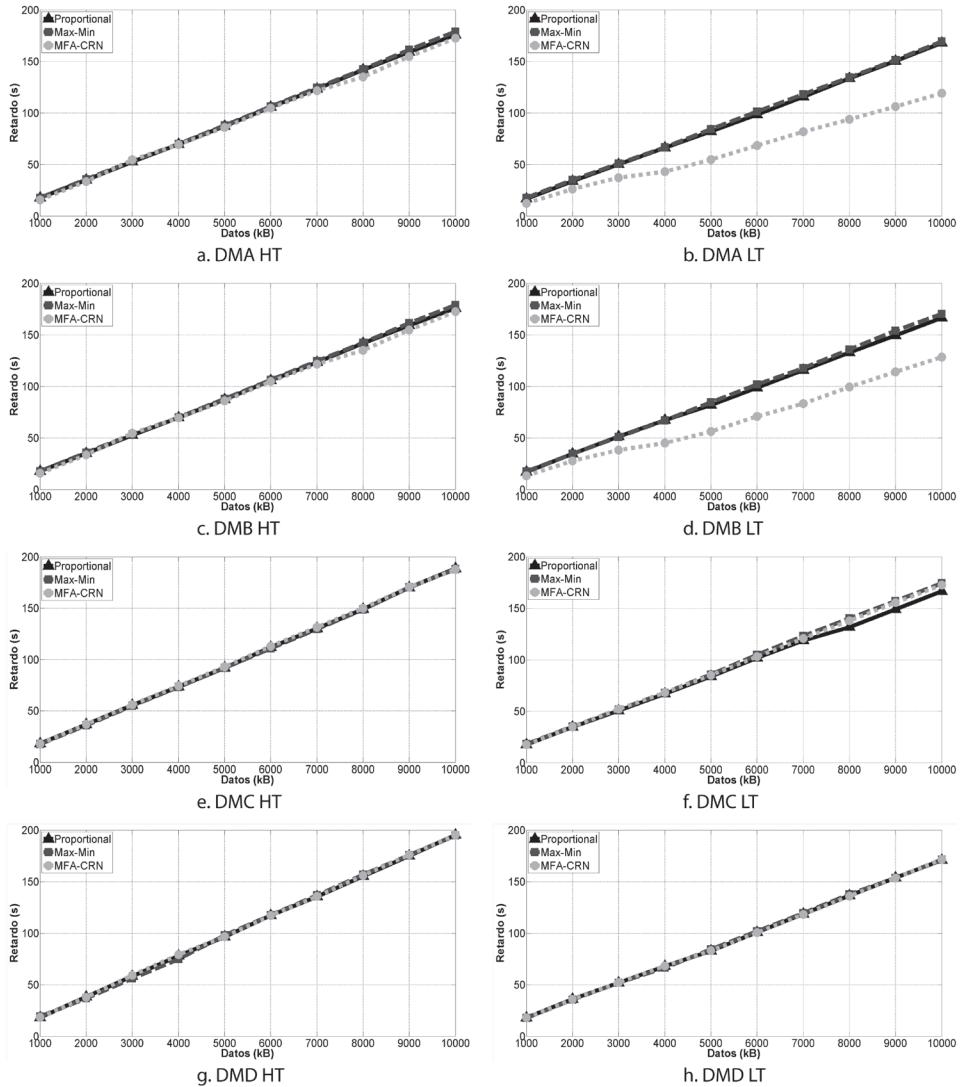


Figura 4-15. AAD para SU4

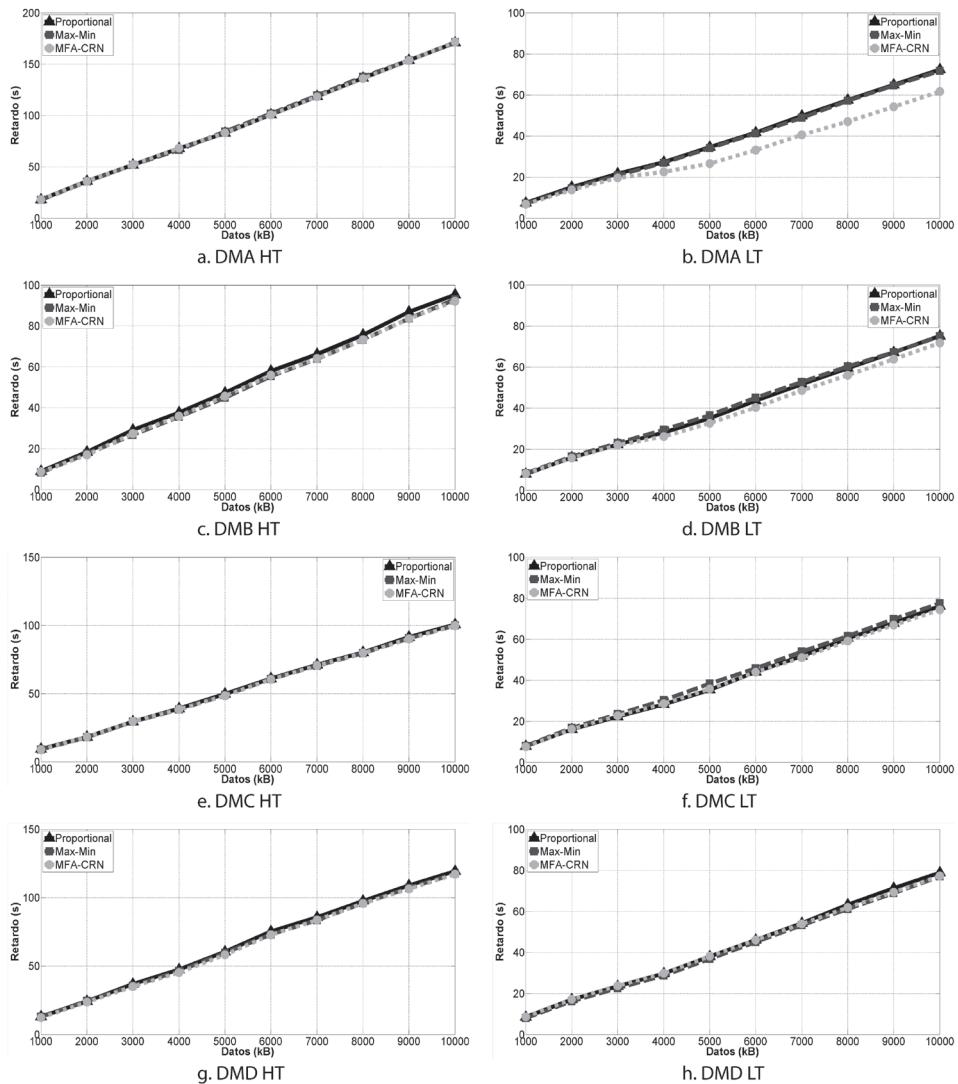


Figura 4-16. AAD para SU10

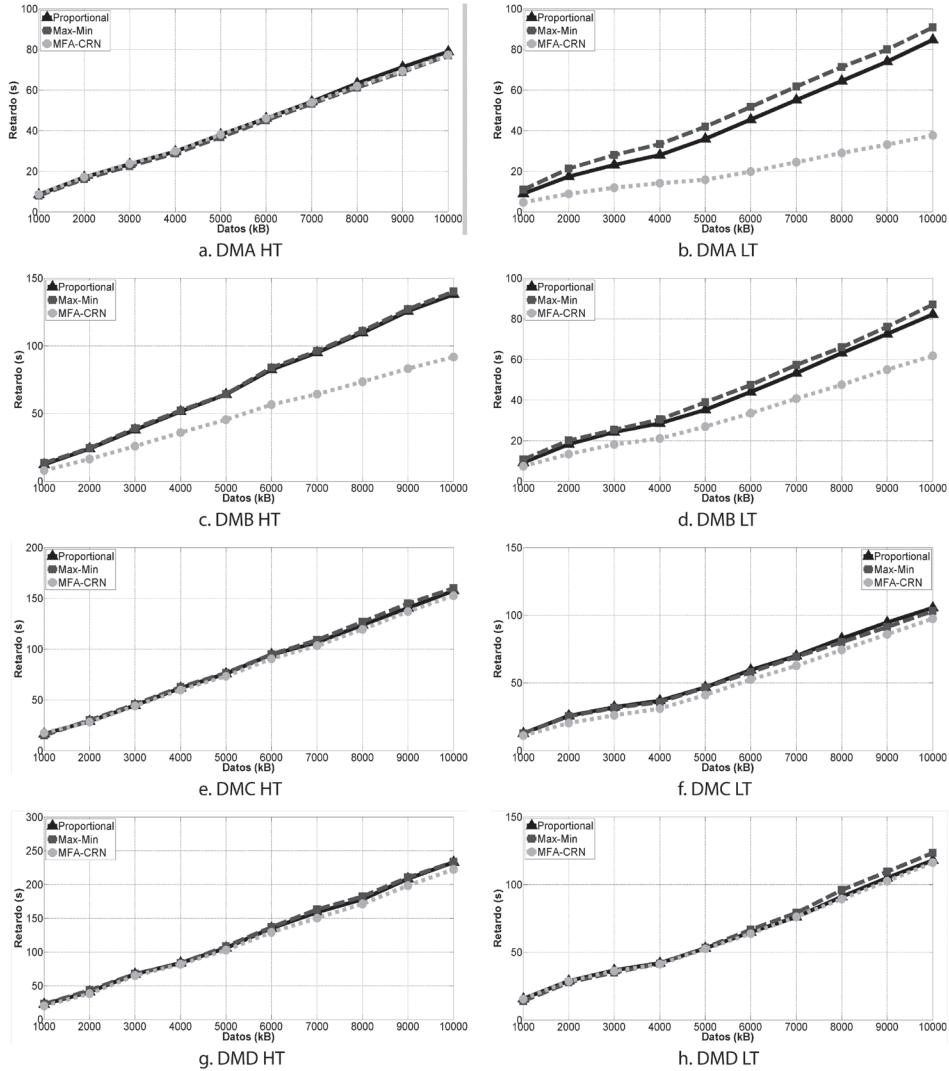


Tabla 4-9. Valores absolutos de AAD para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	122,6	182,7	184,5	119,1	169,3	167,9	61,6	71,6	72,3	35,6	90,8	84,7
DMA HT	158,6	210,4	203,0	172,5	178,9	175,8	86,4	85,6	83,8	59,5	134,2	127,2
DMB LT	174,0	187,0	186,1	128,5	170,3	166,4	71,7	74,9	75,2	61,8	87,0	82,1
DMB HT	207,1	215,5	216,1	182,4	185,6	181,1	92,2	93,0	95,3	91,7	139,9	138,0
DMC LT	183,9	190,8	186,7	172,7	174,3	166,5	74,3	77,5	76,1	97,5	103	105,5
DMC HT	212,8	222,6	221,0	187,8	188,0	188,5	99,9	99,9	100,7	152,5	159,9	157,4
DMD LT	188,8	196,3	191,7	171,6	171,3	171,0	77,2	77,0	78,8	116,2	123,4	117,9
DMD HT	215,2	218,5	217,0	195,2	194,7	195,3	117,2	117,5	119,4	222,2	233,3	232,8

Tabla 4-10. Valores relativos de AAD para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.
DMA LT	100	67,08	66,43	100	70,31	70,93	100	86	85,18	100	39,2	42,02
DMA HT	100	75,36	78,11	100	96,44	98,15	96,98	97,92	100	100	44,32	46,76
DMB LT	100	93,04	93,49	100	75,45	77,22	100	95,77	95,41	100	71,05	75,25
DMB HT	100	96,1	95,84	99,27	97,58	100	100	99,09	96,73	100	65,53	66,43
DMC LT	100	96,38	98,5	96,41	95,52	100	100	95,89	97,69	100	94,64	92,42
DMC HT	100	95,6	96,29	100	99,89	99,61	99,97	100	99,19	100	95,34	96,87
DMD LT	100	96,18	98,49	99,62	99,82	100	99,75	100	97,73	100	94,21	98,61
DMD HT	100	98,48	99,16	99,77	100	99,69	100	99,69	98,11	100	95,23	95,45
Puntaje AAD	100	89,78	90,79	99,38	91,88	93,2	99,59	96,8	96,26	100	74,94	76,73

Throughput promedio acumulativo

Figura 4-17. AAT para SU1

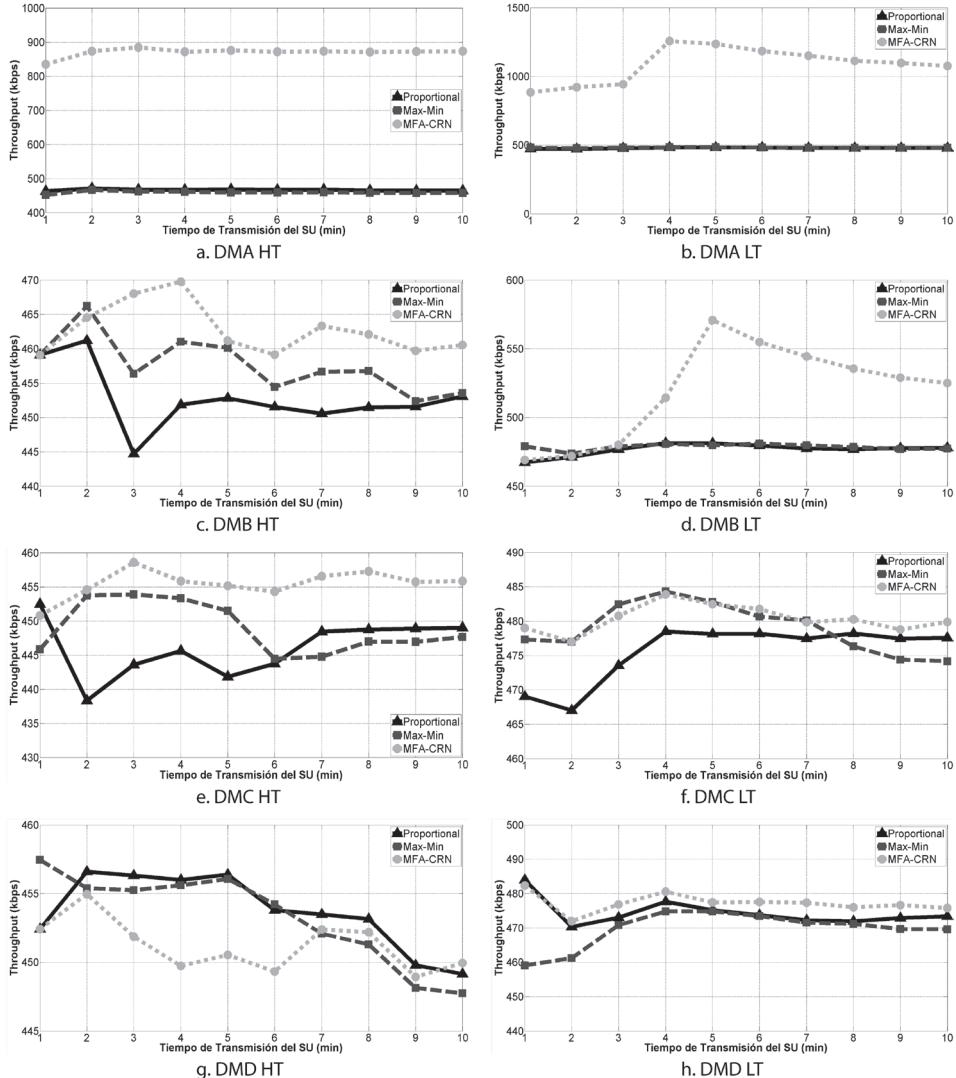


Figura 4-18. AAT para SU2

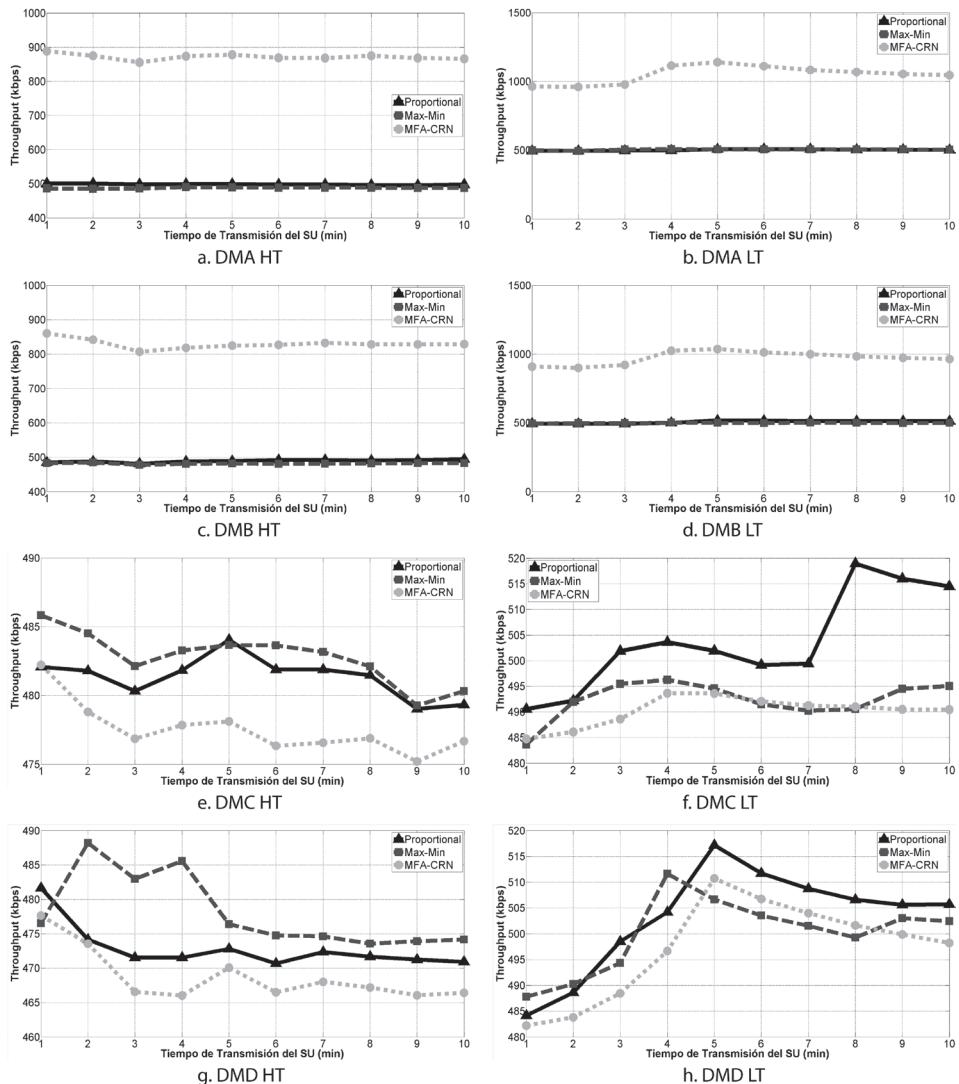


Figura 4-19. AAT para SU4

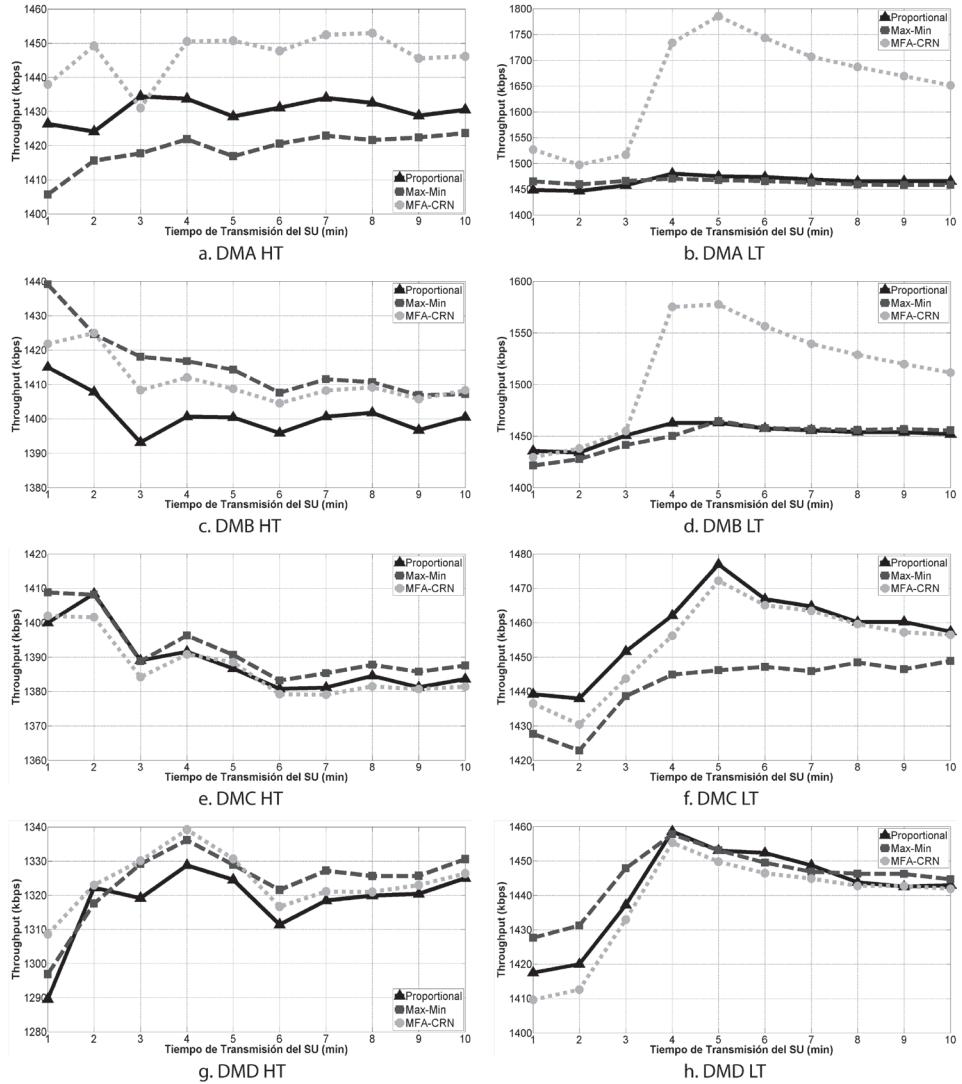


Figura 4-20. AAT para SU10

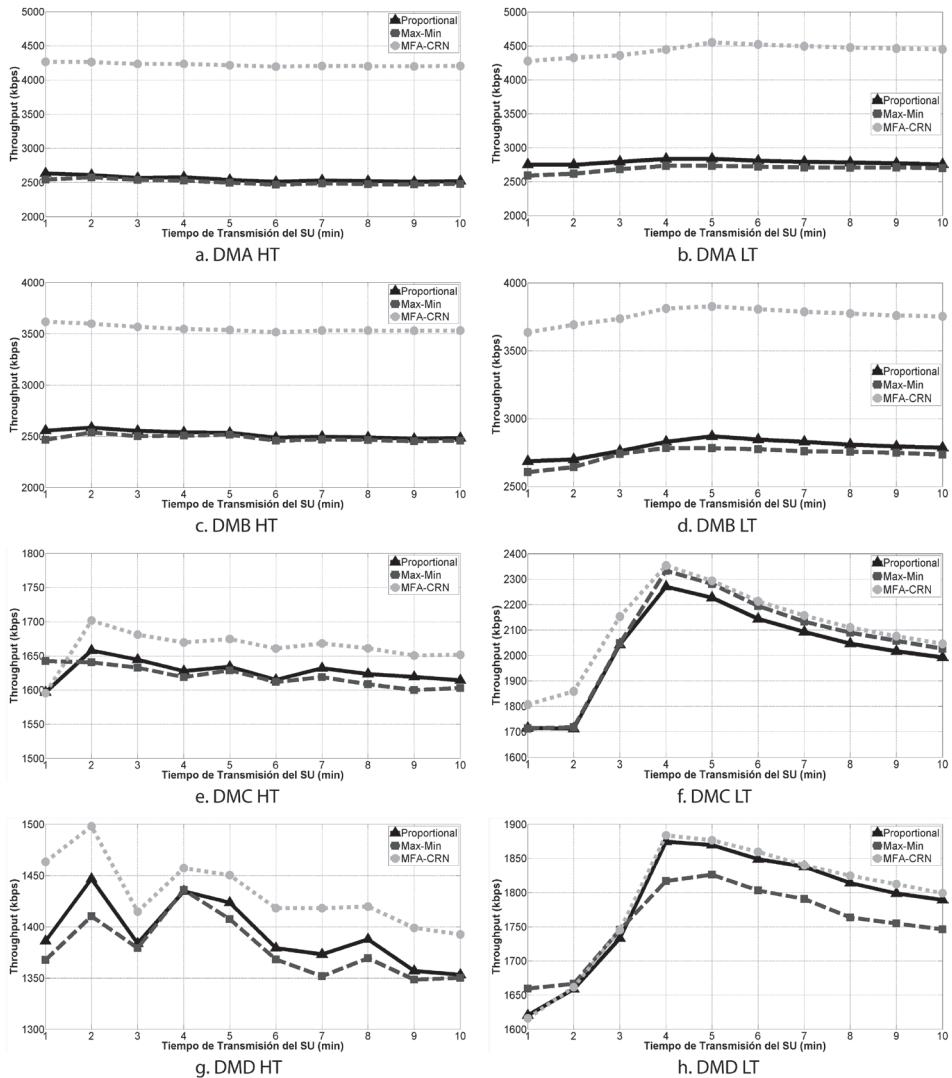


Tabla 4-11. Valores absolutos de AAT para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.	MFA	Max-Min	Prop.
DMA LT	1086,5	481,5	478,6	1052,1	504,2	502,1	1651,8	1463,4	1464,7	4435,7	2688,8	2785,5
DMA HT	870,2	459,3	466,4	871,5	487,6	498,1	1446,4	1418,9	1430,4	4221,8	2505,4	2552,6
DMB LT	519,6	478,6	476,8	972,4	499,4	506,7	1513,1	1448,8	1451,8	3757,4	2731,6	2790,0
DMB HT	462,8	457,7	452,8	829,7	481,9	489,2	1411,2	1415,7	1401,3	3550,9	2482,0	2520,0
DMC LT	480,4	478,9	475,5	490,2	492,4	503,8	1454,1	1441,7	1457,8	2106,6	2059,4	2026,1
DMC HT	455,5	448,9	446,1	477,5	482,8	481,4	1386,9	1392,2	1388,7	1661,5	1620,6	1626,6
DMD LT	477,3	469,6	474,4	497,2	500,1	503,1	1437,9	1445,1	1441,7	1791,9	1757,4	1784,6
DMD HT	451,2	453,3	453,7	468,8	478,1	472,9	1323,9	1323,9	1317,9	1433,2	1378,8	1392,5

Tabla 4-12. Valores relativos de AAT para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	100	44,32	44,05	100	47,92	47,73	100	88,59	88,67	100	60,62	62,8
DMA HT	100	52,79	53,6	100	55,95	57,15	100	98,1	98,89	100	59,35	60,46
DMB LT	100	92,1	91,76	100	51,36	52,11	100	95,75	95,95	100	72,7	74,25
DMB HT	100	98,9	97,85	100	58,08	58,96	100	99,68	100	98,98	100	69,9
DMC LT	100	99,71	98,99	97,3	97,73	100	99,75	98,9	100	100	97,76	96,18
DMC HT	100	98,56	97,94	98,91	100	99,71	99,62	100	99,75	100	97,53	97,9
DMD LT	100	98,4	99,4	98,83	99,39	100	99,5	100	99,76	100	98,07	99,59
DMD HT	99,45	99,91	100	98,06	100	98,91	100	100	99,54	100	96,21	97,16
Puntaje AAT	99,93	85,59	85,45	99,14	76,3	76,82	99,82	97,67	97,69	100	81,52	82,41

Fairness

Figura 4-21. Fairness en cada escenario

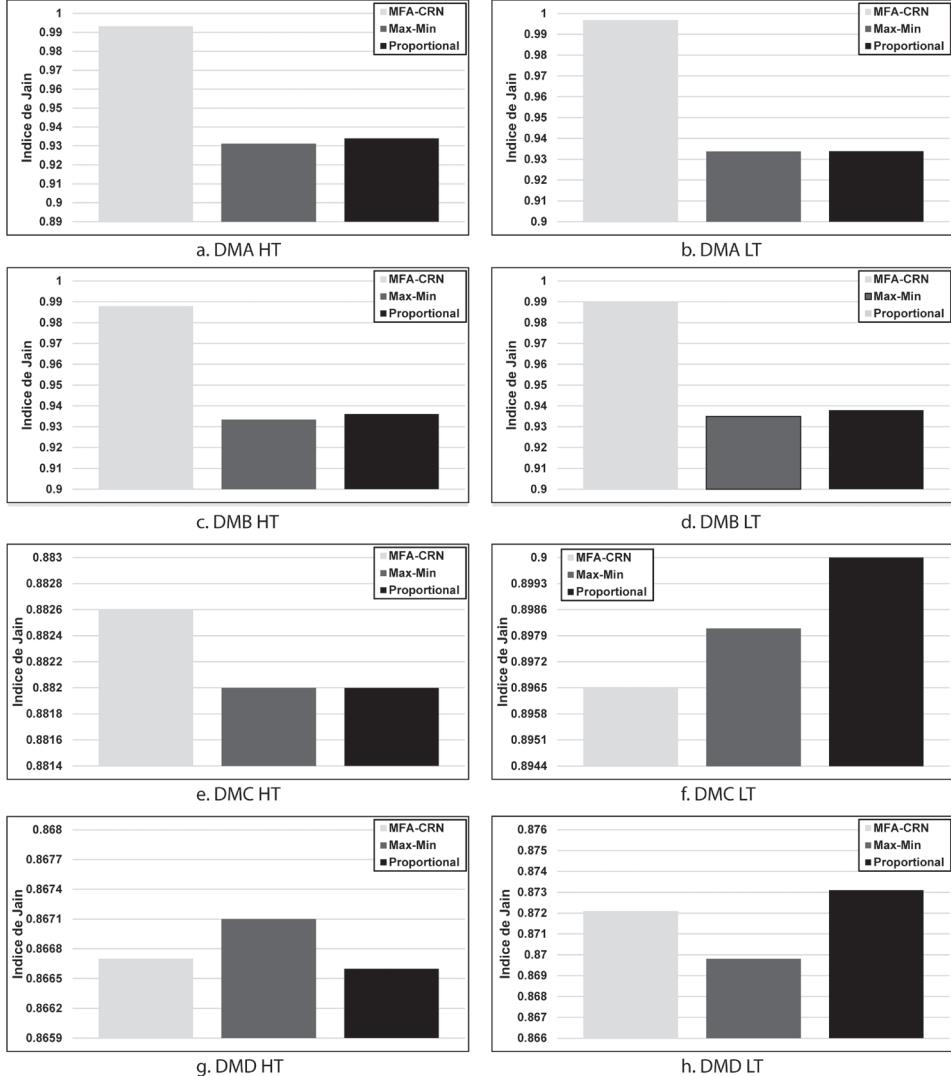


Tabla 4-13. Valores absolutos de *Fairness* para red GSM

Escenario	MFA-CRN	Max-Min	Proportional
DMA en LT	0,9968	0,9337	0,9339
DMA en HT	0,9932	0,9312	0,9339
DMB en LT	0,9902	0,9350	0,9380
DMB en HT	0,9879	0,9334	0,9361
DMC en LT	0,8965	0,8981	0,9003
DMC en HT	0,8826	0,8820	0,8820
DMD en LT	0,8721	0,8698	0,8731
DMD en HT	0,8667	0,8671	0,8666

Tabla 4-14. Valores relativos de *Fairness* para red GSM

Escenario	MFA-CRN	Max-Min	Proportional
DMA en LT	100	93,67	93,69
DMA en HT	100	93,76	94,03
DMB en LT	100	94,43	94,73
DMB en HT	100	94,48	94,76
DMC en LT	99,58	99,76	100
DMC en HT	100	99,93	99,93
DMD en LT	99,89	99,62	100
DMD en HT	99,95	100	99,94
Puntaje Fairness	99,93	96,96	97,14

Evaluación comparativa

De la tabla 4-15 a la tabla 4-18 se presentan los porcentajes comparativos del desempeño de cada algoritmo por EM, por tipo de escenario, por tipo de SU y por *Fairness*.

Tabla 4-15. Evaluación comparativa global por EM para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
AAH	96,46	95,11	100	79,81	95,7	100	100	98,13	96,08	85,18	96,54	100
AAFH	100	75,39	82,71	98,83	100	94,82	89,17	100	79,87	82,59	90,77	100
ABW	100	85,53	85,53	100	74,67	75,43	100	98,07	98,16	100	84,96	85,28
AAD	100	89,78	90,79	100	92,45	93,78	100	97,2	96,66	100	74,94	76,73
AAT	100	85,65	85,51	100	76,96	77,49	100	97,85	97,87	100	81,52	82,41
Puntaje Global	99,2	88,52	90,03	95,43	85,05	86,55	99,73	97,86	96,79	96,23	84,35	86,11

Tabla 4-16. Evaluación comparativa global por escenario para red GSM por clase de SU

Escenario	SU1			SU2			SU4			SU10		
	MFA	Max-Min	Prop.									
DMA LT	87,76	62,33	60,45	89,18	62,51	64,76	100	87,71	86,48	89,7	64,64	67,17
DMA HT	89,39	66,56	69,17	85,16	73,76	76,25	94	97,6	98,94	88,65	65,87	68,57
DMB LT	100	90,22	92,26	87,83	68,55	69,77	100	94,71	95,89	91,04	77,78	81,4
DMB HT	100	93,56	92,35	88,6	75,68	77,67	98,99	99,61	96,47	94,88	77,14	78,36
DMC LT	100	92,66	97	97,26	89,41	96,17	98,59	95,7	95,58	100	94,99	92,89
DMC HT	100	93,11	95,2	99,45	97,17	96,68	99,46	99,7	98,94	99,7	96,29	97,81
DMD LT	98,75	94,05	97,48	97,9	97,54	95,3	98,47	99,86	95,82	100	95,27	99,05
DMD HT	99,54	98,28	97,9	98,92	96,13	95,9	99,89	99,25	98,22	100	96,18	96,62
ANS DMA	100	72,76	73,17	100	78,16	80,88	100	95,52	95,58	100	73,18	76,11
ANS DMB	100	91,89	92,31	100	81,75	83,57	100	97,65	96,67	100	83,33	85,93
ANS DMC	100	92,89	96,1	100	94,85	98,04	100	98,66	98,22	100	95,78	95,49
ANS DMD	100	96,99	98,53	100	98,4	97,14	99,62	100	97,45	100	95,73	97,84
ANS LT	100	87,78	89,83	100	85,45	87,59	100	95,19	94,13	100	87,38	89,43
ANS HT	100	90,38	91,18	100	92,1	93,11	99,04	100	99,09	100	87,54	89,07
Total ANS	96,93	86,35	87,73	93,04	82,59	84,06	98,68	96,77	95,79	95,5	83,52	85,23

Tabla 4-17. Evaluación comparativa global por clase de SU para red GSM

Aplicación	MFA-CRN	Max-Min	Proportional
ANS SU1	100	89,08	90,51
ANS SU2	100	88,77	90,35
ANS SU4	100	98,06	97,07
ANS SU10	100	87,46	89,25
Total ANS	100	90,84	91,8

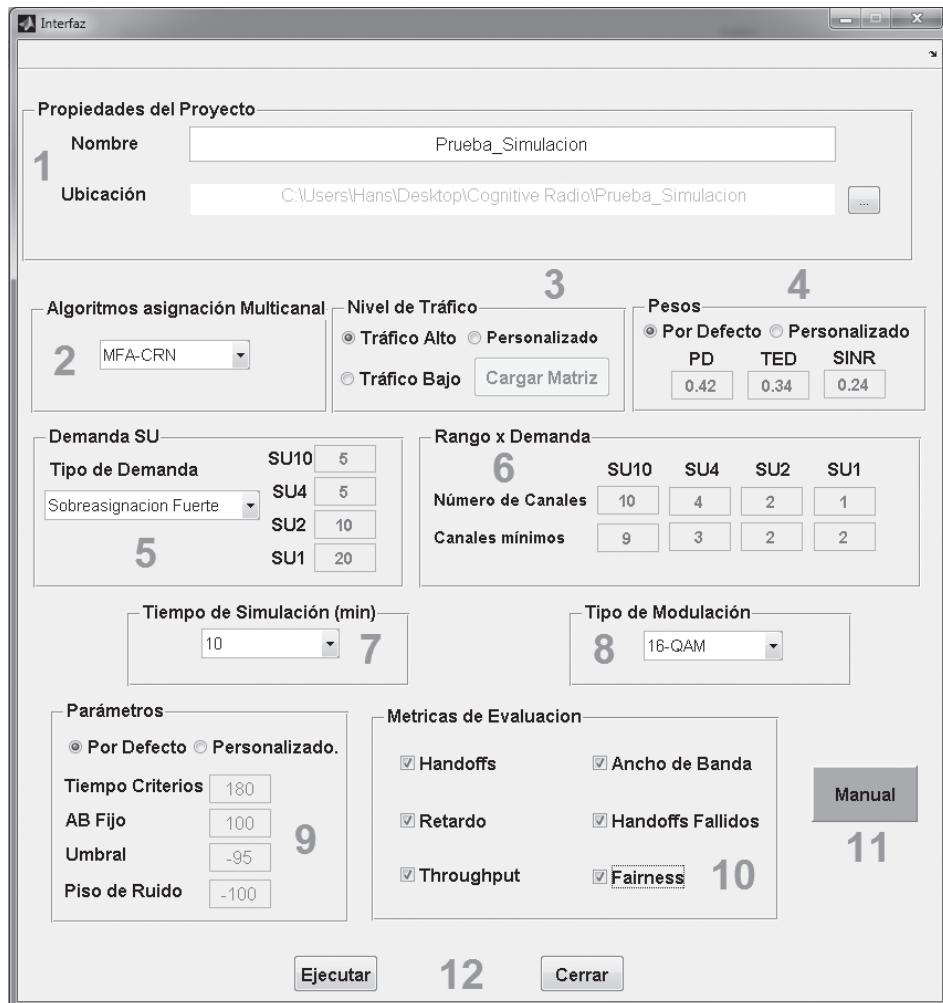
Tabla 4-18. Evaluación comparativa global de *Fairness* para red GSM

Escenario	MFA-CRN	Max-Min	Proportional
ANS DMA	100	93,72	93,86
ANS DMB	100	94,45	94,74
ANS DMC	99,82	99,88	100
ANS DMD	99,94	99,84	100
ANS LT	100	96,84	97,06
ANS HT	100	96,87	97,01
Total ANS	99,9275	96,9563	97,135

Simulador de asignación multicanal en CRN

La figura 4-22 muestra el entorno principal de la herramienta de simulación denominada “asignación multicanal *Fairness* para CRN”. Este software está dividido en 12 secciones: 1) Nombre y ubicación del proyecto, 2) algoritmo de asignación multicanal, 3) nivel de tráfico, 4) pesos de los DC del algoritmo de selección, 5) tipo de demanda, 6) personalización de la demanda, canales requeridos y mínimos por clase de SU, 7) tiempo de simulación, 8) tipo de modulación, 9) parámetros de interés, 10) métricas de evaluación, 11) manual de usuario del simulador, 12) correr la simulación y cerrar el simulador.

Figura 4-22. Entorno principal del simulador de SH “MFA para CRN”



Discusión

Analizando el desempeño del algoritmo híbrido multicanal de SH, MFA-CRN, junto a los más relevantes, seleccionados de la literatura actual, tales como: *Proportional* y Max-Min, se observa lo siguiente. Con respecto a AAH, de la figura 4-1 a la 4-4, la tabla 4-3 y la tabla 4-4, se observa que *Proportional* tiene el mejor desempeño en la clase de servicio SU1, SU2 y SU10, mientras que en SU4 el mejor es MFA-CRN. Con respecto a AAFH, de la figura 4-5 a la figura 4-8, la tabla 4-5 y la tabla 4-6, se observa que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en la clase de servicio SU1; mientras que Max-Min es el mejor en SU2 y SU4, y *Proportional* en SU10. Con respecto a ABW, de la figura 4-9 a la 4-12, la tabla 4-7 y la tabla 4-8, se observa que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en todas las clases de servicio, con un amplio margen. Con respecto a AAD, de la figura 4-13 a la 4-16, la tabla 4-9 y la tabla 4-10, se observa que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en todas las clases de servicio, con un amplio margen. Con respecto a AAT, de la figura 4-17 a la 4-20, la tabla 4-11 y la 4-12, se observa que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en todas las clases de servicio, con un amplio margen. Con respecto a *Fairness*, de la figura 4-21, la tabla 4-13 y la 4-14, se observa que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en los escenarios DMA en LT, DMA en HT, DMB en LT, DMB en HT y DMC en HT, con un significativo margen; mientras que en los escenarios DMC en LT, DMD en LT y DMD en HT, aunque no es el mejor, su margen de diferencia es prácticamente cero.

En la tabla 4-15 a la 4-18, se realiza una comparación global de cada algoritmo de SH en los ocho escenarios planteados en la metodología para multicanal (DMA-LT, DMA-HT, DMB-LT, DMB-HT, DMC-LT, DMC-HT, DMD-LT y DMD-HT) para la red GSM, de aquí se observa que en el puntaje global general el algoritmo MFA-CRN tiene el mejor desempeño, con un margen de 8,2 % con respecto al segundo. Sin embargo, es interesante analizar qué algoritmos son los mejores en cada escenario, al realizar el análisis por tipo de SU y por tipo de tráfico, resulta dominando nuevamente el algoritmo MFA-CRN; pero, haciendo un análisis por tipo de demanda, MFA-CRN tiene el mejor desempeño en DMA y DMB, con un margen de 6,28 % y 5,26 % respectivamente; mientras que *Proportional* es el mejor en DMC y DMD, con un margen de 0,18 % y 0,06 % respectivamente, sobre el algoritmo MFA-CRN. De acuerdo con lo anterior, y añadiendo los resultados comparativos del *Fairness*, se puede concluir que el algoritmo MFA-CRN es el dominante en todos los escenarios diseñados en la GSM.

En razón a que la transmisión multicanal se realiza por varios canales sencillos de forma simultánea, la ocupación por parte del PU de uno o varios de los canales seleccionados, hace que los correspondientes algoritmos reasignen dichos canales. Lo anterior, incrementa significativamente la EM AAH debido a que en un solo TS es posible que se tenga que realizar más de un cambio de canal o SO. Con el objetivo de controlar el aumento de AAH y aprovechar la ventaja de transmitir a través de múltiples SO, se fijaron umbrales de reasignación de SO por debajo del número inicial calculado por el algoritmo. Debido a lo anterior, y a pesar de que los resultados muestran unos valores altos para AAH en los tres algoritmos, si se considera AAH para una única SO este valor resulta ser mayor en proporción al número de SO utilizadas en SU1 (donde se selecciona una SO). Sin embargo, los resultados muestran que el algoritmo MFA-CRN tiene un AAH significativamente mayor en relación con los otros dos algoritmos, lo anterior se debe a que su umbral de reasignación es mayor, a excepción de la clase SU4 donde se dejó el mismo umbral para los tres con el objetivo de realizar un análisis de dicha asignación. De acuerdo con los resultados es posible concluir que cuando el umbral de reasignación de SO es el mismo, el algoritmo MFA-CRN logra obtener la mejor AAH, así como el mejor nivel de AAT; en el caso en el cual se asigna un mayor umbral a MFA-CRN, su AAH se reduce en promedio un 9% pero su AAT se incrementa en promedio un 19%, lo cual resulta ser muy beneficioso para cierto tipo de aplicaciones inalámbricas.

La EM BW resulta ser la de mayor interés en razón a que es la más afectada directamente con la transmisión multicanal. En cada una de las cuatro clases de aplicaciones el algoritmo MFA-CRN obtiene el mejor desempeño; no obstante, en SU4 las diferencias porcentuales no son muy grandes en comparación con *Proportional* y Max-Min, debido nuevamente a que para este caso el umbral de reasignación de SO es el mismo; pero a pesar de esto el hecho de obtener un mejor desempeño comparativo es evidencia de una mejor estrategia en la asignación de SO. Para SU1 y SU10, MFA-CRN logra una diferencia a su favor de 15% y de 25% para SU2, con respecto al desempeño en ABW de *Proportional* y Max-Min. La explicación para esta gran diferencia es la misma, el umbral de reasignación es más alto en MFA-CRN, lo cual le proporciona una excelente ventaja con respecto a los otros dos algoritmos, pero también es una desventaja cuando se analiza la EM AAH. La pregunta que debemos formular es, ¿vale la pena obtener un bajo desempeño en AAH para tener un excelente desempeño en ABW? Para responder dicha pregunta es necesario analizar qué pasa con las EM AAD y AAT, las cuales resultan ser significativamente importantes para la QoS de las aplicaciones móviles tanto de RT como de BE.

El desempeño en las EM ADD es encabezado por el algoritmo de MFA-CRN con una diferencia a su favor con respecto a *Proportional* y Max-Min de 10% en SU1, 7% en SU2, 3% en SU4 y 24% en SU10. Aquí se observa que a pesar de tener una mayor tasa de SH, lo cual implicaría un mayor retardo debido a que un cambio de canal implica un tiempo de desconexión y conexión, el algoritmo MFA-CRN tiene menores tiempos de retardo en todas las clases de aplicaciones. Lo anterior se debe a que el nivel de *throughput* es mucho más alto, en razón a que tiene un mayor número de SO para transmitir la información simultáneamente (como se puede observar de ABW). Ahora, al tener un mayor número de SO durante su transmisión, puede que una (o pocas) SO sea

ocupada por PU reiteradamente generando un aumento significativo en AAH, pero perder solamente una SO puede no generar una reducción significativa en AAT, como en el caso de SU10, donde se seleccionan 10 SO para DMB y hasta 12 para DMA.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el nivel de AAT es más alto en el algoritmo MFA-CRN propuesto, exhibiendo una ventaja porcentual de 15% para SU1, 22% para SU2, 2% para SU4 y 18% para SU10, en comparación con los algoritmos *Proportional* y Max-Min. La baja diferencia porcentual para SU4 se debe nuevamente a que el valor del umbral de reasignación de SO es el mismo para los tres algoritmos.

En conclusión, con respecto a las EM, el algoritmo MFA-CRN exhibe los mejores desempeños en ABW, AAD y AAT, el más bajo en AAH. Lo anterior resulta ideal para obtener excelentes resultados de QoS en aplicaciones de RT y BE.

Si se realiza un análisis, en términos del nivel de tráfico (HT y LT), nuevamente el algoritmo MFA-CRN obtiene los mejores valores de desempeño en cada una de las clases de aplicaciones. En el caso de LT, MFA-CRN es el mejor con ventajas comparativas porcentuales de 11% para SU1, 13% para SU2, 5% para SU4 y 11% para SU10, con respecto a *Proportional* y Max-Min. En el caso de HT, MFA-CRN es el mejor con ventajas comparativas porcentuales de 9% para SU1, 7% para SU2, 0% para SU4 y 15% para SU10, con respecto a *Proportional* y Max-Min. En términos generales MFA-CRN se desempeña mejor en LT que en HT, esto se debe a que en LT hay muchas más SO, lo cual le permite al algoritmo realizar una mejor selección y distribución de SO sobre todo para DMA y DMB.

Si se realiza un análisis, en términos de los diferentes tipos de demandas (DMA, DMB, DMC y DMD), nuevamente el algoritmo MFA-CRN obtiene el primer lugar. Aquí se observa un comportamiento similar al del nivel de tráfico, cuando la cantidad de SU que requieren una o varias SO, es bajo como en el caso de DMA y DMB, el algoritmo se desempeña mejor debido a que puede llegar a tener un mayor número de SO disponibles, en contraste a si el número de SU que requieren una o varias SO es mayor, como es el caso de DMC y DMD. En términos cuantitativos las diferencias comparativas porcentuales a favor de MFA-CRN con respecto a *Proportional* y Max-Min son, para el caso de DMA: 17% para SU1, 20% para SU2, 5% para SU4 y 14% para SU10; para el caso de DMB: 8% para SU1, 17% para SU2, 3% para SU4 y 14% para SU10; para el caso de DMC: 5% para SU1, 3% para SU2, 2% para SU4 y 4% para SU10; para el caso de DMD: 2% para SU1, 2% para SU2, 1% para SU4 y 3% para SU10.

Si se realiza un análisis, en términos de las diferentes clases de aplicación o usuarios (SU1, SU2, SU4 y SU10), se puede observar que las diferencias entre los niveles de desempeño de cada algoritmo son similares, dando el primer lugar al algoritmo MFA-CRN con una ventaja comparativa porcentual del 10% en el caso de SU1 y SU2, 2% en SU4 y 11% en SU10, con respecto a los algoritmos *Proportional* y Max-Min. De aquí se puede observar que el tipo de aplicación no es un factor muy influyente en el desempeño de las transmisiones multicanal para las redes de radio cognitiva, sino que más bien se comportan como requerimientos de QoS en el sentido de que dichas aplicaciones requieren de ciertos niveles en determinados parámetros como BW, retardo y throughput. De acuerdo con lo anterior, es más conveniente ana-

lizar qué tanto se satisficieron los requerimientos de cada aplicación por parte de cada algoritmo. Dado que el nivel de retardo está estrechamente relacionado con el nivel de *throughput* y este a su vez con el nivel de BW, se decidió realizar un análisis considerando el nivel de BW asignado en relación con el solicitado por cada aplicación. La mejor forma de hacerlo es a través del criterio *Fairness*, para lo cual se utilizó el índice de Jain con el objetivo de poder cuantificarlo.

El criterio *Fairness* se analizó de acuerdo con los niveles de tráfico y los tipos de demanda. Con respecto a los niveles de tráfico, tanto para LT como HT se obtuvieron valores muy similares en cada algoritmo concluyendo que el *Fairness* no es dependiente del nivel de tráfico en la red. Los resultados numéricos con respecto a LT y HT dan como ganador a MFA-CRN con una diferencia comparativa porcentual de 3% con respecto a *Proportional* y Max-Min, en ambos casos. Con respecto a los tipos de demandas sí se observan algunas variaciones en los datos numéricos, dando nuevamente como ganador a MFA-CRN con una ventaja comparativa porcentual de 4% en el caso de DMA, 5% en el caso de DMB y 0% en el caso de DMC y DMD. Lo anterior evidencia que a mayor demanda de SO las diferencias en el valor del criterio *Fairness* son prácticamente cero sin importar el algoritmo de asignación multicanal, ya que se hace muy difícil asignar unas pocas SO a muchos SU.

Finalmente, vale la pena mencionar que, aunque los niveles de desempeño de los algoritmos *Proportional* y Max-Min fueron muy similares en cada uno de los escenarios analizados, en la gran mayoría de casos los valores de Max-Min fueron ligeramente superiores (alrededor del 1% comparativamente) a los de *Proportional*.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas para todas las métricas y escenarios de evaluación, el modelo de asignación espectral multicanal MFA-CRN de *handoff* espectral es una técnica comparativamente sencilla, con un costo de procesamiento relativamente bajo que proporciona un eficiente proceso de selección de canales de frecuencia, con un bajo nivel de retardo y un alto nivel de *throughput*. Lo anterior permite mejorar y fortalecer el desempeño de las estrategias de *handoff* espectral en las redes de radio cognitiva.

Las significativas diferencias comparativas porcentuales generadas entre el algoritmo MFA-CRN y los algoritmos *Proportional* y Max-Min, son producto de aumentar el umbral de reasignación de canales de frecuencia y de una estrategia de asignación más inteligente. Lo cual genera ciertas ventajas y desventajas.

Al aumentar el umbral de reasignación de canales de frecuencia en el algoritmo MFA-CRN se evidencia un incremento significativo de la tasa de *handoff* espectral; sin embargo, los retardos generados en los cambios de canal no resultan significativos para el cálculo del retardo promedio acumulativo de las comunicaciones del SU, debido al alto nivel de *throughput* generado por la cantidad de canales seleccionados. En virtud de lo anterior, se concluye que vale la pena aumentar el *throughput* para reducir el retardo a costa de aumentar la tasa de *handoff* espectral.

En términos de las métricas de evaluación el algoritmo MFA-CRN se desempeña con un bajo nivel en AAH, pero en cambio obtiene un gran desempeño y efectividad en las métricas de ancho de banda promedio, retardo promedio acumulado y *throughput* promedio acumulado, que resultan ser más significativas para las aplicaciones de tiempo real y mejor esfuerzo. En términos del nivel de tráfico se evidencia que no existe una fuerte relación entre este y la variación del desempeño de los algoritmos de asignación multicanal. En términos del tipo de demanda, se concluye que a menores demandas de usuarios secundarios existen más opciones de seleccionar las mejores oportunidades espectrales y por ende aumentar el desempeño de los algoritmos de asignación multicanal; por otro lado, a mayores demandas de usuarios secundarios el desempeño de los algoritmos de asignación multicanal son relativamente similares. En términos de la clase de aplicación, el desempeño resulta ser mejor en aquellas en las que se requiere un menor ancho de banda en contraste con aquellas que requieren uno más grande, nuevamente esto se debe a que es mucho más fácil seleccionar unas pocas oportunidades espectrales excelentes a muchas.

Aunque en primera instancia se podría pensar que debido a que el algoritmo MFA-CRN realiza una mayor asignación de ancho de banda en comparación con los algoritmos *Proportional* y Max-Min, los resultados evidencian que MFA-CRN tiene el mejor desempeño en el criterio *Fairness* para todos los escenarios de evaluación configurados en la investigación. La razón por la cual se presentan estos resultados es debido a que el algoritmo MFA-CRN realiza un análisis de las oportunidades espectrales actuales y del comportamiento del usuario primario, con el objetivo de determinar qué porcentaje de oportunidades espectrales puede utilizar. Lo anterior permite concluir que para los escenarios de evaluación diseñados MFA-CRN fue más equitativo en la asignación de recursos, no solo entre usuarios secundarios sino también involucrando al usuario primario.

Contribuciones del proyecto de investigación

- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con datos de ocupación espectral reales capturados en una campaña de medición realizada en la ciudad de Bogotá, D.C., Colombia.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH con MFA desarrollados, en una red GSM.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH con MFA desarrollados, para cuatro clases de aplicación, tres con enfoque de RT: voz, videoconferencia y *streaming*, y una con enfoque de BE: web.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con dos niveles de tráfico de PU: alto y bajo.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, en ocho diferentes escenarios de evaluación: DMA-LT, DMA-HT, DMB-LT, DMB-HT, DMC-LT, DMC-HT, DMD-LT y DMD-HT.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, bajo seis EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT y *Fairness*.
- Determinación de cuatro DC seleccionados cuidadosamente mediante el método *Delphi* modificado, para elegir la mejor SO. Todos los algoritmos desarrollados trabajaron con los mismos cuatro DC. Cada DC es calculado a partir de los datos de ocupación espectral reales.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH híbrido basado en la asignación multicanal que aumenta el BW y el nivel de *throughput* en las comunicaciones del SU, denominado MFA-CRN. El algoritmo MFA-CRN es especialmente útil en las aplicaciones que requieren un mayor BW como la videoconferencia y el *streaming*.
- Inclusión del criterio de *Fairness* en el algoritmo MFA-CRN con el objetivo de hacer un uso eficiente y equitativo de las SO.
- Clasificación más específica de la clase de aplicación que puede ejecutar el SU, tales como: voz, web, videoconferencia y *streaming*, denotadas por SU1, SU2, SU4 y SU10, respectivamente.

- Análisis y evaluación del desempeño cada una de las cuatro clases de aplicación en cuatro diferentes niveles de demanda de SU.
- Desarrollo de dos algoritmos de SH relevantes con MFA, relacionados en la literatura actual, y modificados apropiadamente para evaluar su desempeño en las aplicaciones de RT (SU1, SU4 y SU10) y BE (SU2). Así como su comparación con los algoritmos propuestos.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación para evaluar el desempeño de algoritmos de SH híbridos con asignación multicanal, basada en los datos de ocupación espectral reales, que permite modificar varios parámetros interés para analizar el comportamiento del desempeño de cada algoritmo bajo diferentes situaciones, como por ejemplo el número de SU y su correspondiente demanda, denominado “Asignación Multicanal *Fairness* para CRN”.

Trabajo futuro

La presente investigación se enfocó en desarrollar un algoritmo de asignación multicanal teniendo una entidad central que toma las decisiones de asignación para los diferentes usuarios, con criterio de equidad en la asignación. Sería interesante analizar cómo podría tomarse las decisiones de asignación de canales de manera distribuida y cómo, mediante la cooperación entre nodos, se pudiese manejar un criterio de equidad local y global.

Referencias

- Abramson, N. (1970). The Aloha System. EnInternational Conference on Computer.
- Ahmed, A., Boulahia, L. M. & Gaïti, D. (2014). Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: A state-of-the-art and a classification. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16 (2), 776-811.
- Ahmed, E., Gani, A., Abolfazli, S., Yao, L. J. & Khan, S. U. (2016). Channel Assignment Algorithms in Cognitive Radio Networks: Taxonomy, Open Issues, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (1), 795-823.
- Akin, S. & Fidler, M. (2016). On the Transmission Rate Strategies in Cognitive Radios. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (3), 2335-2350.
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y. & Chowdhury, K. R. (2009). CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 7(5), 810-836.
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C. & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 46 (4), 40-48. DOI <http://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>
- Akyildiz, I. F., Won-Yeol, L., Vuran, M. C. & Mohanty, S. (2006). Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. *Computer Networks*, 50 (13), 2127-2159.
- Anbunami, K. y Nedunchezhian, R. (2010). Soft Computing Applications for Database Technologies: Techniques and Issues. IGI Global.
- Awerbuch, B. & Mishra, A. (2015). Medium Access Control (MAC) Protocols for Ad hoc Wireless Networks - II. Recuperado de http://www.cs.jhu.edu/~cs647/mac_lecture_2.pdf
- Cao, Y., Li, V. & Cao, Z. (2003). Scheduling delay-sensitive and best-effort traffics in wireless networks. *Communications*, 3, 2208-2212.
- Cárdenas-Juarez, M., Díaz-Ibarra, M. A., Pineda-Rico, U., Arce, A. & Stevens-Navarro, E. (2016). On Spectrum Occupancy Measurements at 2. 4 GHz ISM Band for Cognitive Radio Applications. En International Conference on Electronics, Communications and Computers (pp. 25-31).

- Chen, Y., & Hee-Seok, O. (2016). A Survey of Measurement-based Spectrum Occupancy Modeling for Cognitive Radios. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (1), 848-859.
- Chih-Yung, C., Hung, L., Chang, C., Wang, T. y Wang, T. (2013). A Cognitive Radio MAC Protocol for Exploiting Bandwidth Utilization in Wireless Networks. En Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) (pp. 1774-1779).
- Chih-Yung, C., Li-Ling, H., Chao-Tsun, C., Tzu-Lin, W., & Tzu-Chia, W. (2013). A Cognitive Radio MAC protocol for exploiting bandwidth utilization in wireless networks. En Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International (pp. 1774-1779). IEEE.
- Christian, I., Moh, S., Chung, I. & Lee, J. (2012). Spectrum mobility in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 50 (6), 114-121.
- Cohen, K. & Leshem, A. (2013). Distributed throughput maximization for multi-channel ALOHA networks. En Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (pp. 456-459).
- Elliot, R. (2002). A measure of fairness of service for scheduling algorithms in multiuser systems. *Electrical and Computer Engineering*, 3, 1583-1588.
- FCC. (2003). Docket No 03-322 Notice of Proposed Rule Making and Order. Communications. Recuperado de <http://www.fcc.gov>
- FCC (2005). ET Docket No. 03-108. Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, And Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies. Recuperado de <http://www.fcc.gov>
- Federal Communications Commission. (2003). Notice of proposed rulemaking and order. Washington, D.C.
- Fonte, J. P. & Mora, F. E. (2008, jul.). Implementación de protocolos de capar de enlace de datos en los simuladores Omnet++ Y Ns-2. Quito, Ecuador: EPN.
- Forero, F. (2012). Detección de códigos de usuarios primarios para redes de radio cognitiva en un canal de acceso DCMA. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Gast, M. (2005). 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide. booksgooglecom booksgooglecom. Disponible en http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=9rHnRzzMHLIC&oi=fnd&pg=PR3&dq=802.11+Wireless+Networks:+The+Definitive+Guide&ots=3xsOL8XbIs&ig=06lIHUXGYPwzlnC67jDsYVvkK2_gA
- Georgios, E., Antonis, H., Ahmad, K., Neophytos, A. & Mohamed, A. A. (2011). Next-Generation Internet Architectures and Protocols. Next-Generation Internet: Architectures and Protocols.

- Ghorbanzadeh, M., Abdelhadi, A. & Clancy, C. (2015). A Utility ProportionalFairness Radio Resource Block Allocation in Cellular Networks. En 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications, Communication QoS and System Modeling Symposium (pp. 499-504).
- Google (2016, abr.). Youtube: Configuración, tasa de bits y resoluciones del codificador en vivo. Disponible en <https://support.google.com/youtube/answer/2853702?hl=es-419>
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23 (2), 201-220.
- Hernández, C. & Giral, D. (2015). Spectrum Mobility Analytical Tool for Cognitive Wireless Networks. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10 (21), 42265-42274.
- Hernández, C., Pedraza, L. & Rodríguez-Colina, E. (2016). Fuzzy Feedback Algorithm for the Spectral Handoff in Cognitive Radio Networks. Sin publicar.
- Hernández, C., Pedraza, L. F. & Rodríguez-Colina, E. (2016). Fuzzy Feedback Algorithm for the Spectral Handoff in Cognitive Radio Networks. *Revista Facultad de Ingeniería de La Universidad de Antioquia*.
- Hernández, C., Salgado, C., López, H. & Rodríguez-Colina, E. (2015). Multivariable algorithm for dynamic channel selection in cognitive radio networks. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2015 (1), 1-17.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. & Baptista, P. (2006). Metodología de la investigación. McGraw-Hill. Recuperado de http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/020090/020090_Cap1.pdf
- Hoven, N., Tandra, R. & Sahai, A. (2005). Some fundamental limits on cognitive radio. Wireless Foundations EECS. Berkeley: Univ. of California.
- Huang, P., Wang, C. & Xiao, L. (2015). RC-MAC: A receiver-centric MAC protocol for event-driven wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 64 (4), 1149-1161.
- IEEE. Standard Definitions and Concepts for Spectrum Management and Advanced Radio Technologies, Pub. L. No. P1900.1 (2007).
- IEEE COMSOC. (2008). *IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Terminology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management*. IEEE Std 1900.1-2008.
- Jain, K., Chiu, W., & Hawe, W. (1984). *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation and shared computer system*. Recuperado el 20 de abril de 2016, de <http://www.cs.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf>.
- Jiménez, G. (2015). Ventajas y desventajas de las simulaciones. Recuperado el 12 de agosto de 2015, de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060015/Lecciones/Capítulo VI/ventajas.htm>.

- Karmakar, N. C. (2010). *Handbook of Smart Antennas for RFID Systems*. Australia: Wiley.
- Khan, A. R., Bilal, S. M. & Othman, M. (2012). A performance comparison of open source network simulators for wireless networks. En International Conference on Control System, Computing and Engineering (pp. 34-38).
- Köksal, M. (2008). *A survey of network simulators supporting wireless networks*. Middle East Technical University. Ankara, Turquia: Middle East Technical University
- Konishi, Y., Masuyama, H., Kasahara, S. & Takahashi, Y. (2013). Performance analysis of dynamic spectrum handoff scheme with variable bandwidth demand of secondary users for cognitive radio networks. *Wireless Networks*, 19 (5), 607-617.
- Kumar, K., Prakash, A. & Tripathi, R. (2016). Spectrum handoff in cognitive radio networks: A classification and comprehensive survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 61, 161-188.
- Laddomada, M., Mesiti, F., Mondin, M. & Daneshgaran, F. (2010). On the throughput performance of multirate IEEE 802.11 networks with variable-loaded stations: analysis, modeling, and a novel Proportionalfairness criterion. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(5), 1594-1607.
- Le, Y., Ma, L., Cheng, W., Cheng, X. & Chen, B. (2013). A Time Fairness Based MAC Algorithm for Throughput Maximization in 802.11 Networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 99, 1.
- Leiner, B. M., Cerf, V. G., Clark, D. D., Kahn, R. E., Kleinrock, L., Lynch, D. C. & Wolf, S. (2009). A Brief History of the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 39 (5), 22-31. DOI //doi.org/10.1145/1629607.1629613
- Lertsinsrubtavee, A. & Malouch, N. (2016). Hybrid Spectrum Sharing Through Adaptive Spectrum Handoff and Selection. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- Li, X., Song, Q., Wang, J., Tao, H. & Zhang, J. (2013). Improved idle channel utilization in distributed multi-channel cognitive radio systems. IEEE Vehicular Technology Conference.
- Liew, S. & Chang, J. (2008). ProportionalFairness in Multi-Channel Multi-Rate Wireless Networks–Part I: The Case of Deterministic Channels with Application to AP Association Problem in Large-Scale WLAN. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (9), 3446-3456.
- Liu, Y. & Knightly, E. (2003). Opportunistic fair scheduling over multiple wireless channels. In IEEE INFOCOM 2003. EnTwenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428) (Vol. 2, pp. 1106-1115).
- Liu, Y. & Tewfik, A. (2014). Primary Traffic Characterization and Secondary Transmissions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13 (6), 3003-3016.

- López, D. A., García, N. Y. & Herrera, J. F. (2015). Desarrollo de un Modelo Predictivo para la Estimación del Comportamiento de Variables en una Infraestructura de Red. *Información Tecnológica*, 26 (5), 143-154.
- López, D. A., Trujillo, E. R. & Gualdrón, O. E. (2015). Elementos Fundamentales que Componen la Radio Cognitiva y Asignación de Bandas Espectrales. *Información Tecnológica*, 26 (1), 23-40.
- Maldonado, D., Hugine, A., Rondeau, T. W. & Bostian, C. W. (2005). Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation: a discussion and an illustrative example. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005 (pp. 597-600).
- Marinho, J. & Monteiro, E. (2012). Cognitive radio: Survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. *Wireless Networks*, 18 (2), 147-164.
- Microsoft. (2016). Experimento un rendimiento reducido cuando disfruto juegos de Xbox One en Xbox Live. Recuperado el 17 de abril de 2016, de <http://support.xbox.com/es-CO/xbox-one/networking/slow-performance-solution>
- Mishra, A., Banerjee, S. & Arbaugh, W. (2005). Weighted Coloring based Channel Assignment for WLANs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 19-31.
- Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S. & Ganguly, S. (2006). Distributed channel management in uncoordinated wireless environments. International conference on Mobile computing and networking (p. 170).
- Mitola, J. (1999). Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. *Mobile Networks and Applications*, 22102, 3-10.
- Mitola, J. & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6 (4), 13-18.
- Neel, J. O. D. (2006). *Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms*. Blacksburg: Polytechnic Institute and State University
- Netflix (2016). Netflix: Recomendaciones sobre la velocidad de conexión a Internet. Recuperado el 16 de abril de 2016, de <https://help.netflix.com/es/node/306>.
- Nolan, K., & Grosspietsch, J. (2005). Cognitive Radio WG. SDR Forum Technical Conference.
- OMNet++. (2015). User Manual OMNeT++. Recuperado el 19 de agosto de 2015, de <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.htm>
- Ozger, M. & Akan, O. B. (2016). On the utilization of spectrum opportunity in cognitive radio networks. *IEEE Communications Letters*, 20 (1), 157-160.
- Paez, F. J. & Ortiz, J. E. (2010). Simulación de enlaces Wi-Fi y UMTS con J-SIM para estimar el BER y PER. *Vínculos*, 7 (1), 17-24.

- Park, D. & Caire, G. (2008). Hard fairness versus Proportional fairness in wireless communications: The multiple-cell case. IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings (pp. 2036–2040).
- Pedraza, L. F., Forero, F., & Páez, I. (2014). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 10 (19), 127-143.
- Pedraza, L. F., Hernández, C., Galeano, K., Rodríguez-Colina, E. & Páez, I. (2016). *Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá* (1a ed.). Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pedraza, L. F., López, D. & Salcedo, O. (2011). Enrutamiento basado en el algoritmo de Dijkstra para una red de radio cognitiva. *Tecnura*, 15 (30), 93-100.
- Peng, X., Xiao, L., Zhong, X., Li, Y. & Zhou, S. (2013). Modeling and Analysis of An Opportunistic Transmission Scheme Based on Channel Quality Information in Multi-Channel Cognitive Networks. En IEEE, 297-302.
- Pingdom (2016). Pingdom Website Speed Test. Recuperado el 17 de abril de 2016, de <https://tools.pingdom.com/>.
- Qin, L. & Zhao, D. (2015). Channel Time Allocations and Handoff Management for Fair Throughput in Wireless Mesh Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64 (1), 315-326.
- Qin, Y., Zheng, J., Wang, X., Luo, H., Yu, H., Tian, X. & Gan, X. (2013). Opportunistic Scheduling and Channel Allocation in MC-MR Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1-17.
- Rahimian, N., Georghiades, C. N., Shakir, M. Z. & Qaraqe, K. A. (2014). On the probabilistic model for primary and secondary user activity for OFDMA-based cognitive radio systems: Spectrum occupancy and system throughput perspectives. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13 (1), 356-369.
- Rodríguez-Colina, E., Ramírez, P., Carrillo, A. & Ernesto, C. (2011). Multiple attribute dynamic spectrum decision making for cognitive radio networks. International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (pp. 1-5).
- Santi, P. (2005). Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Surveys*, 37 (2), 164-194.
- Sclater, I. (2016). What Are the Bandwidth Specifications for Pandora, Spotify, iTunes Radio, and Beats Music? Recuperado el 15 de abril de 2016, de <http://www.bandwidthplace.com/what-are-the-bandwidth-specifications-for-pandora-spotify-itunes-radio-and-beats-music-article/>.
- Seidel, S., Breinig, R. & Berezdivin, R. (2002). Adaptive Air Interface Waveform for Flexibility and Performance in Commercial Wireless Communications Systems. En World Wireless Research Forum.

- Sgora, A., Vergados, D. & Chatzimisios, P. (2009). IEEE 802.11s wireless Mesh networks: Challenges and Perspectives. En Mobile Lightweight Wireless Systems, 263-271.
- Simon, M. K. & Alouini, M.-S. (2008a). Digital Communications Over Fading Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54 (7), 3369-3370.
- Simon, M. K. & Alouini, M.-S. (2008b). Digital Communications Over Fading Channels (M.K. Simon and M.S. Alouini; 2005) [Book Review]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54 (7), 3369-3370.
- Sklar, B. (2001). *Digital communications: fundamentals and applications*. Los Ángeles Prentice Hall.
- Skype (2016). How much bandwidth does Skype need? Recuperado el 16 de abril de 2016, de <https://support.skype.com/en/faq/FA1417/how-much-bandwidth-does-skype-need>.
- Tan, X., Yin, C. & Ma, L. (2014). Positional Proportional fairness scheduling based on spectrum aggregation in cognitive radio. En 2014 21st International Conference on Telecommunications, ICT 2014 (pp. 176-180).
- Tsiropoulos, G., Dobre, O., Ahmed, M., & Baddour, K. (2016). Radio Resource Allocation Techniques for Efficient Spectrum Access in Cognitive Radio Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (1), 824-847.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2004). User Manual OPNET. Recuperado el 19 de agosto de 2015, de http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OP-NET_Modeler_Manual.pdf.
- Wang, C. W. & Wang, L. C. (2009). Modeling and analysis for proactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks. IEEE International Conference on Communications (pp. 1-6).
- Wang, L.-C., Wang, C.-W. & Chang, C. J. (2012). Modeling and analysis for spectrum handoffs in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11 (9), 1499-1513.
- Wayne, L. & Pan, Y. (2006). Resource allocation in next generation wireless networks. New York: Nova Publishers.
- Wu, D., Hou, Y. T., Zhu, W., Zhang, Y. Q. & Peha, J. M. (2001). Streaming video over the internet: Approaches and directions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 11 (3), 282-300.
- Wu, Y. & Yang, Z. (2010). Multi-channel transmission strategy for dynamic spectrum access. *Journal of Electronics*, 27(3), 345-352. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11767-010-0337-3>
- Xian, X., Shi, W. & Huang, H. (2008). Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1439-1443).

- Xiao, Y. & Hu, F. (2008). Cognitive radio networks. New York: CRC Press.
- Xu, Y., Li, Y., Zhao, Y., Zou, H. & Vasilakos, A. V. (2011). Selective sensing and transmission for multi-channel cognitive radio networks. 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPS 2011 (pp. 47-51).
- Yang, C., Lou, W., Fu, Y., Xie, S. & Yu, R. (2016). On throughput maximization in multichannel cognitive radio networks via generalized access strategy. *IEEE Transactions on Communications*, 64 (4), 1384-1398.
- Yue, W. & Matsumoto, Y. (2002). Output and Delay Process Analysis of Slotted CSMA/CD Multichannel Local Area Networks. Performance Analysis of Multichannel and Multi-Traffic on Wireless Communication Networks (pp. 149-167).
- Yue, X., Wong, C. & Chan, S. (2010). A distributed channel assignment algorithm for uncoordinated WLANs. EnConsumer Communications and Networking Conference (CCNC) (pp. 1-5).
- Zhang, Y. & Liew, S. (2008). Proportional fairness in multi-channel multi-rate wireless networks-part II: the case of time-varying channels with application to OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (9), 3457-3467.

BIOGRAFÍA AUTORES

César Augusto Hernández Suárez

Ingeniero electrónico con especialización en Interconexión de Redes, magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor Titular de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito a los programas de Tecnología en Sistemas Eléctricos de Media y Baja Tensión e Ingeniería Eléctrica de la Facultad Tecnológica. Investigador Senior de Colciencias, director del grupo de investigación SIREC e integrante del grupo de investigación ARMOS e Internet Inteligente, en los que lidera investigaciones sobre sistemas y redes cognitivas y aplicaciones tecnológicas que contribuyen a mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables. Ha realizado publicaciones de patentes, libros de investigación y artículos en el área de las comunicaciones en revistas de categoría nacional e internacional.

Hans Raúl Márquez Ramos

Ingeniero Electrónico de la Universidad Manuela Beltrán, magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se ha desempeñado como Analista de Calidad y Joven Investigador en Colciencias de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (2011 y 2015). Actualmente es Ingeniero de Pruebas de Globant y miembro del grupo de investigación ARMOS y SIREC.

Luis Fernando Pedraza Martínez

Ingeniero electrónico, Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor Titular de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito al programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad Tecnológica; Integrante del grupo de investigación Gidenutas, en el que lidera investigaciones de aplicaciones tecnológicas que contribuyen a mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables. También pertenece al grupo de investigación Internet Inteligente, en el área de Radio Cognitiva y Networking; tiene varias publicaciones en el área de las comunicaciones en revistas de categoría nacional e internacional.



Este libro se
terminó de imprimir
en abril de 2017
en la Editorial UD
Bogotá, Colombia