

Modelo adaptativo multivariable de *handoff* espectral para incrementar el desempeño en redes móviles de radio cognitiva

Modelo adaptativo multivariable de *handoff* espectral para incrementar el desempeño en redes móviles de radio cognitiva

Cesar Augusto Hernández Suárez
Ingrid Patricia Páez Parra
Diego Armando Giral Ramírez



Dedicatoria

*Este libro está dedicado a mi familia,
Gracias por su estímulo, comprensión y cariño.*

Cesar Augusto Hernández Suárez

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.

A dos grandes profesionales y seres humanos, Luis Pedraza y Danilo López, gracias por sus aportes, asesorías y sugerencias.

Finalmente, también quiero agradecer a las instituciones que fueron un soporte fundamental durante este proyecto. A Colciencias, por la financiación de los recursos para el desarrollo de este proyecto de investigación. 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 en este proyecto. A la Universidad Nacional de Colombia por el acceso completo a los recursos bibliográficos pertinentes.

Financiamiento

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. También se reconoce el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia y Colciencias.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UD
Editorial

E2
ESPACIOS

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico
© Cesar Augusto Hernández Suárez, Ingrid Patricia Páez Parra,
Diego Ramírez Giraldo

Primera edición, abril de 2017
ISBN: 978-958-5434-01-1

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
Miguel Fernando Niño Roa

Corrección de estilo
Rodrigo Díaz Lozada

Diagramación
Jorge Andrés Gutiérrez U.

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

P Hernández Suárez, Cesar Augusto

Modelo adaptativo multivariable de handoff espectral para incrementar el desempeño en redes móviles de radio cognitiva / Cesar Augusto Hernández Suárez, Ingrid Patricia Páez Parra y Diego Ramírez Giraldo. -- Bogotá : Editorial UD, 2017.

230 páginas ; 24 cm. -- (Espacios)
ISBN 978-958-5434-01-1

1. Espectro electromagnético 2. Espectro radioeléctrico 3. Telecomunicaciones 4. Algoritmos I. Páez, Ingrid Patricia II. Ramírez Giraldo, Diego III Tít. IV. Serie
384 cd 21 ed.
A1567750

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

I. Proyecto de investigación	27
Problema y motivación del proyecto de investigación	29
Objetivos del proyecto de investigación	30
Alcance y limitaciones del proyecto de investigación	30
Modelo adaptativo multivariable de SH propuesto	31
Metodología del proyecto de investigación	32
Contribuciones del proyecto de investigación	33
Financiamiento del proyecto de investigación	34
Organización del libro de investigación	34
II. Fundamentos teóricos	35
Radio cognitiva	35
<i>Características de la radio cognitiva</i>	37
<i>Gestión de espectro en radio cognitiva</i>	38
<i>Arquitectura de la radio cognitiva</i>	40
<i>Aplicaciones de la radio cognitiva</i>	41
<i>Desafíos y futuras investigaciones en radio cognitiva</i>	41
Movilidad espectral	42
<i>Handoff espectral</i>	43
<i>Causas de un handoff espectral</i>	44
<i>Requerimientos de un SH</i>	45
<i>Fases de un handoff espectral</i>	45
<i>Procedimiento de un SH</i>	46
<i>Impacto de la movilidad espectral</i>	47
<i>Clasificación del SH</i>	48

<i>Tipos de enfoque del handoff espectral</i>	51
<i>Criterios de SH</i>	56
<i>Desafíos y futuras investigaciones en movilidad espectral</i>	65
Técnicas y algoritmos para la SA	67
<i>Algoritmo Random Allocation (RA)</i>	69
<i>Algoritmos MCDM</i>	69
<i>Algoritmos inteligentes</i>	76
<i>Técnicas de aprendizaje</i>	80
<i>Funciones de decisión</i>	82
<i>Algoritmos estadísticos</i>	83
<i>Análisis comparativo de las técnicas y algoritmos de handoff</i>	84
<i>Desafíos de investigación en la SA</i>	86
Series de tiempo	87
<i>Notación de las series de tiempo</i>	87
<i>Estacionariedad</i>	88
<i>Aplicación de las series de tiempo</i>	88
<i>Marco estadístico de las series de tiempo</i>	88
<i>Objetivos de las series de tiempo</i>	89
<i>Componentes de una serie de tiempo</i>	89
<i>Modelos de series de tiempo Arima</i>	90
<i>Funciones FAC y FACP</i>	92
Trabajos relacionados	93
<i>Algoritmos para la selección de la SO</i>	93
<i>Algoritmos para SH predictivos</i>	96
Herramientas de simulación	97
III. Metodología	101
Selección del software y de los equipos	102
Metodología de evaluación	103
Tipo de red	105
Captura y procesamiento de los datos de ocupación espectral	105
Nivel de tráfico	107
Criterios de decisión	109
Clases de aplicación	111
Selección de los algoritmos de SH	112

Diseño y desarrollo de algoritmos propuestos	112
<i>Algoritmo multivariable difuso (FAHP)</i>	112
<i>Algoritmo multivariable difuso realimentado (FFAHP)</i>	123
<i>Algoritmo multivariable proactivo predictivo (PPTS)</i>	125
Modelo adaptativo multivariable de SH (MAPFF)	129
<i>Diseño del algoritmo decisor</i>	129
<i>Propuesta inicial del modelo adaptativo multivariable (MAPFF)</i>	130
Métricas de evaluación	131
Desarrollo del simulador de SH	134
<i>Diseño de la herramienta de simulación</i>	134
<i>Bases de datos</i>	137
<i>Función Input_Data</i>	138
<i>Función Criteria_Values</i>	139
<i>Función ranking</i>	141
<i>Core del algoritmo</i>	142
<i>Funciones Data_Export y Figure</i>	143
Simulador de SH proactivo-predictivo	144
IV. Resultados	145
Análisis del espectro para el enlace ascendente GSM	145
Herramienta de simulación de SH desarrollada	147
Resultados del algoritmo RA	148
Resultados de los algoritmos híbridos FAHP y FFAHP	151
<i>Handoff total promedio acumulativo</i>	152
<i>Handoff fallido promedio acumulativo</i>	154
<i>Ancho de banda promedio</i>	156
<i>Retardo promedio acumulativo</i>	158
<i>Throughput promedio acumulativo</i>	160
<i>Evaluación comparativa</i>	162
Resultados del algoritmo proactivo predictivo PPTS	164
<i>Handoff total promedio acumulativo</i>	166
<i>Handoff fallido promedio acumulativo</i>	168
<i>Handoff sin interferencia promedio acumulativo</i>	170
<i>Handoff con interferencia promedio acumulativo</i>	172
<i>Handoff perfecto promedio acumulativo</i>	174

<i>Handoff anticipado promedio acumulativo</i>	176
<i>Evaluación comparativa</i>	178
Modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo	182
Discusión	185
Conclusiones	191
Conclusiones	191
Contribuciones de la investigación	193
Investigación futura	195
Referencias bibliográficas	197
Anexos	217

Lista de figuras

Figura 2.1. Concepto de SO	37
Figura 2.2. Ciclo cognitivo	38
Figura 2.3. Clasificación de las técnicas de detección de espectro	39
Figura 2.4. Arquitectura de una red de radio cognitiva	40
Figura 2.5. Aspectos relevantes en la movilidad espectral	43
Figura 2.6. Un ejemplo de selección de canal bajo un sistema de dos canales	46
Figura 2.7. Clasificación de los algoritmos para la asignación de espectro	68
Figura 2.8. Número difuso triangular	77
Figura 3.1. Configuración experimental para medir la ocupación espectral	105
Figura 3.2. Estructura propuesta para el algoritmo FAHP	117
Figura 3.3. TFN para la escala de importancia de FAHP	118
Figura 3.4. Esquema del algoritmo FFAHP propuesto	124
Figura 3.5. Esquema del algoritmo PPTS propuesto	125
Figura 3.6. Metodología de Box-Jenkins	127
Figura 3.7. Muestra de la FAC	128
Figura 3.8. Muestra de la FACP	128
Figura 3.9. Propuesta inicial del modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF	131
Figura 3.10. Diagrama básico del simulador de SH propuesto	135
Figura 3.11. Diagrama detallado de la solución propuesta	136
Figura 3.12. Parámetros iniciales	138
Figura 3.13. Flujo de datos de entrada y de salida, función criteria_values	140

Figura 3.14. Flujo de datos de entrada para los algoritmos de SH	142
Figura 3.15. Flujo de datos de la función core	143
Figura 3.16. Figuras de salida	144
Figura 4.1. Ciclo de trabajo normalizado por canal en el EA-GSM	146
Figura 4.2. AP por canal en el EA-GSM	146
Figura 4.3. ETA por canal en el EA-GSM	147
Figura 4.4. SINR estimada por canal en el EA-GSM	147
Figura 4.5. Entorno principal del simulador de SH Cognitive Radio Networks	148
Figura 4.6. EM de RA para red GSM	149
Figura 4.7. EM de RA para red Wi-Fi	150
Figura 4.8. AAH en cada escenario	152
Figura 4.9. AAFH en cada escenario	154
Figura 4.10. ABW en cada escenario	156
Figura 4.11. AAD en cada escenario	158
Figura 4.12. AAT en cada escenario	160
Figura 4.13. AAH en cada escenario	166
Figura 4.14. AAFH en cada escenario	168
Figura 4.15. AAPH en cada escenario	170
Figura 4.16. AAIH en cada escenario	172
Figura 4.17. AAEH en cada escenario	174
Figura 4.18. AAUH en cada escenario	176
Figura 4.19. Modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo	182

Lista de tablas

Tabla 2.1. Comparación entre los modelos de SH de la primera clasificación	49
Tabla 2.2. Análisis comparativo de las técnicas de SA	84
Tabla 3.1. Especificaciones de los equipos para la monitorización del espectro	102
Tabla 3.2. Especificaciones del equipo de cómputo	102
Tabla 3.3. Configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro para GSM	106
Tabla 3.4. Umbral de decisión para la detección de PU	108
Tabla 3.5. Características de las clases de QoS	111
Tabla 3.6. TFN y TFN reciproco para la escala de importancia de FAHP	118
Tabla 3.7. Matriz de juicios para los subcriterios de RT	120
Tabla 3.8. Matriz de juicios para los subcriterios de BE	120
Tabla 3.9. Pesos normalizados de los subcriterios de RT	122
Tabla 3.10. Pesos normalizados de los subcriterios de BE	122
Tabla 3.11. Modelos de series de tiempo propuestos	129
Tabla 3.12. DC para el algoritmo decisor	130
Tabla 3.13. EM utilizadas en la evaluación de los algoritmos FAHP y FFAHP	132
Tabla 3.14. EM utilizadas en la evaluación del algoritmo PPTS	132
Tabla 3.15. Bases de datos de ocupación espectral	137
Tabla 3.16. Descripción parámetros de entrada para Input_Data	138
Tabla 3.17. Vectores criteria_values	140
Tabla 3.18. Tipo de formato	144

Tabla 4.1. Valores absolutos de AAH para red GSM	153
Tabla 4.2. Valores relativos de AAH para red GSM	153
Tabla 4.3. Valores absolutos de AAH para red Wi-Fi	153
Tabla 4.4. Valores relativos de AAH para red Wi-Fi	153
Tabla 4.5. Valores absolutos de AAFH para red GSM	155
Tabla 4.6. Valores relativos de AAFH para red GSM	155
Tabla 4.7. Valores absolutos de AAFH para red Wi-Fi	155
Tabla 4.8. Valores relativos de AAFH para red Wi-Fi	155
Tabla 4.9. Valores absolutos de ABW para red GSM	157
Tabla 4.10. Valores relativos de ABW para red GSM	157
Tabla 4.11. Valores absolutos de ABW para red Wi-Fi	157
Tabla 4.12. Valores relativos de ABW para red Wi-Fi	157
Tabla 4.13. Valores absolutos de AAD para red GSM	159
Tabla 4.14. Valores relativos de AAD para red GSM	159
Tabla 4.15. Valores absolutos de AAD para red Wi-Fi	159
Tabla 4.16. Valores relativos de AAD para red Wi-Fi	159
Tabla 4.17. Valores absolutos de AAT para red GSM	161
Tabla 4.18. Valores relativos de AAT para red GSM	161
Tabla 4.19. Valores absolutos de AAT para red Wi-Fi	161
Tabla 4.20. Valores relativos de AAT para red Wi-Fi	161
Tabla 4.21. Evaluación comparativa global por EM para red GSM	162
Tabla 4.22. Evaluación comparativa por EM con RT para red GSM	162
Tabla 4.23. Evaluación comparativa por EM con BE para red GSM	162
Tabla 4.24. Evaluación comparativa global por escenario para red GSM	163
Tabla 4.25. Evaluación comparativa global por EM para red Wi-Fi	163
Tabla 4.26. Evaluación comparativa por EM con RT para red Wi-Fi	163
Tabla 4.27. Evaluación comparativa por EM con BE para red Wi-Fi	164
Tabla 4.28. Evaluación comparativa global por escenario para red Wi-Fi	164
Tabla 4.29. Valores absolutos de AAH para red GSM	167
Tabla 4.30. Valores relativos de AAH para red GSM	167
Tabla 4.31. Valores absolutos de AAH para red Wi-Fi	167

Tabla 4.32. Valores relativos de AAH para red Wi-Fi	167
Tabla 4.33. Valores absolutos de AAFH para red GSM	169
Tabla 4.34. Valores relativos de AAFH para red GSM	169
Tabla 4.35. Valores absolutos de AAFH para red Wi-Fi	169
Tabla 4.36. Valores relativos de AAFH para red Wi-Fi	169
Tabla 4.37. Valores absolutos de AAPH para red GSM	171
Tabla 4.38. Valores relativos de AAPH para red GSM	171
Tabla 4.39. Valores absolutos de AAPH para red Wi-Fi	171
Tabla 4.40. Valores relativos de AAPH para red Wi-Fi	171
Tabla 4.41. Valores absolutos de AAIH para red GSM	173
Tabla 4.42. Valores relativos de AAIH para red GSM	173
Tabla 4.43. Valores absolutos de AAIH para red Wi-Fi	173
Tabla 4.44. Valores relativos de AAIH para red Wi-Fi	173
Tabla 4.45. Valores absolutos de AAEH para red GSM	175
Tabla 4.46. Valores relativos de AAEH para red GSM	175
Tabla 4.47. Valores absolutos de AAEH para red Wi-Fi	175
Tabla 4.48. Valores relativos de AAEH para red Wi-Fi	175
Tabla 4.49. Valores absolutos de AAUH para red GSM	177
Tabla 4.50. Valores relativos de AAUH para red GSM	177
Tabla 4.51. Valores absolutos de AAUH para red Wi-Fi	177
Tabla 4.52. Valores relativos de AAUH para red Wi-Fi	177
Tabla 4.53. Evaluación comparativa global por EM para red GSM	178
Tabla 4.54. Evaluación comparativa por EM con RT para red GSM	178
Tabla 4.55. Evaluación comparativa por EM con BE para red GSM	179
Tabla 4.56. Evaluación comparativa global por escenario para red GSM	179
Tabla 4.57. Evaluación comparativa global por EM para red Wi-Fi	180
Tabla 4.58. Evaluación comparativa por EM con RT para red Wi-Fi	180
Tabla 4.59. Evaluación comparativa por EM con BE para red Wi-Fi	181
Tabla 4.60. Evaluación comparativa global por escenario para red Wi-Fi	181
Tabla 4.61. Reglas de selección del algoritmo decisor	182

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
AAD	Retardo Promedio Acumulado
AAEH	Handoff Perfecto Promedio Acumulado
AAFH	Handoff Fallidos Promedio Acumulado
AAH	Handoff Promedio Acumulado
AAIH	Handoff con Interferencia Promedio Acumulado
AAPH	Handoff sin Interferencia Promedio Acumulado
AAT	Throughput Promedio Acumulado
AAUH	Handoff Anticipado Promedio Acumulado
ABC	Colonia Artificial de Abejas
ABW	Ancho de Banda Promedio
AHP	Analytical Hierarchical Process
AM	Matriz de Disponibilidad
ANS	Puntaje Promedio Normalizado
AP	Probabilidad de Disponibilidad
MAPFF	Multivariable Adaptive Predictive Feedback Fuzzy
AR	Autorregresivo
ARIMA	Autorregresivo Integrado de Media Móvil
ARMA	Autorregresivo de Media Móvil
BCL	Lista de Canales de Respaldo
BE	Mejor-Esfuerzo
BER	Tasa de Error de Bit

Abreviatura	Término
BS	Estación Base
BW	Ancho de Banda
CAP	Punto de Acceso Cognitivo
CAR	Consejo de Administradores de Red
CBS	Estación Base Central
CCC	Canal de Control Común
CDB	Base de Datos Central
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CR	Radio Cognitiva
CRAHN	Redes de Radio Cognitiva Ad Hoc
CRN	Redes de Radio Cognitiva
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DC	Criterios de Decisión
DCF	Función de Coordinación Distribuida
DOFDM	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Discontinua
D-QDCR	Reserva de Canal Dinámica Distribuida basada en la QoS
DSA	Acceso Dinámico al Espectro
EA-GSM	Enlace Ascendente de la banda GSM
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing the Reality
EM	Métrica de Evaluación
ETA	Tiempo Medio de Disponibilidad
EV	Evaluación
FAC	Función de AutoCorrelación
FACP	Función de AutoCorrelación Parcial
FAHP	Fuzzy Analytical Hierarchical Process
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia
FFAHP	Feedback Fuzzy Analytical Hierarchical Process
FTR	Probabilidad de Terminación Forzosa
GRA	Grey Relational Analysis

Abreviatura	Término
GSM	Sistema Global para Comunicaciones Móviles
HMM	Modelos Ocultos de Markov
HT	Tráfico Alto
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LCCS	Least Congested Channel Search
LT	Tráfico Bajo
MA	Media Móvil
MAC	Control de Acceso al Medio
MANET	Redes Móviles Ad-hoc
MAS	Sistemas Multi-Agente
MCDM	Toma de Decisiones Multi-Criterio
MEW	Multiplicative Exponent Weighting
MT	Tráfico Medio
NTIA	Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
PA	Punto de Acceso
PDA	Asistente Personal Digital
PM	Matriz de Potencias
PM-HT	Matriz de Potencias de Tráfico Alto
PM-HT-EV	Matriz de Potencias de Tráfico Alto para Evaluación
PM-HT-TR	Matriz de Potencias de Tráfico Alto para Entrenamiento
PM-LT	Matriz de Potencias de Tráfico Bajo
PM-LT-EV	Matriz de Potencias de Tráfico Bajo para Evaluación
PM-LT-TR	Matriz de Potencias de Tráfico Bajo para Entrenamiento
PM-MT	Matriz de Potencias de Tráfico Medio
PM-MT-EV	Matriz de Potencias de Tráfico Medio para Evaluación
PM-MT-TR	Matriz de Potencias de Tráfico Medio para Entrenamiento
PPS	Puntos Por Span
PPTS	Proactive Predictive based on Time Series

Abreviatura	Término
PU	Usuario Primario
QoE	Experiencia del Usuario
QoS	Calidad de Servicio
RA	Random Allocation
RBW	Resolución de Ancho de Banda
RIV	Ranking del Impacto de las Variables
RRSS	Fuerza Relativa de la Señal Recibida
RSS	Fuerza de la Señal Recibida
RSSI	Indicador de Fuerza de la Señal Recibida
RT	Tiempo-Real
SA	Asignación Espectral
SAW	Simple Additive Weighting
SH	Handoff Espectral
SINR	Relación Señal a Ruido más Interferencia
SIR	Relación Señal a Interferencia
SMS	Servicio de Mensajes Cortos
SNR	Relación Señal a Ruido
SO	Oportunidad Espectral
SU	Usuario Secundario
SVM	Máquinas de Soporte Vectorial
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TR	Entrenamiento
TS	Instante de Tiempo
VIKOR	Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution
VoIP	Voz sobre IP
WCDMA	Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha
Wi-Fi	Wireless-Fidelity
WMC	Weighted Markov Chain

I. Proyecto de investigación

En la actualidad la cantidad de tráfico transportado por las redes inalámbricas crece constantemente debido al aumento del número de usuarios y al incremento de las aplicaciones inalámbricas (López, García & Herrera, 2015). Lo anterior, junto a 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, como las de 50 a 700 MHz, están siendo subutilizadas, ya que sus ciclos útiles son prácticamente nulos porque que 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, las cuales hoy 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, o 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 hace que quede fuera del área de cobertura, el SU deberá liberar dicho canal y buscar un nuevo canal 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) (E. Ahmed, Gani, Abolfazli, Yao, & Khan, 2016; Akyildiz, Lee, Vuran, & Mohanty, 2008; Akyildiz, Won-Yeol, Vuran, & Mohanty, 2006; Ozger & Akan, 2016; Tsiopoulos, Dobre, Ahmed, & Baddour,

2016). Lo anterior le confiere a la CR la capacidad de proveer un gran ancho de banda (BW) al SU, a través de 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: detección del espectro, decisión de espectro, compartición de espectro y movilidad de espectro, las cuales conforman el ciclo cognitivo (Akyildiz, Lee, & Chowdhury, 2009; Akyildiz et al., 2008). El ciclo cognitivo inicia con la detección del espectro, los usuarios de radio cognitiva monitorizan el espectro para detectar las oportunidades espectrales (SO), a 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 (Akyildiz et al., 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 (Akyildiz et al., 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 que el SU está interfiriendo al PU, o por la degradación de la calidad del canal (Akyildiz et al., 2009; Tsiropoulos et al., 2016).

En la movilidad espectral, el SH se desarrolla a partir de las tres fases principales: medición, decisión y ejecución (A. 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 se toma la decisión de 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. De acuerdo con el modelo de SH que se configure, el desempeño de las CRN puede verse 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).

Problema y motivación del proyecto de investigación

La utilización ineficiente y esporádica del espectro, junto al incremento en su uso, 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 (Akyildiz *et al.*, 2008; 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 compartan el espectro con PU de manera oportunista (Akyildiz *et al.*, 2008; Ozger & Akan, 2016).

De acuerdo con investigaciones actuales (E. Ahmed *et al.*, 2016; Akyildiz *et al.*, 2009, 2008, 2006; Christian, Moh, Chung, & Lee, 2012; Marinho & Monteiro, 2012; Rodríguez-Colina, Ramírez, Carrillo, & Ernesto, 2011; Tsipopoulos *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, con lo cual se minimizaría la degradación del canal (Christian *et al.*, 2012). Hoy en día 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; Y. 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 tanto, se requiere un modelo de SH que permita cambiar la actual transmisión del SU a una nueva banda espectral con la mínima degradación de calidad, reconfigurando así 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, y esto provoca un aumento significativo del retraso que finalmente incide de forma directa en el nivel de desempeño y QoS de la comunicación del SU (Akyildiz *et al.*, 2009). De acuerdo con 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 de canal, su disponibilidad

durante el SH y la probabilidad de que siga libre en el futuro, entre otras. Una pobre selección de canal puede causar múltiples SH, con lo cual se degrada 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).

De acuerdo con el contexto anterior, este proyecto plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo se podría mejorar el desempeño de la movilidad espectral del usuario secundario, teniendo en cuenta el contexto de la comunicación en desarrollo, sin degradar la calidad de servicio del enlace del usuario primario? Para dar respuesta a la anterior pregunta, esta investigación propone desarrollar un modelo adaptativo multivariable de SH que cambie su comportamiento de forma dinámica, de conformidad con los requerimientos y parámetros de la comunicación del SU, realizando previamente y de forma inteligente, con base en reglas y criterios preestablecidos, un *ranking* de las mejores SO. Lo anterior permite al SU hacer el cambio de canal con un retardo menor, debido a que no es necesario ejecutar la detección ni decisión de espectro, y reduciendo el número de SH realizados para completar la transmisión de datos del SU.

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 a través 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.

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 si solos dan para otro proyecto de investigación.

La validación del modelo adaptativo multivariable de SH propuesto se realizará a través de 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.

Modelo adaptativo multivariable de SH propuesto

Esta investigación propone un modelo adaptativo multivariable de SH conformado por varios algoritmos híbridos para la toma de decisiones multicriterio. Dicho modelo está basado en un multimodelo que, de acuerdo con las características del espectro y los requerimientos del SU, selecciona el mejor algoritmo de SH entre tres algoritmos desarrollados: *fuzzy analytical hierarchical process* (FAHP), *feedback fuzzy analytical hierarchical process* (FFAHP) y *proactive predictive based on time series* (PPTS). El modelo propuesto selecciona de forma dinámica e inteligente la mejor 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.

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. A diferencia de los trabajos relacionados, la evaluación comparativa se validó a través 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) y *wireless-fidelity* (Wi-Fi) (Cárdenas-Juárez, Díaz-Ibarra, Pineda-Rico, Arce, & Stevens-Navarro, 2016), que modelan el comportamiento real de los PU (Y. Chen & Hee-Seok, 2016). En la evaluación de desempeño se tuvieron en cuenta dos tipos de red: GSM y Wi-Fi, dos clases de aplicaciones: *tiempo-real* (RT) y *mejor-esfuerzo* (BE), dos niveles de tráfico: *tráfico alto* (HT) y *tráfico bajo* (LT), y nueve 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), *número de handoff sin interferencia promedio acumulado* (AAPH), *número de handoff con interferencia promedio acumulado* (AAIH), *número de handoff perfecto promedio acumulado* (AAEH) y *número de handoff anticipado promedio acumulado* (AAUH).

Metodología del proyecto de investigación

El desarrollo del presente proyecto de investigación se realizó secuencialmente a través de cuatro enfoques metodológicos, el primero de tipo descriptivo, el cual 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 aplicar soluciones de otras situaciones al contexto de interés, y, finalmente, un 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. 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 tanto en la banda GSM como en la banda Wi-Fi, para analizar el comportamiento de dichas bandas y del PU. Cuarto, se llevó a cabo un procesamiento de los datos capturados para construir bases de datos de información organizada sobre el comportamiento del PU y las características de los recursos espectrales de las bandas mencionadas; dichas bases de datos fueron clasificadas por tipo de red (GSM y Wi-Fi) y 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, las cuales fueron complementadas. Sexto, se seleccionaron y desarrollaron los algoritmos de SH más relevantes en la literatura actual. Séptimo, se diseñaron y desarrollaron tres algoritmos de SH novedosos. Octavo, con base en los tres algoritmos de SH, se construyó el modelo adaptativo multivariable propuesto para SH. Noveno, a partir del análisis del estado del arte del SH en CRN, se diseñaron nueve EM para evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos en esta investigación, así como los seleccionados de la literatura actual, y se propusieron ocho escenarios de evaluación, considerando dos tipos de redes: GSM y Wi-Fi, dos clases de aplicaciones: RT y BE, y dos niveles de tráfico: HT y LT. Decimo, con base en toda la información anterior se diseñaron y desarrollaron dos simuladores que permitieron evaluar cuantitativamente el desempeño de los algoritmos de SH, considerando el comportamiento real del PU. Undécimo, con los resultados obtenidos a partir de los simuladores, se realizó una eva-

luación comparativa de su desempeño en cada una de las EM. Duodécimo, a partir del análisis comparativo se realizaron ajustes y modificaciones al modelo adaptativo multivariable propuesto.

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, Colombia.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, en dos tipos de redes: GSM y Wi-Fi.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con dos tipos de enfoque: RT y BE, de acuerdo con la clase de aplicación que puede ejecutar el SU.
- 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: GSM-RT-LT, GSM-RT-HT, GSM-BE-LT, GSM-BE-HT, Wi-Fi-RT-LT, Wi-Fi-RT-HT, Wi-Fi-BE-LT y Wi-Fi-BE-HT.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, bajo nueve EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT, AAPH, AAIH, AAEH y AAUH.
- 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 se calcula a partir de los datos de ocupación espectral reales.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH híbrido basado en lógica difusa que mejora el manejo de la subjetividad y la incertidumbre en la información y en las evaluaciones de criterios, denominado FAHP.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH híbrido basado en la realimentación del algoritmo FAHP, que aumenta el nivel de precisión en la evaluación de las SO al tener en cuenta su desempeño reciente, denominado FFAHP.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH proactivo predictivo basado en series de tiempo que reduce el nivel de interferencia entre el PU y el SU, denominado PPTS.

- Desarrollo de una gran variedad de algoritmos de SH relevantes, relacionados en la literatura actual y modificados apropiadamente para evaluar su desempeño en las aplicaciones de RT y BE, así como su comparación con los algoritmos propuestos.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación novedosa para evaluar el desempeño de algoritmos de SH híbridos, 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, denominada *cognitive radio networks*.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación novedosa para evaluar el desempeño de algoritmos de SH proactivos-predictivos, 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, denominada *cognitive radio networks prediction*.

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, en la convocatoria 8 del año 2014. También se reconoce el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia y 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 de la CR, el SH, los algoritmos de *asignación espectral* (SA) y las series de tiempo, una revisión de la literatura actual sobre modelos de SH para CRN y herramientas de simulación de SH. 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.

II. Fundamentos teóricos

El desarrollo de este proyecto de investigación está totalmente enfocado en el área de la CR, por tal razón, el presente capítulo está estructurado en seis secciones principales. La primera tiene por objetivo presentar los fundamentos de la CR, la segunda, enfocarse en los aspectos teóricos del SH, la tercera, presentar los algoritmos más relevantes de la SA, la cuarta, enfocarse en los aspectos teóricos de las series de tiempo, la quinta, presentar una revisión de la literatura actual sobre modelos de SH para CRN, y, finalmente, la sexta, mostrar algunas herramientas de simulación de SH.

Radio cognitiva

En la actualidad las redes y las aplicaciones inalámbricas en gran parte del mundo se han caracterizado por una política de asignación fija del espectro de radiofrecuencia regulada por el Estado. Esta asignación fija provoca que las frecuencias asignadas a servicios específicos estén prácticamente en desuso y no puedan ser aprovechadas por los SU, aun si estos no provocan ninguna interferencia (E. Ahmed *et al.*, 2016; Akyildiz *et al.*, 2008).

Según estudios realizados por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos (Federal Communications Commission, 2003) se ha evidenciado que gran parte del espectro de radiofrecuencia se utiliza de manera ineficiente. Con base en las variaciones temporales y geográficas, la utilización del espectro asignado es ineficiente (Federal Communications Commission, 2003; IEEE Standards Coordinating Committee 41 on Dynamic Spectrum, 2008). Incluso, mediciones más actuales muestran que más del 70% del espectro no se utiliza (Hoven *et al.*, 2005; Pedraza *et al.*, 2016).

Esta utilización ineficiente y esporádica del espectro, junto al incremento de la demanda de espectro, han hecho que se degrade la QoS en varias redes y aplicaciones inalámbricas, como las comunicaciones móviles.

Lo anterior ha motivado el desarrollo de investigaciones recientes que han encontrado en el DSA la solución al problema. La tecnología clave que permite materializar las técnicas de DSA es la CR (Akyildiz *et al.*, 2008; Tsipopoulos *et al.*, 2016).

El concepto de CR fue elaborado por Joseph Mitola III en 1999, como “el punto en el cual las Personal Digital Assistant (PDA) inalámbricas y las redes relacionadas son, en términos computacionales, lo suficientemente inteligentes con respecto a los recursos de radio y las correspondientes comunicaciones de ordenador a ordenador como para detectar las necesidades eventuales de comunicación del usuario como una función del contexto de uso y proporcionarle los recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a ese mismo instante” (Mitola & Maguire, 1999). Sin embargo, varias entidades importantes han dado su punto de vista al respecto: según la Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones (NTIA), la CR “es una radio o sistema que detecta su entorno electromagnético de operación y puede ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros de operación de radio para modificar la operación del sistema como: maximizar el rendimiento, reducir la interferencia y/o facilitar la interoperabilidad”. Para la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), la CR “es 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”. De acuerdo con el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), la CR “es un tipo de radio que puede detectar de forma autónoma y razonar sobre su entorno y adaptarse acorde a este” (IEEE Standards Coordinating Committee 41 on Dynamic Spectrum, 2008). Según la FCC, CR es una radio que “puede cambiar los parámetros del transmisor basado en la interacción con su entorno” (Federal Communications Commission, 2003).

La CR tiene la capacidad de proveer un gran BW a usuarios móviles, a través de arquitecturas inalámbricas heterogéneas, gracias a lo cual aumenta significativamente la eficiencia espectral, debido a que permite que SU compartan el espectro con PU de manera oportunista (Akyildiz *et al.*, 2008), a partir de las SO, como se muestra en la figura 2.1, es decir, que utilicen las porciones del espectro que no están siendo usadas en ese momento (Delgado & Rodríguez, 2016; Ozger & Akan, 2016).

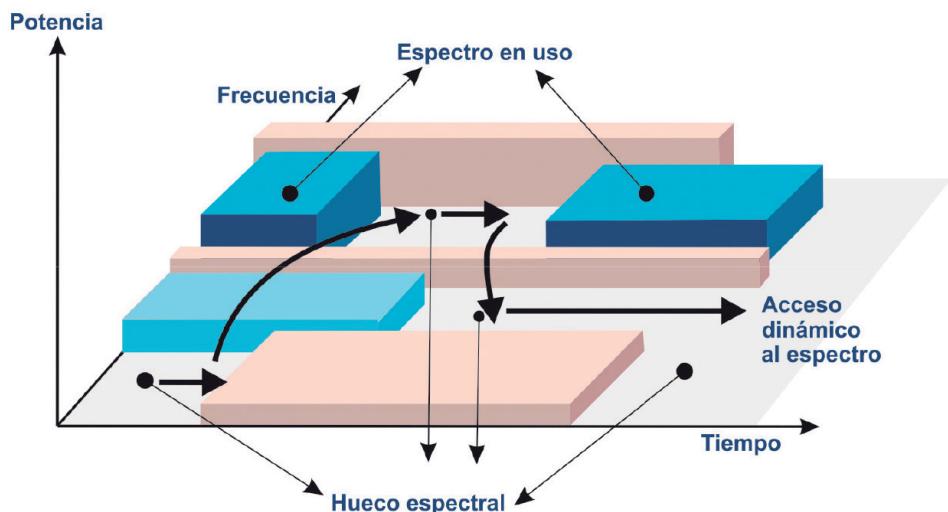
La figura 2.1 describe el concepto de SO a través de una gráfica en tres dimensiones, cuyos ejes son potencia, frecuencia y tiempo. Cada bloque gris de la figura es un PU que hace uso de una porción del espectro de

frecuencia dado por el eje de frecuencia, a un nivel de potencia dado por el eje de potencia, y durante un determinado periodo dado por el eje de tiempo. Sin embargo, existen porciones del espectro de frecuencia que no son utilizadas durante un determinado intervalo de tiempo, dichos espacios son denominados SO, que pueden ser aprovechados por los SU (Ozger & Akan, 2016).

Características de la radio cognitiva

Las principales características de la CR, que le confieren todas las capacidades descritas anteriormente, son la capacidad cognitiva y la reconfigurabilidad.

Figura 2.1. Concepto de SO



Fuente: adaptado de Akyildiz *et al.* (2009).

Capacidad cognitiva

La capacidad cognitiva es la tecnología capaz de capturar la información de su entorno de radiofrecuencia para identificar los segmentos del espectro que no se utilizan, seleccionar el mejor espectro posible y definir los parámetros de operación más adecuados con el objetivo de evitar la interferencia con otros usuarios (Aguilar & Navarro, 2011; Akyildiz *et al.*, 2006).

Reconfigurabilidad

La reconfigurabilidad es la capacidad de cambiar de forma dinámica los diferentes parámetros de operación relacionados con la transmisión y/o

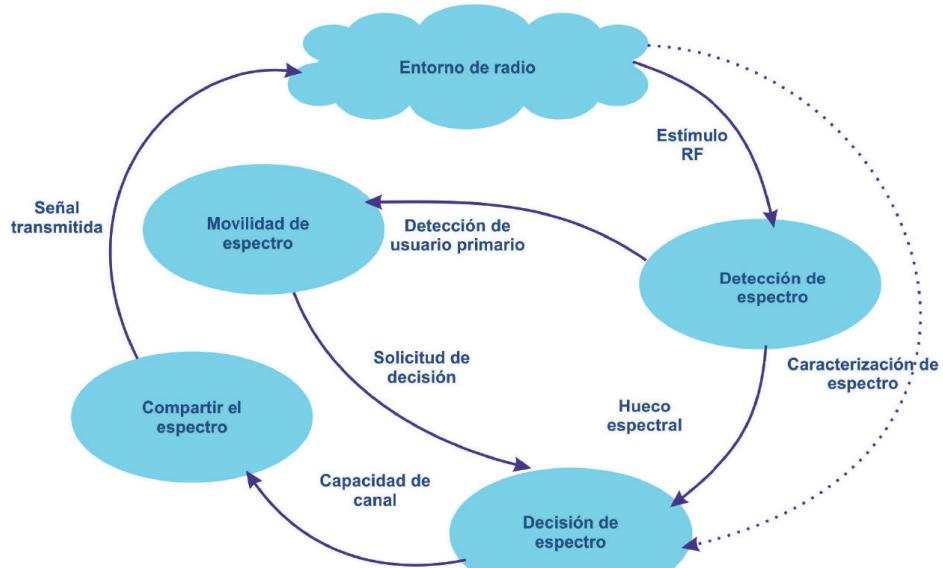
recepción, como frecuencia, potencia y modulación, con el objetivo de habilitar la radio para ser programada dinámicamente para transmitir y recibir en una gran variedad de frecuencias, en función del ambiente de radio, y usar diferentes tecnologías de acceso a la transmisión (Aguilar & Navarro, 2011; Akyildiz *et al.*, 2009, 2006).

Gestión de espectro en radio cognitiva

Las CRN también imponen retos en la gestión del espectro, debido a la naturaleza fluctuante del espectro disponible y los requerimientos de QoS de varias aplicaciones. Las cuatro principales funciones en la gestión del espectro son: monitorización del espectro, decisión de espectro, compartición de espectro y movilidad de espectro, las cuales conforman el ciclo cognitivo (kyildiz *et al.*, 2009, 2008).

La figura 2.2 describe el ciclo cognitivo, inicia con la monitorización del espectro para detectar las SO, luego la decisión de espectro selecciona una de ellas para ser utilizada por el SU. Si un PU arriba a la misma SO, el SU debe realizar la movilidad espectral y seleccionar una nueva SO. En el caso de varios SU se puede realizar una compartición del espectro.

Figura 2.2. Ciclo cognitivo

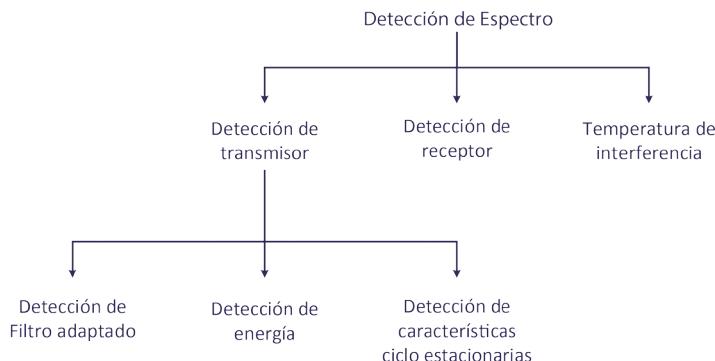


Fuente: adaptado de Akyildiz *et al.* (2009).

Monitorización de espectro

En las bandas licenciadas los SU solo pueden ser asignados a SO, para que no interfieran con los PU. Por tanto, es necesario que monitoricen las bandas de espectro disponibles para detectar dichas SO (Akyildiz *et al.*, 2009). Hoy existen diferentes técnicas para monitorizar el espectro, las cuales se clasifican como se muestra en la figura 2.3; la detección de energía es la más básica de ellas.

Figura 2.3. Clasificación de las técnicas de detección de espectro



Fuente: adaptado de Akyildiz *et al.* (2009).

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 la anterior 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 (Akyildiz *et al.*, 2009).

Compartición de espectro

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 (Akyildiz *et al.*, 2009; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

Movilidad de espectro

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 a la degradación de la calidad del canal (Akyildiz *et al.*, 2009; Kumar *et al.*, 2016).

Arquitectura de la radio cognitiva

Arquitectura centralizada

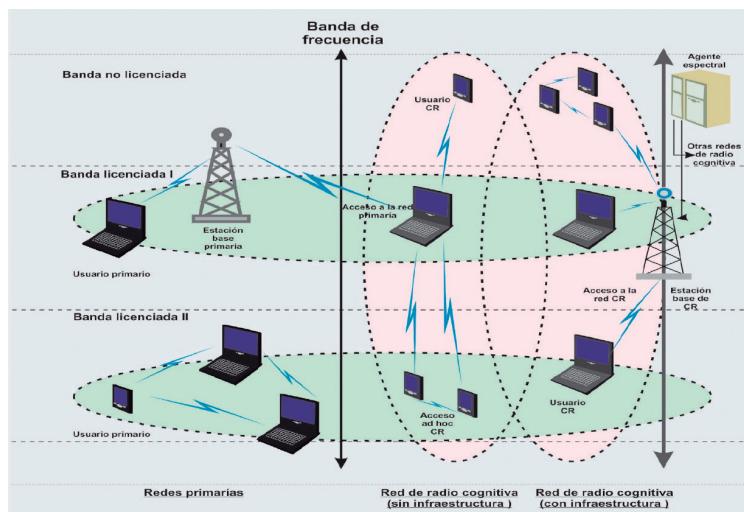
En la arquitectura centralizada, la coordinación de los nodos entre sí se mantiene mediante la difusión de mensajes a través de un CCC de coordinación del espectro, con independencia del canal de datos. Cada usuario determina el canal que puede utilizar para la transmisión de datos, de tal manera que se evite la interferencia. En el caso de que la selección de canal no sea suficiente para tal fin, se implementa la adaptación de potencia. Las evaluaciones de las alternativas anteriores revelan que el CCC mejora el rendimiento entre 35 y 160%, a través tanto de la frecuencia como de la adaptación de potencia (Akyildiz *et al.*, 2006; Tsiropoulos *et al.*, 2016).

Arquitectura distribuida

En la arquitectura distribuida la coordinación entre nodos utiliza una *reserva de canal dinámica distribuida basada en la QoS* (D-QDCR). El concepto básico detrás de D-QDCR es que una *estación base* (BS) compite con su interferente BS de acuerdo con los requisitos de QoS de los usuarios para asignar una porción del espectro. De forma similar al protocolo CCC, los canales de control y datos se separan (Akyildiz *et al.*, 2006; Tsiropoulos *et al.*, 2016).

La figura 2.4 muestra un ejemplo de una arquitectura de CR centralizada (con infraestructura) y distribuida ad-hoc (sin infraestructura).

Figura 2.4. Arquitectura de una red de radio cognitiva



Fuente: adaptado de Akyildiz *et al.* (2006).

Aplicaciones de la radio cognitiva

Con el objetivo de argumentar la relevancia de esta investigación, se podría mencionar cómo los resultados pueden impactar el campo de la información y las comunicaciones en la región de aplicación de sus resultados, como es no solo Bogotá D.C., sino toda Colombia y el mundo entero. Un ejemplo muy claro son las redes *mesh*, las cuales han emergido como una tecnología con relación costo-beneficio muy buena, sin embargo, el incremento en la densidad de la red y el requerimiento de un alto *throughput* por parte de sus aplicaciones han degradado su QoS. Con las ventajas de la CR es posible habilitar el acceso a un mayor segmento del espectro, y por otro lado, una red *backbone mesh* puede incrementar el área de cobertura basada en *puntos de acceso cognitivos* (CAP) (Akyildiz *et al.*, 2006).

También un desastre natural podría deshabilitar temporalmente o incluso destruir la infraestructura de comunicaciones, por lo que se haría necesario establecer redes de emergencia que requieren una gran cantidad de espectro para poder manejar el volumen de tráfico de video, voz y datos. CR tiene la capacidad de proporcionar dicho espectro, sin la necesidad de una gran infraestructura. Es así como la seguridad pública y las redes de emergencia también se pueden beneficiar de las ventajas de la radio cognitiva (Akyildiz *et al.*, 2006).

Otra de las potenciales aplicaciones de la CR son las redes militares, ya que permite a la radio militar escoger arbitrariamente su frecuencia, BW, modulación y codificación, adaptándose al ambiente de radio variable del campo de batalla (Akyildiz *et al.*, 2006).

Como conclusión, las características de reconfigurabilidad dinámica de cada uno de los parámetros de operación en una CRN pueden garantizar integridad de la información, interoperabilidad, fiabilidad, flexibilidad, redundancia, escalabilidad, seguridad, eficiencia y acceso en todo tiempo y espacio, lo cual beneficia significativamente el manejo de la información y las comunicaciones en Colombia.

Desafíos y futuras investigaciones en radio cognitiva

Los desafíos de CR pueden ser varios, debido a que se abarcan temas desde la monitorización del espectro hasta decisiones de movilidad en este, teniendo en cuenta esquemas de acceso al medio y tipo de redes en las cuales interactúa la CR. Por tanto, en este apartado se describirán brevemente estos desafíos.

Monitorización del espectro

El proceso de monitorización no puede realizarse al tiempo que se envía la información entre SU, por consiguiente, si se requiere desarrollar acciones de monitorización, los usuarios deben detener las transmisiones, y con ello la eficiencia del espectro se ve afectada. Con base en esto, sería deseable desarrollar algoritmos de monitorización que reduzcan su tiempo, mientras mejoran la precisión en el proceso de detección de SO.

Espectro compartido

En trabajos realizados en CR se hacen suposiciones como que los SU conocen de antemano la localización y el nivel de potencia de la transmisión de los PU, lo cual permite realizar los cálculos de interferencia de manera fácil. Sin embargo, esta suposición no siempre es cierta para algunas CRN (Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

Procesos de aprendizaje

Debido a las complejidades inherentes de la CR, sería deseable habilitar en los dispositivos que hagan uso de CR un proceso de aprendizaje que tome en cuenta las decisiones tomadas en el pasado, a efectos de mejorar su comportamiento dentro de la red y perfeccionar sus decisiones futuras. El diseño de este tipo de algoritmos representa un gran desafío, puesto que se debe determinar qué mediciones son necesarias para desarrollar este proceso de aprendizaje (Delgado & Rodríguez, 2016).

Esquemas de control de acceso al medio

Aunque el grupo de investigación del estándar IEEE 802.22 trabaja en el desarrollo de un protocolo de *control de acceso al medio* (MAC), otras investigaciones han desarrollado esquemas que no se adecuan al estándar. Por ejemplo, los esquemas MAC distribuidos para *redes de radio cognitiva ad hoc* (CRAHN) no están del todo cubiertos.

Movilidad espectral

Esta sección tiene por objetivo presentar una revisión sobre la movilidad espectral en CRN, describiendo el SH, sus clasificaciones, sus enfoques actuales, sus DC y sus EM, de acuerdo con la literatura actual. Esta revisión se realizó a partir del análisis de publicaciones recientes de corriente principal, con sus respectivas citas, tratando de proveer un marco referencial completo de la literatura actual sobre la movilidad espectral en CRN.

Los tópicos más relevantes dentro de la movilidad espectral para CRN son: (1) las estrategias de SH (en este capítulo se presentan tres tipos de clasificación de estas estrategias); (2) los enfoques que se deben tener en cuenta en un SH de acuerdo con las características de la red (este capítulo presenta los más relevantes); (3) los DC o criterios de información para SH (este capítulo presenta los más relevantes); (4) los parámetros que es preciso modificar o criterios de control para SH (este capítulo presenta los más relevantes); (5) las EM o criterios de evaluación para SH, que estiman el nivel de desempeño del SH (este capítulo presenta los más relevantes); (6) los algoritmos de SA que seleccionan la SO con base en los DC designados y el tipo de enfoque; y (5) los desafíos de investigación que actualmente presenta el tema de SH en CRN (véase figura 2.5).

Figura 2.5. Aspectos relevantes en la movilidad espectral



Fuente: adaptado de Tragos, Zeadally, Fragkiadakis, & Siris (2013).

Handoff espectral

La movilidad de espectro o SH se puede definir como el proceso en donde un SU cambia su frecuencia de operación, cuando las condiciones de un canal se

degradan o cuando un PU aparece, ya que el primero se encuentra utilizando una banda licenciada (Akyildiz *et al.*, 2008, 2006; Kumar *et al.*, 2016).

La movilidad espectral da lugar a un nuevo tipo de *handoff* denominado SH. El concepto de SH en CR difiere de los mecanismos tradicionales de las redes inalámbricas, en el sentido de que hay dos tipos de usuarios con diferentes prioridades. Los PU (con alta prioridad), los cuales tienen derecho a interrumpir la transmisión de los SU (con baja prioridad). En un *handoff* tradicional los usuarios tienen la misma prioridad (L.-C. Wang & Wang, 2008).

Durante la movilidad espectral es inevitable que la comunicación se rompa temporalmente, debido a que es necesario realizar un proceso de descubrimiento de nuevas bandas de frecuencias disponibles; por tanto, la movilidad espectral requiere 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).

Cada vez que ocurre un SH los parámetros de operación de la CRN cambian, a fin de minimizar el impacto en la operación de los SU y satisfacer su QoS (Hoven *et al.*, 2005; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

Causas de un *handoff* espectral

La necesidad de realizar un SH en CRN se puede presentar por alguna de las siguientes causas (Akyildiz *et al.*, 2009):

El canal objetivo está siendo ocupado por un PU. En estrategias proactivas, donde el canal de respaldo se selecciona con anterioridad y no se verifica su estado de ocupación al momento de realizar el cambio de canal, es posible que el SU lo encuentre ocupado por otro SU o por un PU.

Llegada de un PU al canal ocupado por el SU. Durante la transmisión de datos de un SU en un canal licenciado, un PU puede arribar y exigir la disponibilidad inmediata de dicho canal.

El canal ocupado por el SU se degrada. Aun sin la existencia de un PU, es posible que el SU deba realizar un cambio de canal debido a la degradación de la calidad del canal que está utilizando.

El SU interfiere al PU. Si durante el uso oportunista del canal licenciado por parte del SU se interfiere al PU, es necesario realizar un SH.

Variación del tráfico. Si la cantidad de tráfico en la banda de frecuencia aumenta significativamente es posible que el SU deba realizar un cambio de canal, buscando el balanceo de carga y garantizando mejores niveles de desempeño.

Movimiento del SU. Si el SU se desplaza geográficamente fuera de la zona de cobertura del nodo en un sistema centralizado, es necesario realizar un SH.

Requerimientos de un SH

La realización de un SH puede afectar el desempeño y la QoS de las CRN; por tanto, existen algunos requerimientos al momento de efectuar un SH (E. Ahmed *et al.*, 2016; Van, Prasad, & Niemegeers, 2012):

Velocidad. El retardo de SH debe ser lo suficientemente pequeño para no causar degradación o interrupción durante la comunicación.

Señalización. Es importante minimizar la señalización, ya que un alto volumen de esta puede afectar significativamente el desempeño de la comunicación.

Tasa de *handoff*. Un elevado número de cambios de canal innecesarios afecta directamente el desempeño de la transmisión de datos; por tanto, es necesario minimizar la tasa de *handoff* (Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

Confiabilidad. Minimizar el efecto del *handoff* en la QoS; por ejemplo, en redes móviles la probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas y la probabilidad de caída de llamadas actuales deben ser minimizadas, así como balancear el tráfico entre celdas adyacentes.

Éxito. Los canales y los recursos deben estar disponibles para garantizar un exitoso *handoff* (Kaleem, 2012).

Múltiples criterios de *handoff*. La nueva red de acceso o canal debe ser seleccionada con inteligencia, a partir de múltiples criterios, ya que seleccionar la mejor oportunidad espectral evita múltiples *handoff* (Kaleem, 2012; Kumar *et al.*, 2016).

Fases de un *handoff* espectral

El objetivo fundamental de cualquier modelo de SH es la transición de una frecuencia a otra con la mínima degradación de calidad (Duan & Li, 2011). El SH se desarrolla a partir de tres fases: medición, decisión y ejecución (A. Ahmed *et al.*, 2014).

Medición. En esta fase 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.

Decisión. En esta fase se toma la decisión de *cuándo* y *dónde* realizar el SH, con base en los múltiples criterios y métricas que se hayan seleccionado.

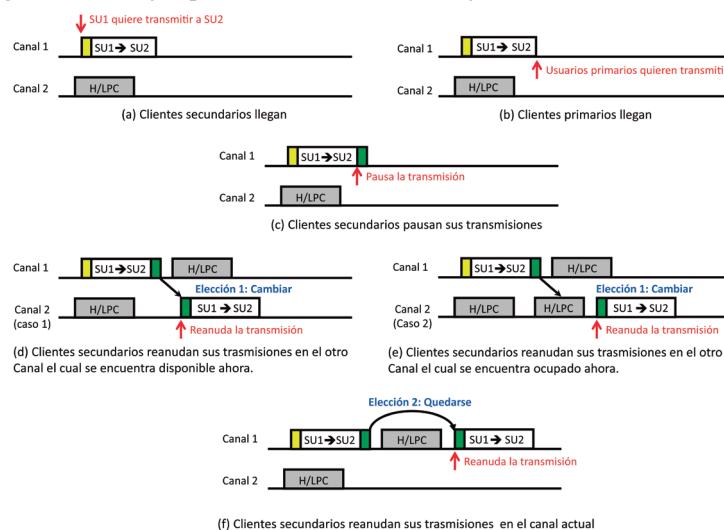
Ejecución. En esta fase se realiza la transferencia de la actual conexión a la nueva, teniendo en cuenta los requerimientos del SH mencionados anteriormente.

Procedimiento de un SH

El procedimiento de un SH consiste en los siguientes cinco pasos descritos en la figura 2.6 (L.-C. Wang & Wang, 2008):

1. Primero, se asume que los usuarios secundarios SU1 y SU2 se comunican en el canal Ch1, como se observa en la figura 2.6(a).
2. Cuando el PU aparece en el canal Ch1, SU1 lo detecta y se prepara para realizar el SH, como se muestra en la figura 2.6 (b).
3. SU1 pausa su comunicación actual dentro de una duración predefinida, como se observa en la figura 2.6 (c). También se notifica a SU2 de la interrupción antes de otro intervalo de tiempo predefinido.
4. Después, SU1 y SU2 retoman la comunicación en el siguiente canal seleccionado, como se muestra en la figura 2.6 (d)-(f).
5. Finalmente, debido a que una trama puede ser interrumpida muchas veces durante el tiempo de transmisión, el SH puede tener que ejecutarse muchas veces también.

Figura 2.6. Un ejemplo de selección de canal bajo un sistema de dos canales¹



Fuente: adaptado de L.-C. Wang & Wang (2008).

1 La notación H/LPC representa la duración de ocupación de los usuarios primario y secundario.

Impacto de la movilidad espectral

La movilidad espectral tiene un impacto significativo en el desempeño de las CRN. De acuerdo con la estrategia de SH que se configure, el desempeño de las CRN puede verse afectado por alguno de los siguientes factores: latencia, *throughput*, confiabilidad, señalización, interferencia al PU, eficiencia energética, BW, SINR, QoS, y VER (Kumar *et al.*, 2016).

Latencia. La magnitud de la latencia o retardo puede aumentar considerablemente con las estrategias de *handoff* reactivas, debido al tiempo de detección de SO empleado.

Throughput. El valor de la tasa de datos efectiva puede ser reducido, debido a la capacidad de canal de la banda de frecuencia seleccionada por la estrategia de SH (Akin & Fidler, 2016).

Confiabilidad. Una inadecuada toma de decisiones por parte de la estrategia de SH puede contribuir a un mayor desbalanceo de la carga de tráfico de datos en la CRN. Esto puede afectar los parámetros de QoS, como la probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas y la probabilidad de caída de llamadas actuales.

Señalización. De acuerdo con la estrategia de SH, la cantidad de información de señalización puede aumentar considerablemente, sobre todo en las estrategias con CCC. La cantidad de información adicional reduce el nivel de la tasa de datos efectiva.

Interferencia PU. Las estrategias de SH reactivas siempre causan interferencia temporal al PU, la cual es proporcional al tiempo de detección de SO empleado por el SU. La decisión de aumentar la potencia de transmisión para incrementar el *throughput*, también aumenta la interferencia ocasionada a los PU o SU en canales de frecuencia adyacentes.

Eficiencia energética. La ejecución de algoritmos muy complejos, el aumento innecesario de la potencia de transmisión, el tiempo de detección prolongado, entre otros factores, contribuyen a la reducción de la eficiencia energética del SU.

BW. La utilización de múltiples canales de frecuencia para la transmisión de un solo SU puede beneficiar el BW de este, pero también puede disminuir el BW potencial de otros SU, si no se cuenta con una métrica de justicia adecuada al nivel de tráfico de la red.

SINR. Una inadecuada toma de decisiones por parte de la estrategia de SH puede afectar la SINR, tanto del SU como del PU. Lo anterior puede ser causado

por una pobre selección de canal, un aumento exagerado en la potencia de transmisión, el modo de transmisión empleado o un mal balanceo de carga.

Calidad de servicio. Una pobre selección del canal de frecuencia por parte de la estrategia de SH puede provocar que aplicaciones sensitivas al retardo tengan unos parámetros de QoS y calidad de la experiencia del usuario (QoE) bajos.

BER. En las comunicaciones de datos la BER es una función de los siguientes parámetros: frecuencia de operación, modulación, potencia de transmisión y tecnología de comunicación, entre otros. La estrategia de SH debe reconfigurar dichos parámetros al momento de realizar un cambio de canal.

Clasificación del SH

Los modelos de SH se pueden clasificar de tres formas diferentes: (1) de acuerdo con el momento en el que se selecciona el canal objetivo y se realiza el cambio de canal, (2) de acuerdo con el tipo de tecnología de la red a la que se hace el cambio de canal y (3) de acuerdo con la forma de conexión a la nueva BS en sistemas centralizados.

Clasificación A

De acuerdo con el momento en el que se selecciona el canal objetivo y se realiza el cambio de canal, se ha determinado la existencia de cuatro tipos de modelos de SH en las CRN: el modelo no SH, el modelo puramente reactivo, el modelo puramente proactivo y el modelo híbrido (tabla 2.1). Cada uno de las anteriores presenta ventajas y desventajas de acuerdo con los parámetros en los que se desarrolle la comunicación (Christian *et al.*, 2012).

Modelo no SH. El SU se mantiene en el canal original y permanece inactivo hasta que el canal vuelve a quedar libre. Después de que el PU deja el canal licenciado, el SU retoma la transmisión de datos. Este modelo causa una alta latencia al SU, ya que el retardo es tan largo como el PU esté activo en el canal correspondiente. Este modelo puede ser adecuado para la transmisión de datos cortos que no sean sensibles al retardo (Kumar *et al.*, 2016; Marinho & Monteiro, 2012).

Modelo reactivo puro. En este caso el SU realiza la detección de espectro y el *handoff* después de la detección del PU. La ventaja radica en que el SU puede obtener exactitud en el canal objetivo; sin embargo, esto produce una larga latencia, debido a lo que tarda la detección de espectro, así como una interferencia temporal al PU, ya que durante dicho tiempo coexistirán los dos en el mismo recurso espectral (Kumar *et al.*, 2016; Marinho & Monteiro, 2012).

Modelo proactivo puro. En este caso el SU realiza la detección de espectro y el *handoff*, antes de la llegada del PU (Marinho & Monteiro, 2012). Algunos de los beneficios de esta estrategia son: (1) decremento del tiempo y de la energía gastada para encontrar un canal disponible; (2) decremento de la tasa de pérdida de la comunicación; y (3) decremento de la interferencia causada a los PU (Duan & Li, 2011). Sin embargo, el problema radica en que el SH proactivo está basado en procesos estocásticos, donde los SU utilizan las observaciones pasadas del canal para predecir la disponibilidad del espectro futuro, lo que podría llevar a tener que hacer muchas conmutaciones de canal innecesarias si el modelo de predicción es imperfecto (Akyildiz *et al.*, 2006; Kumar *et al.*, 2016; Tsipopoulos *et al.*, 2016; Yan Wu, Yang, Liu, & Kwak, 2016).

Modelo híbrido. Aquí se combinan los modelos proactivo y reactivo, aplicando detección espectral proactiva y *handoff*reactivo (Kumar *et al.*, 2016).

Tabla 2.1. Comparación entre los modelos de SH de la primera clasificación

Estrategia	No handoff	Reactivo puro	Proactivo puro	Híbrido
Idea Principal	Parar y esperar	Monitoreo reactivo y acción reactiva	Monitoreo proactivo y acción proactiva	Monitoreo proactivo y acción reactiva
Ventajas	Muy baja interferencia al PU	Precisión en la selección del canal	Muy rápida respuesta y selección del canal inteligente	Respuesta rápida
Desventajas	Muy alta interferencia al SU	Respuesta lenta	Datos de la disponibilidad del canal no actualizados y costo computacional alto	Datos de la disponibilidad del canal no actualizados
Latencia	Alta (impredecible)	Media	Muy baja	Baja
Dependencia	Actividad del PU	Monitoreo del espectro	Canal de respaldo y precisión del modelo de tráfico del PU	Canal de respaldo
Contexto	Red del PU con transmisión de datos cortos	Red del PU general	Red del PU bien modelada	Red del PU general

Fuente: Marinho y Monteiro (2012).

Clasificación B

Con la gran diversidad de tecnologías y sistemas de comunicación inalámbricos se hace indispensable garantizar la movilidad espectral entre redes heterogéneas. De acuerdo con el tipo de tecnología o arquitectura de la red a la cual se hace el cambio de canal, el SH se puede clasificar de tres formas diferentes: *handoff horizontal*, *handoff vertical* y *handoff diagonal* (A. Ahmed *et al.*, 2014; Al-Surmi, Othman, & Mohd Ali, 2012; Balan, Moerman, Sas, & Demeester, 2012; Kassar, Kervella, & Pujolle, 2008; Stevens-Navarro & Wong, 2007).

Handoff horizontal. Ocurre cuando un SU se mueve fuera de la cobertura de una BS a la de otra BS, pero dentro de la misma red de acceso (Van *et al.*, 2012). En el ambiente de redes celulares también se le conoce como *handoff intracelda*. El *handoff horizontal* tradicional toma sus decisiones basado en la evaluación de la medición de la *fuerza de la señal recibida* (RSS) para apoyar las comunicaciones “*always best connected*”. Este tipo de *handoff* es ejecutado cuando el nivel de RSS está por debajo de un umbral específico (Kaleem, 2012).

Handoff vertical. Ocurre cuando un SU se mueve se mueve fuera de la cobertura de una BS a la de otra BS de una red de acceso diferente, con diferente tecnología inalámbrica (Van *et al.*, 2012). En el ambiente de redes celulares también se le conoce como *handoff intercelda*. En un ambiente inalámbrico heterogéneo, un SU debe moverse entre diferentes redes de acceso con funcionalidades y características distintas, por lo que el nivel de RSS no es suficiente para la toma de decisiones inteligentes al momento de realizar un SH, es necesario incluir más criterios y métricas como el retardo, la tasa de datos efectiva, el BW, el patrón de tráfico o la potencia de transmisión. Sin embargo, la inclusión de múltiples criterios incrementa la complejidad en la toma de decisiones y hace que el proceso de *handoff vertical* sea más desafiante (Kaleem, 2012).

Handoff diagonal. Es la combinación del *handoff horizontal* y del *handoff vertical* (A. Ahmed *et al.*, 2014). Ocurre cuando un SU se mueve fuera de la cobertura de una BS a la de otra BS de una red de acceso diferente, pero con igual tecnología inalámbrica.

Clasificación C

Otra clasificación, más común en los sistemas de telefonía celular, es la que depende del número de BS y/o *puntos de acceso* (PA) a los cuales el SU (o PU) está asociado en cualquier momento. De acuerdo con lo anterior, existen dos tipos de *handoff*: fuerte (*hard*) y suave (*soft*) (Yi-Bing & Ai-Chun, 2000).

Handoff fuerte. Este tipo de *handoff*, también conocido como *break before make*, se da cuando al realizar el cambio de canal el SU (o PU) se desconecta de su actual BS antes de conectarse a una nueva, y durante un tiempo no está conectado a ninguna BS. De acuerdo con lo anterior, este tipo de *handoff* solo utiliza un canal, lo que mejora la eficiencia espectral, pero lo hace menos confiable que el *handoff* suave. Este tipo de *handoff* se utiliza en GSM y en general en el *acceso múltiple por división de frecuencia* (FDMA) y en el *acceso múltiple por división de tiempo* (TDMA) cuando se usan diferentes rangos de frecuencias en canales adyacentes para minimizar las interferencias de canal.

Handoff suave. Este tipo de *handoff*, también conocido como *make before break*, se da cuando al realizar el cambio de canal el SU (o PU) se conecta a una nueva BS antes de desconectarse de la actual. De acuerdo con lo anterior, durante el *handoff* suave la comunicación se realiza en paralelo por los dos canales. Así se evita la interrupción del enlace y se ofrece mayor confiabilidad, a pesar del incremento de la complejidad en su implementación. Este tipo de *handoff* se utiliza en el *acceso múltiple por división de código* (CDMA) y en el *acceso múltiple por división de código de banda ancha* (WCDMA).

Tipos de enfoque del *handoff* espectral

Las CRN pueden operar de acuerdo con varios enfoques básicos, cada uno de los cuales presenta ventajas y desventajas con respecto a su enfoque opuesto. En esta sección se estudiarán el enfoque con infraestructura *versus* el enfoque ad-hoc, el enfoque centralizado *versus* el distribuido, el enfoque de asignación multicanal *versus* el de asignación única, inclusión o no del PU, inclusión o no del SU, CCC dedicado o dinámico, segmentación o agrupamiento.

Infraestructura versus ad-hoc

De acuerdo con la arquitectura de la red, las CRN pueden clasificarse en redes basadas en infraestructura o CRAHN (E. Ahmed *et al.*, 2016; Akyildiz *et al.*, 2006). Las CRN basadas en infraestructura tienen una entidad de red central similar a una BS en redes celulares o un PA en las redes inalámbricas de área local. Por otro lado, las CRAHN no tienen ninguna infraestructura, por tanto, un SU se comunica con otro SU a través de una conexión ad-hoc, tanto en bandas espectrales licenciadas como en no licenciadas (Akyildiz *et al.*, 2009).

En las redes con infraestructura la información observada por cada SU alimenta la base de datos de la entidad central, de forma que esta pueda

tomar decisiones inteligentes a fin maximizar los parámetros de comunicación, como el *throughput*, el BW, el SINR y el balanceo de carga, entre otros, y eliminar o minimizar la interferencia hacia los PU (Akyildiz *et al.*, 2009). En el caso de las CRAHN, los SU son responsables de tomar sus propias decisiones con base únicamente en observaciones locales, lo cual les impide realizar un uso eficiente de los recursos de la red entera. Para compensar el caso anterior, los SU pueden hacer uso de esquemas de colaboración, en los cuales cada SU intercambia su información de observación del espectro local, y esto les permite tener un conocimiento aproximado de la red completa (Akyildiz *et al.*, 2009).

Centralizado vs. distribuido

Si las CRN cuentan con infraestructura, pueden operar tanto con un enfoque centralizado como con uno distribuido. En el primero existe una entidad central encargada de coordinar las funciones necesarias para la decisión y asignación del canal de frecuencia durante un SH. Esta entidad central, también conocida como *estación base central* (CBS), cumple además con la función de almacenar y procesar la información del ambiente de radio y del espectro recibida por los SU, periódicamente o por demanda (E. Ahmed *et al.*, 2016; Tragos *et al.*, 2013).

Debido a que la CBS tiene un nivel mucho más elevado de procesamiento y autonomía energética que los SU, también desarrolla funciones de monitoreo del espectro de forma periódica. Esta información, junto a la proporcionada por los SU, actualiza dinámicamente la *base de datos central* (CDB). La CBS procesa periódicamente la información de la CDB y calcula valores estimados de algunos parámetros de interés del espectro, como la AP de los canales, la SINR de los canales, el ETA de los canales y el BW de los canales, entre otros, los cuales permiten tomar decisiones más acertadas para la SA. Lo anterior libera a los SU de la carga computacional requerida para ejecutar un algoritmo robusto de SA.

La principal ventaja en el enfoque centralizado es la observación y el conocimiento global de la red, lo cual permite maximizar el *throughput* de la red, minimizar la interferencia entre los SU, una asignación multicanal justa y, en general, mejorar el nivel de desempeño de la red (Alnwaimi, Arshad, & Moessner, 2011; Byun, Balasingham, & Liang, 2008). Sin embargo, su mayor desventaja es la cantidad de información de señalización que se introduce a la red para coordinar los procedimientos de intercambio de información entre la CBS y los SU. Además, si la CBS llegara a fallar se perdería el control sobre la SA, y ello crearía desequilibrio y un potencial caos en el sistema (Tragos *et al.*, 2013).

En el enfoque distribuido no existe un CBS responsable de coordinar la SA a los SU. Por tanto, estos últimos toman decisiones por ellos mismos o de forma colaborativa con otros SU vecinos, a través del intercambio de información y medidas dentro de un rango determinado (i.e. 2-3 saltos). Lo anterior hace que el enfoque distribuido sea más flexible y más eficiente que el enfoque centralizado, ya que puede adaptarse rápidamente a los posibles cambios o variaciones del ambiente de radio o de la red, porque solamente los SU en el área afectada tendrán que hacer modificaciones e intercambiar información. Otra ventaja significativa del enfoque distribuido es la baja información de señalización requerida, ya que solo los nodos vecinos intercambian información. Entre las desventajas del enfoque distribuido se encuentra que las decisiones tomadas no son óptimas, en razón a que los nodos solo tienen información de sus vecinos y no de la red completa, a lo que se suma el hecho de que es posible que la información intercambiada no sea suficiente (Tragos *et al.*, 2013). La falta de un soporte centralizado impide asimismo obtener información completa de la topología de la red, y esto provoca colisiones entre SU e interferencia al PU (Giupponi & Pérez-Neira, 2008). En conclusión, en lo que respecta a la SA, el enfoque distribuido puede tomar decisiones adecuadas en casos de baja carga de tráfico, pero para los casos contrarios, el enfoque centralizado toma mejores decisiones (Tragos *et al.*, 2013).

Una solución híbrida entre el enfoque centralizado y el distribuido es el enfoque de agrupamiento (*cluster*), el cual intenta eliminar las desventajas de cada uno. La red es dividida en M *clusters*, cada uno con un enrutador principal (*cluster head*). Cada SU envía la información de espectro detectada a su correspondiente *cluster head*, los cuales se encargan de combinar la información completa y generar un vector de SA final. Todos los *cluster head* intercambian su respectivo vector y de esta manera cada uno conoce el estado general de la red. Con la información de completa de la red cada *cluster head* decide qué canal de frecuencia asignar y transmite esta información a todos los demás *cluster head* de la red. Este enfoque es más robusto contra fallas, hace un uso más eficiente del BW disponible, logra una mejor distribución de los usuarios en *clusters* y de la carga en múltiples canales, y reduce la sobrecarga de información de control, ya que los mensajes se intercambian a nivel del *cluster* y no de la red completa (Alsarhan & Agarwal, 2009; T. Chen, Zhang, Maggio, & Chlamtac, 2007; Tragos *et al.*, 2013).

Canal único vs. multicanal

El enfoque de asignación de canal único, como se hace tradicionalmente, consiste en la asignación de una frecuencia central y un BW específico alrededor de esa frecuencia. Lo anterior implica que los canales son contiguos en el espectro.

El caso de la asignación multicanal consiste en la agrupación de varios canales disponibles que no son adyacentes, para formar un solo canal. Este enfoque permite aumentar el BW del SU aprovechando las SO con baja capacidad de canal. Una de las técnicas que permiten el acceso simultáneo a varios canales de frecuencia es *la multiplexación por división de frecuencia ortogonal discontinua* (DOFDM) (D. Chen, Zhang, & Jia, 2008). Lo anterior permite un uso más eficiente del espectro, ya que aprovecha los canales que por sí solos no son adecuados debido a su restringido BW, pero que en conjunto con otros canales similares puede satisfacer los requerimientos de un SU. La asignación multicanal puede incrementar significativamente la capacidad de la red y la tasa de datos de los SU (Dadallage, Yi, & Cai, 2016; Tragos *et al.*, 2013).

La asignación multicanal, sin embargo, también tiene limitaciones, debido a que los transreceptores no pueden agregar canales de frecuencia que se encuentren muy distanciados entre sí. En otras palabras, el *span* de agregación no es ilimitado, ya que generalmente cada transceptor tiene un *span* máximo especificado, por ejemplo, 12MHz. Esto significa que si dos canales están separados más de 12MHz, no pueden unirse en un solo canal. Por tanto, los algoritmos de SA deben evitar crear pequeños canales de frecuencia que posteriormente no puedan agregarse. También es necesario analizar que la utilización de múltiples canales por parte de un solo SU no deje sin SO a otros SU; en consecuencia, el algoritmo de SA debería manejar alguna métrica de justicia para estos casos (Tragos *et al.*, 2013).

Incluir modelos de PU y SU vs. no incluirlos

De acuerdo con algunos trabajos (Akter, Natarajan, & Scoglio, 2008; Y. Chen & Hee-Seok, 2016; Csurgai-Horvath & Bito, 2011; Rahimian *et al.*, 2014; Rodríguez, Ramírez, & Chahuan, 2015; Yan Wu *et al.*, 2016), la precisión y exactitud en el modelado de la actividad de los PU y los SU es relevante para lograr un buen desempeño en las CRN. Un buen modelo de la actividad del PU y del SU permite asignar inteligentemente cada canal de frecuencia disponible, de manera tal que se optimiza el uso del espectro, se maximizan parámetros de comunicación como la tasa de datos, el BW, la SINR y el

balanceo de carga, entre otros, y se elimina o minimiza la interferencia entre PU y SU. Sin embargo, la validez de dichos modelos generalmente está restringida a un determinado tiempo y lugar para los cuales se diseñó.

Una estrategia de SH reactiva provoca interferencia temporal con el PU, debido a que durante el tiempo que tome realizar la movilidad del SU coexistirán los dos en el mismo recurso espectral. Un buen modelo del PU puede evitar o minimizar esta interferencia, a través de una estrategia de SH proactiva (Yan Wu *et al.*, 2016). Sin embargo, el problema radica en que dichos modelos se basan en procesos estocásticos, los cuales utilizan las observaciones pasadas del canal para predecir la disponibilidad del espectro futuro, y ello podría llevar a tener que hacer muchas conmutaciones de canal innecesarias si el modelo de predicción es imperfecto. Pero no solo el modelo de actividad del PU es relevante, Akter *et al.* (2008) proponen un modelo de predicción para el SU, en razón a que en muchas oportunidades, múltiples SU compiten por el mismo recurso de espectro y con ello degradan la QoS. A través de la implementación de un filtro Kalman se logró realizar una estimación significativa del número de SU en el futuro instantáneo.

CCC dedicado vs. CCC dinámico

El CCC, uno de los requerimientos comunes en la SA en CRN, permite la coordinación entre SU para la asignación del canal. Es un canal predefinido para el intercambio de información de señalización, control y espectro entre los SU, el cual puede ser global o local, dependiendo del operador de red (Kumar *et al.*, 2016). A continuación se presentan las ventajas y las desventajas de tener un CCC dedicado a la asignación del canal de frecuencia o dinámico.

En la literatura son más los trabajos de investigación que defienden la necesidad de la existencia de un CCC dedicado (Ding, Melodia, Batalama, Matyjas, & Medley, 2010; W. Kim, Kassler, Di Felice, & Gerla, 2010; Ma, Shen, & Ryu, 2007). El enfoque con CCC dedicado se puede dividir en dos situaciones: (1) cuando el CCC y el canal de datos del SU son el mismo, y (2) cuando el CCC se encuentra en un canal independiente del canal de datos del SU (Akyildiz *et al.*, 2009). Cuando el canal de datos del SU y el CCC son el mismo, su utilización se comparte por períodos fijos, y no es necesario un transceptor adicional, ni se requiere cambiar la frecuencia para recibir o transmitir los mensajes. Sin embargo, cuando sea necesario realizar un SH, el CCC desaparecerá. Aunque este enfoque proporciona una mayor eficiencia espectral al utilizar un solo canal de frecuencia, la cantidad de información del CCC reduce el *throughput* de la transmisión de datos del SU (Akyildiz *et al.*, 2009).

Cuando el canal de datos del SU y el CCC son independientes, el CCC no se ve afectado por la realización de un SH, sin embargo, el costo de tener dos canales implica la necesidad de un transreceptor adicional y un incremento en el retardo. El CCC independiente puede ser global, si es el mismo para todos los SU en una CRN, o local, si se dedica solamente a una pequeña área geográfica. En ambos casos es necesario contar con un algoritmo de asignación de CCC que permita encontrar el canal óptimo del área geográfica de la CRN (Akyildiz *et al.*, 2009). Con respecto al enfoque del CCC dinámico existen muy pocos trabajos (Almasaeid & Kamal, 2010; Kondareddy, Agrawal, & Sivalingam, 2008). Aunque hace un uso más eficiente del espectro, es vulnerable al problema del nodo escondido, que puede llevar a un decremento del nivel de conectividad. Además, una selección dinámica de un CCC puede incrementar el nivel de retardo en la transmisión del SU (Tragos *et al.*, 2013).

Criterios de SH

En la SA existen múltiples criterios que ayudan a tomar decisiones inteligentes. Sin embargo, cuántos y cuáles criterios utilizar, depende del objetivo de cada estrategia de SH. Para realizar un análisis objetivo se analizaron todas las variables que intervienen durante el proceso de SH y que pueden afectar su desempeño. Esto se logró a partir del análisis de cada una de las investigaciones consultadas alrededor del tema de movilidad espectral en CRN (A. Ahmed *et al.*, 2014; Masonta, Mzyece, & Ntlatlapa, 2013; Tragos *et al.*, 2013). Las variables resultantes se clasificaron en tres categorías: criterios de información, criterios de control y criterios de evaluación. Las primeras proporcionan información que puede ayudar a una mejor toma de decisiones por parte del modelo de SH, las segundas son aquellas variables que se pueden manipular por parte del modelo de SH para obtener cambios significativos en las variables objetivo, en tanto que las tercera son aquellas variables que determinan el nivel de desempeño del modelo de SH.

Criterios de información

Estos criterios proporcionan la información necesaria para alimentar los algoritmos de toma de decisiones con base en los criterios de evaluación para la SA a los SU en las CRN. Estos criterios varían de acuerdo con los objetivos de cada esquema de SH.

Calidad de servicio. La QoS es uno de los criterios más relevantes en los algoritmos de toma de decisión para la SA de los SU en las CRN. La QoS permite diferenciar entre aplicaciones sensivas al retardo y aplicaciones

que no lo son, en otras palabras, permite clasificar las aplicaciones en RT y BE. Con esta información el esquema de SH puede tomar la decisión más adecuada en términos de las SO.

Aplicaciones que no son sensibles al retardo pueden ser asignadas a SO con nivel de disponibilidad intermedio a través de estrategias de no SH. Mientras que aplicaciones sensibles al retardo pueden ser asignadas a SO con un nivel alto de disponibilidad, a través de estrategias proactivas que minimicen el valor del retardo global, aquí el *throughput* resulta más relevante que la BER. Lo anterior permite mejorar la eficiencia espectral.

Calidad del enlace. La calidad del enlace es otro criterio importante que normalmente se refleja a través de la BER y la *relación señal a ruido* (SNR), los cuales también afectan la QoS de la red. Esta última a veces se trabaja como *relación señal a interferencia* (SIR) o SINR.

BER. Es el número de bits recibidos que han sido alterados debido al ruido y la interferencia, divididos por el número total de bits transmitidos durante un periodo de tiempo (A. Ahmed *et al.*, 2014). La BER promedio del canal es un parámetro útil para estimar la caracterización del ambiente de radio en las CRN (Masonta *et al.*, 2013). El nivel de BER está relacionado con el nivel de SNR, esto causa que la energía por bit transmitido sea una métrica importante en la estimación del error (Höyhtyä *et al.*, 2008). A mayor SNR menor BER, sin embargo, es importante tener en cuenta que un mayor nivel de SNR generalmente implica un mayor nivel de potencia, lo cual causa mayor interferencia al PU. Por tanto, es necesario estimar un mínimo nivel de SNR que garantice cierto nivel de BER que no perjudique la comunicación (Tragos *et al.*, 2013).

La calidad del enlace de comunicación. En CRN puede variar dinámicamente en el tiempo y en el espacio. Por ello, es importante para el SU monitorizar y analizar periódicamente la calidad del canal que está siendo utilizado; por ejemplo, a través de la SNR. Esta última define la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Es otro parámetro importante que afecta y refleja la QoS de la red. Muchas veces RSS y SINR son consideradas similares, pero RSS está más inclinada a proveer conectividad y SINR a proveer QoS de la red (A. Ahmed *et al.*, 2014).

AP del canal. La disponibilidad de canal es un criterio que busca estimar la probabilidad de que un canal de frecuencia esté disponible. Algunos trabajos lo expresan como ocupación de canal, en cuyo caso se busca estimar la probabilidad de que un canal de frecuencia esté ocupado. Este criterio es

muy relevante en la SA, ya que puede determinar las posibilidades de que una SO esté libre para ser utilizada por un SU. Su valor es proporcional a la media aritmética de las medidas de disponibilidad obtenidas anteriormente por cada canal. Aquí resulta interesante determinar el periodo a partir del cual se debe actualizar el valor promedio de la disponibilidad por canal. Un análisis de la serie de tiempo para esta variable podría estimar un intervalo de confianza para el periodo de actualización. Lo anterior permite lograr una mejor eficiencia de energía, al no tener que correr continuamente el algoritmo de estimación del criterio de disponibilidad de canal (E. Ahmed *et al.*, 2016).

ETA del canal. El tiempo estimado de disponibilidad es un criterio que busca determinar el valor promedio que un canal de frecuencia permanece disponible para un SU o PU. A diferencia del criterio de disponibilidad de canal, donde se determina la probabilidad de encontrar cierto canal libre, en el criterio de tiempo estimado de disponibilidad se estima el tiempo medio durante el cual el canal permanece libre una vez está disponible. Estos dos criterios no son sustitutos sino complementarios, ya que dos canales pueden tener la misma probabilidad de disponibilidad pero con distribuciones de tiempo de disponibilidad distintas. Seleccionar un canal con un tiempo estimado de disponibilidad alto garantiza un menor número de SH. Pla, Vidal, Martinez-Bauset, & Guijarro (2010) proponen un modelo markoviano para determinar la duración de las SO. Una vez se ha modelado el tiempo ocioso del PU, se aplican técnicas de matriz analítica para determinar la duración de las SO para ser ocupadas por los SU. La principal desventaja de esta técnica radica en su complejidad.

Patrón de tráfico del PU y del SU. No hay ninguna garantía de que el canal de frecuencia seleccionado esté disponible durante toda la comunicación, por ello es beneficioso contar con un modelo que estime la actividad del PU en la CRN. En algunos trabajos se asume que se puede conocer el patrón de llegadas del PU, ya que no es aleatorio estadísticamente, debido a que depende del comportamiento humano. De esta forma se puede estimar la AP y la ETA (E. Ahmed *et al.*, 2016; Akyildiz *et al.*, 2009; Christian *et al.*, 2012; Yan Wu *et al.*, 2016).

X. Wang, Wong y Ho (2010) exponen varios trabajos que argumentan que el comportamiento de ocupación de los canales exhibe patrones que pueden ser modelados estadísticamente. Sin embargo, diferentes modelos pueden aplicar a diferentes aplicaciones como voz, video y paquetes de datos generales. Varios modelos asumen que la actividad del PU se puede modelar con interllegadas distribuidas exponencialmente (Chou, Shankar, Kim, & Shin,

2007; H. Kim & Shin, 2008; Lee & Akyildiz, 2008). En Sriram y Whitt (1986) el patrón de tráfico se modela como un proceso de dos estados ON-OFF, nacimiento y muerte, con sus respectivas tasas de nacimiento y muerte. Otros modelan la actividad del PU a partir del tiempo entre arribos de paquetes, la longitud de los paquetes y la cantidad de estos.

Algunos trabajos se esfuerzan en modelar el comportamiento del PU en bandas específicas, a partir de datos experimentales (Pedraza, Forero, & Paez, 2014). Willkomm, Machiraju, Bolot y Wolisz (2008) utilizan medidas reales de una red celular para modelar las características del uso del espectro por parte del PU. El análisis realizado muestra que el modelo de llegadas exponencialmente distribuidas es adecuado para capturar el tiempo de actividad del PU en llamadas no inalámbricas. Mientras que para las llamadas móviles dicho modelo no resulta útil, y es más efectivo el uso de un modelo de caminata aleatoria, aun en condiciones de tráfico alto. Hernández, Salcedo y Pedraza (2009) validan el uso de series de tiempo como los modelos *autorregresivo* (AR), *media móvil* (MA) y *autorregresivo integrado de media móvil* (ARIMA), en el modelamiento y la predicción de tráfico en redes Wi-Fi, y obtienen un alto nivel de precisión en el pronóstico de rango corto. Li y Zekavat (2008) presentan un trabajo sobre la predicción del patrón de tráfico para CRN.

Q. Wei, Farkas, Prehofer, Mendes y Plattner (2006) almacenan la información pasada y presente, de interés para una CRN, en un repositorio, incluyendo la información de localización y tráfico del SU y del PU. Es importante validar la información almacenada para asegurarse de que no es obsoleta. Esta colección de datos debe ser estadísticamente analizada y usada para modelar la actividad del PU en un canal de frecuencia dado (Issariyakul, Pillutla, & Krishnamurthy, 2009). De acuerdo con el aprendizaje maquinal, los SU deberían ser hábiles para recordar las lecciones aprendidas en el pasado y actuar rápidamente en el futuro (Marinho & Monteiro, 2012). Idealmente, el SU debería conocer el patrón de tráfico del PU y seleccionar la estrategia de *handoff* más adecuada. Cuando el patrón de tráfico del PU cambie, SU debería observar el cambio y adaptar una estrategia de *handoff* adecuada (Akyildiz *et al.*, 2009; Christian *et al.*, 2012). Las estrategias de SH futuras deberían considerar un factor de aprendizaje.

Fecha y hora. La utilización del espectro depende del tiempo y del espacio. El criterio de fecha y hora puede ser un buen dato de información para estimar el nivel de tráfico y congestión de la red, a partir de las estadísticas de la historia de información pasada (Hernández *et al.*, 2009; Hernández, Salgado,

& Salcedo, 2013; Issariyakul *et al.*, 2009; Q. Wei *et al.*, 2006; Y. Zhang, Tay, Li, Esseghir, & Gaiti, 2016). Una base de datos de estadísticas pasadas y recientes podría permitir que se estime la disponibilidad y el acceso al espectro con cierto nivel de precisión. Las series de tiempo son una herramienta muy útil en ese sentido (Hernández *et al.*, 2009).

Geolocalización. De acuerdo con la naturaleza de las redes inalámbricas, la disponibilidad de espectro no cambia solamente con el tiempo, sino también con la movilidad espacial (Duan & Li, 2011; Y. Zhang *et al.*, 2016). Conocer la posición exacta de los SU y de los PU es una ventaja en la toma de decisiones para la SA. Esta información puede mejorar las estrategias para evitar la interferencia al PU y reducir la tasa de SH, al determinar una distancia umbral a partir de la cual se deba realizar el cambio de canal. En zonas rurales, debido a la baja demanda de espectro, es posible utilizar un BW más amplio. Este conocimiento puede ser útil para futuras predicciones de SO y la caracterización del ambiente de radiofrecuencia.

Capacidad del canal o BW disponible. Muchos trabajos se enfocan en parámetros como la tasa de datos, el retardo, el nivel de interferencia, la BER o la tasa de SH, los cuales son relevantes para la eficiencia espectral. Sin embargo, la capacidad de canal es otra variable de interés en la SA, ya que algunas aplicaciones requieren un mínimo BW para mantener sus parámetros de BW (Kumar *et al.*, 2016). En los sistemas de *multiplexación por división de frecuencia ortogonal* (OFDM) cada banda espectral tiene un diferente BW que consiste en varias subportadoras (Masonta *et al.*, 2013).

RSS. También conocida como indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) y fuerza relativa de la señal recibida (RRSS), es un factor tradicional e importante para tomar decisiones de SH. Provee información acerca del nivel de potencia que está siendo recibido por la antena, el cual decrece cuando el usuario se aleja de la actual PA de la red (A. Ahmed *et al.*, 2014). Este criterio permite determinar el momento en el cual se hace necesario realizar un cambio de canal.

Costo monetario. Las redes que funcionan sobre bandas de espectro licenciadas proveen ciertos servicios a los usuarios a cambio de un costo monetario. El valor del costo monetario dependerá principalmente del recurso de BW y del tiempo durante el cual se utilizó. Si dos redes proveen la misma QoS entonces la red con el costo más bajo será la preferida por los SU (A. Ahmed *et al.*, 2014). Debido a lo anterior, el valor del costo monetario es una variable de información de interés para el algoritmo de SA.

Preferencias de usuario. Las preferencias de los usuarios pueden ser definidas con base en la red preferida dentro de las disponibles para la ejecución de las aplicaciones. Las preferencias de los usuarios también se pueden definir a partir de las prioridades asignadas a cada aplicación, las cuales pueden ser alta o baja. Generalmente, los usuarios prefieren conexiones con alto BW, bajo costo y amplia cobertura, entre otras (A. Ahmed *et al.*, 2014). La mayoría de los trabajos que analizan las preferencias de los usuarios utilizan funciones de utilidad que permiten describirlas y manipularlas matemáticamente para encontrar óptimos.

Seguridad de la red. La seguridad es uno de los temas más relevantes en la convergencia de redes, debido a que cada red tiene sus propias opciones de seguridad. El proceso de SH requiere proveer seguridad y privacidad contra intercepciones ilegales o ataques de denegación de servicio (A. Ahmed *et al.*, 2014).

Criterios de control

Estos criterios permiten, en cierta medida, adaptar el nivel de desempeño de la transmisión de datos a las variaciones o cambios de las condiciones iniciales del ambiente o la comunicación. La adaptación se materializa a través de la reconfiguración de los parámetros de comunicación como la frecuencia de operación, la potencia de transmisión, la modulación, el esquema de codificación y el BW, entre otros (Delgado & Rodríguez, 2016).

Frecuencia de operación. La frecuencia de operación es uno de los parámetros reconfigurables claves en las CRN. Este permite modificar dinámicamente la frecuencia central de la transmisión de datos, debido al cambio en el ambiente de radiofrecuencia. Weingart, Sicker y Grunwald (2007) proponen un modelo predictivo para seleccionar dinámicamente la configuración adecuada. Dicho modelo de predicción debe ser actualizado continuamente para garantizar una predicción confiable en tiempo real basado en un objetivo determinado, a partir de un conjunto de posibles configuraciones (Masantा *et al.*, 2013).

Existen compromisos entre la frecuencia de operación y algunas medidas de transmisión; si la frecuencia aumenta entonces también aumentan las pérdidas por trayectoria, y si se aumenta la potencia de transmisión para compensar dichas pérdidas, entonces también aumenta la interferencia al PU (Akyildiz *et al.*, 2008).

Potencia de transmisión. El control sobre la potencia de transmisión permite reducir la interferencia co-canal, maximizar la capacidad de la red y minimizar el uso de energía (Z. Han & Liu, 2008). Sin embargo, lograr un efectivo

control de potencia de transmisión es una tarea bastante compleja, debido a los compromisos entre este parámetro y el nivel de interferencia generado al PU. Si se aumenta la potencia de transmisión, mejora la QoS del SU, pero al mismo tiempo aumenta el nivel de interferencia al PU. Si se disminuye la potencia de transmisión, disminuye la interferencia al PU, pero también disminuye la SINR recibida por el SU. La potencia de transmisión se debe seleccionar cuidadosamente para mantenerla por encima de la sensibilidad de los SU y esperar hasta que aparezca un canal disponible que permita aumentarla (Masonta *et al.*, 2013; Tragos *et al.*, 2013).

Modulación y esquema de codificación. El SU debería reconfigurar su esquema de modulación y codificación para adaptarse a los cambios en las condiciones de canal o en los requerimientos del usuario (Akyildiz *et al.*, 2006). Un cambio en el nivel de interferencia puede modificar la SINR del SU y producir un aumento de la BER. Sin embargo, el nivel requerido en la BER se puede mantener si se ajusta el esquema de modulación.

Hong, Kim, Kim y Shin (2008) proponen un esquema de transmisión adaptativa basado en un escenario de transmisión simplificado para CRN. Dicho esquema selecciona adaptativamente la modulación que provee el máximo *throughput* para el SU, de acuerdo con los canales disponibles.

BW (número de canales a asignar). La definición de canal se puede interpretar como una frecuencia central asociada a un determinado BW. Este último se refiere a la amplitud del espectro sobre el cual un transceptor propaga su señal. Dependiendo de las características del ambiente de radio y de la aplicación utilizada, un SU puede comunicarse sobre BW angostos o amplios (Masonta *et al.*, 2013). Para la operación sobre redes heterogéneas es importante que los SU puedan soportar y adaptarse a BW distintos. La adaptación al BW puede ser muy útil en zonas rurales, donde se pueden tolerar tasas de datos bajas a cambio de un mayor alcance o una reducción de la potencia necesaria (Masonta *et al.*, 2013). En el caso de selección de múltiples canales, hay que tener en cuenta que los transceptores no pueden agregar fragmentos de espectro que estén muy lejos entre sí, o sea, que el *span* de agregación de bandas no es infinito (Tragos *et al.*, 2013).

Tecnología de comunicación. La capacidad de reconfigurabilidad de las CRN les debería permitir la interoperabilidad en una gran diversidad de sistemas de tecnologías de comunicación diferentes, tales como GSM, LTE, WiMAX o Wi-Fi, entre otras. En la actualidad existen varias propuestas de estrategias de SH vertical (Ramírez-Pérez & Ramos-R, 2013; Stevens-Nava-

rro, Martínez-Morales, & Pineda-Rico, 2012) para realizar el cambio de canal de frecuencia entre tecnologías de comunicación distintas.

Criterios de evaluación

Calidad de servicio. La QoS comprende varias EM para medir el desempeño del SH en las CRN, tales como el BW de transmisión, el retardo y el *throughput*, entre otras. En cuanto al BW, la estrategia de SH que se ejecute podría estar en la capacidad de realizar una transmisión multicanal, de manera que aumente considerablemente el BW de transmisión y mejore de modo significativo el desempeño de la aplicación ejecutada.

El retardo *end to end*. Es el tiempo total de la entrega de un paquete medido desde la fuente hasta el destino, y tiene en cuenta los diferentes tipos de retardo que se pueden presentar, tales como: detección, ejecución o cambio, entre otros. En el caso del retardo de cambio, es el tiempo que necesita un SU para moverse de una frecuencia a otra. Este retardo puede ser del orden de 10 ms para un cambio de 10 MHz en frecuencias de hasta 3 GHz, y es proporcional a la diferencia entre la frecuencia central actual y la nueva (Tragos *et al.*, 2013). En el caso de los algoritmos de aprendizaje, la velocidad de convergencia es deseable por dos razones: mejor adaptación al ambiente dinámico y menor costo y *overhead* (Y. Xu *et al.*, 2013). Muchos trabajos se enfocan en mejorar o maximizar el *throughput*, ignorando otras medidas de QoS como la distorsión en aplicaciones multimedia (Marinho & Monteiro, 2012). Ferro, Pedraza y Hernández (2011) realizan un trabajo sobre la maximización de *throughput*, sin embargo, considerar solo el *throughput* no es suficiente en aplicaciones sensibles al retardo como *Voz sobre IP* (VoIP) (Tragos *et al.*, 2013).

Suposiciones: la mayoría de modelos asumen que los valores de los criterios son precisos, lo cual no es tan válido, ya que parámetros como el BW disponible, el *jitter* o el retardo, entre otros, no pueden ser estimados o tienen un porcentaje de error (A. Ahmed *et al.*, 2014).

Tasa de SH. El número de SH afecta directamente el desempeño de las transmisiones del SU y puede reducir significativamente el *throughput* promedio del SU. Los SH también se podrían clasificar como exitosos, fallidos o innecesarios. El *handoff* fallido se da cuando una red A inicia el *handoff*, pero la red objetivo B aún no está lista para la solicitud de *handoff* debido a la deficiencia de recursos. La falla se debe a que no hay disponibilidad de canales en la red B (A. Ahmed *et al.*, 2014). Los denominados *handoffs* innecesarios o efecto ping-pong son *handoffs* recurrentes que podrían causar

un consumo extra de los recursos de la red, y que pueden afectar otras funcionalidades de la red (A. Ahmed *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2016; Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016).

Nivel de interferencia al PU/SU. Controlar la interferencia es esencial para lograr un máximo desempeño en redes inalámbricas, ya que la interferencia afecta directamente las capacidades de recepción de los clientes y la BER. La asignación de canal es uno de los mecanismos básicos que controlan la interferencia en redes inalámbricas; por ejemplo, la interferencia entre canales adyacentes (Tragos *et al.*, 2013). Debido a lo anterior, no es recomendable utilizar canales de frecuencia adyacentes por cuestiones de interferencia, pero tampoco muy lejanos. La interferencia afecta tanto al transmisor como al receptor, disminuye la SINR y esto a su vez causa una reducción de la tasa de transmisión; Reduce la utilización de recursos y causa pérdida o retardo de paquetes, entre otras fallas (A. Ahmed *et al.*, 2014). Las soluciones para el SH deberían ser escalables y depender no solo de la carga de tráfico y del comportamiento del usuario, sino también de los niveles de interferencia (Kumar *et al.*, 2016; Steenkiste, Sicker, Minden, & Raychaudhuri, 2009).

Fairness. La transmisión multicanal en redes inalámbricas se utiliza para mejorar la capacidad de canal y maximizar así el *throughput* (Akyildiz *et al.*, 2009; C. Yang, Lou, Fu, Xie, & Yu, 2016). El criterio de maximizar el *throughput* del SU o de la red puede causar un *unfairness* en la distribución del espectro; por ejemplo, en casos donde un SU puede seleccionar múltiples canales y otros ninguno (Lertsinsrubtavee & Malouch, 2016). Para el caso anterior es mejor un enfoque centralizado ya que ayuda a lograr el *fairness* mucho mejor. Para ser más justos se podrían considerar grupos separados de SU de acuerdo con sus requerimientos de QoS o usar prioridades para los usuarios con diferente QoS. Otra opción es enfocarse en maximizar el mínimo BW promedio por flujo (Tragos *et al.*, 2013). De acuerdo con lo anterior, existe un *trade off* entre el *throughput* y el *fairness*.

Eficiencia espectral. La eficiencia espectral está dada por la razón entre el BW del espectro utilizado y la tasa de datos de transmisión efectiva (MHz/Mbps); en otras palabras, cuántos bits caben en un Hertz. La detección de espectro disminuye la eficiencia espectral, por tanto, es necesario minimizar el tiempo de detección. La velocidad de detección y la exactitud de detección son dos factores importantes en la detección de espectro para una movilidad espectral eficiente. De hecho, existe un *trade off* entre las dos.

Eficiencia energética. En CRAHN la eficiencia de energía llega a ser la mayor restricción, debido a los limitados recursos de los nodos de CR. La frecuente actualización de la información espectral y la detección de espectro utilizan una potencia significativa (Akyildiz *et al.*, 2009). Dispositivos con restricciones de energía necesitan estrategias reactivas (Akyildiz *et al.*, 2009). Hoy en día todos los trabajos transforman el problema de maximización de la eficiencia de energía en un problema de minimización de la potencia de transmisión del SU (Kumar *et al.*, 2016; Tragos *et al.*, 2013).

Desafíos y futuras investigaciones en movilidad espectral

En la movilidad espectral hay al menos diez tareas, dentro de las cuales hay retos por solucionar; estas se presentan a continuación.

Detección de PU

La velocidad de detección y la exactitud de detección, son dos factores importantes en la detección de espectro para una movilidad espectral eficiente. De hecho, existe una compensación entre las dos (Christian *et al.*, 2012).

Para incrementar la velocidad y la exactitud en la detección, los nodos de CR pueden seleccionar otro nodo de CR ocioso, como socio, para desempeñar una detección espectral cooperativa (Christian *et al.*, 2012).

Decisión de SH

Define en qué momento se debe realizar el SH. En la actualidad existen varios modelos que permiten tomar esta decisión, algunos de ellos son mencionados en la tercera sección de este capítulo: “Técnicas y Algoritmos para la SA”.

Caracterización del canal

Las características de los canales de frecuencia en las CRN varían tanto espacial como temporalmente. Las SO deben ser caracterizadas en términos de la variación temporal del ambiente de radio y los parámetros del espectro, tales como frecuencia de operación y BW, para realizar una adecuada selección de estas (E. Ahmed *et al.*, 2016).

Selección de canal objetivo

Encontrar un canal aceptable sobre el cual un SU pueda continuar su sesión de transmisión de datos es el asunto más apremiante en movilidad espectral (Christian *et al.*, 2012).

La selección del canal depende de muchos factores, tales como (Christian *et al.*, 2012):

- Capacidad de canal
- Disponibilidad del canal durante el SH
- Probabilidad de que el canal siga libre en el futuro

Una pobre selección de canal puede causar múltiples SH, con lo cual se degrada el desempeño de todo el conjunto. El enfoque más común para la selección de canal es usar una BCL (Christian *et al.*, 2012).

Reducción de la tasa de SH

La tasa de SH tiene un impacto negativo en el desempeño de la transmisión de datos en las CRN, en términos de la latencia de SH y mantenimiento del enlace. Los esquemas de SH deberían eliminar los frecuentes e innecesarios SH (Kumar *et al.*, 2016).

ETA

La duración de tiempo que el canal del PU permanece disponible también influye en las comunicaciones de los SU. Conocer el ETA de la SO proporciona una ventaja significativa para el SU, por tanto, es importante poder conocer el patrón de comportamiento del PU a partir de modelos de predicción (E. Ahmed *et al.*, 2016).

Transmisión multicanal

En algunos casos el número de SO es significativamente mayor que la demanda por parte de los SU. Esto permite que se asignen varias SO a un mismo SU que requiera un mayor BW debido al tipo de aplicación que se encuentra ejecutando. Sin embargo, es importante conservar un nivel de equidad que permita a los demás SU que aparezcan posteriormente, encontrar SO sobre las cuales poder realizar su transmisión de datos (E. Ahmed *et al.*, 2016; Dabdallage *et al.*, 2016).

Eliminación de interferencia

El uso oportunista de bandas licenciadas por parte del SU puede producir interferencia al PU, por tanto, deberían existir modelos de SH con mecanismos que eviten dicha interferencia, o por lo menos la reduzcan significativamente (Kumar *et al.*, 2016).

SA proactiva

La SA proactiva reduce de manera considerable el retardo de *handoff* y la interferencia entre el PU y SU, y también el nivel de consumo de energía, ya que evita realizar una detección espectral al momento de realizar el *handoff*. Una SA proactiva inteligente también permite reducir la tasa de *handoff* (Tsiropoulos *et al.*, 2016).

Modelo de SH adaptativo e inteligente

El modelo de SH es considerado el tema principal en la movilidad espectral. Los tipos de modelos de SH dependen de: (a) si la detección de espectro se realiza antes o después del *handoff*, (b) si la decisión de *handoff* se realiza antes o después del *handoff* (Christian *et al.*, 2012)). Hoy en día se hace necesario contar con modelos de SH adaptativos que permitan reconfigurar dinámicamente su comportamiento, de manera que se modifique el BW, la SO, la técnica de modulación y la potencia de transmisión, entre otras, para que se desempeñen adecuadamente en un ambiente de radio real (Kumar *et al.*, 2016; Tsiropoulos *et al.*, 2016).

Técnicas y algoritmos para la SA

Dentro del proceso de SH la SA en las CRN es un aspecto clave para reducir la latencia, incrementar la tasa de datos, aumentar el BW, mejorar la capacidad y la cobertura y optimizar el uso del espectro, garantizando así la QoS necesaria para aplicaciones de RT y BE.

Seleccionar un canal con las características requeridas sobre el cual un SU pueda continuar su sesión de transmisión de datos es un asunto apremiante en las CRN (Christian *et al.*, 2012). Una pobre selección de canal puede causar múltiples SH y degradar el desempeño de todo el conjunto (Christian *et al.*, 2012; Hernández, Salgado, López, & Rodríguez-Colina, 2015; J. Hernández-Guillén, Rodríguez-Colina, Marcelín-Jiménez, & Chalke, 2012).

Esta sección tiene por objetivo presentar una revisión de los algoritmos de SA en CRN, describiendo los más relevantes y su clasificación de acuerdo con la literatura actual. Esta revisión se realizó a partir del análisis de publicaciones recientes de corriente principal, con sus respectivas citas, tratando de proveer un marco referencial completo de la literatura actual sobre los algoritmos de SA en CRN. Los principales resultados determinan la importancia de una SA inteligente, teniendo en cuenta la carga de tráfico, el comportamiento del usuario, los niveles de interferencia, la caracterización del espectro, el tipo de aplicación y la necesidad de múltiples canales de frecuencia. Como

conclusión, es importante diseñar algoritmos adaptativos que permitan hacer un uso eficiente de las porciones disponibles del espectro licenciado.

Una vez que todas las SO se detectan y se caracterizan, se debe seleccionar la SO que más se acerca a los requerimientos para la transmisión, teniendo en cuenta los requisitos de QoS y las características del espectro. Por tanto, se deben conocer los requisitos de QoS del usuario. Con base en las necesidades de los usuarios se puede determinar: la velocidad de datos, la BER aceptable, el retardo máximo permitido, el modo de transmisión y el BW para la transmisión. Entonces, puede ser elegido el conjunto de bandas del espectro apropiado, de acuerdo con las reglas de decisión y los algoritmos que evalúan las posibles soluciones. Zheng y Cao (2005) presentan cinco reglas para asignar espectro que se centran en la equidad y el costo de la comunicación. Sin embargo, este método asume que todos los canales tienen una capacidad de rendimiento similar (Akyildiz *et al.*, 2006). Lo ideal es ajustarse a los requerimientos que imponen las distintas aplicaciones. Kanodia, Sabharwal, y Knightly (2004) proponen un protocolo de saltos de canal de frecuencia oportunista para la búsqueda de un canal de mejor calidad, basado en la SNR.

En la figura 2.7 se propone una clasificación de los algoritmos para la selección de las SO. Esta clasificación agrupa los algoritmos de SA en seis clases: (1) *toma de decisiones multicriterio* (MCDM), (2) algoritmos inteligentes, (3) técnicas de aprendizaje, (4) funciones de decisión, (5) contexto y (6) estadísticos. A continuación se describen los algoritmos más relevantes dentro de cada clase de la clasificación propuesta.

Figura 2.7. Clasificación de los algoritmos para la asignación de espectro



Fuente: elaboración propia.

Algoritmo *Random Allocation* (RA)

Es la forma más básica para la SA y la que peor desempeño provee, por esta razón no se encuentra en la clasificación propuesta de la figura 2.7. Sin embargo, se ha convertido en el algoritmo más utilizado para contrastar los resultados obtenidos por otros algoritmos de SA propuestos en la literatura actual. El algoritmo *Random Allocation* (RA) selecciona de forma completamente aleatoria las SO, por lo cual es utilizado como punto de referencia y comparación para la evaluación de algoritmos propuestos.

Algoritmos MCDM

El problema de SA tiene múltiples variables que analizar para seleccionar una sola SO, por tanto, los algoritmos basados en MCDM son ampliamente usados en este tipo de problemas, donde la relación entre los DC se mide a través de pesos que son ajustados de acuerdo con los requerimientos del diseñador. Al cabo de un cierto número de iteraciones el algoritmo determinará la mejor solución (Hernández, Giral, & Páez, 2015a).

Simple Additive Weighting (SAW)

Este algoritmo desarrolla una matriz de decisión conformada por criterios y alternativas (oportunidades espectrales). Para cada intersección de la matriz, el algoritmo asigna un peso de acuerdo con los criterios del diseñador. Esto permite establecer una calificación para cada una de las SO evaluadas, y obtener así un *ranking* de todas las alternativas. La SO con mayor puntaje será la seleccionada (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010).

La alternativa A_i está definida por la ecuación (2.1) (Ramírez-Pérez & Ramos-R, 2013).

$$u_i = \sum_{j=1}^M \omega_j r_{i,j} \quad \forall i \in 1, \dots, N \quad (2.1)$$

Donde $r_{i,j}$ pertenece a la matriz y la suma de los pesos es 1.

Los pasos para desarrollar este algoritmo son: (1) identificar los objetivos y alternativas; (2) evaluar las alternativas; (3) determinar los pesos de cada combinación; (4) adicionar los valores agregados según las preferencias; y (5) analizar la sensibilidad (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Hübler, 2007; Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010; Ramírez-Pérez & Ramos-R, 2013).

Hernández, Giral y Santa (2015) utilizan SAW para seleccionar la mejor SO en una banda de frecuencia GSM, evaluando la cantidad de *handoff realizados y comparando los resultados con otros dos algoritmos de SA*.

Multiplicative Exponent Weighting (MEW)

MEW es otro algoritmo MCDM, muy similar a SAW. La principal diferencia es que en MEW en lugar de suma hay multiplicación. Fue propuesto para SA por Stevens-Navarro y Wong (2006). En MEW la calificación de las SO es determinada por el producto de los pesos de los DC. El puntaje Si de la SO i es determinado por la ecuación (2.2) (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Hernández, Giral, & Santa, 2015; Hübner, 2007; Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010; Ramírez-Pérez & Ramos-R, 2013; Stevens-Navarro *et al.*, 2012; Stevens-Navarro & Wong, 2006).

$$S_i = \prod_{j \in N} x_{ij}^{w_j} \quad (2.2)$$

Donde X_{ij} denota el criterio j de la SO i, w_j denota el peso del criterio j, y $\sum_{j=1}^N w_j = 1$. Es necesario tener en cuenta que en (2.2) w_j es una potencia positiva para métrica de beneficio y negativa para una métrica de costo. Debido a que no se requiere la normalización de parámetros (es opcional), el puntaje de la SO, asignado por MEW, no tiene una cota superior (Yoon & Hwang, 1995).

Hernández, Giral, & Páez (2015b) utilizan MEW para seleccionar la mejor SO en una banda de frecuencia de comunicaciones móviles, evaluando el nivel de *throughput* y BW, y comparando los resultados con otros dos algoritmos de SA.

Elimination and Choice Expressing the Reality (ELECTRE)

ELECTRE es un MCDM que realiza comparaciones entre parejas de alternativas utilizando cada uno de los criterios por separado para establecer relaciones entre las alternativas (Valenta *et al.*, 2010). Christian *et al.* (2012) lo propusieron inicialmente para la SA. En general, utiliza un vector de criterios de referencia para ajustar los valores iniciales de los criterios de las alternativas antes de compararlas. El valor de cada uno de los criterios en la matriz de decisión se compara con el correspondiente valor de criterio de referencia X_j^{ref} . La diferencia entre los dos valores se calcula de acuerdo con la ecuación (2.3) (Stevens-Navarro *et al.*, 2012).

$$r_{ij} = |x_{ij} - x_j^{ref}| \quad (2.3)$$

Con el objetivo de comparar las alternativas espectrales, se introducen los conceptos de concordancia y discordancia, que son medidas de satisfacción e insatisfacción del algoritmo cuando una alternativa es comparada con otra. La alternativa con el valor más alto de concordancia neta y el valor más bajo de discordancia neta será la preferida (Stevens-Navarro *et al.*, 2012).

Grey Relational Analysis (GRA)

“El objetivo de este algoritmo es establecer las redes candidatas y seleccionar las que tengan más alta puntuación de acuerdo con unos parámetros definidos. Para lograr esto se establecen relaciones de Grey entre elementos de dos series: la primera contiene las mejores cualidades, mientras que la otra contiene entidades comparativas. Acá es parte importante el coeficiente de Grey, que se usa para describir las relaciones entre las series calculado a partir del nivel de similitud y variabilidad” (Hernández, Pedraza & Martínez, 2016) (Hernández, Giral, & Páez, 2015b; Hernández, Giral, & Santa, 2015; Hernández, Páez, & Giral, 2015; Hübner, 2007; Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010; Ramírez-Pérez & Ramos-R, 2013; Stevens-Navarro *et al.*, 2012; Stevens-Navarro & Wong, 2006).

“En GRA primero se genera el vector de referencia X_0 , de la matriz X , a través de la escogencia de los valores mínimos para los costos y los valores máximos para los criterios de beneficios. Después, la secuencia de datos debe ser normalizada para X de acuerdo con tres situaciones: más grande el mejor, más pequeño el mejor o nominal el mejor. Luego, se calcula el coeficiente relacional de Grey”, como lo describe la ecuación (2.4) (Hernández, Páez, & Giral, 2015).

$$\gamma(x_0(i), x_j(i)) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{0,j}(i) + \zeta\Delta_{max}} \quad (2.4)$$

Donde,

$$\Delta_{0,j} = |x_0(i) - x_j(i)|$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in N} \left\{ \min_{i \in M} \{|x_0(i) - x_j(i)|\} \right\}$$

Donde el coeficiente ζ que pertenece $[0,1]$ compensa el efecto de Δ_{\max} de 0,5, generalmente.

Por último, se calcula el grado relacional de Grey para cada una de las diferentes series de datos, como lo describe la ecuación (2.5), donde $\Gamma(x_o, x_i)$ representa el grado relacional de Grey para las j-ésimas alternativas.

$$\Gamma(x_o, x_j) = \sum_{i=1}^M \omega_i \gamma(x_o(i), x_j(i)) \quad (2.5)$$

Donde ω_i es el peso de la importancia de los i-ésimos criterios.

Hernández, Páez y Giral (2015) utilizan GRA para seleccionar la SO en el enlace ascendente de la banda de frecuencia GSM, evaluando el nivel de bloqueos de *handoff* y comparando los resultados con otros dos algoritmos de SA.

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

El desarrollo de este algoritmo se basa en la determinación de dos componentes: la solución ideal del sistema y la solución que no puede ser aceptada en ninguna situación. Para lograrlo, es necesario comparar los resultados obtenidos para determinar qué solución es la más cercana posible a la ideal, y cual la más lejana (la cual no será aceptada). Dicha métrica se obtiene a partir de la distancia euclíadiana entre los criterios y los pesos (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Ramírez Pérez & Ramos Ramos, 2010).

El procedimiento del algoritmo TOPSIS esta descrito en Hernández, Giral y Páez (2015a), Ramírez Pérez y Ramos Ramos (2010) y Ramírez-Pérez y Ramos-R (2013). Inicialmente se construye la matriz de decisión X y se normaliza usando el método de raíz cuadrada (ecuación (2.6)).

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{11} & \dots & \tilde{x}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{N1} & \dots & \tilde{x}_{NM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 \tilde{x}_{11} & \dots & \omega_M \tilde{x}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_1 \tilde{x}_{N1} & \dots & \omega_M \tilde{x}_{NM} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Donde ω_i es el peso asignado al criterio i, y la suma de estos debe ser 1.

Luego se determina la solución ideal y la peor solución, como lo describen las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$A^+ = \left\{ \left(\max \tilde{x}_{ij} | j \in X^+ \right), \left(\min \tilde{x}_{ij} | j \in X^- \right) \right\} = \left\{ \tilde{x}_1^+, \dots, \tilde{x}_M^+ \right\} \quad (2.7)$$

$$A^- = \left\{ \left(\min_{j \in X^+} \tilde{\chi}_{ij} \right), \left(\max_{j \in X^-} \tilde{\chi}_{ij} \right) \right\} = \left\{ \tilde{\chi}_1^-, \dots, \tilde{\chi}_M^- \right\} \quad (2.8)$$

Donde $i = 1, \dots, N$, y X^+ y X^- son el conjunto de beneficios y costos, respectivamente.

Posteriormente, para cada alternativa se calcula la distancia euclíadiana D , como se observa en las ecuaciones (2.9) y (2.10).

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^M (\tilde{\chi}_{ij} - \tilde{\chi}_j^+)^2} \quad i = 1, \dots, N \quad (2.9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^M (\tilde{\chi}_{ij} - \tilde{\chi}_j^-)^2} \quad i = 1, \dots, N \quad (2.10)$$

Finalmente, las alternativas son organizadas en orden descendente, de acuerdo con el índice de preferencia dado por la ecuación (2.11).

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.11)$$

Hernández, Vasquez y Páez (2015) utilizan TOPSIS para seleccionar la mejor SO, a efectos de lo cual evalúan el nivel de interferencia por canal adyacente y el número promedio de *handoff* realizados. Los resultados son comparados con otro algoritmo y sus respectivas versiones, al combinarlos con tres algoritmos de predicción basados en series de tiempo.

Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR)

“El método VIKOR asume que cada alternativa es evaluada de acuerdo con cada función de criterio, y la clasificación puede ser desarrollada a través de la comparación de las medidas que estén más cercanas a la alternativa ideal” (Hernández, Pedraza & Martínez, 2016) (Hernández, Páez, & Giral, 2015; Hernández, Vasquez, *et al.*, 2015; Tanino, Tanaka, & Inuiguchi, 2003). VIKOR fue desarrollado para lograr la optimización de sistemas complejos con múltiples criterios, por tanto, es útil para determinar el compromiso en una lista de *ranking*, aun en presencia de criterios en conflicto, lo que lo hace

un algoritmo adecuado para la toma de decisiones en la SA (Gallardo-Medina, Pineda-Rico, & Stevens-Navarro, 2009).

El algoritmo VIKOR sigue los pasos descritos en Hernández, Giral y Páez (2015b), Hernández, Páez y Giral (2015), Ramírez Pérez y Ramos Ramos (2010) y Stevens-Navarro *et al.* (2012).

Para cada parámetro $j = 1, 2, 3, \dots, N$, se determina el mejor y el peor valor, dados por las ecuaciones (2.12) y (2.13).

$$F_j^+ = \left\{ \left(\max_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_b \right), \left(\min_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_c \right) \right\} \quad (2.12)$$

$$F_j^- = \left\{ \left(\min_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_b \right), \left(\max_{i \in M} x_{ij} \mid j \in N_c \right) \right\} \quad (2.13)$$

Donde N_b , que pertenece a N , es el conjunto de parámetros de beneficios, y N_c , que pertenece a N , es el conjunto de parámetros de costos.

Luego se calculan los valores de S_i y R_i para $i = 1, 2, 3, \dots, M$, como lo describen las ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$S_i = \sum_{j \in N} w_j \frac{(F_j^+ - x_{ij})}{(F_j^+ - F_j^-)} \quad (2.14)$$

$$R_i = \max_{j \in N} \left[w_j \frac{(F_j^+ - x_{ij})}{(F_j^+ - F_j^-)} \right] \quad (2.15)$$

Donde w_j es la importancia del peso del parámetro j .

Posteriormente se calculan los valores de Q_i para $i = 1, 2, 3, \dots, M$, dados por la ecuación (2.16).

$$Q_i = \gamma \left(\frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1 - \gamma) \left(\frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right) \quad (2.16)$$

Dónde, $S^+ = \min_{i \in M} S_i$, $S^- = \max_{i \in M} S_i$, $S^+ = \min_{i \in M} S_i$, $S^- = \max_{i \in M} S_i$, $R^+ = \min_{i \in M} R_i$, $R^- = \max_{i \in M} R_i$, y $0 \leq \gamma \leq 1$.

Dados los valores de Q para todos los i pertenecientes a M , las SO candidatas se clasifican de mayor a menor. Finalmente, la SO seleccionada está dada por el Q óptimo, como lo describe la ecuación (2.17).

$$A_{VIK}^* = \arg \min_{i \in M} Q_i^* \quad (2.17)$$

Hernández, Páez y Giral (2015) utilizan VIKOR para seleccionar la mejor SO en el enlace ascendente de la banda de frecuencia GSM, evaluando el nivel de bloqueos de *handoff* y comparando los resultados con otros dos algoritmos de SA.

Analytical Hierarchical Process (AHP)

AHP se basa en comparaciones sobre la importancia entre los criterios de decisión escogidos para la selección de una alternativa, la cual es más una medida relativa que un valor absoluto (Saaty, 1990).

En la metodología de diseño del algoritmo AHP el primer paso es definir el problema, descomponiéndolo a su vez en objetivo, criterios y alternativas. El objetivo es la decisión que se ha de tomar, que para el presente trabajo corresponde a la selección de la mejor SO. Los criterios son los factores que afectan la preferencia de una alternativa. Las alternativas son todas las SO, de las cuales hay que escoger solo una.

El segundo paso es la construcción de la jerarquía de acuerdo con la definición del problema. El tercer paso es la realización de las matrices de juicios, las cuales corresponden a evaluaciones comparativas que definen el nivel de importancia relativa entre cada combinación posible de parejas de criterios (véase ecuación (2.18)).

$$A = [a_{ij}]_{nxn} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donde $i = j = 1, 2, \dots, n$, corresponden al número de criterios.

En el cuarto paso se procede a calcular los pesos normalizados para cada criterio, como lo describe la ecuación (2.19) (Hernández, Giral, & Páez, 2015a).

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_n] \text{ con } r_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j} \quad (2.19)$$

Donde r es el vector de valores propios, r_1, r_2, \dots, r_n es el valor de los pesos de cada subcriterio, V_i es la media geométrica de la fila i , y V_j es la media geométrica de la columna j .

Finalmente, el quinto paso evalúa la validez del algoritmo AHP a través del índice de consistencia, como se muestra en la ecuación (2.20) (Miranda, 2001). De acuerdo con Saaty (1990), si el índice de consistencia es menor que 0,1, el desarrollo del algoritmo es satisfactorio.

$$CI = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n \left(\ln a_{ij} - \ln \frac{v_i}{v_j} \right)^2}}{\frac{(n-1) \times (n-2)}{2}} \quad (2.20)$$

Donde CI es el índice de consistencia, n el número de subcriterios y a_{ij} es el valor del elemento de la fila i y columna j .

Hernández, Giral y Páez (2015^a) utilizan AHP para seleccionar la mejor SO en la banda de frecuencia GSM, calculando el desempeño del algoritmo con base en cinco EM y comparando los resultados con otros cinco algoritmos de SA.

Algoritmos inteligentes

La inteligencia artificial tiene como objetivo hacer que las máquinas realicen tareas de una manera similar a un experto. La máquina inteligente percibirá la toma de decisiones y de esta manera maximizará su propia utilidad (Woods, 1986). De tal manera, tendrá que prever los principales desafíos, como la deducción, el razonamiento o la representación de las problemáticas, para finalmente dar solución a los problemas como fuente de entradas principales de estudio (Abbas, Nasser, & Ahmad, 2015).

En relación con la CR, los principales retos para las subáreas de la inteligencia artificial son: la detección de la frecuencia disponible de radio, la calidad del canal de comunicación, el reconocimiento, la predicción y la anticipación en la toma de decisiones y, por último, pero no menos importante, la decisión sobre la asignación de recursos para el ajuste de errores de transmisión y recepción de datos (Abbas *et al.*, 2015).

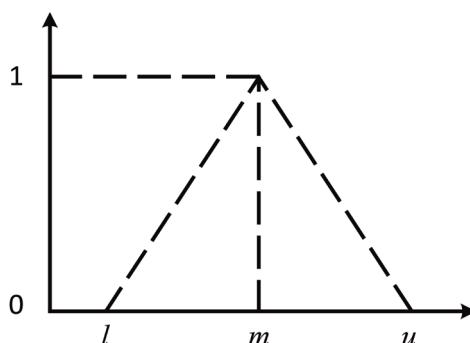
Lógica difusa

La lógica difusa se basa en la teoría de conjuntos difusos, la cual fue propuesta por Zadeh (1965). Un conjunto difuso es definido por una función de **membresía** que mapea elementos a grados de **membresía** dentro de un cierto intervalo, el cual usualmente es $[0,1]$. Si el valor es cero, el elemento no pertenece al conjunto. Si por el contrario es uno, el elemento pertenece completamente al conjunto, y si el valor es una cantidad intermedia, el elemento tiene cierto grado de pertenencia al conjunto (Patil & Kant, 2014). Los números difusos triangulares (TFN) son ampliamente usados como funciones de **membresía** debido a su eficiencia computacional.

Los TFN pueden ser denotados como (l,m,u) , donde los parámetros l , m y u representan el límite más bajo, el valor modal y el límite más alto, respectivamente, como se observa en la ecuación (2.21) y en la figura 2.8.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < l, \\ (x-1)/(m-1), & l \leq x \leq m, \\ (u-x)/(u-m), & m < x \leq u, \\ 0, & x > u, \end{cases} \quad (2.20)$$

Figura 2.8. Número difuso triangular



Fuente: adaptado de Cho y Lee (2013).

La lógica difusa es una herramienta particularmente apropiada para tomar decisiones en situaciones donde las entradas disponibles son en general inciertas e imprecisas o cualitativamente interpretadas. La lógica difusa también puede transformar información cualitativa y heterogénea en valores de membresía homogéneos, los cuales pueden ser procesados a través de un conjunto de reglas de inferencia difusa apropiadas (Giupponi & Pérez-Neira, 2008).

La lógica difusa resulta ser una posición relativa desde el observador principal, sin embargo, las conclusiones de la técnica están respaldadas por métricas iniciales que describen el conjunto de valores admisibles de una muestra. De tal manera, la lógica difusa, aunque con una tasa de estudio aleatoria, permite obtener valores diferentes a los supuestos de verdadero o falso (Gavrilovska, Atanasovski, Macaluso, & Dasilva, 2013).

La lógica difusa proporciona al sistema razonamiento aproximado mediante conjuntos de reglas, con la capacidad de obtener condiciones de incertidumbre a través de la predicción de consecuencias, además de la capacidad de adaptarse a nuevas situaciones (Abbas *et al.*, 2015; Dadios, 2012; Gavrilovska *et al.*, 2013).

Diferentes investigaciones (Abbas *et al.*, 2015; Hernández, Salgado, López, *et al.*, 2015; Matinnikko, Del-Ser, Rauma, & Mustonen, 2013) han aplicado la teoría de lógica difusa en la CR para resolver los problemas en función de la asignación del BW, tras estudiar de antemano la interferencia y la administración de la energía como métodos de evaluación en la correcta SA. No obstante, diferentes resultados de estudios han detallado tópicos como la inferencia difusa centralizada, que asigna los BW correspondientes a la intensidad de tráfico y la prioridad del servicio. Así pues, esta última detalla cómo los SU tienen que presentar solicitudes de BW al administrador primario de la red (Abbas *et al.*, 2015). Del mismo modo, el administrador analiza el tráfico desde la cola y verifica los retardos producidos por la demora en la transmisión de paquetes. En otras palabras, se determina la latencia para el acceso a SU (Abbas *et al.*, 2015).

Algoritmos genéticos

Su principal campo de acción se encuentra inmerso en la optimización y la búsqueda de soluciones, inspirado en la evolución genética y la selección natural de las especies por naturaleza (Goldberg & Holland, 1988). Los algoritmos evolutivos hacen parte de las ciencias de la computación y su principal enfoque está determinado en la inteligencia artificial, siguiendo la terminología de la teoría de la evolución. Así pues, es común encontrar

definiciones de los cromosomas y funciones de aptitud como descriptores de un algoritmo genético, donde los cromosomas son representaciones abstractas de las soluciones candidatas y la función de aptitud se encuentra estrechamente relacionada con el objetivo del algoritmo para los procesos de optimización (He *et al.*, 2010).

La ventaja de utilizar algoritmos genéticos para solucionar el problema de optimización de la SA en CR es que estos pueden manejar restricciones y objetivos de forma arbitraria; por ejemplo, las soluciones ineficientes son simplemente descartadas por el algoritmo. Del-Ser, Matinmikko, Gil-López y Mustonen (2010) utilizan la técnica de *búsqueda de armonía* para encontrar la asignación de canal óptima. El algoritmo genético construye un vector de asignación de canales (llamados armonías); inicialmente se realizan combinaciones y mutaciones de forma inteligente, y, posteriormente, en la evaluación se almacenan las mejores armonías (Tragos *et al.*, 2013).

Sistemas multiagente

Los *sistemas multiagente* (MAS) se consideran una entidad inteligente y consciente del entorno que es capaz de actuar hábilmente y genera comunicación de forma independiente. Los MAS están relacionados con el ambiente, los objetivos, otros agentes y las diferentes relaciones entre esas entidades, por lo que son rápidos, confiables y flexibles (Abbas *et al.*, 2015; Ferber, 1999; Wooldridge, 2009).

Trigui, Esseghir y Merghem-Boulahia (2012) introdujeron un concepto novedoso para dirigir el “espectro de transición” en CR, permitiendo a los terminales cambiar a una banda espectral que ofrezca mejores condiciones mediante una negociación usando MAS. Mir, Merghem-Boulahia, Esseghir y Gaïti (2011) usaron MAS para compartir dinámicamente el espectro en CR. De acuerdo con las necesidades de SU, los agentes SU cooperan y se comunican con los agentes PU para compartir el espectro.

Colonia artificial de abejas

La *colonia artificial de abejas* (ABC) está compuesta por tres grupos: *abejas empleadas*, *abejas exploradoras* y *abejas observadoras*. El objetivo es determinar las ubicaciones de las mejores fuentes de alimento, para ello las abejas empleadas buscarán las fuentes de alimento, y si la cantidad de néctar de la nueva fuente es mayor que una anterior, esta memorizará las nuevas posiciones y se olvidará de la anterior. Las abejas empleadas son iguales al número de fuentes de alimento, las abejas observadoras comparten la información de las fuentes de alimento y las abejas exploradoras buscan

nuevas fuentes de alimentos y abandonan la propia (E. Ahmed *et al.*, 2016; Tragos *et al.*, 2013).

Para Cheng y Jiang (2011) el problema de SA se resuelve utilizando el algoritmo ABC, la ubicación de una abeja o espectador representa una posible asignación de canal y la cantidad de néctar es la utilidad que se maximiza.

Técnicas de aprendizaje

El aprendizaje autónomo tiene por objetivo principal el autoaprendizaje computacional, donde las técnicas de análisis pueden ser programadas de forma autónoma a través de la inducción del conocimiento. En esta última, la información objeto de estudio se encuentra disponible a partir de grandes conjuntos de datos, dispuestos a ser analizados para la consecución objetiva de resultados (Abbas *et al.*, 2015).

No supervisado

El aprendizaje no supervisado puede ser adecuado para las CR que operen en entornos desconocidos de radiofrecuencia (Jayaweera & Christodoulou, 2011). En este caso, los algoritmos de aprendizaje sin supervisión autónoma permiten la exploración de las características del entorno y la toma acciones por sí mismo, sin tener ningún conocimiento previo (Jayaweera & Christodoulou, 2011). Sin embargo, si la CR tiene información previa sobre el medio ambiente, puede aprovechar este conocimiento mediante el uso de técnicas de aprendizaje supervisado (Bkassiny, Li, & Jayaweera, 2013).

Aprendizaje por refuerzo. El aprendizaje por refuerzo es una técnica que permite a un agente modificar su comportamiento mediante la interacción con su entorno (Sutton & Barto, 1998). Este tipo de aprendizaje puede ser utilizado por los agentes para aprender de forma autónoma y sin supervisión. En este caso, la única fuente de conocimiento es la retroalimentación que un agente recibe de su entorno después de ejecutar una acción. Dos características principales caracterizan el aprendizaje por refuerzo: (1) ensayo y error y (2) recompensa retardada. Por ensayo y error se supone que un agente no tiene ningún conocimiento previo sobre el medio ambiente, y ejecuta acciones ciegamente con el fin de explorar el entorno. La recompensa retardada es la señal de realimentación que un agente recibe del entorno después de la ejecución de cada acción (Bkassiny *et al.*, 2013).

El aprendizaje por refuerzo ha sido incorporado a la CR, específicamente en las telecomunicaciones móviles. Abbas *et al.* (2015) muestran la capacidad de implementar un sistema de errores y recompensas en función de cada de-

cisión, de modo tal que se optimiza el desempeño en la toma decisiones para la administración del espectro electromagnético.

Teoría de juegos. La teoría de juegos es una herramienta matemática que pretende modelar el comportamiento de entidades racionales en un entorno conflictivo (Fudenberg & Tirole, 1991). En las comunicaciones inalámbricas esta teoría se ha aplicado a las redes de comunicación de datos, a fin de modelar y analizar encaminamiento y la asignación de recursos en entornos competitivos (Bkassiny *et al.*, 2013).

La teoría de juegos es utilizada como una herramienta en la toma de decisiones donde varios jugadores se enfrentan a una serie de situaciones en las cuales deben tomar medidas que, en la mayoría de los casos, pueden afectar los intereses de los otros (Abbas *et al.*, 2015). Una ventaja clave de la aplicación de soluciones de teoría de juegos a los protocolos CR es en la reducción de la complejidad de los algoritmos de adaptación en grandes redes cognitivas (Bkassiny *et al.*, 2013). En la literatura actual existen varios trabajos (Ji & Liu, 2007; Nisan, Roughgarden, Tardos, & Vazirani, 2007; Zhao, Mao, Neel, & Reed, 2009) sobre la aplicación de la teoría de juegos en la CR.

Supervisado

El aprendizaje supervisado se usa cuando los datos de entrenamiento están etiquetados, es decir, se conoce información a priori acerca del ambiente. Algoritmos de entrenamiento tales como arboles de decisión, redes neuronales, máquinas de soporte vectorial y razonamiento basado en casos funcionan bien para este caso. Difieren ellos mismos en sus fortalezas y limitaciones, desafíos y aplicaciones referentes a la CR (Abbas *et al.*, 2015).

Redes neuronales. Las redes neuronales se asemejan al cerebro en dos aspectos (Haykin, 1998): 1) la red adquiere el conocimiento de su entorno, a través de un proceso de aprendizaje, y 2) las fuerzas de conexión interneuronas, conocidas como pesos sinápticos, se utilizan para almacenar el conocimiento adquirido. Algunas de las capacidades y ventajas de las redes neuronales incluyen el modelado de comportamientos no lineales y la capacidad de adaptación ante cambios pequeños, y su principal desventaja es la necesidad de realizar un entrenamiento en diferentes condiciones del entorno (Bkassiny *et al.*, 2013).

Taj y Akil (2011) presentan una metodología para predecir el comportamiento del espectro. La actividad del PU es modelada a través de una serie de tiempo caótica multivariable, la cual se convierte en una entrada a la red

neuronal, y esta última predice la evolución de la serie de tiempo para decidir si el SU puede ocupar una SO determinada (Bkassiny *et al.*, 2013).

Máquina de soporte vectorial. Las *máquinas de soporte vectorial* (SVM) son el conjunto de algoritmos que tienen la capacidad de aprender bajo la supervisión de un agente de *software*. Su principal modo de operación está en función de la regresión y la clasificación en el aprendizaje. Esta técnica es utilizada para llegar a márgenes de clasificación en un conjunto de datos, por tanto, su principal objetivo consiste en establecer un modelo de predicción donde una entrada incierta puede ser identificada en una categoría u otra (Abbas *et al.*, 2015; Bkassiny *et al.*, 2013; Dadios, 2012; Del-Ser *et al.*, 2010; Ferber, 1999; Fudenberg & Tirole, 1991; Goldberg & Holland, 1988; J. Han, Kamber, & Pei, 2012; He *et al.*, 2010; Ji & Liu, 2007; Matinmikko *et al.*, 2013; Mir *et al.*, 2011; Nisan *et al.*, 2007; Sutton & Barto, 1998; Taj & Akil, 2011; Trigui *et al.*, 2012; Wooldridge, 2009; Zhao *et al.*, 2009).

En la literatura actual existen varios trabajos sobre la aplicación de las SVM en la CR (Petrova, Mahonen, & Osuna, 2010; G. Xu & Lu, 2006).

Funciones de decisión

En las redes heterogéneas con facilidades de acceso ubicuo, los procesos de decisión y selección se hacen más complejos debido a que las diferentes tecnologías de acceso por lo general ofrecen diferentes características. De acuerdo con lo anterior, la SA llega a ser un problema con múltiples criterios y parámetros que incluyen complejos *trade-offs* entre criterios contradictorios. En estos casos resulta útil la aplicación de funciones de beneficio o costo (A. Ahmed *et al.*, 2014).

Función de utilidad

La función de utilidad tiene por objetivo maximizar la satisfacción del usuario, de acuerdo con ciertos parámetros y restricciones. En la SA y de gestión de decisiones, la utilidad mide el nivel de satisfacción del usuario, correspondiente a un conjunto de características de una red inalámbrica, incluyendo los parámetros de recursos asignados (A. Ahmed *et al.*, 2014). Ormond, Murphy y Muntean (2006) examinan el nivel de satisfacción del usuario mediante el empleo de una función de utilidad para aplicaciones de BE.

Función de costos

La función de costo, a diferencia de la función de utilidad, busca minimizar el costo de ciertos parámetros, teniendo en cuenta las restricciones del caso.

En una SO el costo total se calcula mediante la suma del costo de parámetros de interés como QoS, BW, retardo y AP, entre otros (A. Ahmed *et al.*, 2014). Y. Wei, Li, Song y Song (2008), por su parte, presentan una aplicación de la función de costo.

Algoritmos estadísticos

Existe otro tipo de técnicas que también se han utilizado para la SA en CRN, las cuales están basadas fundamentalmente en conceptos de estadística y probabilidad, tales como las redes bayesianas, las cadenas de Markov y los arboles de decisión.

Redes bayesianas

Las redes bayesianas son “modelos probabilísticos gráficos” que dependen de la interacción de diferentes nodos para generar aprendizaje en cada nodo involucrado en el proceso, mediante el enfoque bayesiano. Esta técnica de aprendizaje probabilístico provee inferencias exactas y estima modelos de probabilidad completa en los cuales el conocimiento a priori o los resultados sean usados para construir un modelo actualizado (Bolstad, 2007; Yonghui, 2010).

Jiang, Chen y Liu (2014) adoptan un “enfoque cooperativo” para estimar el estado del canal, a efectos de lo cual usan aprendizaje bayesiano para resolver problema de la detección multicanal.

Cadenas de Markov

Los modelos de Markov son usados para modelar procesos aleatorios que cambian de un estado a otro en el tiempo. En dichos procesos aleatorios el estado futuro depende del estado presente, y tales estados son visibles al observador, en contraste con los *modelos ocultos de Markov* (HMM), en los cuales los estados no son visibles (Fraser, 2008). Estas cadenas generan “secuencias de observaciones” entre transiciones de estado, ya sea en el tiempo, o ya sea en el espacio con probabilidades fijas. El estado actual depende de los eventos previos, en tanto que sus sucesivas estructuras determinan el éxito del proceso. La cadena puede ser asignada a un solo paso, o bien puede extenderse a las probabilidades asociadas con cada una de las transiciones dependientes en múltiples eventos que lo preceden (Abbas *et al.*, 2015).

Yifei, Yinglei, Li, Mei y Xiaojun (2013) usaron toma de decisiones de Markov para el DSA en CRN. Emplearon HMM en un canal inalámbrico y predijeron el estado del canal. Las decisiones estuvieron basadas en sensibilidad espectral, selección de canal, modulación, esquemas de codificación y

potencia transmitida Pham, Tran, Do, Moon y Hong (2014) utilizan HMM en el SH para que el SU estudie el comportamiento del PU y pueda predecir su futuro comportamiento y asegurar la transmisión.

Árboles de decisión

Son un modelo que predice el valor de una “clase objetivo” basada en diversidad de variables de entrada. En un árbol de decisión cada nodo tiene un “criterio”, cada rama representa el “resultado de una prueba” y cada “hoja” representa la etiqueta de una clase. Cada hoja contiene información de la “etiqueta de clase” (Abbas *et al.*, 2015; A. Ahmed *et al.*, 2014; Bkassiny *et al.*, 2013; Bolstad, 2007; Cheng & Jiang, 2011; Del-Ser *et al.*, 2010; Ferber, 1999; Fraser, 2008; Fudenberg & Tirole, 1991; Gavrilovska *et al.*, 2013; Goldberg & Holland, 1988; J. Han *et al.*, 2012; Haykin, 1998; He *et al.*, 2010; Ji & Liu, 2007; Jiang *et al.*, 2014; Matinmikko *et al.*, 2013; Mir *et al.*, 2011; Nisan *et al.*, 2007; Ormond *et al.*, 2006; Petrova *et al.*, 2010; Pham *et al.*, 2014; Safavian & Landgrebe, 1991; Sutton & Barto, 1998; Taj & Akil, 2011; Trigui *et al.*, 2012; Wooldridge, 2009; G. Xu & Lu, 2006; Yifei *et al.*, 2013; Yonghui, 2010; Zhao *et al.*, 2009).

Análisis comparativo de las técnicas y algoritmos de *handoff*

La tabla 2.2 resume el análisis comparativo de las diferentes técnicas para la SA en CRN, en términos de fortalezas y limitaciones.

Tabla 2.2. Análisis comparativo de las técnicas de SA

Algoritmo	Fortalezas	Limitaciones
MCDM	Simplicidad, fácil implementación, respuesta rápida.	No hay una metodología analítica para estudiar su convergencia.
Lógica difusa	Decisiones rápidas basadas en reglas predefinidas; las técnicas de aprendizaje pueden mejorar la calidad de las decisiones.	Funcionalidad limitada ya que las reglas son predefinidas; necesita un gran número de reglas para considerar todos los parámetros.
Algoritmos genéticos	Tiene optimización multiobjetivo; se configura dinámicamente dados los cambios del entorno.	Requiere conocimiento previo del sistema; proceso lento para encontrar una solución óptima.
MAS	Adecuados para problemas con múltiples jugadores; aprendizaje y cooperación.	La complejidad y el costo computacional pueden llegar a ser altos.

Algoritmo	Fortalezas	Limitaciones
ABC	Búsqueda de soluciones en paralelo.	Requiere conocimiento a priori del sistema; necesita una función de aptitud.
Aprendizaje por refuerzo	Aprendizaje autónomo usando retroalimentación y autoadaptación progresiva en tiempo real.	Demanda reglas de derivación, por lo que la exactitud está basada en dichas reglas.
Teoría de juegos	Reduce la complejidad de la adaptación; soluciones por medio de múltiples agentes; enfoque cooperativo y no cooperativo.	Requiere conocimiento previo de diferentes parámetros del sistema y que los datos de entrenamiento estén etiquetados.
Redes neuronales	Habilidad para adaptarse a los cambios menores; excelente para clasificación; puede identificar nuevos patrones.	El entrenamiento puede ser lento dependiendo del tamaño de la red. Poca capacidad para generalizar; puede sufrir de sobreentrenamiento; datos previos.
SVM	Capacidad de generalizar; robustez contra el ruido de entrada y casos diferentes; mejor desempeño con poco entrenamiento en comparación con las redes neuronales.	Requiere que los datos de entrenamiento estén etiquetados; hay que tener conocimiento previo del funcionamiento del sistema; se vuelve complejo a medida que el problema es más grande.
Funciones de utilidad y costo	Permite encontrar óptimos con múltiples parámetros y restricciones.	Requiere que todos los parámetros estén modelados con una función analítica.
Redes bayesianas	Se basa en modelos probabilísticos.	Requiere conocimiento a priori del sistema; presenta complejidad computacional.
Modelos de Markov	Se basa en modelos estadísticos y es fácilmente escalable; puede predecir con base en la experiencia.	Requiere conocimiento previo del sistema; presenta complejidad computacional.
Árboles de decisión	Simplicidad; toma de decisiones mediante las configuraciones de sus ramas.	Requiere conocimiento previo del sistema; puede sufrir sobreentrenamiento y requiere que los datos de entrenamiento estén etiquetados.

Fuente: Bkassiny *et al.* (2013), He *et al.* (2010), Tragos *et al.* (2013) y Yifei *et al.* (2013).

Desafíos de investigación en la SA

Existen varias cuestiones de investigación abiertas que necesitan ser estudiadas para el desarrollo de la SA, algunas de ellas se mencionan a continuación (Akyildiz *et al.*, 2006).

Modelo de decisión multivariado

La SNR no es suficiente para caracterizar las bandas espectrales en las CRN. Además de la SNR, muchos parámetros de caracterización del espectro afectan la calidad. Por tanto, la manera de combinar estos parámetros de caracterización del espectro para el modelo de decisión del espectro sigue siendo una cuestión abierta.

Algoritmos adaptativos

Para desarrollar soluciones eficientes en la SA es necesario desarrollar algoritmos que logren adaptarse a diversas condiciones y escenarios, con el objetivo de satisfacer los requisitos de un entorno altamente dinámico. Todos los algoritmos hasta ahora se centran en un escenario y una red estáticos y en tratar de encontrar una solución óptima de acuerdo con algunos criterios (Tragos *et al.*, 2013).

Selección multicanal

En las CRN se pueden utilizar simultáneamente múltiples bandas del espectro para la transmisión. Por otra parte, las CRN no requieren que las múltiples bandas seleccionadas sean contiguas. De este modo, un SU puede enviar paquetes a través de bandas del espectro no contiguas. Esta transmisión sobre múltiples bandas muestra menos degradación de calidad durante el SH en comparación con la transmisión convencional sobre una sola banda del espectro (Akyildiz & Li, 2006). Por ejemplo, si un PU aparece en una banda del espectro en particular, el SU tiene que desalojar solo esa banda, y en el resto de las bandas de espectro mantendrá la comunicación, por lo cual la degradación de la QoS puede ser mitigada (Dadallage *et al.*, 2016).

Adicionalmente, la transmisión en múltiples bandas del espectro permite un menor consumo de energía en cada banda del espectro. Como resultado se consigue menos interferencias con los PU, en comparación con la transmisión en una única banda del espectro (Akyildiz & Li, 2006). Por estas razones, el esquema de gestión del espectro debe tener la capacidad de toma de decisión para múltiples bandas. Por ejemplo, la forma de determinar el número de bandas del espectro y cómo seleccionar el conjunto de bandas apropiadas sigue siendo un tema de investigación abierto en CRN.

Selección cooperativa de espectro

El enfoque cooperativo tiene más ventajas que el enfoque no cooperativo. En la detección de espectro cooperativo, el SU vecino comparte su información de detección con el objetivo de aprovechar la diversidad espacial. Un desafío en la selección de espectro cooperativa es cómo combinar la información de los usuarios cooperativos mientras se realiza la transmisión (Masonta *et al.*, 2013).

Selección de espectro en redes heterogéneas

En una determinada CRN puede haber requerimientos de QoS heterogéneos y el espectro disponible puede presentar fluctuaciones y cualidades variables. En las redes de tráfico heterogéneas, un desafío consiste en seleccionar las bandas de frecuencia apropiadas para satisfacer los requerimientos de QoS de cada SU (Masonta *et al.*, 2013).

Series de tiempo

Un proceso estocástico es una sucesión de variables aleatorias $\{Z_t | t \in I \subseteq \mathbf{Z}\}$. El subíndice que indica cómo varía t , es el índice del proceso (Devore, 2001).

Una serie de tiempo es una sucesión Z_t generada al obtener una y solo una observación de cada una de las variables aleatorias que definen un proceso estocástico. Las observaciones son tomadas a intervalos de tiempo o de distancia iguales, según lo indica el índice t que genera la sucesión. En tal sentido, la serie es una realización de un proceso estocástico (Correa, 2004; Guerrero, 2003).

Notación de las series de tiempo

- Z_t : variable aleatoria definida en el tiempo t .
- z_t : valor tomado por la variable aleatoria Z_t en el tiempo t o realización de Z_t en el periodo t .
- $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$: serie de tiempo que tiene n observaciones o una realización del proceso $\{Z_t\}$ cuando t varía entre uno y n .
- n : origen de los pronósticos. Entero que indica la posición de la última observación disponible, el presente, o el punto a partir del cual se empieza a pronosticar.

Como z_t es un valor que toma la variable aleatoria Z_t en el tiempo t , si $t < n$, Z_t es una observación del pasado; si $t = n$, Z_t es la observación presente; y si

$t > n$, Z_t es un valor que tomará la variable Z_t . Es claro que los valores de Z_t para $t > n$ no son desconocidos, uno de los objetivos es estudiar métodos para estimarlos (Correa, 2004; Guerrero, 2003).

Estacionariedad

Formalmente, una variable X_t es estacionaria si:

- La esperanza matemática de la variable X_t ($E[X_t]$) es una constante para todos los valores de t .
- La varianza de la variable X_t ($VAR[X_t]$) es una constante para todos los valores de t .
- La covarianza del producto $X_t * X_{t+k}$ ($Cov[X_t * X_{t+k}]$) es una constante para todos los valores de t y todas las k , respectivamente.

Estas condiciones requieren que las medias, las varianzas y las covarianzas de X_t permanezcan constantes a lo largo del tiempo, ello significa que no importa si las observaciones vienen del principio o del fin de la muestra, con tal de que las medias y las varianzas sean siempre las mismas.

En otras palabras, X_t será estacionaria solo si está distribuida normalmente, con media 0 y varianza constante, es decir: $N(0, S^2)$ (Brillinger, 2001; Guerrero, 2003; Hamilton, 1994).

Aplicación de las series de tiempo

En el contexto de series de tiempo, pronosticar significa predecir valores futuros de una variable aleatoria basándose en el estudio de la estructura definida por las observaciones pasadas de variables que explican su variación, suponiendo que la estructura del pasado se conserva en el futuro.

La existencia del intervalo de tiempo comprendido entre el presente y el momento en el cual ocurrirá el suceso o evento de interés, llamado tiempo de previsión, origina la necesidad de conocer un pronóstico del evento, para así poder planear y ejecutar acciones que contrarresten o controlen los efectos que dicho suceso producirá. La longitud de este intervalo de tiempo da origen a la planeación; si no existiera o fuese muy pequeño, se estaría enfrentando a situaciones concretas que deben resolverse mediante acciones inmediatas, mas no planearse (Correa, 2004).

Marco estadístico de las series de tiempo

Una serie de tiempo es una sucesión de observaciones o de lecturas ordenadas, obtenidas al variar el tiempo u otro índice. Una variación de esta sucesión se

denota por Z_t , donde t , el índice de la serie, indica el tiempo o posición que ocupa la observación en la sucesión (Brockwell & Davis, 1991; Guerrero, 2003).

En una serie de tiempo la observación que ocupa la posición T (valor que toma la variable aleatoria en el tiempo T) está relacionada con la observación ubicada en $T-1$, en $T-2$ y quizás en $T-K$; por esta razón, si se altera la posición de una observación, también lo hacen las relaciones entre las observaciones y por ende los pronósticos estimados. En resumen, si se considera que la observación z_T es el valor que toma una variable aleatoria en T , puede decirse que este valor depende de los valores que tomó la variable aleatoria en el pasado, esto es, z_T depende de z_{T-t} , donde $t < T$; esta dependencia define una estructura de correlación que debe ser tenida en cuenta en la estimación de los pronósticos. En este sentido, se dice que el tiempo o el índice inducen un orden entre las observaciones o en la serie.

Objetivos de las series de tiempo

Los objetivos específicos de las series de tiempo son (Harvey, 1993):

1. Obtener modelos estadísticos que describan la estructura pasada de las observaciones que generan la serie; y/o estudiar modelos que expliquen la variación de una serie en términos de series (explicativas) conocidas.
2. Suponer que la estructura pasada de la serie de interés o de las series explicativas se conserva, y, en este supuesto, pronosticar valores futuros de la serie en estudio.
3. Analizar la significancia de los efectos, qué políticas o intervenciones pasadas causaron en la estructura de la serie.
4. Simular valores futuros de la serie en condiciones o restricciones definidas por políticas o criterios nuevos, para así supervisar y controlar los cambios que se producen en la serie.

Componentes de una serie de tiempo

Una serie de tiempo puede tener las siguientes componentes (Correa, 2004; Guerrero, 2003):

Componente de tendencia

Esta componente representa la trayectoria suavizada que define la serie en el rango de variación del índice, se halla al observar la forma funcional de la gráfica de la serie (Z_T vs t) a lo largo del tiempo. La tendencia puede ser: constante, lineal, cuadrática o exponencial, entre otras.

Componente estacional

Esta componente se presenta cuando la serie tiene patrones estacionales que se repiten con una frecuencia constante y producen un efecto periódico en su gráfica.

Los patrones estacionales se presentan porque los fenómenos climáticos, la recurrencia en los pagos y las costumbres y/o de agrupamiento afectan las observaciones que genera la serie.

Se llama periodo estacional y se notará por s al mínimo número de períodos (unidades de t) que tarda el patrón en volver a presentarse.

Componente cíclica

Se presenta en series que son afectadas por fenómenos físicos o económicos que ocurren con una periodicidad variable.

Componente aleatorio

Representa los cambios que sufre la serie debido a fenómenos externos no controlables.

Modelos de series de tiempo Arima

Estos métodos modelan las series de tiempo estudiando la estructura de correlación que el tiempo, el índice o la distancia inducen en las variables aleatorias que originan la serie. El plan de trabajo en estos modelos es: 1) por medio de transformaciones y/o diferencias se estabiliza la varianza y se eliminan la tendencia y la estacionalidad de la serie; se obtiene una serie estacionaria. 2) Para la serie estacionaria obtenida se identifica y se estima un modelo que explica la estructura de correlación de la serie con el tiempo. 3) Al modelo hallado en el paso dos se le aplican transformaciones inversas para establecer la variabilidad, la tendencia y la estacionalidad de la serie original. Este modelo integrado se usa para pronosticar (Akaike, 1973; Box & Cox, 1964; Guerrero, 2003).

Los tres modelos fundamentales de series de tiempo *autorregresivos integrados de promedios móviles* (Arima) son: el *autorregresivo* (AR), el de *promedios móviles* (MA) y el *autorregresivo de promedios móviles* (ARMA).

Modelo AR

Considera que el valor de la serie estacionaria en el tiempo presente t depende de (a) todos los valores pasados que ha tomado la serie, ponderados por un factor de peso φ_j que mide la influencia de ese valor pasado en el valor

presente, y de (b) una perturbación aleatoria presente (Brockwell, 2001). El modelo AR es por la ecuación (2.22).

$$Z_t = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j Z_{t-j} + a_t \quad (2.22)$$

Donde φ_j son los parámetros del modelo y a_t es un término de error o proceso de ruido blanco gaussiano, es decir, son variables aleatorias con media cero, varianza constante, no correlacionadas entre sí y con los valores pasados de la serie. El proceso AR es un modelo de regresión en el que las variables explicativas son la misma variable dependiente retardada. Una condición para que un modelo AR sea un proceso estacionario es cuando $\varphi_p < 1$ (Garrett & Willinger, 1994).

Cuando solamente los últimos p valores pasados de la serie afectan significativamente el valor presente, el modelo se denomina AR de orden p , AR (p), y en este caso el límite superior de la sumatoria en la ecuación (2.22) es p . La determinación del valor de p se realiza a partir de *la función de autocorrelación parcial* (FACP).

Modelo MA

Este modelo considera que el valor de la serie estacionaria oscila o se desplaza alrededor de un valor medio μ . Además, supone que el desplazamiento de μ en el tiempo presente t es ocasionado por infinitas perturbaciones ocurridas en el pasado, ponderadas por un factor θ_j que mide la influencia de dicha perturbación en el presente de la serie (Brockwell, 2001). El modelo MA es descrito por la ecuación (2.23).

$$Z_t = \mu + \sum_{j=0}^{\infty} \theta_j a_{t-j} \quad (2.23)$$

Donde θ_j son los parámetros del modelo y a_t es un término de error o proceso de ruido blanco gaussiano, es decir, son variables aleatorias con media cero, varianza constante, no correlacionadas entre sí y con los valores pasados de la serie. El modelo MA supone que todas las observaciones de la serie de tiempo son igualmente importantes para la estimación del parámetro que se va a pronosticar.

Cuando solo las últimas perturbaciones pasadas afectan significativamente el valor presente de la serie, el modelo se denomina MA de orden q , notado

MA (q), y en este caso la sumatoria de la ecuación (2.23) tiene como límite superior q. De esta manera, como pronóstico para el siguiente periodo se utiliza el promedio de los valores de los q datos más recientes de la serie de tiempo. La determinación del valor de q se realiza a partir de la *función de autocorrelación* (FAC).

El modelo ARMA

Este modelo es la combinación del modelo AR(p) y MA(q) para producir el modelo ARMA (p,q). El modelo ARMA esta descrito por la ecuación (2.24).

$$Z_t = \mu + \sum_{j=0}^{\infty} \theta_j a_{t-j} + \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j Z_{t-j} + a_t \quad (2.24)$$

En general las series de tiempo no son estacionarias, pero por medio de transformaciones de varianza y diferencias pueden transformarse en estacionarias. Los modelos Arima (p,d,q) resultan al integrar a la serie estacionaria ARMA (p,q) estimada, las diferencias y las transformaciones que fueron necesarias para convertir la serie inicial en una serie estacionaria. El número de diferencias y transformaciones de la serie denotan el parámetro del modelo (Brookwell, 2001).

Funciones FAC y FACP

La FAC mide la correlación entre dos variables separadas por k periodos, como lo describe la ecuación (2.25). La FACP mide la misma correlación, pero sin considerar la dependencia de los retardos intermedios entre ambas variables, como lo describe la ecuación (2.26) (Villavicencio, 2014).

$$\rho_j = \text{corr}(Z_j, Z_{j-k}) = \frac{\text{cov}(Z_j, Z_{j-k})}{\sqrt{V(Z_j)} \sqrt{V(Z_{j-k})}} \quad (2.25)$$

La FACP mide la correlación entre dos variables separadas por k periodos cuando no se considera la dependencia creada por los retardos intermedios existentes entre ambas.

$$(Z_j, Z_{j-k} / Z_{j-1} Z_{j-2} \dots Z_{j-k+1}) = \frac{\text{cov}(Z_j - \hat{Z}_j, Z_{j-k} - \hat{Z}_{j-k})}{\sqrt{V(Z_j - \hat{Z}_j)} \sqrt{V(Z_{j-k} - \hat{Z}_{j-k})}} \quad (2.26)$$

La FAC identifica fácilmente un modelo MA puro, mientras la FACP hace lo correspondiente con un modelo AR puro. La FAC permite estimar el orden “q” de una posible componente de promedio móvil, MA (q), mientras que la FACP permite estimar el orden p de una posible componente autorregresiva, AR (p) (Akaike, 1973; Anderson, 1980; Box & Jenkins, 1976; Brockwell & Davis, 2002).

Trabajos relacionados

En esta sección se presenta un estado del arte de trabajos recientes acerca de algoritmos para la toma de decisiones de SH en CRN.

Algoritmos para la selección de la S0

El método MCDM ha sido el más ampliamente utilizado en los trabajos de investigación sobre SH (Lahby, Leghris, & Adib, 2011; Stevens-Navarro, Lin, & Wong, 2008; S. F. Yang & Wu, 2008; S. J. Yang & Tseng, 2013; Zapata, Arango, & Adarme, 2012). Los problemas basados en MCDM son diversos pero comparten características en común, como: alternativas para seleccionar, múltiples DC que describen las alternativas y un conjunto de pesos ponderados que representan la importancia relativa de cada DC (Stevens-Navarro *et al.*, 2012). De acuerdo con lo anterior, MCDM es una herramienta matemática adecuada para modelar el proceso de SH. Diferentes métodos de MCDM han sido propuestos en la literatura sobre SH, como: SAW (Hernández, Giral, & Santa, 2015; W. Zhang, 2004), TOPSIS (Hernández, Vásquez, *et al.*, 2015; W. Zhang, 2004), MEW (Hernández, Giral, & Páez, 2015b; Stevens-Navarro & Wong, 2006), GRA (Hernández, Páez, & Giral, 2015; Q. Song & Jamalipour, 2005), ELECTRE (Bari & Leung, 2007), Weighted Markov Chain (WMC) (Ying, Jun, Yun, Gen, & Ping, 2008) y VIKOR (Hernández, Páez, & Giral, 2015; Stevens-Navarro, Gallardo-Medina, Pineda-Rico, & Acosta-Elias, 2012). Stevens-Navarro *et al.* (2012) presentan un estudio comparativo extenso de los siete métodos MCDM mencionados anteriormente. A través de simulaciones en Matlab con datos aleatorios, evalúan el desempeño de cada método con tres diferentes aplicaciones: voz, datos y restricciones de costos. Los autores también hacen un análisis de la sensibilidad de cada método y su costo computacional, en términos del número de operaciones de punto flotante. Los resultados arrojan que los algoritmos VIKOR y MEW presentan el mejor desempeño en las tres aplicaciones.

Uno de los métodos MCDM con mejores resultados obtenidos ha sido el algoritmo Analytical Hierarchical Process (AHP), este ha demostrado ser

una alternativa eficaz para la evaluación y selección de SO (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Kibria, Jamalipour, & Mirchandani, 2005; Lahby *et al.*, 2011; Q. Song & Jamalipour, 2005; Stevens-Navarro *et al.*, 2008). Por otro lado, los métodos clásicos de MCDM no pueden resolver eficientemente un problema de decisión que contiene información imprecisa. Sin embargo, la lógica difusa resuelve este problema satisfactoriamente, ya que puede evaluar y combinar múltiples criterios de manera simultánea. Complementar el AHP con la lógica difusa da como resultado el algoritmo FAHP (Hernández, Salgado, López, *et al.*, 2015; Mehboodniya, Kaleem, Yen, & Adachi, 2012), el cual permite mejorar el manejo de la subjetividad y la incertidumbre en la información y en las evaluaciones de criterios.

Fu, Wu, Zhang, Ping y Li (2010), Gódor y Détári (2007) e Inwhee, Won-Tae y Seokjoon (2007) proponen un algoritmo de selección de red basado en AHP y GRA. El método AHP es usado para obtener los pesos de cada criterio, mientras que el método GRA se utiliza para ordenar de mejor a peor las alternativas. En S. M. Liu, Pan, Mi, Meng y Xu (2010) y en Shun-Fang, Jung-Shyr y Hsu-Hung (2008) la decisión de selección de red es modelada a través de AHP y SAW. AHP es usado para determinar los pesos de cada criterio de selección, en tanto que SAW se emplea para ordenar de mejor a peor las alternativas. En Sgora, Vergados y Chatzimisios (2010), en Lahby *et al.* (2011) y en Lahby, Cherkaoui y Adib (2013) el algoritmo de selección de red combina AHP y TOPSIS. AHP calcula la importancia relativa de cada criterio, mientras TOPSIS es utilizado para ordenar de mejor a peor cada una de las alternativas.

Méndez, Rodríguez-Colina y Medina (2013) plantean el objetivo de encontrar el camino más corto para la toma de decisiones sobre el espectro que cumpliera con ciertos criterios requeridos por una aplicación o servicio. Méndez *et al.* (2013) se basaron en la modificación del algoritmo de Dijkstra, teniendo en cuenta cuatro parámetros: calidad, ocupación, SINR y BW. También se propuso un nuevo método para la toma de decisiones, el cual consiste en la asignación de vértices o aristas al espectro, de acuerdo con los criterios o parámetros que se van a evaluar. Estas aristas permiten crear una matriz de la cual se obtiene una lista adyacente. En esta el tamaño son las bandas de frecuencia disponibles del espectro, a las que se le asigna un identificador que va de cero a n, a partir de la asignación previa de un peso a cada criterio o parámetro, identificando el camino más corto. Los resultados, que se obtuvieron mediante una simulación con valores aleatorios para las características de los canales de frecuencia, presentan un menor tiempo de ejecución que el método basado en el algoritmo AHP descrito en Rodríguez-Colina *et al.* (2011).

F. Liu *et al.* (2013) usan la lógica difusa para crear una tabla de reserva de canales. De esta forma, cuando ocurra un SH, el SU podrá elegir rápidamente un canal de frecuencia disponible para continuar con la transmisión de sus datos y reducir el nivel de latencia del SH. Debido a que la aparición de un PU es incierta, no se puede asegurar que el canal de respaldo escogido de la tabla esté disponible. Sin embargo, este posible error se minimizó a través de una actualización frecuente de la tabla de canales de respaldo. Los resultados alcanzados en esta propuesta muestran una reducción del retardo de SH y un incremento en la tasa efectiva de transmisión de datos por parte del SU.

Fu *et al.* (2010) plantearon desarrollar un esquema de asignación de canal para el sistema 802.22 que mejore el rendimiento de la *probabilidad de terminación forzosa* (FTR). Este artículo se centra en la capa MAC que permite la convivencia entre los SU y los PU, e incluye dos elementos: la etiqueta de espectro y la *contención del marco de baja demanda*. El esquema de asignación de canal se desarrolla con base en la clasificación de los canales disponibles: canal de operación, canal de respaldo y canal candidato. Los parámetros que se tienen en cuenta para la selección de los canales de clasificación en este esquema son la interferencia y la probabilidad de la llegada del PU. El esquema propuesto consiste en que si llega el PU al canal de operación del SU, el canal de respaldo pasa a ser el nuevo canal de operación del SU, y el canal candidato pasa a ser el nuevo canal de respaldo; si llegan dos PU, uno al canal de operación y el otro al canal de respaldo, el canal candidato pasa a ser inmediatamente el canal de operación del SU. Los resultados obtenidos al medir el número de terminaciones forzosas y el número de bloqueos de los SU en la red muestran que la asignación de canal propuesta, con base en la interferencia, la probabilidad o su combinación, mejora el rendimiento de FTR.

Hernández-Guillem *et al.* (2012) proponen un protocolo MAC para CRN, sin la necesidad de un CCC. Dicho protocolo ha sido validado con un simulador de eventos discretos para caracterizar la comunicación del SU en presencia del PU. Los resultados muestran que el protocolo desarrollado causa el mínimo de interferencia a la transmisión del PU y también reduce el tiempo de acceso al canal, así como el número de paquetes perdidos, en comparación con una implementación de *carrier sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA) sobrecapa para CRN.

Na, Nan y Yoo (2007) proponen una arquitectura de selección dinámica de canales basada en políticas para CRN, con el objetivo de lograr una comunicación eficiente. Se proponen tres tipos de métodos para la selección

de canales: el primero es la selección ponderada, el segundo la selección secuencial y el último una selección combinada. Como resultado se obtiene un protocolo que permite obtener una lista óptima de canales.

Bennai, Sydor y Rahman (2010) proponen un algoritmo de selección de canal considerando los requerimientos de QoS de los SU, con base en la medición de la utilización del canal. El algoritmo es flexible para lograr diferentes grados de compromiso entre la tasa de datos del sistema y la equidad de los usuarios. Los resultados de simulación muestran que el algoritmo propuesto puede alcanzar hasta un 30% más de rendimiento en la tasa de datos, al tiempo que garantiza un mayor nivel de equidad con respecto a un esquema en el que la selección de canal es aleatoria.

Tuan, Tong y Premkumar (2010) aplican técnicas de autómatas de aprendizaje para permitir que una radio cognitiva aprenda y tome decisiones sobre la selección de canal, a partir de un conjunto de canales disponibles. El conjunto de canales de frecuencia aleatorios disponibles se modela como un entorno desconocido. Como las redes prácticas son por lo general no estacionarias, se propone un algoritmo adaptativo que permite a la CR monitorizar los cambios en el entorno de radio y siempre seleccionar el canal óptimo después de un largo plazo.

Y. Wu, Yang, Zhao y Cheng (2009) proponen un SH proactivo que tiene en cuenta la congestión, utilizando la teoría de juegos de coalición. Esta propuesta permite maximizar la utilización de los recursos disponibles y el cumplimiento de los requisitos de QoS de los SU. Hasswa, Nasser y Hassanein (2006) se proponen el uso de una función de umbral de *handoff* y una función de costos de *handoff* para evaluar la decisión de SH. En P. Yang, Sun, Liu, Li y Wen (2013) el modelo propuesto se puede adaptar dinámicamente a los cambios del entorno de la red.

Algoritmos para SH predictivos

A partir de la revisión de la literatura actual se evidencia que los modelos de SH proactivos no son puros en su mayoría, ya que no cumplen con el requerimiento de la predicción temporal del PU, a excepción de los dos que se presentan a continuación.

Yan Wu *et al.* (2016) proponen una estrategia de transmisión para CRN con varias SO, basada en un SH proactivo a través de programación dinámica. En esta propuesta el SU predice el estado futuro del espectro y decide si se mantiene inactivo, se queda en la SO actual o cambia a una nueva para continuar su transmisión. Los resultados alcanzados muestran que el esque-

ma propuesto logra una alta eficiencia en la transmisión de datos, en comparación con los esquemas tradicionales de siempre espere y siempre cambie.

Y. Song y Xie (2010) proponen un modelo con diversas variables para realizar la predicción de canal, incluyendo un modelo de predicción del comportamiento del PU para evitar la interferencia y un modelo multiusuario para controlar la colisión entre SU. El control de colisión entre SU es uno de los temas más complicados a la hora de realizar modelos asertivos, debido a su comportamiento aleatorio. Para solucionar esto, Y. Song y Xie (2010) proponen un esquema de coordinación Hopping, común en el diseño del protocolo de SH. Todos los SU están sincronizados al Hop a través de los canales, con el mismo Hopping de secuencia. Para realizar la detección del espectro se asume que el dispositivo cognitivo tiene dos antenas, una para transmisión y control y otra exclusiva para realizar la detección del espectro. El resultado demuestra que la estrategia proactiva es eficiente cuando la carga de los PU es baja, pues reduce el número de *handoffs* y colisiones, pero si la demanda es alta por parte del PU, el control de colisión se mantiene pero el número de *handoffs* aumenta.

Herramientas de simulación

En la actualidad existen diversas investigaciones técnicas y analíticas que hacen 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 en el 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), las cuales permiten analizar y sintetizar lo complejo y extenso que pueda llegar a ser la evaluación de los algoritmos y las soluciones propuestas.

En el área de 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 su tipo licencia (Fonte & Mora, 2008; OMNet++, 2015), y sobre estos se ha 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. Se orienta a objetos y es utilizado 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, y, al igual que OMNeT++, es un simulador basado en lenguaje C++ (Páez & Ortiz, 2010).

J-Sim, desarrollado en Java, se basa en componentes independientes y está construido sobre la noción del modelo de programación de componentes autónomos. No se utiliza a menudo en proyectos de investigación, por lo que se puede cuestionar la validez de sus modelos antes de empezar a trabajar con él (Köksal, 2008; Páez & 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, proporciona un entorno para el diseño de protocolos y tecnologías, así como pruebas con diseños en escenarios realistas. Es un *software* bastante usado en la industria de las telecomunicaciones; por ejemplo, en el desarrollo de proyectos gubernamentales y militares (Paez & Ortiz, 2010; Universidad Politecnica de Cataluña, 2004).

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

Khan, Bilal y Othman (2012) se plantean el objetivo de comparar los simuladores NS-2, NS-3, OMNET++, SWAN, OPNET, Jist y GloMoSiM con un protocolo de enrutamiento para redes móviles ad-hoc (MANET), a efectos de identificar el simulador óptimo; el análisis comparativo se realiza de acuerdo con parámetros como: utilización de la unidad central de procesamiento, uso de memoria, tiempo de cómputo y escalabilidad mediante la simulación.

Köksal (2008) hace una descripción de simuladores para el modelo de redes inalámbricas. Su objetivo es identificar un simulador fiable y con niveles de complejidad bajos, para lo cual 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.

Fonte y Mora (2008) describen con detalle los simuladores NS-2 y OM-NET++, a través de 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 no incluyen un módulo para trabajar con CRN, o no permite 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.

III. Metodología

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. Segundo, con base en el análisis de la anterior información 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, tanto en la banda GSM como en la banda Wi-Fi, para analizar el comportamiento de dichas bandas y del PU. Cuarto, se realizó un procesamiento de los datos capturados para construir bases de datos de información organizada sobre el comportamiento del PU y las características de los recursos espectrales de las bandas mencionadas; dichas bases de datos fueron clasificadas por tipo de red (GSM y Wi-Fi) y 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, las cuales fueron complementadas. Sexto, se seleccionaron y se desarrollaron los algoritmos de SH más relevantes en la literatura actual. Séptimo, se diseñaron y se desarrollaron tres algoritmos de SH novedosos. Octavo, con base en los tres algoritmos de SH, se construyó el modelo adaptativo multivariable propuesto para SH. Noveno, a partir del análisis del estado del arte del SH en CRN se diseñaron nueve EM para evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos en esta investigación, así como los seleccionados de la literatura actual, y se propusieron ocho escenarios de evaluación; se consideraron dos tipos de redes: GSM y Wi-Fi, dos clases de aplicaciones: RT y BE, y dos niveles de tráfico: HT y LT. Décimo, con base en toda la información anterior se diseñaron y se desarrollaron dos simuladores que permiten evaluar cuantitativamente el desempeño de los algoritmos de SH, considerando el comportamiento real del PU. Undécimo, con los resultados obtenidos a partir de los simuladores

se realizó una evaluación comparativa de su desempeño en cada una de las EM. Duodécimo, a partir del análisis comparativo se realizaron ajustes y modificaciones al modelo adaptativo multivariable propuesto.

Selección del software y de los equipos

Para desarrollar la presente investigación se utilizaron los siguientes recursos: un sistema de monitorización del espectro —descrito en la tabla 3.1—, a fin de 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 la construcción de la revisión literaria sobre SH para CRN; el *software* Matlab, a efectos de 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 procesar 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: Hernández *et al* (2015).

Tabla 3.2. Especificaciones del equipo de cómputo

Característica	Valor de referencia
Procesador	AMD FX 9590 de ocho núcleos y 4,71 GHz
Memoria RAM	DDR 3 de 16 GB
Disco de estado sólido	Kingston SV300S37A de 240 GB

Característica	Valor de referencia
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

Fuente: elaboración propia.

Metodología de evaluación

Con base en el análisis de la información obtenida a través de la revisión literaria sobre SH 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 para CRN más relevantes en la literatura actual y los desarrollados en esta investigación. La evaluación del desempeño se realizó para nueve EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT, AAPH, AAIH, AAEH y AAUH, en ocho escenarios diferentes: GSM-RT-LT, GSM-RT-HT, GSM-BE-LT, GSM-BE-HT, Wi-Fi-RT-LT, Wi-Fi-RT-HT, Wi-Fi-BE-LT y Wi-Fi-BE-HT, producto de la combinación de tres parámetros de interés: el tipo de red (GSM y Wi-Fi), el nivel de tráfico (LT y HT) y la clase de aplicación (RT y BE).

Para obtener la información de evaluación de cada algoritmo en las nueve EM, para los ocho escenarios descritos, se desarrollaron dos herramientas de simulación novedosas que reconstruyen 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 y fueron capturados en la ciudad de Bogotá D.C., Colombia (Pédriza et al., 2016).

Si un SU desea realizar una transmisión durante φ minutos, la herramienta de simulación desarrollada realiza el siguiente procedimiento, en forma más compleja, donde TS representa *instante de tiempo*; TT, *tiempo de transmisión*; y t, una variable temporal que define cuando la comunicación se pierde.

Algoritmo simulador

Entrada: información espectral (matriz de potencias por canal)

Salida: Gráficas de AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT, AAPH, AAIH, AAEH y AAUH

- 1: Inicialización (TS,t);
- 2: leer: tipo de red, nivel de tráfico, clase de aplicación, TT
- 3: **función**[Available,SINR,BW]=input_data(información espectral)
- 4: **función**[AP,ETA,PSINR,PBW]=Criteria_values(Available,SINR,BW)
- 5: **función**[RankingF]=Ranking_Algoritmo_SH(AP,ETA,PSINR,PBW)
- 6: **mientras** TS<TT **hacer**
- 7: Canal=RankingF(j)
- 8: **si** Canal=Busy **entonces**
- 9: j=j+1; t=t+1; AAFH=AAFH+1; AAH=AAH+1;
- 10: **sino**
- 11: t=0; AAH=AAH+1; TS=TS+1;
- 12: **fin si**
- 13: **si** TS es múltiplo de 60 **entonces**
- 14: Criteria_values(Available,SINR,BW)
- 15: Ranking_Algoritmo_SH(AP,ETA,PSINR,PBW)
- 16: **fin si**
- 17: **si** t= 50 **entonces**
- 18: Perdida de la comunicación
- 19: **fin si**
- 20: **fin mientras**

La base de datos suministra únicamente la información espectral correspondiente al TS que se esté ejecutando en la simulación, y, para no afectar la validación, los valores de los DC se construyen progresivamente a partir de la información espectral anterior al TS actual. Esta simulación se ejecuta de forma independiente para cada algoritmo de SH, para cada uno de los cuatro escenarios y para cada tipo de red.

Tipo de red

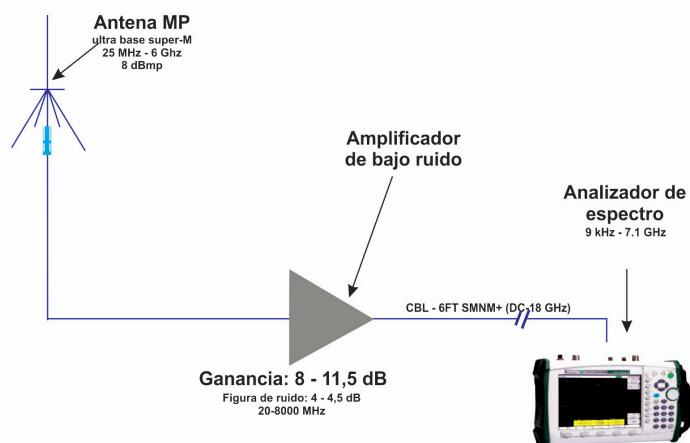
Para realizar un análisis comparativo más completo, se decidió evaluar y validar el desempeño de cada algoritmo de SH en dos tipos de redes diferentes: GSM y Wi-Fi. La razón de escoger la banda GSM se basa en la alta demanda de telefonía celular y la baja QoS (Pedraza *et al.*, 2016). En el caso de la banda Wi-Fi, la razón obedece al interés de analizar el desempeño de los algoritmos de SH en un ambiente más estocástico y la viabilidad de la posible utilización de esta banda por parte de SU de telefonía móvil (Cárdenas-Juárez *et al.*, 2016).

Captura y procesamiento 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. El análisis se presenta para la red GSM, en el caso de Wi-Fi se sigue una metodología similar.

La figura 3.1 describe la configuración de los equipos para realizar el proceso de medición de la ocupación espectral en las bandas GSM (824 MHz - 874 MHz) y Wi-Fi (2,4 GHz - 2,5 GHz). Las especificaciones de los equipos utilizados se muestran en la tabla 3.1, en tanto que 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: adaptado de Pedraza *et al* (2014).

Tabla 3.3. Configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro para GSM

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 del 2012. Una explicación más detallada de la configuración de los parámetros técnicos del analizador de espectro se puede consultar en el capítulo 3 de Pedraza *et al.* (2016).

El valor del Span corresponde al rango de frecuencia que se analiza, 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 tienen aproximadamente 3,448 barridos en un segundo. Por tanto el número total de barridos realizados en un mes corresponde a: $8.937.216 \text{ (barridos/mes)} = 3,448 \text{ (barridos/segundo)} \times 60 \text{ (segundos/minuto)} \times 60 \text{ (minutos/hora)} \times 24 \text{ (horas/día)} \times 30 \text{ (días/mes)}$, y el número total de datos de potencia es: $4.468.608.000 \text{ (dato de potencia del canal/mes)} = 8.937.216 \text{ (barridos/mes)} \times 500 \text{ (dato de potencia del canal/barrido)}$.

A partir de la anterior información se construyó una matriz de potencia de $8.937.216 \times 500$, la cual contiene el valor de potencia de cada uno de los quinientos canales (comprendidos entre 824 MHz y 874 MHz) para 8.937.216 TS (cada TS 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 ella.

Nivel de tráfico

Hasta el momento se cuenta con una matriz de valores de potencia de cada uno de los quinientos canales (con BW de 100 kHz, comprendidos entre 824 MHz y 874 MHz), para cada uno de los 8.937.216 TS (correspondientes a un mes continuo de tiempo; cada TS es igual a 290 ms), a la cual denominaremos *matriz de potencias* (PM). Con el objetivo de analizar el desempeño de los algoritmos de SH de acuerdo con el nivel de tráfico en la red, se decidió extraer de la PM tres trazas de información (submatrices) que representen el comportamiento del espectro cuando la red tiene un nivel de LT, *tráfico medio* (MT) y HT; estas nuevas matrices se denominaron PM de LT (PM-LT), PM de MT (PM-MT) y PM de HT (PM-HT), respectivamente. Cada una de ellas tiene un tamaño de 14.483×500 , las quinientas columnas representan cada uno de los canales medidos y las 14.483 filas corresponden a los TS consecutivos en los cuales se realizó la medición. Los 14.483 TS de cada matriz se segmentaron en dos partes, una con 12.414 TS que corresponden a una subtraza de sesenta minutos, denominada *entrenamiento* (TR), y otra con 2.069 TS que corresponden a una subtraza de diez minutos, denominada *evaluación* (EV). La matriz TR contiene la información histórica (últimos sesenta minutos) de ocupación espectral que conocen los algoritmos de SH; mientras que la matriz EV contiene la información futura (diez minutos) de ocupación espectral que no conocen los algoritmos de SH y que solo es manipulada por la herramienta de simulación para realizar la correspondiente evaluación y validación de cada algoritmo de SH.

De acuerdo con la explicación anterior, finalmente se tienen seis matrices de potencias por cada tipo de red (GSM y Wi-Fi): PM-LT-TR, PM-LT-EV, PM-MT-TR, PM-MT-EV, PM-HT-TR y PM-HT-EV. Sin embargo, solo es necesario encontrar las tres matrices de EV, ya que cada matriz de TR corresponde a los sesenta minutos anteriores de la respectiva matriz de EV. Para encontrar las tres matrices de EV se realizó un análisis estadístico de la ocupación espectral capturada, para lo cual es necesario conocer la disponibilidad de cada canal en cada TS. Por tanto, el primer paso fue obtener la *matriz de disponibilidad* (AM) a partir de la PM.

Para obtener la AM a partir de la potencia de cada canal, se calculó un umbral de decisión; los canales con potencias menores al valor del umbral de decisión se clasificaron como disponibles, y dicho estado se representó en la AM con un ‘1’ lógico. En el caso contrario, los canales fueron clasificados como ocupados y su estado se denotó con un ‘0’ lógico. El valor de la potencia del umbral de decisión se calculó a partir la ecuación (3.1), con una probabilidad de falsa alarma de 1% (Pedraza *et al.*, 2016). Otro método para determinar el valor del umbral de decisión es tomar un nivel de guarda de 5 dBm por encima del piso de ruido promedio del analizador de espectro, con el objetivo de minimizar posibles falsas alarmas. El piso de ruido promedio se determinó con la ubicación de una impedancia de $50\ \Omega$ a la entrada del analizador de espectro, con un nivel de atenuación de 0 dB, detección RMS y un largo periodo de medición (Pedraza *et al.*, 2016). La tabla 3.4 muestra el valor del piso de ruido promedio y del umbral de decisión para las dos metodologías.

$$P_{fa} = \frac{\Gamma\left(m, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(m)} \quad (3.1)$$

Tabla 3.4. Umbral de decisión para la detección de PU

Banda de frecuencia	Piso de ruido promedio	Umbral de decisión (piso de ruido + 5 dBm)	Umbral de decisión Ecuación (3.1)
GSM (824 MHz - 874 MHz)	-113 dBm	-108 dBm	-109 dBm
Wi-Fi (2,4 GHz - 2,5 GHz)	-111 dBm	- 106 dBm	-108 dBm

Fuente: elaboración propia.

Con la AM ya construida se procedió a realizar un análisis estadístico de la ocupación espectral en el tiempo, de acuerdo con el número promedio de PU activo simultáneamente. Este consistió en calcular el porcentaje de canales ocupados por cada TS, posteriormente se diseñó un algoritmo que contara el número de TS con ocupación mayor al 80 %, dentro de una ventana móvil de diez minutos (2069 TS), y promediara los porcentajes de ocupación de cada TS incluido dentro de la ventana. Dicha ventana se desplazó por el total de filas de la AM para analizar todas las combinaciones posibles. Los resultados evidenciaron que el peor caso corresponde a una ocupación promedio de la ventana del 48 % y en el mejor caso del 18 %. Estos valores corresponden a las ventanas que describen las matrices de EV para HT y LT, respectivamente. En el caso de MT se tomó el valor medio entre 48 y 18, y se buscó una ventana que se ajustara a este. Los valores de ocupación espectral promedio encontrados se explican en gran parte porque los primeros 25 MHz de la banda de 824 a 874 MHz corresponden al enlace ascendente GSM. Estos valores también evidencian la oportunidad de hacer un uso más eficiente del espectro en dicha banda.

Con los resultados anteriores se determinaron las matrices de potencia: PM-LT-TR, PM-LT-EV, PM-MT-TR, PM-MT-EV, PM-HT-TR y PM-HT-EV, y a partir de estas se construyeron las matrices de disponibilidad: AM-LT-TR, AM-LT-EV, AM-MT-TR, AM-MT-EV, AM-HT-TR y AM-HT-EV. Sin embargo, debido a la extensión de los resultados obtenidos, se decidió excluir las matrices de potencia y disponibilidad correspondientes a MT, y por tanto de aquí en adelante solo se mencionan los niveles de LT y HT, así como las matrices de potencia: PM-LT-TR, PM-LT-EV, PM-HT-TR y PM-HT-EV, y las matrices de disponibilidad: AM-LT-TR, AM-LT-EV, AM-HT-TR y AM-HT-EV, tanto para la banda GSM como para la Wi-Fi.

Criterios de decisión

Es necesario obtener los valores de los DC: AP, ETA, SINR y BW, para cada una de las matrices de entrenamiento, ya que las de evaluación no son conocidas por los algoritmos de SH.

La variable AP corresponde al análisis del ciclo de trabajo normalizado de cada una de las quinientas potenciales SO. Por tanto, el resultado de AP es un vector de 1×500 , donde cada elemento es equivalente al promedio de la correspondiente columna de la matriz AM-LT-TR o AM-HT-TR, según el nivel de tráfico.

La variable ETA corresponde al tiempo de disponibilidad promedio de cada canal. Primero se calculan todos los periodos de tiempo en que cada canal estuvo disponible de forma continua, y luego se toma el promedio sobre dichos periodos para cada canal. Por tanto, el resultado de ETA también es un vector de 1×500 , para las matrices AM-LT-TR o AM-HT-TR, según el nivel de tráfico.

La variable SINR corresponde al promedio de la diferencia entre la potencia de la señal y el piso de ruido promedio. Primero, para cada elemento de la matriz AM-LT-TR diferente de cero, se realiza la diferencia entre el elemento que tiene la misma posición en la matriz PM-LT-TR y el valor promedio del piso de ruido. El resultado de la diferencia se almacena en la misma posición de una matriz temporal denominada matriz SINR-LT-TR. Segundo, se calcula el valor promedio de cada columna de la matriz SINR-LT-TR. Por tanto, el resultado de SINR también es un vector de 1×500 . Por último, se realiza el mismo procedimiento con la matriz AM-HT-TR, según el nivel de tráfico.

La variable BW corresponde al BW promedio de cada canal. Sin embargo, debido a que son canales, todos tienen el mismo BW, equivalente a 100kHz, por lo que el promedio será siempre igual, lo cual le resta importancia a la variable BW. Con el objetivo de que esta última tenga incidencia en el *ranking* de cada SO, se decidió tomar para cada potencial SO el BW agregado de hasta cuatro canales adyacentes, tanto a la izquierda como a la derecha, siempre y cuando estuvieran disponibles de forma consecutiva para formar un solo canal.

En la banda GSM todos los canales tienen un BW de 200 kHz, sin embargo, debido a los parámetros técnicos configurados en el analizador de espectro, la campaña de medición arrojó datos de ocupaciónpectral para segmentos de frecuencia con un BW fijo de 100 kHz. Y, a pesar de que se podría haber realizado el promedio del nivel de potencia para cada dos segmentos, a fin de obtener el valor correspondiente a cada canal GSM, se decidió trabajar con un BW de 100 kHz para realizar un uso oportunista más eficiente del espectro disponible.

Una vez calculados los valores de los DC se procedió a realizar su normalización, para que los puntajes que definen la posición de las SO en el *ranking* siempre sean los justos, tanto en la clase de aplicación RT como en BE. La normalización de los valores para los cuatro DC consistió en ajustar su rango de escala de 0 a 100, para lo cual se multiplicaron todos los valores de un mismo DC por un factor de escala equivalente a 100 dividido por el valor más alto del DC correspondiente.

Clases de aplicación

En las comunicaciones móviles se transportan diferentes clases de tráfico, asociadas con aplicaciones específicas que tienen sus correspondientes requerimientos de QoS. En ETSI (2012) se definen cuatro clases de QoS para redes móviles:

- Clase conversacional
- Clase *streaming*
- Clase interactiva
- Clase *background*

El principal factor de diferencia entre cada una de las cuatro clases es su sensibilidad al retardo. La clase conversacional es la más sensible al retardo, mientras que la *background* es la más tolerante a este. Las clases conversacional y *streaming* se destinan principalmente a aplicaciones que requieren transportar flujos de información en RT, mientras que las clases interactiva y *background* están destinadas a aplicaciones tradicionales que no requieren RT (ETSI, 2012). De acuerdo con lo anterior, las cuatro clases de QoS se pueden clasificar en dos clases de aplicaciones: RT y BE, las cuales adopta esta investigación.

La tabla 3.5 resume las principales características de cada clase de QoS. Debido a que la clase *background* tiene la prioridad más baja, solo utiliza los recursos de transmisión cuando las demás clases no los necesitan. Esto es muy importante en redes inalámbricas, donde el BW es bajo en comparación con las redes alambradas (ETSI, 2012).

Tabla 3.5. Características de las clases de QoS

Clase de tráfico	Conversacional	Streaming	Interactiva	Background
Características fundamentales	Preserva la variación de tiempo entre las entidades de información del flujo de bits. Patrón de conversación con retardo estrictos y bajos.	Preserva la variación de tiempo entre las entidades de información del flujo de bits.	Se requiere interactividad y un patrón de respuesta a peticiones.	El destino no está esperando la información dentro de cierto tiempo.
Ranking de prioridad	1	2	3	4

continúa

Clase de tráfico	Conversacional	Streaming	Interactiva	Background
Sensibilidad al retardo	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Ejemplos de aplicación	Voz	Video <i>streaming</i>	Busqueda en internet	Correo electrónico
Clase de aplicación	RT	RT	BE	BE

Fuente: ETSI (2012).

Selección de los algoritmos de SH

A partir de una revisión literaria actual sobre el tema de SH para CRN, se seleccionaron los algoritmos de SH con los que se compararon los algoritmos desarrollados en esta investigación. Para realizar dicha selección se tuvo en cuenta, no solo los resultados del algoritmo, sino también su fundamentación matemática y una metodología clara que permitiera su reproducción. Además, debido a que la selección de una SO involucra múltiples variables, los métodos MCDM son una herramienta matemática adecuada para modelar el proceso de SH, y, por tanto, han sido los más ampliamente utilizados en los trabajos de investigación sobre SH (Lahby *et al.*, 2011; Stevens-Navarro *et al.*, 2008; S. F. Yang & Wu, 2008; S. J. Yang & Tseng, 2013; Zapata *et al.*, 2012). Los algoritmos de SH seleccionados son: SAW (Hernández, Giral, & Santa, 2015; W. Zhang, 2004), TOPSIS (Hernández, Giral, & Santa, 2015; W. Zhang, 2004), MEW (Hernández, Giral, & Páez, 2015b; Stevens-Navarro & Wong, 2006), VIKOR (Hernández, Páez, & Giral, 2015; Stevens-Navarro *et al.*, 2012) y AHP (Hernández, Giral, & Páez, 2015a; Kibria *et al.*, 2005; Lahby *et al.*, 2011; Q. Song & Jamalipour, 2005; Stevens-Navarro *et al.*, 2008), que ha demostrado ser una alternativa eficaz para la evaluación y selección de SO.

Para cada uno de los algoritmos de SH seleccionados se desarrollaron dos versiones, una con enfoque en aplicaciones RT y otra con enfoque en aplicaciones BE; por ejemplo, para el caso de SAW se tiene SAW-RT y SAW-BE.

Diseño y desarrollo de algoritmos propuestos

Algoritmo multivariable difuso (FAHP)

El algoritmo AHP para la toma de decisiones basada en múltiples criterios, tanto cuantitativos como cualitativos, ha demostrado ser una alternativa eficaz para la selección del canal objetivo (Kibria *et al.*, 2005; Lahby *et al.*, 2011;

Rodríguez-Colina *et al.*, 2011; Q. Song & Jamalipour, 2005; Stevens-Navarro *et al.*, 2012; Stevens-Navarro *et al.*, 2008). El algoritmo AHP se basa en juicios subjetivos, a través de comparaciones de la importancia entre criterios usados para la selección de una alternativa; en consecuencia, es más una medida relativa que un valor absoluto (Saaty, 1990).

Sin embargo, el método AHP propuesto por Saaty (1990) tiene algunas limitaciones, como: (1) trabajar con una escala de juicios muy desbalanceada, (2) no manejar información con incertidumbre y ambigüedad asociadas a la asignación de un número a cada evaluación, (3) el *ranking* de AHP es bastante impreciso, y (4) la subjetividad del juicio, la selección y la preferencia de quienes toman las decisiones tienen gran influencia en los resultados. Estas limitaciones se pueden corregir a través de la integración de la lógica difusa en el algoritmo AHP, con lo cual mejora el manejo de la subjetividad y la incertidumbre en la información y en las evaluaciones de criterios; además, de esta forma se obtiene el algoritmo FAHP (Mehbodiya *et al.*, 2012; Patil & Kant, 2014; Zapata *et al.*, 2012).

Aunque el método FAHP tenga en esencia la misma metodología del algoritmo AHP, la lógica difusa ayuda a tratar la subjetividad y la incertidumbre en las evaluaciones de criterios, ya que la lógica difusa, mediante un proceso matemático, permite utilizar un rango en la respuesta en lugar de un número puntual (Cortés, 2011).

Recientemente, el algoritmo FAHP ha sido utilizado ampliamente para resolver problemas de decisión multicriterio en algunas aéreas (Patil & Kant, 2014), como por ejemplo: selección de plantas de potencia termales (Choudhary & Shankar, 2012), análisis estratégico de la calidad de servicio (Gülçin Büyüközkan & Çifçi, 2012) y planeación de energía renovable (Kaya & Kahraman, 2010). Esta investigación muestra que su contribución puede extenderse a los estudios de la CR.

El algoritmo FAHP propuesto, adaptado a la CR, se desarrolló a través de cuatro pasos: (1) definición del problema, (2) construcción de la jerarquía, (3) construcción de la matriz de juicios y (4) cálculo de los pesos normalizados.

Definición del problema. El problema puede ser dividido en cuatro niveles jerárquicos: objetivo, criterios, subcriterios y alternativas. El objetivo es la selección de la mejor SO en una CRN, los criterios y subcriterios son los factores que afectan la preferencia de una alternativa y las alternativas son todas las SO presentes en la banda de frecuencia seleccionada.

El procedimiento para determinar los criterios y los subcriterios fue realizado a través de una modificación del *método Delphi* (Green, Armstrong, & Graefe, 2007). Este método es relativamente fácil de implementar y ha sido adoptado para diversas aplicaciones, como pronósticos, estimaciones y problemas de toma de decisiones (Green *et al.*, 2007). El método consiste, generalmente, en un panel de expertos que responden cuestionarios en dos o más rondas. Después de cada ronda un moderador provee un resumen anónimo de los juicios y las razones de cada experto en la ronda previa. En esta investigación, los DC para el algoritmo FAHP fueron propuestos inicialmente a partir de todos los parámetros reportados en la literatura actual sobre SH para CRN, y al final fueron seleccionados con una modificación del método Delphi propuesto en Hernández, Salgado, López, *et al.* (2015). La contribución al método Delphi es la definición de experto por sí misma — profesional inmerso en la administración y operación de red—, así como la propuesta del método Delphi modificado, la cual consiste en considerar dos entradas, en lugar de una, para cada ronda. Para la primera ronda y las siguientes se consideraron dos entradas, la decisión de un *consejo de administradores de red* (CAR), compuesto por nueve expertos seleccionados aleatoriamente, y el *ranking del impacto de las variables* (RIV) que influyen en el proceso de SH, reportadas en la literatura. Como resultado de la primera ronda de implementación del método Delphi se seleccionaron trece variables, las cuales se presentan a continuación.

- Tipo de datos del SU: este parámetro define las características de la información que está siendo transmitida; por ejemplo, video, audio o datos. Para cada tipo de datos hay diferentes requerimientos; por ejemplo, para datos de voz en una comunicación telefónica es muy importante el parámetro de retardo.
- Clase de aplicación/servicio del SU: para esta investigación los casos de estudio son RT y BE. Esto se ha decidido con base en las estadísticas de la consulta de literatura actual sobre SH para CRN. La clase de aplicación/servicio define la mayor parte de las características de una comunicación, como el retardo y las retransmisiones.
- Tiempo de transmisión estimado del SU: es el tiempo promedio que un SU ocupa las frecuencias asignadas al PU. Este parámetro puede ayudar a asumir una frecuencia adecuada para ser ocupada por un SU.
- Patrón de tráfico del PU: describe el comportamiento del tráfico generado por un PU y ayuda a modelar el uso del espectro licenciado, con lo cual mejora la exactitud en la predicción de los canales disponibles.

- Patrón de tráfico del SU: describe el comportamiento del tráfico del SU, lo cual es útil para describir la demanda de espectro en caso de que varios SU intenten acceder a frecuencias licenciadas.
- Geolocalización del PU: representa la localización geográfica del PU. Este parámetro está relacionado con el comportamiento del tráfico para una locación específica, la cual es útil en la predicción de la ocupación del espectro.
- SINR: este es un parámetro significativo para la detección de energía porque comprende la relación entre la potencia media de la señal y la potencia media de ruido más interferencia.
- AP: es la probabilidad de que una porción de frecuencia del espectro (por ejemplo, un canal) esté disponible en el momento en que un SU intente acceder al medio. Si la AP del canal es alta, ello quiere decir que el SU puede ocupar ese canal, lo cual reduce el riesgo de interferencia al PU.
- ETA: representa el tiempo promedio que un canal está disponible, esto indica al SU cuál canal tiene alta probabilidad para permitir una comunicación más larga sin interrupciones.
- Fecha de transmisión del SU: este parámetro señala la fecha de la transmisión del SU. La carga total del tráfico varía de acuerdo con ciertas fechas. Por tanto, este parámetro indica un posible calendario para diferentes cargas de tráfico y el porcentaje de ocupación de canales de acuerdo con la fecha.
- Hora de transmisión del SU: indica la hora en la cual comienza la transmisión del SU. De forma similar a la variable fecha de transmisión del SU, la hora de transmisión es importante porque la carga de tráfico varía de acuerdo con la hora del día.
- BW: conocer el BW disponible es crucial para la decisión de espectro y para determinar la capacidad del canal para el SU y PU, debido a que determina el rango de frecuencias que pueden ser ocupadas por el SU en un instante particular.
- BER: es el número de bits recibidos de una trama de datos que han sido alterados en un canal de comunicación. Este parámetro puede ayudar a evaluar las SO.

La segunda ronda del método Delphi implementado consideró las trece variables seleccionadas durante la primera ronda del proceso y el RIV

actualizado. El CAR determinó cuáles de estas son significativas, si debía adicionarse nuevas variables, o si se debía modificar o descartar variables seleccionadas inicialmente, lo cual se combinó con las estadísticas del RIV y se actualizó. En caso de desacuerdo entre miembros del CAR, se desarrolla un análisis global combinado con las estadísticas del RIV; posteriormente, se propone un segundo conjunto de variables para la tercera ronda, con el mismo procedimiento. Este proceso se repite iterativamente hasta alcanzar un consenso general por parte del CAR, combinado con las estadísticas del RIV. En el método Delphi propuesto, si el consenso no se da antes de la quinta ronda, la decisión final se toma con base en las estadísticas finales del RIV. En este caso, el consenso se logró en la tercera ronda, en la cual se descartaron ocho variables. Los resultados del método muestran que la variable *tipo de datos del SU* fue descartada porque está directamente relacionada con la variable *clase de servicio*. Las variables *patrón de tráfico del PU y SU* fueron descartadas debido a que pueden ser caracterizadas por la presencia y ausencia de PU y SU. Otras variables descartadas fueron la fecha y la hora de transmisión del SU, ya que durante el periodo de alta demanda de espectro, las SO son escasas y no es posible para el SU encontrar una frecuencia para asignar a la comunicación. Por otro lado, durante el periodo de baja demanda de espectro, la asignación de SO para SU no requiere este DC. La variable *geolocalización* determina directamente el comportamiento espectral, pero para este análisis dicha información ya está considerada en los datos capturados en un área específica, por lo que dicha variable es innecesaria. La variable *tiempo estimado de transmisión del SU* puede ser estimada por el tiempo promedio de una transmisión, y debido a que esta sería una constante que no es necesario evaluar con el algoritmo FAHP. Finalmente, la variable *BER* fue descartada, debido a que puede estimarse a través de la variable *SINR*, e incluirla sería redundante.

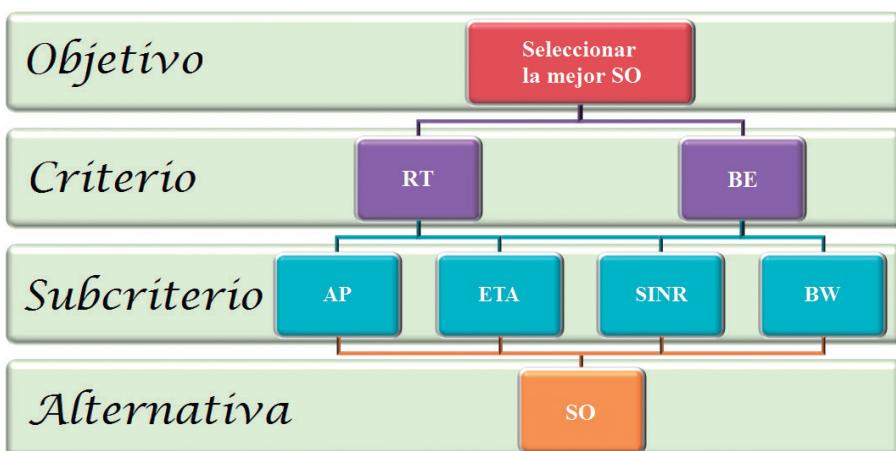
Después de tres rondas del método Delphi modificado, fueron seleccionadas cinco variables por la combinación del CAR y las estadísticas del RIV. Estas son: *clase de servicio del SU* (RT y BE); *AP, ETA, SINR* y *BW*. El próximo paso fue organizar los DC en criterios y subcriterios para el objetivo de seleccionar la mejor SO para el SU. Se consideró que la variable *clase de servicio* es más general que las otras variables, por lo que se decidió seleccionarla como criterio, fue clasificada como RT y BE, y las otras cuatro variables seleccionadas se consideraron subcriterios de la clase de servicio. En esta investigación el criterio clase de servicio es determinado por la aplicación del SU. Se considera que el objetivo es el mismo para RT y BE (seleccionar la mejor SO), sin embargo, la importancia (ponderación)

de cada subcriterio es diferente, y corresponde al enfoque de las aplicaciones RT y BE.

Los cuatro subcriterios fueron medidos y calculados a partir de datos experimentales de ocupación espectral capturados en las bandas GSM y Wi-Fi.

Estructura jerárquica. La estructura jerárquica del algoritmo FAHP se construyó con base en el objetivo, los criterios, los subcriterios y las alternativas seleccionadas. Dicha estructura se puede observar en la figura 3.2.

Figura 3.2. Estructura propuesta para el algoritmo FAHP



Fuente: adaptado de Hernández *et al* (2015).

Matrices de juicio. De acuerdo con el método AHP, una vez diseñada la jerarquía se construyen las matrices de juicios, las cuales corresponden a las evaluaciones comparativas que definen el nivel de importancia relativa entre cada combinación posible de parejas de criterios, subcriterios y alternativas, de forma independiente. Sin embargo, debido a que solo se tienen dos únicos criterios: RT y BE (cada uno con los mismos cuatro subcriterios), los cuales son mutuamente excluyentes, no tiene sentido realizar una matriz de juicios para este nivel. En el caso de las alternativas, debido a que las SO modifican sus características (subcriterios) dinámicamente en el tiempo, tampoco tendría sentido realizar una matriz de juicios a este nivel, y por ello se decidió que el algoritmo FAHP evaluara dinámicamente el conjunto de alternativas.

De acuerdo con Büyüközkan, Kahraman y Ruan (2004), “las personas encargadas de la toma de decisiones usualmente encuentran que se sienten me-

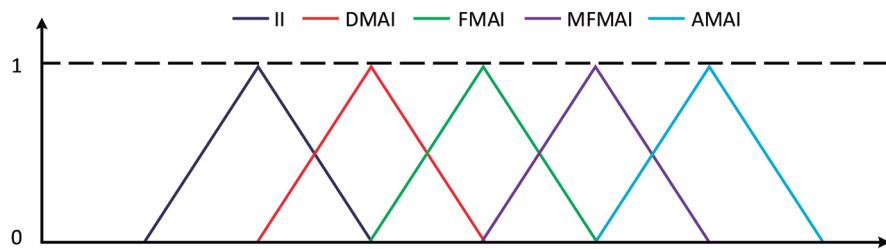
jor presentando sus juicios como un intervalo, en vez de dar un valor puntual y fijo. Esto se debe a que él, ella o ellos, son incapaces de explicar sus preferencias, dado la naturaleza difusa de los procesos de comparación humana". Por ello se decidió trabajar con una escala de TFN, presentados en la tabla 3.6 y en la figura 3.3. La escala de importancia difusa se obtuvo de la conversión de la escala de importancia fundamental de nueve niveles a números difusos presentada por Büyüközkan *et al.* (2004).

Tabla 3.6. TFN y TFN reciproco para la escala de importancia de FAHP

Nomenclatura	Escala de importancia	TFN	TFN reciproco
EI	Igualmente importante	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
MI	Moderadamente más importante	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
SI	Fuertemente más importante	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
VSI	Muy fuertemente más importante	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
XI	Extremadamente más importante	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Fuente: Büyüközkan *et al.* (2004), Büyüközkan y Çifçi (2012), Choudhary y Shankar (2012), Cor-tés (2011), Giupponi y Pérez-Neira (2008), Kaya y Kahraman (2010), Mehbodniya *et al.* (2012), Patil y Kant (2014) y Zadeh (1965).

Figura 3.3. TFN para la escala de importancia de FAHP



Fuente: elaboración propia.

En la ecuación (3.2) se describe una matriz de juicios de n criterios o subcriterios.

$$A = \begin{bmatrix} a_{ij} \end{bmatrix}_{nxn} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde $i = j = 1, 2, \dots, n$ y n es el número de criterios o subcriterios.

En el caso del algoritmo FAHP, las matrices de juicios que contienen los TFN representan las comparaciones por parejas entre subcriterios (Mehbodniya *et al.*, 2012), como lo describe la ecuación (3.3).

$$\tilde{A}(\tilde{a}_{ij})_{nxn} = \begin{bmatrix} (0.5, 1, 1.5) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (0.5, 1, 1.5) & \dots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & (0.5, 1, 1.5) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\text{Donde } (\tilde{a}_{ij}) = [\tilde{a}_{ij}]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}} \frac{1}{m_{ij}} \frac{1}{l_{ij}} \right)$$

Los elementos de la diagonal de cada matriz corresponden a la igualdad, porque comparan la importancia entre los mismos subcriterios. La mitad diagonal superior de cada matriz describe la importancia relativa del subcriterio de la primera columna con respecto al subcriterio de la primera fila.

Con base en la escala de importancia difusa presentada en la tabla 3.6 y en la figura 3.3, y el método Delphi modificado, se determinó el nivel de importancia relativa de cada par de subcriterios y se construyeron las matrices de juicios para los subcriterios. La matriz de juicios preliminar se construyó a partir de los resultados de la primera ronda del método Delphi modificado. Los resultados de la primera ronda fueron usados en la segunda ronda, tanto para el enfoque RT como para BE. El proceso de decisión se repite hasta que los resultados convergen; estos se presentan en las matrices de juicio para los subcriterios con el enfoque de RT (véase tabla 3.7) y para los subcriterios con el enfoque de BE (véase tabla 3.8).

Tabla 3.7. Matriz de juicios para los subcriterios de RT

Subcriterios	AP	ETA	SINR	BW
AP	(1/2,1,3/2) EI	(1,3/2,2) MI	(3/2,2,5/2) SI	(3/2,2,5/2) SI
ETA	(1/2,2/3,1) 1/MI	(1/2,1,3/2) EI	(3/2,2,5/2) SI	(3/2,2,5/2) SI
SINR	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(1/2,1,3/2) EI	(1,3/2,2) MI
BW	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(1/2,2/3,1) 1/MI	(1/2,1,3/2) EI

Fuente: Hernández *et al* (2015).

Tabla 3.8. Matriz de juicios para los subcriterios de BE

Subcriterios	AP	ETA	SINR	BW
AP	(1/2,1,3/2) EI	(1,3/2,2) MI	(1/3,2/5,1/2) 1/VSI	(1/3,2/5,1/2) 1/VSI
ETA	(1/2,2/3,1) 1/MI	(1/2,1,3/2) EI	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(2/5,1/2,2/3) 1/SI
SINR	(2,5/2,3) VSI	(3/2,2,5/2) SI	(1/2,1,3/2) EI	(3/2,2,5/2) SI
BW	(2,5/2,3) VSI	(3/2,2,5/2) SI	(2/5,1/2,2/3) 1/SI	(1/2,1,3/2) EI

Fuente: Hernández *et al* (2015).

Las aplicaciones RT y BE tienen diferentes enfoques. Para RT los subcriterios con más alta prioridad son los que reducen el retardo, como AP y ETA. Para BE los subcriterios con más alta prioridad son los que incrementan la tasa de datos, como BW y SINR.

Cálculo de los pesos normalizados. Con las matrices de juicios definidas se procedió a calcular los pesos normalizados para cada subcriterio, con base en el modelo propuesto por Mehbodniya *et al.* (2012). Estos resultados se basan en el análisis difuso extendido presentado en Chang (1996), como se describe a continuación.

El valor del i -ésimo objeto del análisis extendido es definido como se muestra en la ecuación (3.4).

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (3.4)$$

Donde:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right)$$

La matriz inversa de la ecuación (3.4) se calcula a partir de la ecuación (3.5).

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (3.5)$$

El grado de posibilidad de que un número difuso convexo sea más grande que k números difusos convexos, está dado por la ecuación (3.6).

$$V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i) = V[(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1) \wedge (\tilde{S} \geq \tilde{S}_2) \dots (\tilde{S} \geq \tilde{S}_k)] = \min \{V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i)\} \quad (3.6)$$

Donde el grado de posibilidad de que $\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2$ y $\tilde{S}_2 \geq \tilde{S}_1$ esta dado por las ecuaciones (3.7) y (3.8), respectivamente.

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ 0 & l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$V(\tilde{S}_2 \geq \tilde{S}_1) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.8)$$

Si se asume que $d'_1 = \min\{V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2)\}$, el vector de pesos es $w' = (d'_1, d'_2, \dots, d'_n)$.

Finalmente, después de la normalización, el vector de pesos no difuso está dado por la ecuación (3.9).

$$W = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T = \left(\frac{d'_1}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \frac{d'_2}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \dots, \frac{d'_n}{\sum_{i=1}^n d'_i} \right) \quad (3.9)$$

A partir del anterior procedimiento, los resultados del vector de pesos correspondiente al criterio RT se observan en la tabla 3.9, mientras que los correspondientes al criterio BE se observan en la tabla 3.10.

Tabla 3.9. Pesos normalizados de los subcriterios de RT

Subcriterio RT	AP	ETA	SINR	BW
Pesos normalizados	0,3593	0,2966	0,1970	0,1471

Fuente: Hernández *et al* (2015).

Tabla 3.10. Pesos normalizados de los subcriterios de BE

Subcriterio BE	AP	ETA	SINR	BW
Pesos normalizados	0,1607	0,1523	0,3949	0,2921

Fuente: Hernández *et al* (2015).

Los pesos normalizados describen el grado de importancia relativa de cada subcriterio para la selección del canal de respaldo, según el criterio de RT o BE. Por ejemplo, en el caso de que un SU requiera un canal de respaldo para una aplicación de TR, entonces la selección de dicho canal dependerá en un 36% de la AP del canal, 30% del ETA del canal, 20% de la SINR del canal, y 14% del BW del canal, aproximadamente.

Con los pesos descritos en las tablas 3.9 y 3.10 se evalúan todos los canales de frecuencia disponibles, los cuales hacen parte de las alternativas en la jerarquía del algoritmo FAHP desarrollado, y se clasifican en un *ranking* de mayor a menor puntaje, siendo el canal de mayor puntaje el seleccionado como canal de respaldo.

El puntaje de cada SO se calcula usando la ecuación (3.10) para el enfoque RT y la ecuación (3.11) para el enfoque BE. La SO con el puntaje más alto es la objetivo, aquella con el segundo puntaje más alto es la de respaldo, en tanto que las siguientes son SO candidatas en orden de mayor a menor puntaje.

$$\text{Score}_i - \text{RT} = AP \times 0,3593 + ETA \times 0,2966 + SINR \times 0,1970 + BW \times 0,1471 \quad (3.10)$$

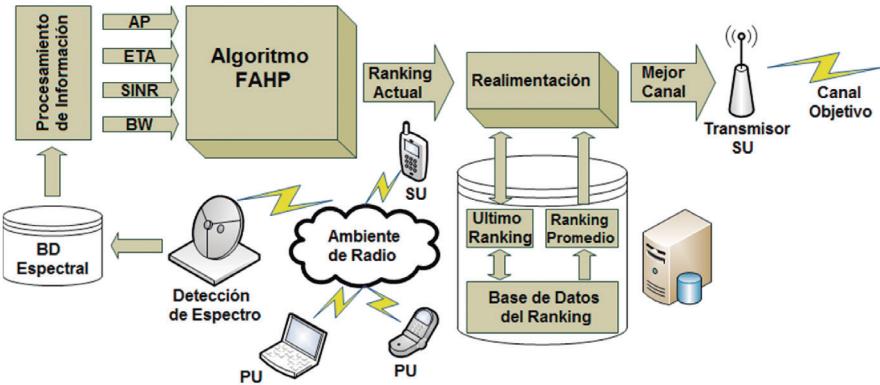
$$\text{Score}_j - \text{BE} = AP \times 0,1607 + ETA \times 0,1523 + SINR \times 0,3949 + BW \times 0,2921 \quad (3.11)$$

Algoritmo multivariable difuso realimentado (FFAHP)

El algoritmo FFAHP propuesto tiene por objetivo incrementar la precisión en la selección de la SO. Para lograr esto, el FFAHP realimenta la información de las evaluaciones de las SO realizadas anteriormente. La selección de la SO se lleva a cabo con base en la evaluación de la información actual del espectro y las evaluaciones pasadas.

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 RBW, Span y tiempo de barrido, configurados en el analizador de espectro (Pedraza *et al.*, 2016). Los datos capturados son almacenados en una base de datos. Periódicamente, la unidad de procesamiento de información calcula el valor de los DC: AP, ETA, SINR y BW, y los normaliza sobre una base de 100. El algoritmo FAHP recibe los valores actualizados de cada DC y procede a evaluar cada SO. Si la aplicación es de RT utiliza la ecuación (3.10), y si es una aplicación de BE utiliza la ecuación (3.11), donde Score *i* es el puntaje asignado a la SO *i* para la aplicación RT, y Score *j* es el puntaje asignado a la SO *j* para la aplicación BE. El rango del puntaje de evaluación puede estar entre 0 y 100, siendo 100 el mejor puntaje posible. La figura 3.4 ilustra el diseño del algoritmo FFAHP.

Figura 3.4. Esquema del algoritmo FFAHP propuesto



Fuente: Hernández, Pedraza y Rodríguez-Colina (2016).

En esta parte del proceso se tiene un *ranking* de cada una de las SO, con base únicamente en la información actual de los DC. Sin embargo, la SO con la mejor evaluación hasta el momento puede no ser la seleccionada finalmente, debido a que este valor de evaluación se pondera con las evaluaciones realizadas en el pasado. El proceso de realimentación recibe las evaluaciones actuales (PS) de cada SO y las pondera con el valor de la última evaluación reciente (LS) y el promedio de las evaluaciones (AS) realizadas en la ultima hora. Esta ponderación da como resultado el *ranking* definitivo de las SO. El procedimiento anterior se describe en la ecuación (3.12).

$$\text{Final_Score}_{i/j} = \alpha \times PS + \beta \times LS + (1 - \alpha - \beta) \times AS \quad (3.12)$$

Donde α y $\beta \in [0,1]$, en tanto que $\text{Final_Score}_i/j$ es el valor de la evaluación final de la SO i o j.

La SO 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 SO seleccionada finalmente se encuentra ocupada, el algoritmo FFAHP sobrescribe el valor de LS en cero para la respectiva SO.

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 pre-

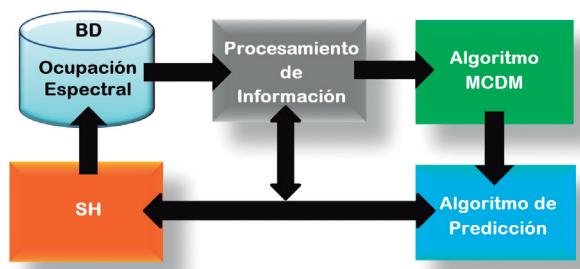
cisión en la selección de la SO fue más alta. Dichos valores corresponden a $\alpha=0,60$ y $\beta=0,35$, con una precisión experimental del 87%.

Algoritmo multivariable proactivo predictivo (PPTS)

El principal objetivo de desarrollar el algoritmo multivariable PPTS, es reducir el nivel de interferencia entre el PU y el SU. El desarrollo del algoritmo PPTS está compuesto por dos algoritmos: uno de predicción, encargado de pronosticar la llegada del PU, y otro algoritmo MCDM, encargado de seleccionar la SO. El objetivo del algoritmo de predicción es informarle al algoritmo MCDM cuándo debe realizar el SH, y el algoritmo MCDM decide donde realizarlo. Para lograr esto, el algoritmo de predicción modela la serie de tiempo de potencias medidas en cada canal. Luego hace el pronóstico de la potencia de cada TS para el respectivo canal, y, con base en el umbral de decisión dado por la ecuación de probabilidad de falsa alarma, predice si el canal estará ocupado o disponible. El alcance de los pronósticos va hasta el TS donde el algoritmo prediga que el canal estará ocupado por un PU.

La figura 3.5 describe el diagrama de bloques del algoritmo PPTS. Primero, el módulo de procesamiento de información calcula el valor promedio de los DC con la información de la base de datos, y le entrega esta información al algoritmo MCDM. Segundo, el algoritmo MCDM actualiza el *ranking* de las SO, selecciona la mejor y se lo informa al algoritmo de predicción. Tercero, el algoritmo de predicción pronostica durante cuántos TS estará disponible la SO seleccionada y se lo informa al módulo de SH. Cuarto, el módulo de SH realiza el SH cuando se cumpla el TS predicho o llegue un PU, lo primero que ocurra. Finalmente, se actualiza la base de datos con la información del último SH y se repite el ciclo nuevamente, hasta que termine el tiempo de transmisión del SU.

Figura 3.5. Esquema del algoritmo PPTS propuesto



Fuente: elaboración propia.

Luego de llevar a cabo varias pruebas con diferentes algoritmos MCDM, pero manteniendo el mismo algoritmo de predicción, se evidenció que las diferencias en los niveles de desempeño del algoritmo combinado son muy similares a las diferencias de los algoritmos MCDM sin combinar, por lo que se decidió seleccionar como algoritmo MCDM el algoritmo FFAHP, por tener el mejor desempeño. De acuerdo con lo anterior, esta sección se concentrará en el diseño del algoritmo de predicción.

A pesar de que en la actualidad existen varios modelos de predicción, se decidió seleccionar las series de tiempo, debido a sus buenos resultados evidenciados en publicaciones y a su bajo nivel computacional, dado que son modelos lineales (Y. Chen & Hee-Seok, 2016). Las series de tiempo son modelos idóneos para series correlacionadas como el tráfico de redes móviles (Y. Chen & Hee-Seok, 2016). El estudio de series de tiempo tiene como objetivo central desarrollar modelos estadísticos que expliquen el comportamiento de una variable aleatoria que varía con el tiempo, o con la distancia, o según un índice, y que permiten estimar pronósticos futuros de dicha variable aleatoria. Lo anterior convierte a las series de tiempo en una excelente opción para modelar el comportamiento del PU y realizar predicciones sobre su ocupación espectral en las bandas licenciadas (Y. Chen & Hee-Seok, 2016).

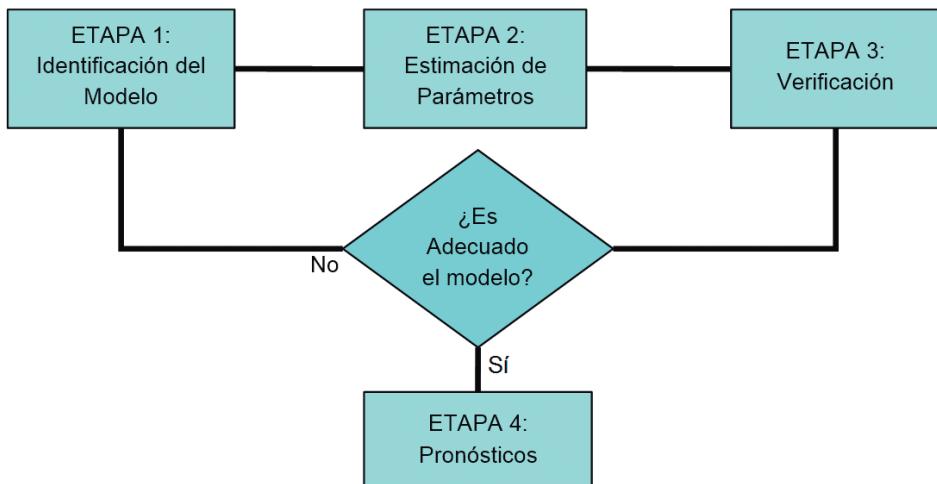
Con el objetivo de analizar el desempeño de diferentes tipos de series de tiempo, se seleccionaron los modelos AR, MA y ARMA, a fin de realizar predicciones sobre el comportamiento del PU, por ser los modelos con la mejor relación entre desempeño y complejidad (Y. Chen & Hee-Seok, 2016). Además, a fin de evaluar la reducción en el nivel de interferencia del algoritmo PPTS, se incluyó también en los análisis, los resultados del algoritmo FFAHP sin combinarlo con ningún algoritmo de predicción.

La influencia más importante que tiene el modelo de predicción sobre el algoritmo PPTS es el aumento en el número de SH que se pueden producir, debido a un bajo nivel de precisión de la predicción. Por lo anterior, las EM para el algoritmo PPTS se enfocan en la cantidad y las características de los SH realizados. Para evaluar el algoritmo PPTS se determinaron seis EM: AAH, AAFH, AAPH, AAIH, AAEH y AAUH, las cuales se describen en la tabla 3.14.

Para desarrollar los tres modelos de series de tiempo AR, MA y ARMA se siguió la metodología de Box-Jenkins (Box & Jenkins, 1976), por ser la más utilizada y reconocida. Esta metodología consiste en construir un modelo de series de tiempo en cuatro etapas: (1) identificación, (2) estimación de

parámetros, (3) verificación del modelo y (4) pronósticos del modelo. Esta metodología es un proceso iterativo que se puede representar gráficamente mediante la figura 3.6 (Box & Jenkins, 1976).

Figura 3.6. Metodología de Box-Jenkins



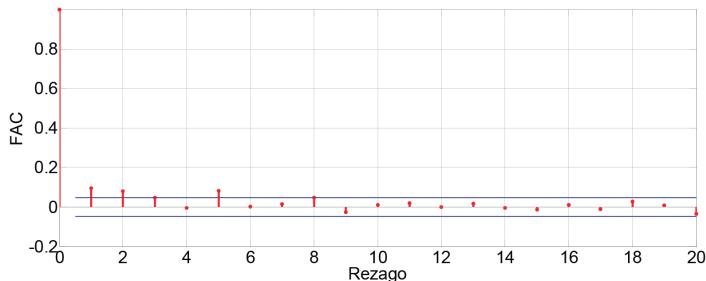
Fuente: elaboración propia.

Antes de aplicar la metodología de Box-Jenkins, es necesario verificar si la serie de tiempo es estacionaria. Para esto se realizó la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller. Según el criterio de Dickey-Fuller, la serie no es estacionaria, ya que el valor absoluto del test es menor al valor absoluto del valor crítico del 5 %. Para lograr la estacionariedad se diferencia la serie una vez, se realiza la prueba de raíz unitaria nuevamente, y se corrobora que la serie ya es estacionaria; por tanto, se inicia con la metodología de Box-Jenkins.

La primera etapa es la identificación del modelo, la cual busca seleccionar un tipo de serie de tiempo adecuado, antes de estimar sus parámetros; sin embargo, como el objetivo es comparar los modelos AR, MA y ARMA, esta etapa no se tendrá en cuenta.

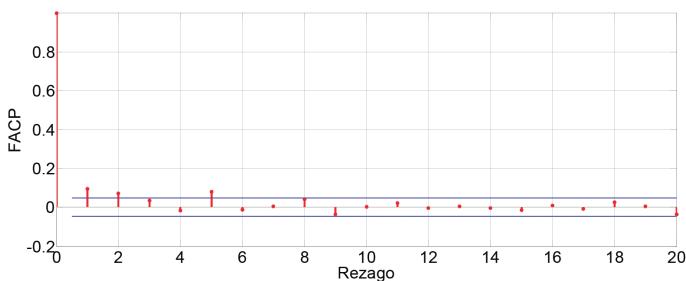
La segunda etapa es la estimación de los parámetros de los modelos, allí se determinan los coeficientes de los modelos de series de tiempo AR, MA y ARMA, a partir de las FAC (véase figura 3.7) y de las FACP (véase figura 3.8), que identifican los valores de q y p respectivamente, así como los rezagos que deben hacer parte del modelo.

Figura 3.7. Muestra de la FAC



Fuente: elaboración propia.

Figura 3.8. Muestra de la FACP



Fuente: elaboración propia.

La tercera etapa es la verificación, en esta se revisa si el modelo es adecuado (correctamente estimado), para lo cual se realiza un análisis residual. Los residuos son las diferencias entre los datos observados (reales) y los ajustados (calculados). Si el modelo particular se ajusta adecuadamente, las FAC y las FACP sobre los residuos no deben evidenciar ningún tipo de correlación entre ellos, de lo contrario, es necesario iterar una vez más, incluyendo los rezagos identificados (donde existe correlación) en el análisis residual.

En cada modelo se itera el número de veces que sea necesario, hasta que no se evidencie ningún tipo de correlación en los residuales. En este punto ya se cuenta con un modelo AR, MA y ARMA definido.

Dado que se tiene un modelo AR, MA y ARMA para cada uno de los quinientos canales de GSM y los correspondientes en Wi-Fi, y cada uno de estos tiene la capacidad de actualizarse, no tiene sentido presentar dichos modelos. Sin embargo, las ecuaciones (3.13), (3.14) y (3.15) describen los modelos matemáticos generales de las series de tiempo AR, MA y ARMA, respectivamente, y la tabla 3.11 presenta el orden de los modelos

y su porcentaje de error en el modelado de la serie de tiempo de potencias (no de disponibilidad).

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + a_t \quad (3.13)$$

$$X_t = \mu - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.14)$$

$$Z_t = \mu - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} + \varphi_1 Z_{t-1} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + a_t \quad (3.15)$$

Tabla 3.11. Modelos de series de tiempo propuestos

Modelo	Orden de p	Orden de q	Error en LT	Error en HT
AR	19	0	2.47 %	3.43 %
MA	0	19	2.48 %	3.90 %
ARMA	19	19	2.20 %	3.19 %

Fuente: elaboración propia.

Modelo adaptativo multivariable de SH (MAPFF)

El *modelo adaptativo multivariable predictivo realimentado difuso de SH*, denominado MAPFF, es un multimodelo conformado inicialmente por los tres algoritmos desarrollados con anterioridad: FAHP, FFAHP y PPTS. MAPFF cuenta asimismo con un algoritmo decisor encargado de seleccionar cuál de los tres algoritmos desarrollados es el más adecuado para controlar el proceso de movilidad espectral, según los requerimientos del SU (en realidad, de la aplicación que se va a ejecutar) y las características del ambiente de radio y del escenario donde se desarrolla la comunicación del SU.

Diseño del algoritmo decisor

El diseño del algoritmo decisor se basa en un conjunto de reglas que le permitirán tomar la decisión de qué algoritmo de SH es mejor, de acuerdo con los requerimientos del SU y las características del ambiente de radio

y del escenario donde se desarrolla la comunicación del SU, que también se denomina DC. Los DC, para que el algoritmo decisor seleccione inteligentemente cuál algoritmo es el más adecuado para controlar el proceso de movilidad espectral, se clasifican en variables de información, control y objetivo (tabla 3.12). Las primeras proporcionan información que puede ayudar a una mejor toma de decisiones por parte del algoritmo decisor; las segundas son aquellas variables que se pueden manipular por parte del modelo de SH para obtener cambios significativos en las variables objetivo; las tercera son aquellas variables que determinan el nivel de desempeño del modelo de SH y de las cuales se esperan valores dentro de rangos específicos.

Tabla 3.12. DC para el algoritmo decisor

Variables de información	Variables de control	Variables objetivo
Tipo de red	Frecuencia de operación	Nivel de interferencia
Nivel de tráfico	Potencia de transmisión	Nivel de retardo
Clase de aplicación	Modulación	Nivel de <i>throughput</i>
Patrón de tráfico PU/SU	Codificación	Tasa de <i>handoff</i>
DC: AP, ETA, SINR, BW	Ancho de banda	

Fuente: elaboración propia.

Propuesta inicial del modelo adaptativo multivariable (MAPFF)

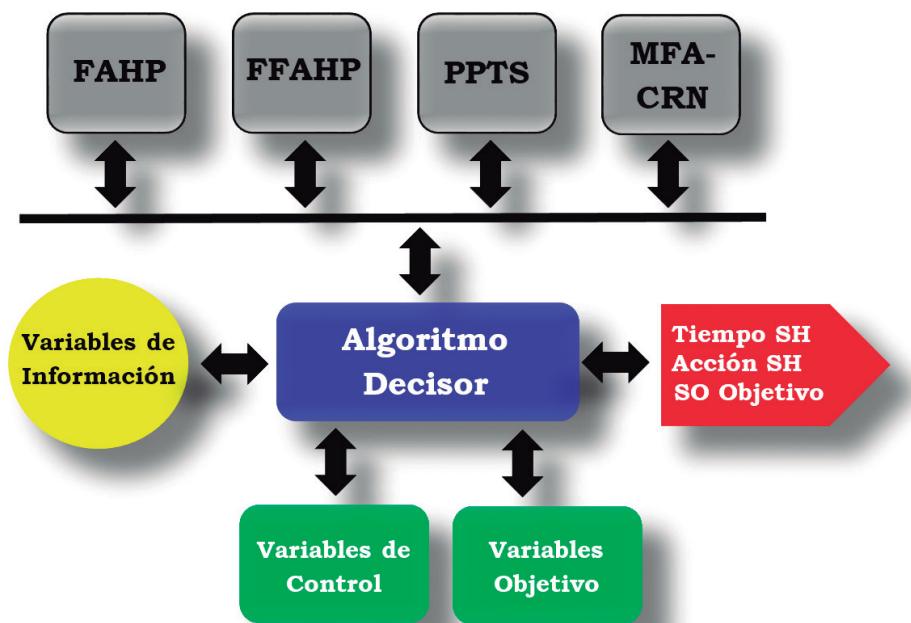
Del análisis de la literatura actual sobre modelos de SH para CRN, se puede concluir que ningún modelo es el más adecuado para todos los entornos de comunicación, cada uno es el mejor en determinadas circunstancias. Tomando como argumento lo anterior, se realiza una propuesta inicial de un multimodelo de SH, MAPFF, el cual se fundamenta en un algoritmo decisor encargado de seleccionar entre los tres algoritmos desarrollados anteriormente, el que mejor se pueda desempeñar, con base en las características del entorno de radio suministradas por las variables de información, los requerimientos de la aplicación que se va a ejecutar,

suministrados estos por las variables objetivo, y parámetros de comunicación que se pueden modificar, descritos por las variables de control. La figura 3.9 presenta la propuesta inicial del modelo MAPFF, y posteriormente, con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se llevarán a cabo los ajustes necesarios y pertinentes con el objetivo de mejorar el desempeño del modelo.

Métricas de evaluación

Para evaluar el desempeño de los algoritmos de SH híbridos: FAHP y FFAHP, propuestos en esta investigación, se determinaron cinco EM, los cuales se describen en la tabla 3.13. Para el algoritmo proactivo predictivo: PPTS, también propuesto en esta investigación, se determinaron seis EM que se describen en la tabla 3.14. En ambas tablas se presenta la sigla, el significado, la descripción y el tipo de EM; este último hace referencia a si la métrica es de beneficio (entre mayor mejor) o de costo (entre menor mejor). En las EM la palabra promedio hace referencia a que los resultados de estas corresponden al promedio de los valores arrojados por varios experimentos realizados.

Figura 3.9. Propuesta inicial del modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.13. EM utilizadas en la evaluación de los algoritmos FAHP y FFAHP

Sigla	Nombre	Descripción	Tipo de EM
AAH	Número de <i>Handoff</i> Promedio Acumulado	Es el número total de <i>handoff</i> realizados durante los diez minutos de transmisión del SU.	Costo
AAFH	Número de <i>Handoff</i> Fallidos Promedio Acumulado	Es el número de <i>handoff</i> que el SU no pudo materializar porque encontró las respectivas SO objetivo ocupadas.	Costo
ABW	Ancho de Banda Promedio	Es el BW promedio utilizado por el SU durante los diez minutos de su transmisión.	Beneficio
AAD	Retardo Promedio Acumulado	Es el tiempo promedio total experimentado por el SU durante la transmisión de una determinada cantidad de información.	Costo
AAT	<i>Throughput</i> Promedio Acumulado	Es la tasa de datos efectiva transmitida por el SU durante los diez minutos de comunicación.	Beneficio

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.14. EM utilizadas en la evaluación del algoritmo PPTS

Sigla	Nombre	Descripción	Tipo de EM
AAH	Número de <i>Handoff</i> Promedio Acumulado	Es el número total de <i>handoff</i> realizados durante los diez minutos de transmisión del SU.	Costo
AAFH	Número de <i>Handoff</i> Fallidos Promedio Acumulado	Es el número de <i>handoff</i> que el SU no pudo materializar porque encontró las respectivas SO objetivo ocupadas.	Costo
AAPH	Número de <i>Handoff</i> sin Interferencia Promedio Acumulado	Es el número total de <i>handoff</i> predictivos realizados antes de la llegada del PU, durante los diez minutos de transmisión del SU.	Beneficio-costo
AAIH	Número de <i>Handoff</i> con Interferencia Promedio Acumulado	Es el número total de <i>handoff</i> reactivos realizados una vez llega el PU, durante los diez minutos de transmisión del SU.	Costo

Sigla	Nombre	Descripción	Tipo de EM
AAEH	Número de <i>Handoff</i> Perfecto Promedio Acumulado	Es el número de AAPH realizados muy cerca de la llegada del PU, pero sin causar interferencia a este último, durante los diez minutos de transmisión del SU.	Beneficio
AAUH	Número de <i>Handoff</i> Anticipado Promedio Acumulado	Es el número de AAPH realizados de forma muy anticipada a la llegada del PU, durante los diez minutos de transmisión del SU.	Costo

En el caso del algoritmo PPTS, para realizar una evaluación comparativa justa, se tomó cada uno de los valores absolutos de las métricas AAPH, AAIH, AAEH y AAUH, y se dividieron por el valor absoluto de AAH correspondiente a cada escenario de evaluación, es decir, se tomaron los valores relativos con respecto a AAH.

AAPH representa los SH realizados antes de la llegada del PU, mientras que AAIH representa los SH realizados después de la llegada del PU; por tanto, AAH = AAPH + AAIH. La EM AAPH es dual, de beneficio, ya que es deseable que el SH se realice antes de la llegada del PU, a fin de evitar la interferencia entre PU y SU, y de costo cuando la predicción es imprecisa y se realiza con demasiada anticipación a la llegada del PU, lo cual provoca un aumento en AAH. Debido a lo anterior, se decidió crear las EM AAEH y AAUH, las cuales son subconjuntos de AAPH. AAEH representa los SH que se realizan muy cerca de la llegada del PU, pero anterior a esta; es decir, son los SH perfectos, ya que optimizan el tiempo disponible de la SO que están utilizando. AAUH representa los SH que se realizan de forma muy anticipada a la llegada del PU, lo cual produce un aumento de AAH. Para determinar si una predicción se clasifica como AAEH, se verifica si el SH se realizó posteriormente al 80% del tiempo de disponibilidad de la SO en dicho momento; en el caso de AAUH se verifica si el SH se realizó antes del 20% del tiempo de disponibilidad de la SO en dicho momento. Lo anterior implica que AAPH no es igual a la suma de AAEH y AAUH, sino que también hay un número de SH intermedios, que se realizan entre el 20 y el 80% del tiempo de disponibilidad de la SO, los cuales se pueden calcular como AAPH - AAEH - AAUH.

Con el objetivo de facilitar el análisis comparativo de cada algoritmo, se calcularon los valores relativos (en porcentaje) de cada EM. Para las métricas de tipo beneficio se calculó el valor relativo (Rel) del algoritmo *i*, a partir del valor absoluto (Abs) y el valor máximo (Max) de la EM, como se describe en la ecuación (3.16). Para las métricas de tipo costo se calculó el valor relativo

(Rel) del algoritmo i, a partir del valor absoluto (Abs) y el valor mínimo (Min) de la EM, como se describe en la ecuación (3.17).

$$X_i^{Rel} = \frac{X_i^{Abs}}{X_{Max}^{Abs}} \times 100\% \quad (3.16)$$

$$X_i^{Rel} = \frac{X_i^{Min}}{X_i^{Abs}} \times 100\% \quad (3.17)$$

Para el cálculo de los puntajes globales, se ponderó como lo describe la ecuación (3.18) en el caso de los algoritmos híbridos y como lo describe la ecuación (3.19) en el caso del algoritmo predictivo.

$$PG_i = 0.225 \times AAH_i + 0.025 \times AAFH_i + 0.25 \times (ABW_i + AAD_i + AAT_i) \quad (3.17)$$

$$G_i = 0.02 \times AAFH_i + 0.18 \times AAPH_i + 0.2 \times (AAH_i + AAIH_i + AAEH_i + AAUH_i) \quad (3.18)$$

Desarrollo del simulador de SH

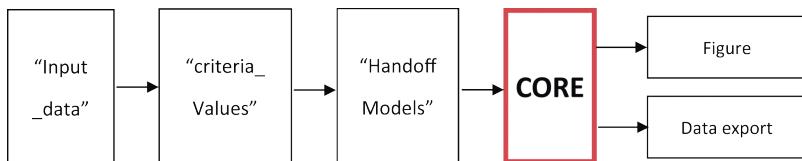
La herramienta de simulación propuesta fue desarrollada en Matlab (Matlab, 2015) y está diseñada para permitir al usuario trabajar en un ambiente amigable y parametrizable según las pruebas que sea necesario llevar a cabo. Esta herramienta se basa en datos de ocupación espectral reales, capturados de las bandas de frecuencia GSM y Wi-Fi, a fin de incorporar el comportamiento real del PU a la evaluación del desempeño del algoritmo de SH seleccionado. La herramienta propuesta permite seleccionar entre dieciséis posibles algoritmos de SH, enfocados a aplicaciones de RT o BE. También es posible modificarlos, o incluso proponer uno propio. Además, permite configurar parámetros de interés como el tiempo de transmisión del SU o el tipo de modulación, entre otros. La selección de frecuencia se toma a partir de los cuatro DC: AP, ETA, SINR y BW. La evaluación del desempeño de los algoritmos de SH se realiza a partir de las cinco EM: AAH, AAFH, ABW, AAD y AAT.

Diseño de la herramienta de simulación

La herramienta cuenta con un entorno gráfico y está conformada básicamente por cinco funciones y un núcleo principal, como se observa en la figura

3.10. Cada función es parametrizada con diferentes valores de entrada, los cuales corresponden a los datos que el usuario puede modificar desde el entorno gráfico.

Figura 3.10. Diagrama básico del simulador de SH propuesto

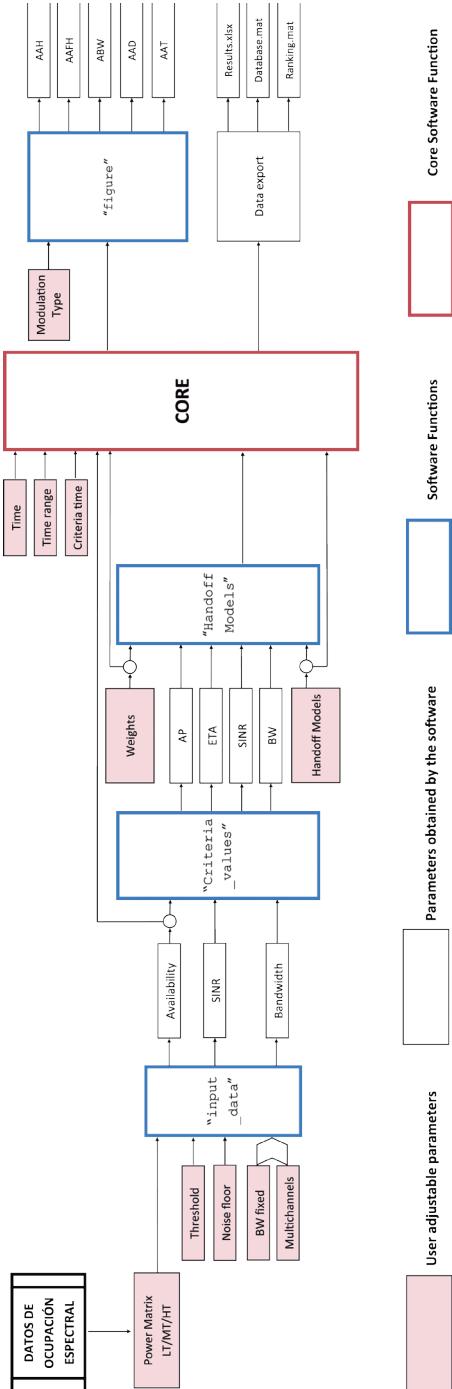


Fuente: Hernández y Giral (2015).

La función *input_data* busca realizar un preprocessamiento de los datos de ocupación espectral capturados de la banda de frecuencia GSM o Wi-Fi (de acuerdo con la selección del usuario), los cuales están dados en niveles de potencia. A partir del preprocessamiento de la función *input_data* se obtienen los valores de cada uno de los cuatro DC: AP, ETA, SINR y BW. La función *criteria_values* calcula el valor promedio de cada uno de los DC, de acuerdo con la configuración que haya realizado el usuario en el entorno gráfico. La función *Ranking* realiza una clasificación de las SO en la banda licenciada, de la mejor a la peor, de acuerdo con la lógica del algoritmo de SH seleccionado. La función *core* realiza la evaluación paso a paso del algoritmo seleccionado, durante el tiempo de transmisión configurado por el usuario, y evalúa las decisiones tomadas por el algoritmo en relación con los datos de ocupación espectral reales. La función *figure* está encargada de generar las figuras correspondientes a las EM: AAH, AAFH, ABW, AAD y AAT, de la herramienta, con base en los resultados almacenados por la función *core*. Finalmente, la función *data export* exporta los datos cuantitativos de todo el proceso de SH paso a paso, en un archivo .xls (Excel) o .mat (Matlab).

En la figura 3.11se puede observar una descripción más detallada de la estructura de la herramienta de simulación propuesta. Este esquema permite identificar el flujo de datos entre cada uno de los bloques o funciones, desde la captura hasta la construcción de las figuras y las matrices de salida. Los bloques llenos de color rojo hacen referencia a los datos que pueden ser parametrizados por el usuario, en tanto que los bloques sin color se refieren a los valores que son determinados por el *software*. Cada una de las cinco funciones y sus valores de entrada y de salida se explican detalladamente en las siguientes secciones.

Figura 3.11. Diagrama detallado de la solución propuesta



Fuente: adaptada de Hernández y Giral (2015).

Bases de datos

La herramienta propuesta funciona con datos de ocupación espectral reales que están organizados a partir de tres matrices de datos de potencia: PM-LT, PM-MT y PM-HT (que representan el nivel de tráfico del PU), para dos tipos de tecnología: GSM y Wi-Fi (*load database*). Lo anterior equivale a tres bases de datos para GSM y otras tres para Wi-Fi. Sin embargo, cada una de estas bases de datos se divide en dos: una porción de datos correspondientes a una hora, para conformar la matriz de entrenamiento, y la porción de los datos siguientes correspondientes a diez minutos, para conformar la matriz de evaluación, por lo que en total se tienen seis matrices de potencias por cada tipo de red (GSM y Wi-Fi): PM-LT-TR, PM-LT-EV, PM-MT-TR, PM-MT-EV, PM-HT-TR y PM-HT-EV. La herramienta utiliza la base de datos de entrenamiento para configurar los parámetros iniciales del algoritmo de *handoff* seleccionado y la base de datos de evaluación para calcular sus métricas de evaluación (véase tabla 3.15).

La herramienta propuesta también permite a los usuarios trabajar con datos de ocupación espectral externos a los predefinidos en la configuración inicial.

Tabla 3.15. Bases de datos de ocupación espectral

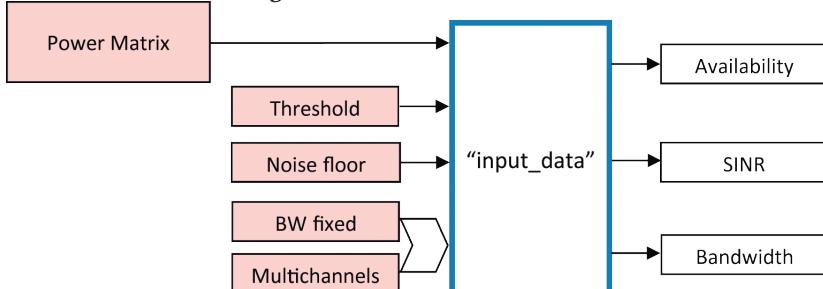
Red	Traza	Nivel de Tráfico	Tiempo
GSM	Evaluación	Alto	10 min
		Medio	
		Bajo	
	<i>Training</i>	Alto	60 min
		Medio	
		Bajo	
Wi-Fi	Evaluación	Alto	10 min
		Medio	
		Bajo	
	<i>Training</i>	Alto	60 min
		Medio	
		Bajo	

Fuente: Hernández y Giral (2015).

Función Input_Data

Con el objetivo de parametrizar las diferentes variables iniciales, la herramienta propuesta cuenta con cuatro parámetros de entrada ajustables por el usuario (figura 3.12), cada uno de estos parámetros es descrito en la tabla 3.16.

Figura 3.12. Parámetros iniciales



Fuente: Hernández y Giral (2015).

Tabla 3.16. Descripción parámetros de entrada para Input_Data

Parámetros	Descripción
<i>Threshold</i>	Umbral de decisión para determinar si una SO está ocupada por un PU
<i>Noise floor</i>	Piso de ruido promedio del analizador de espectro
<i>BW fixed</i>	BW fijo para cada canal de frecuencia
<i>Multichannels</i>	Número máximo de canales adyacentes disponibles que se pueden agrupan para formar un solo canal

Fuente: Hernández y Giral (2015).

La función *input_data* está dividida en tres secciones. Después de seleccionar el nivel de tráfico (LT, MT, HT) y el tipo de red (GSM, Wi-Fi), la primera sección genera las matrices: AM-LT-TR y AM-LT-EV, AM-MT-TR y AM-MT-EV, o AM-HT-TR y AM-HT-EV, de acuerdo con el nivel de tráfico seleccionado. Lo anterior se logra comparando elemento por elemento (entre

filas y columnas) de cada matriz con el valor de *Threshold*, de acuerdo con la ecuación (3.20), donde 1 representa una frecuencia disponible y 0 una frecuencia no disponible. Las matrices de disponibilidad son entradas para la función *core*.

$$Available = \begin{cases} 1 & If\ Power > Threshold \\ 0 & If\ Power < Threshold \end{cases} \quad (3.20)$$

La segunda sección se encarga de generar la matriz SINR, a través de la resta de cada elemento de las matrices de potencias con el valor de piso de ruido promedio, determinado por el usuario (ecuación (3.21)).

$$SINR = [Power] - Noise\ Floor \quad (3.21)$$

La tercera sección genera la matriz de BW, a partir de la AM y los parámetros *BW_fixed* y *Multichannels*. A diferencia de las secciones previas, esta requiere una programación más estructurada, debido a que debe contar la cantidad de ‘1’s adyacentes a la derecha de cada elemento de la AM (obtenida en la primera sección), hasta alcanzar el valor definido en *Multichannels* o hasta que aparezca un ‘0’, y luego repetir este proceso hacia la izquierda. Cuando termina de evaluar la condición en las dos direcciones calcula el “BW” para el elemento de la matriz mediante la ecuación (3.22).

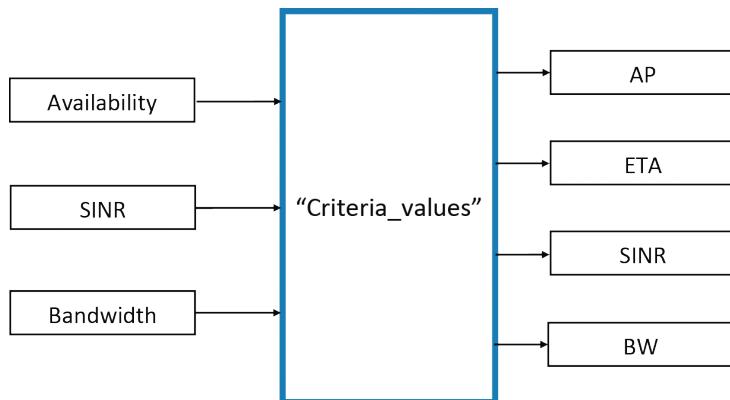
$$Bandwidth = BW_{fixed} \times (Count + Availability\ Current\ Channel) \quad (3.22)$$

El pseudocódigo correspondiente a la función *input_data* se describe en el anexo A.

Función Criteria_Values

El flujo de información de la segunda función de la herramienta propuesta (*criteria_values*) se puede observar en la figura 3.13. Los datos de entrada corresponden a las salidas de la función *input_data*, y sus salidas corresponden a cuatro vectores filas descritos en la tabla 3.17.

Figura 3.13. Flujo de datos de entrada y de salida, función *criteria_values*



Fuente: adaptada de Hernández y Giral (2015).

Tabla 3.17. Vectores *criteria_values*

Siglas	Promedio	Descripción
AP	Probabilidad de disponibilidad	Promedio de cada una de las columnas (canales) de la AM
ETA	Tiempo medio de disponibilidad	Promedio de '1's consecutivos de la AM por columna (canal), multiplicado por el valor de TS
SINR	Promedio de SINR	Promedio de cada columna (canal) de la matriz de SINR sin tener en cuenta los '0's
BW	Promedio de BW	Promedio de cada una de las columnas (canales) de la matriz de BW

Fuente: Hernández y Giral (2015).

El vector AP corresponde al promedio de cada una de las columnas (canales) de la AM, e indica la probabilidad de que dicho canal esté disponible. El vector ETA requiere un preprocesamiento adicional, ya que inicialmente se debe construir una matriz, donde cada uno de sus elementos de una misma columna representa la cantidad de '1's seguidos de la AM antes de encontrar un '0', y esto indica la cantidad de tiempo que la frecuencia está disponible antes de ser ocupada por un PU. Finalmente, a la matriz obtenida se le calcula el promedio por columna. El vector SINR está formado por el promedio de cada columna de la matriz SINR sin tener en cuenta los '0's. El vector BW calcula el promedio de cada columna de la matriz de BW.

El tamaño de cada uno de los vectores promedio es de $1 \times n$, donde „n“ corresponde a la cantidad de columnas (canales) de la matriz de potencia.

El pseudocódigo correspondiente a la función *criteria_values* se describe en el anexo B.

Función *ranking*

La función que calcula el *ranking* no tiene un nombre en particular, ya que corresponde a los diferentes algoritmos de SH que el usuario puede seleccionar para cada simulación, y depende de la concatenación de los cuatro vectores filas obtenidos en la función *criteria_values*.

La función *ranking* cuenta con siete algoritmos de SH desarrollados de acuerdo con la literatura actual, cada uno enfocado a aplicaciones RT o BE, lo que duplica el número de algoritmos; adicionalmente, existen otros dos algoritmos sencillos: GRA y RA, para un total de diecisésis algoritmos. La herramienta propuesta puede ser adaptada de manera sencilla a múltiples algoritmos de SH adicionales, solo requiere que los algoritmos entreguen como salida un vector de posiciones fila, que clasifica de mejor a peor cada uno de los canales de frecuencia existentes. Este vector es tomado por la función *ranking* y adaptado al *software* para que pueda ser evaluado. El vector de posiciones equivale a la puntuación de cada frecuencia y permite al *core* determinar el orden en el que debe saltar la transmisión del SU de ser necesario. La descripción de los saltos se encuentra de manera más detallada en la función *Core*.

Cada uno de los algoritmos de SH requiere la asignación de un vector columna de pesos de tamaño 1×4 , que corresponde a los pesos que se asignan a cada valor de los DC entregados por la función *criteria_values*. Estos pesos pueden ser ajustados por el usuario para cada uno de los diferentes algoritmos, con excepción del algoritmo RA, ya que este genera de manera aleatoria el vector de puntuaciones. Dependiendo del algoritmo, el vector de pesos es multiplicado matricialmente por el vector *criteria_values* (ecuaciones (3.23), (3.24) y (3.25)).

$$[\text{Weights Vector}]_{1 \times 4} \times [P]_{4 \times n} \quad (3.23)$$

Donde:

$$[\text{Weights Vector}]_{1 \times 4} = [W_{AP} \quad W_{ETA} \quad W_{SINR} \quad W_{BW}] \quad (3.24)$$

$$[\mathbf{P}]_{4xn} = \begin{bmatrix} AP_{1,1} & \dots & \dots & AP_{1,n} \\ ETA_{2,1} & \dots & \dots & ETA_{2,n} \\ SINR_{3,1} & \dots & \dots & SINR_{3,n} \\ BW_{4,1} & \dots & \dots & BW_{4,n} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

La descripción de los algoritmos de *handoff* no se realiza, debido a la extensión de estos, pero el pseudocódigo correspondiente a la función *ranking* se describe en el anexo C.

En general, cada algoritmo entrega al *core* un vector de tamaño $1 \times n$ que contiene posiciones de búsqueda para las columnas de la matriz de disponibilidad. La figura 3.14 muestra la parametrización de los algoritmos de SH.

Figura 3.14. Flujo de datos de entrada para los algoritmos de SH



Fuente: adaptada de Hernández y Giral (2015).

Core del algoritmo

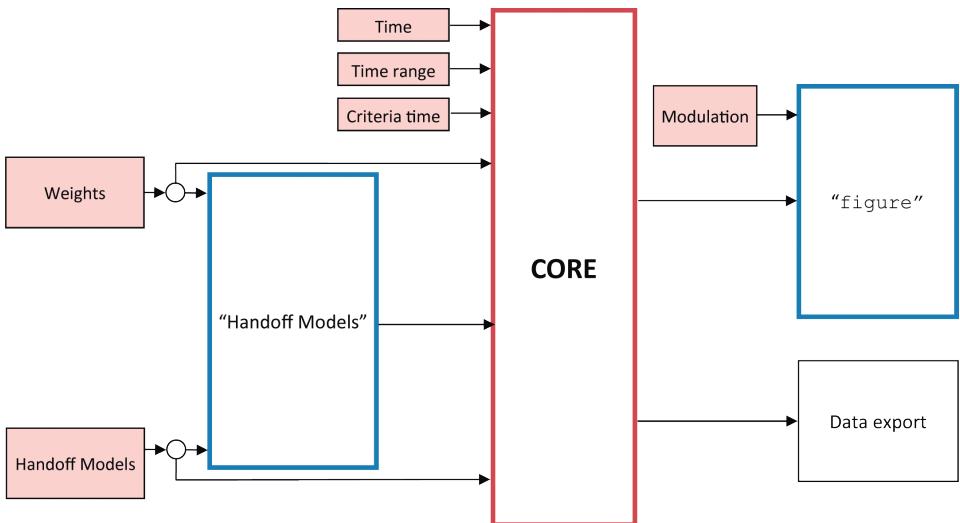
El *core* o núcleo del simulador es un algoritmo de búsqueda encargado de realizar saltos de columna (canales o frecuencias) en la AM, de acuerdo con el vector de posiciones entregado por el algoritmo de SH. El algoritmo realiza dichos saltos hasta encontrar un valor de '1' equivalente a una frecuencia disponible. Cada salto de columna es almacenado en un vector que será retroalimentado en forma de tabla al usuario, al final de la simulación. Una vez el algoritmo encuentra un '1', realiza un nuevo salto, pero esta vez a la siguiente fila de la matriz de disponibilidad. Cada fila representa un TS y la condición de parada del algoritmo de búsqueda es el tiempo de transmisión (*time*) configurado por el usuario al inicio. Al igual que en los saltos de columna, los saltos de fila, el tiempo y la disponibilidad son almacenados en un vector y retroalimentados al usuario al final de la simulación.

Adicionalmente al parámetro *time*, el *core* tiene otro parámetro de entrada llamado *criterio time*, este parámetro establece un periodo al cabo del cual

el algoritmo de búsqueda actualizará el vector de posiciones calculado inicialmente, pero en este caso solo tendrá en cuenta las últimas n filas de las AM, SINR y BW, donde n es definido por el usuario mediante la variable *Time range* en el entorno gráfico. Esta condición se ejecutará cada vez que se cumpla el tiempo definido en *criteria time*, hasta que finalice el tiempo de simulación. Por tanto, si el tiempo de parada *time* es mayor que n veces *criteria time*, entonces el vector de posiciones se actualizara n veces.

El diagrama presentado en la figura 3.15 describe el flujo de datos de entrada y de salida para el *core* de la herramienta propuesta.

Figura 3.15. Flujo de datos de la función *core*



Fuente: Hernández y Giral (2015).

El pseudocódigo correspondiente a la función *core* se describe en el anexo D.

Funciones *Data_Export* y *Figure*

Cuando se cumpla la condición de parada, la herramienta propuesta exporta los resultados en dos diferentes formatos: .xls (Excel) y .mat (Matlab). En la tabla 3.18 se muestran los archivos exportados y el tipo de archivo, de acuerdo con lo seleccionado por el usuario en la función *Data Export*.

Tabla 3.18. Tipo de formato

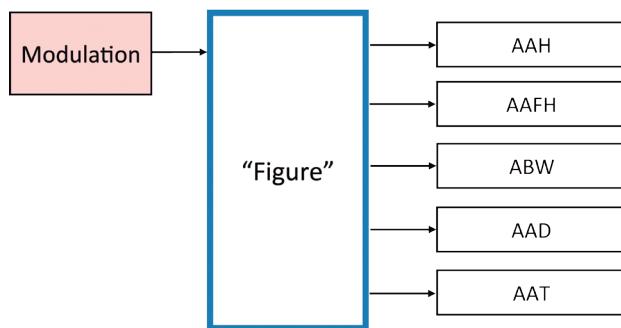
Archivo	Formato exportación
Results	Documento en Excel *.xls
Database	Documento en Matlab *.mat
Ranking	Documento en Matlab *.mat

Fuente: Hernández y Giral (2015).

Los archivos de Matlab (*.mat) contienen información referente a los resultados obtenidos en cada una de las funciones del algoritmo, en tanto que el archivo de Excel (*.xls) contiene los saltos de columna, los saltos de fila, el tiempo, la disponibilidad y el valor de BW correspondiente a la posición de cada salto.

Finalmente, y además de los *.mat y *.xls, el programa genera cinco figuras (véase figura 3.16) que se obtienen a partir de la última función: *Figure*. Para las figuras se crean dos tipos de archivos, el primero en formato *.png y el segundo es un archivo *.fig editable en Matlab.

Figura 3.16. Figuras de salida



Fuente: adaptada de Hernández y Giral (2015).

Tanto las figuras (*.png, *.fig) como los archivos exportados (*.mat, *.xls) se guardan en la ruta seleccionada por el usuario (*Project name and Project location*).

Simulador de SH proactivo-predictivo

Para el algoritmo PPTS también se desarrolló una adaptación de Hernández y Giral (2015); sin embargo, no se describe aquí, debido a la extensión del documento.

IV. Resultados

Este capítulo presenta una evaluación comparativa del desempeño de los tres algoritmos desarrollados: FAHP, FFAHP y PPTS, y los algoritmos más relevantes relacionados en la literatura actual en el campo de SH para CRN. La evaluación comparativa se realizó con base en nueve EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT, AAPH, AAEH, AAIH y AAUH, en ocho escenarios diferentes: GSM-RT-LT, GSM-RT-HT, GSM-BE-LT, GSM-BE-HT, Wi-Fi-RT-LT, Wi-Fi-RT-HT, Wi-Fi-BE-LT y Wi-Fi-BE-HT, producto de la combinación de tres parámetros de interés: el tipo de red (GSM y Wi-Fi), el nivel de tráfico (LT y HT) y la clase de aplicación (RT y BE).

La presentación de los resultados está organizada en seis secciones:

1. Un análisis estadístico de la ocupación espectral en el enlace ascendente de la banda de frecuencia GSM, de acuerdo con cada DC
2. Las herramientas de simulación desarrolladas
3. Resultados del algoritmo RA
4. Resultados de los algoritmos híbridos FAHP y FFAHP
5. Resultados del algoritmo proactivo-predictivo PPTS
6. Modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo.

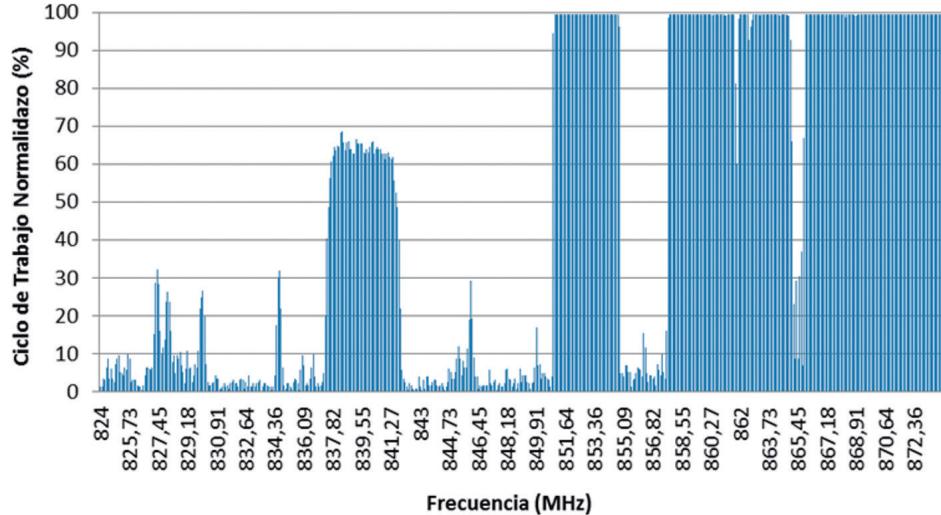
A continuación se presentan únicamente los resultados alcanzados, su análisis se presenta en el capítulo de discusión.

Análisis del espectro para el enlace ascendente GSM

La figura 4.1 describe el ciclo de trabajo normalizado para el *enlace ascendente de la banda GSM* (EA-GSM). El ciclo de trabajo representa la fracción de tiempo durante la cual el canal permanece ocupado por el PU. La figura 4.2

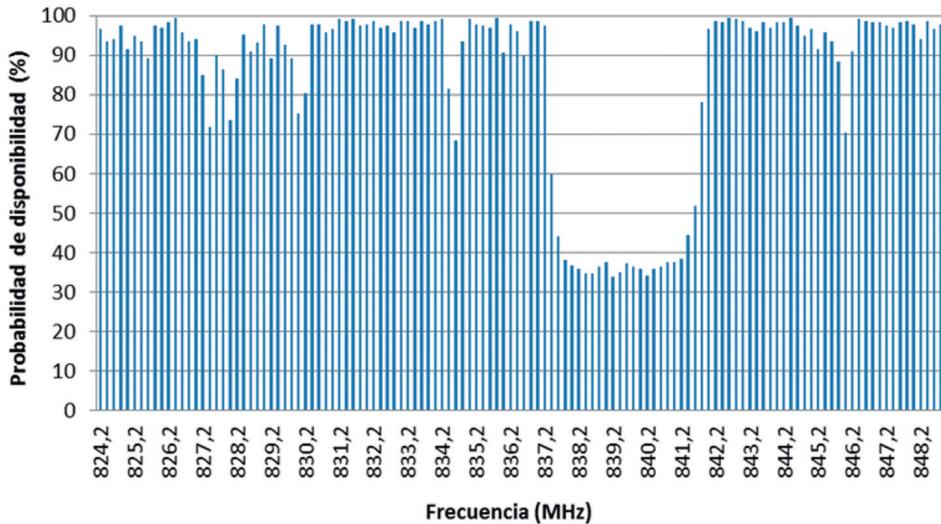
describe la AP por canal en el EA-GSM, la figura 4.3 describe el ETA por canal en el EA-GSM, en tanto que la figura 4.4 describe la SINR estimada por canal en el EA-GSM.

Figura 4.1. Ciclo de trabajo normalizado por canal en el EA-GSM



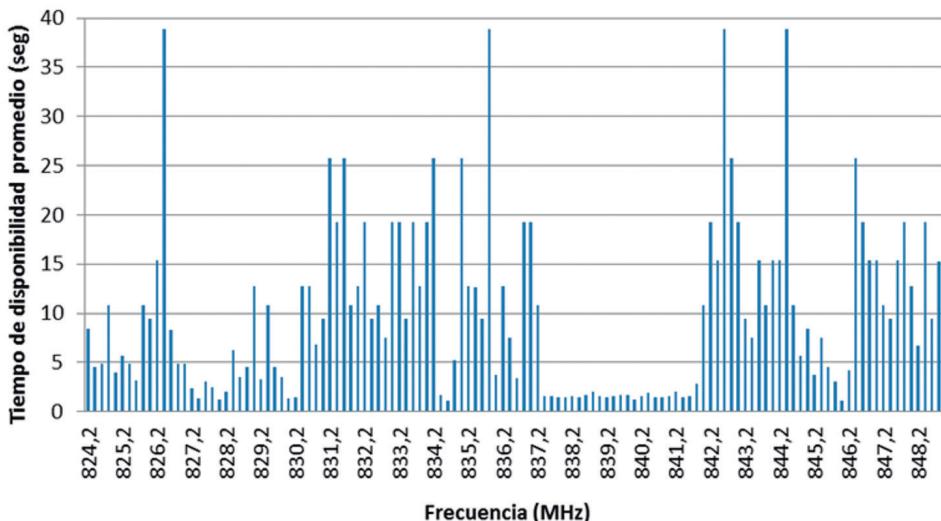
Fuente: adaptada de Hernández *et. al.* (2015).

Figura 4.2. AP por canal en el EA-GSM



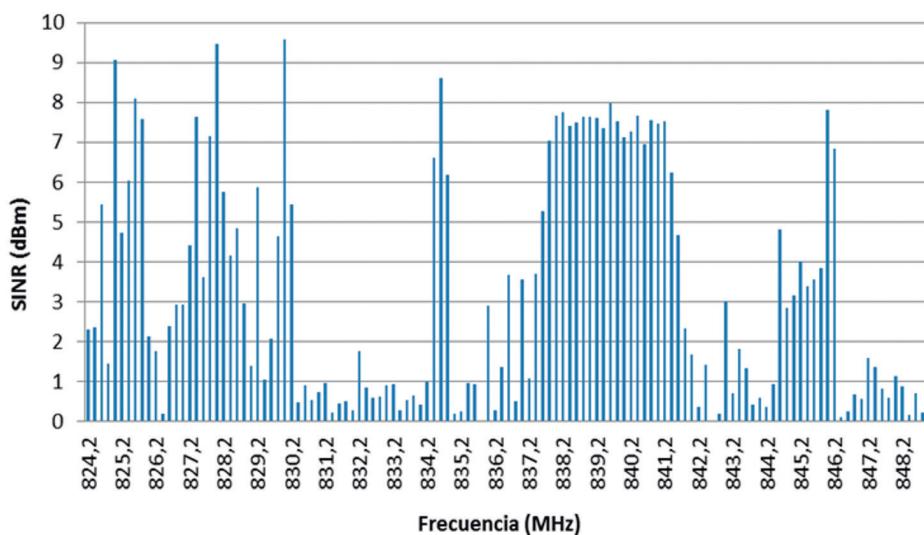
Fuente: adaptada de Hernández *et. al.* (2015)

Figura 4.3. ETA por canal en el EA-GSM



Fuente: adaptada de Hernández *et. al.* (2015).

Figura 4.4. SINR estimada por canal en el EA-GSM



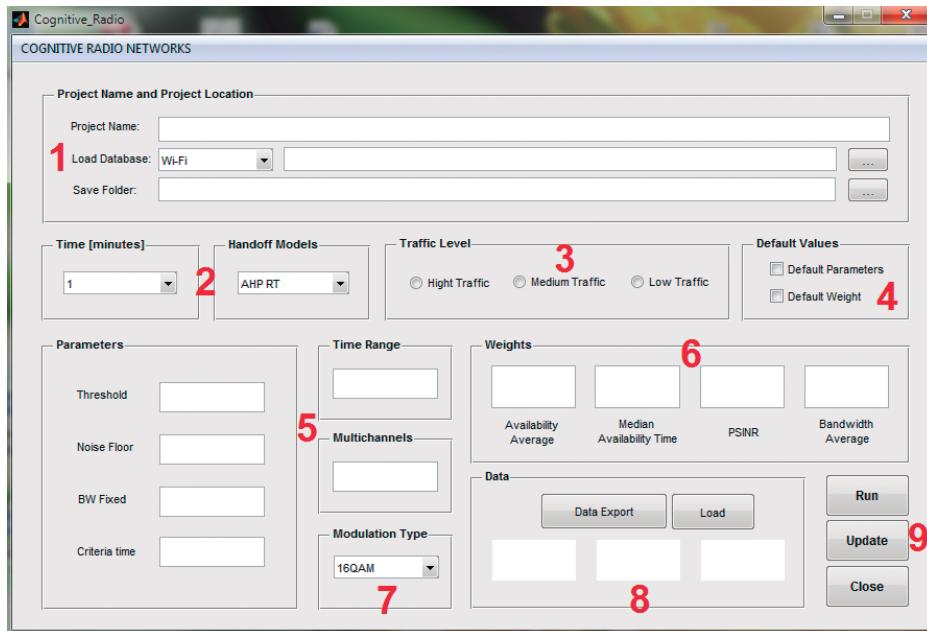
Fuente: adaptada de Hernández *et. al.* (2015).

Herramienta de simulación de SH desarrollada

La figura 4.5 muestra el entorno principal de la herramienta de simulación denominada Cognitive Radio Networks. Este *software* esta divido en nueve

secciones: (1) *Project name and Project location*, (2) *Time and handoff models*, (3) *Traffic level*, (4) *Default values*, (5) *Parameters, time range and multichannels*, (6), *Weights*, (7) *Modulation type*, (8) *Data export* y (9) *Selection run*.

Figura 4.5. Entorno principal del simulador de SH Cognitive Radio Networks

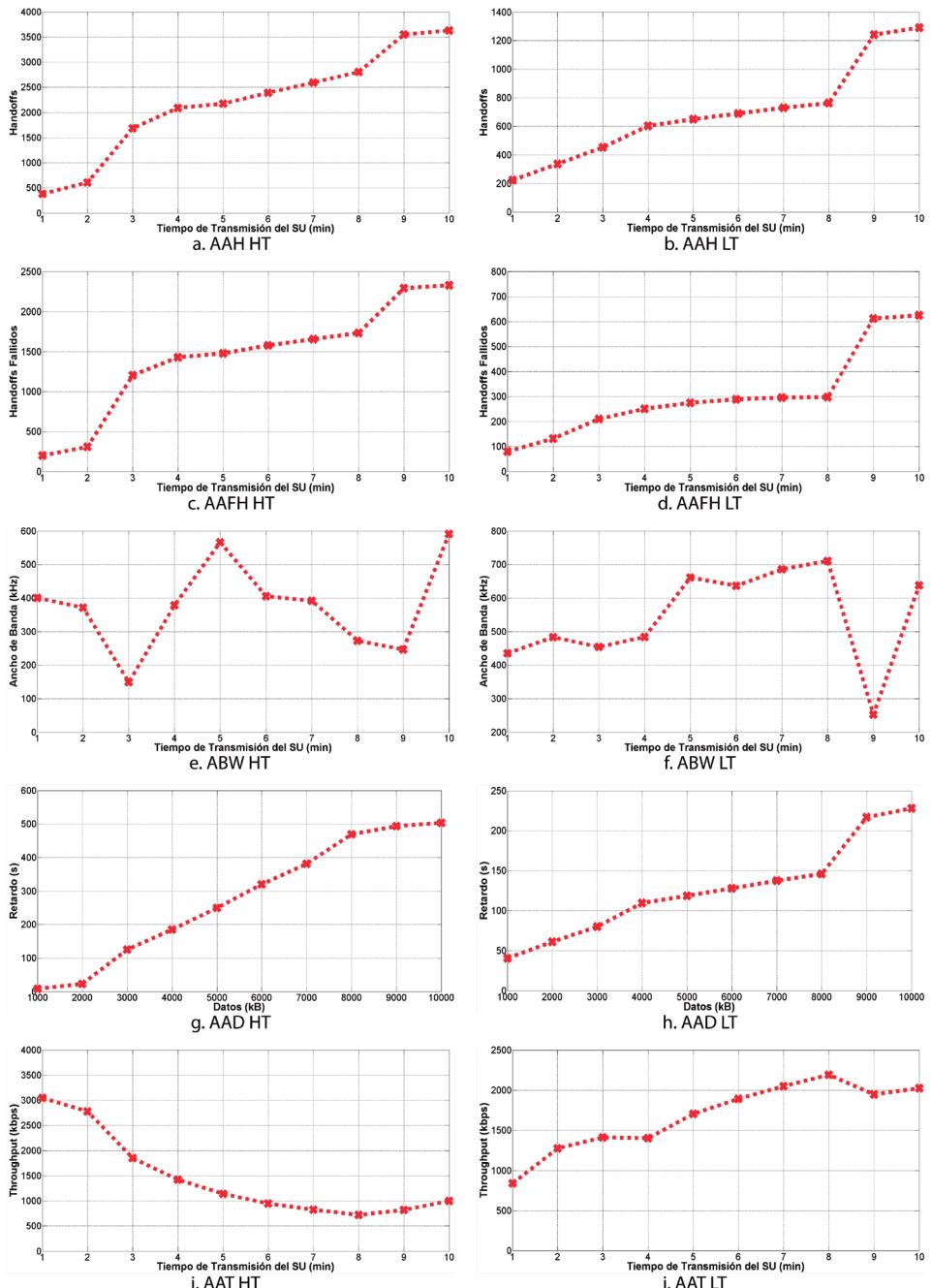


Fuente: adaptada de Hernández y Giral (2015).

Resultados del algoritmo RA

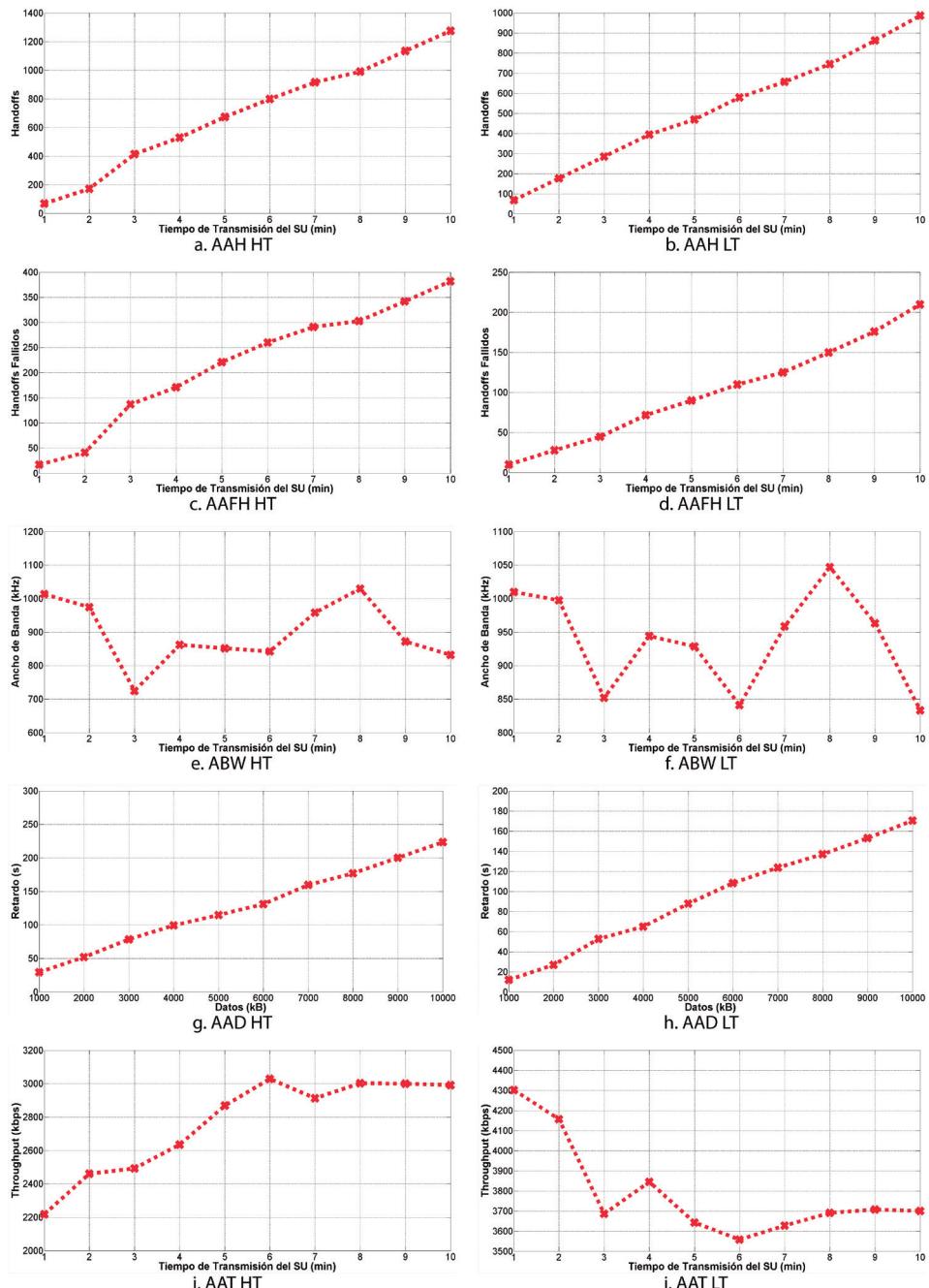
Las figuras 4.6 y 4.7 presentan los resultados obtenidos por el algoritmo RA en las redes GSM y Wi-Fi, respectivamente. Este algoritmo selecciona de forma completamente aleatoria las SO, por lo cual es utilizado como punto de referencia y comparación para la evaluación de algoritmos propuestos en varias publicaciones.

Figura 4.6. EM de RA para red GSM



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.7. EM de RA para red Wi-Fi



Fuente: elaboración propia.

Resultados de los algoritmos híbridos FAHP y FFAHP

La figura 4.8 describe el AAH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.1 y 4.3 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, en tanto que las tablas 4.2 y 4.4 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.9 describe el AAFH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.5 y 4.7 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, mientras que las tablas 4.6 y 4.8 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

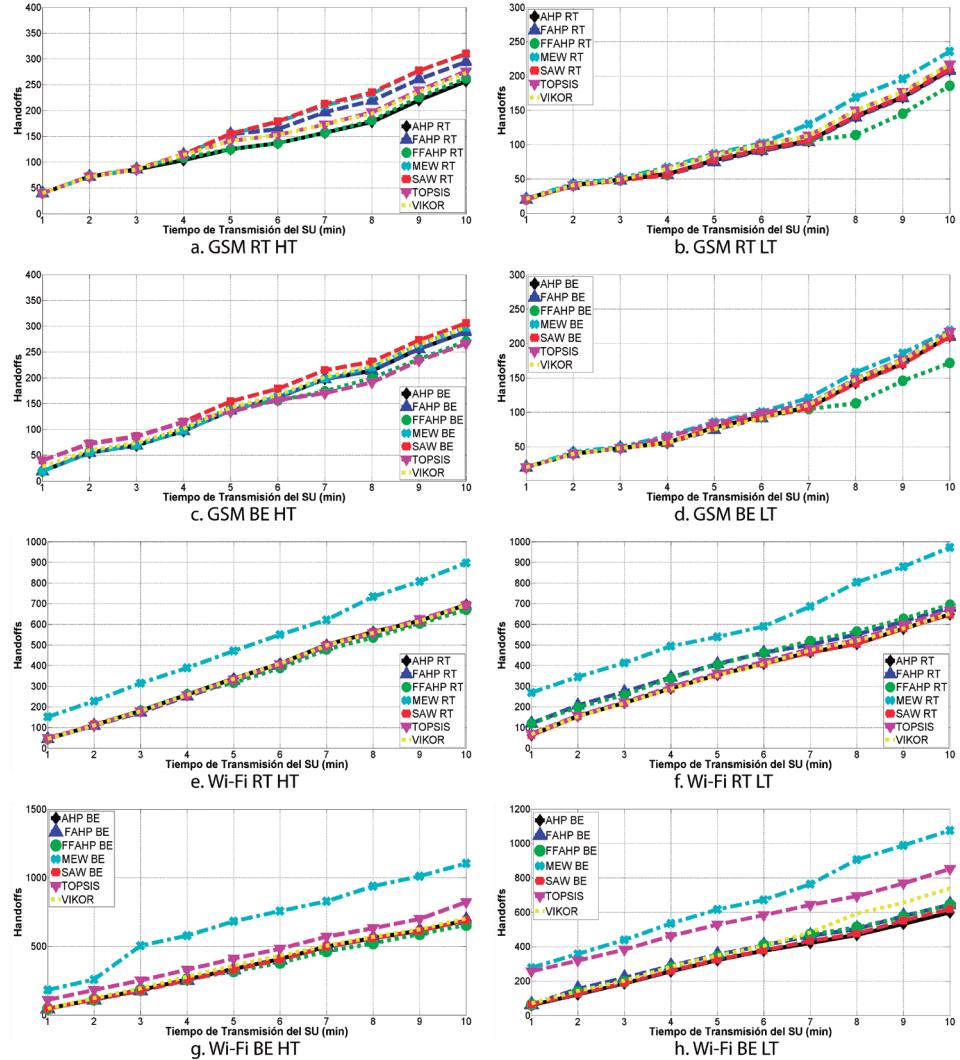
La figura 4.10 describe el ABW que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.9 y 4.11 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.10 y 4.12 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.11 describe el AAD que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10000 kB, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.13 y 4.15 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.14 y 4.16 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.12 describe el AAT que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.17 y 4.19 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.18 y 4.20 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

Handoff total promedio acumulativo

Figura 4.8. AAH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.1. Valores absolutos de AAH para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	236	210	217	217	209	208	186	1292
RT en HT	309	310	276	273	257	294	262	3629
BE en LT	219	210	217	216	211	210	172	1292
BE en HT	297	306	266	298	289	289	271	3629

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.2. Valores relativos de AAH para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	78,81	88,57	85,71	85,71	89	89,42	100	14,4
RT en HT	83,17	82,9	93,12	94,14	100	87,41	98,09	7,08
BE en LT	78,54	81,9	79,26	79,63	81,52	81,9	100	13,31
BE en HT	89,56	86,93	100	89,26	92,04	92,04	98,15	7,33
Puntaje AAH	82,52	85,08	89,52	87,19	90,64	87,69	99,06	10,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.3. Valores absolutos de AAH para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	973	647	668	653	648	680	695	987
RT en HT	898	694	692	693	695	687	670	1276
BE en LT	1076	618	852	739	600	645	643	987
BE en HT	1105	691	823	704	690	691	657	1276

Fuente: elaboración propia.

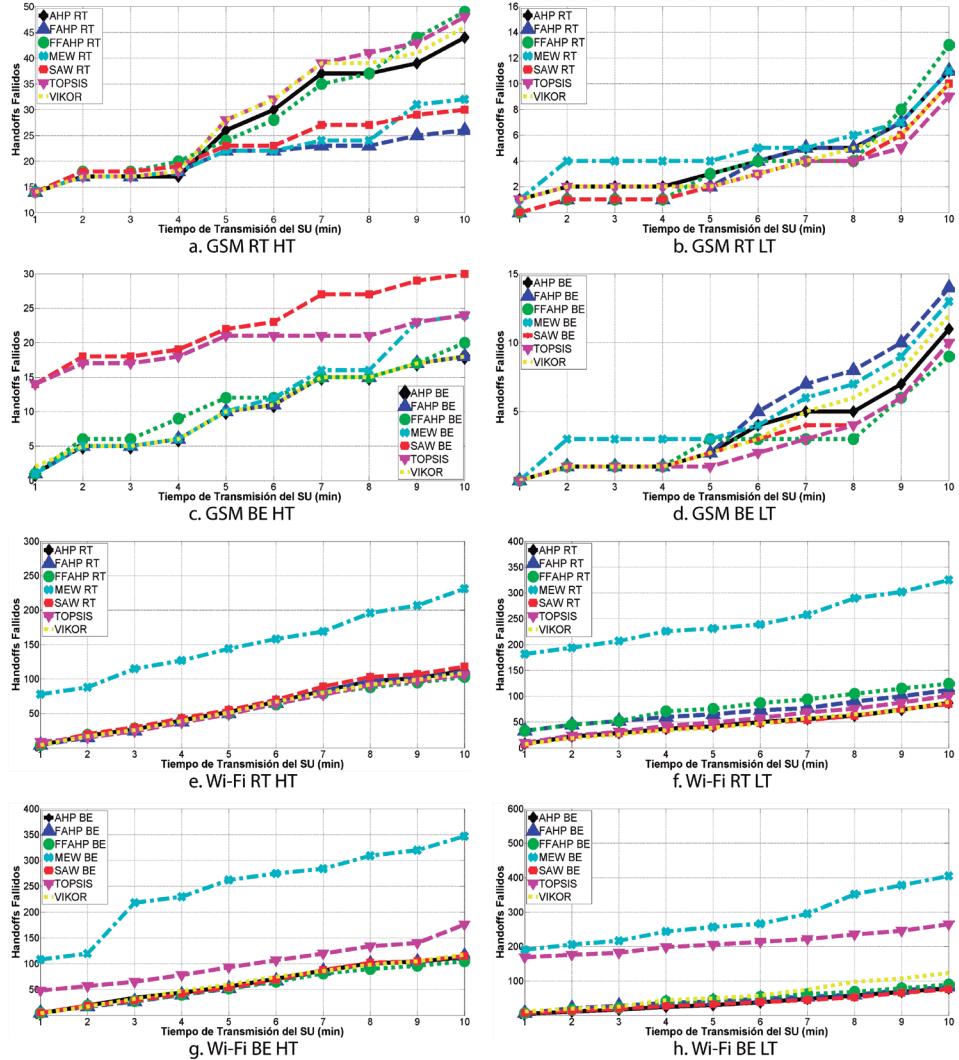
Tabla 4.4. Valores relativos de AAH para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	66,5	100	96,86	99,08	99,85	95,15	93,09	65,55
RT en HT	74,61	96,54	96,82	96,68	96,4	97,53	100	52,51
BE en LT	55,76	97,09	70,42	81,19	100	93,02	93,31	60,79
BE en HT	59,46	95,08	79,83	93,32	95,22	95,08	100	51,49
Puntaje AAH	64,08	97,18	85,98	92,57	97,87	95,2	96,6	57,59

Fuente: elaboración propia.

Handoff fallido promedio acumulativo

Figura 4.9. AAHF en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.5. Valores absolutos de AAFH para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	11	10	9	10	11	11	13	625
RT en HT	32	30	48	46	44	26	49	2332
BE en LT	13	10	10	12	11	14	9	625
BE en HT	24	30	24	18	18	18	20	2332

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.6. Valores relativos de AAFH para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	81,82	90	100	90	81,82	81,82	69,23	1,44
RT en HT	81,25	86,67	54,17	56,52	59,09	100	53,06	1,11
BE en LT	69,23	90	90	75	81,82	64,29	100	1,44
BE en HT	75	60	75	100	100	100	90	0,77
Puntaje AAFH	76,83	81,67	79,79	80,38	80,68	86,53	78,07	1,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.7. Valores absolutos de AAFH para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	325	85	101	89	87	112	124	210
RT en HT	231	114	106	109	112	111	103	382
BE en LT	405	76	265	123	79	83	90	210
BE en HT	347	115	176	118	113	115	105	382

Fuente: elaboración propia.

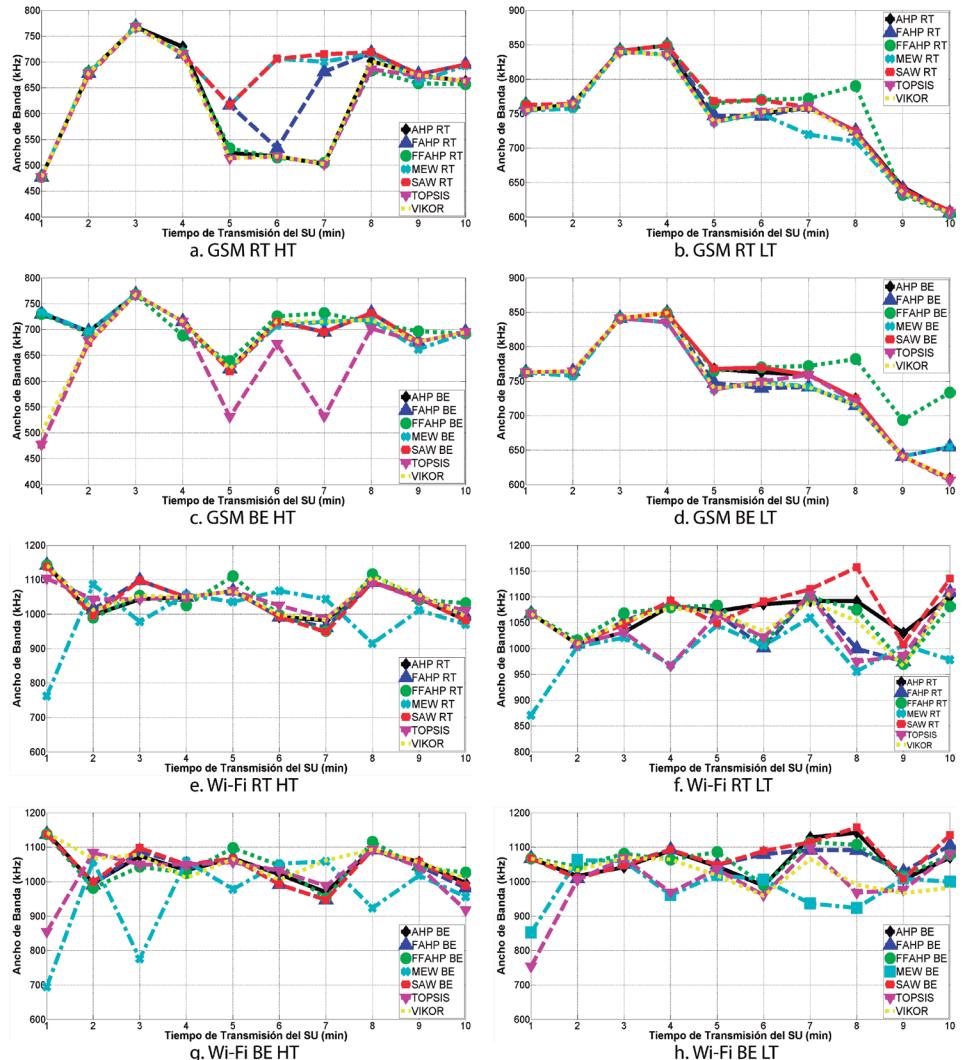
Tabla 4.8. Valores relativos de AAFH para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	26,15	100	84,16	95,51	97,7	75,89	68,55	40,48
RT en HT	44,59	90,35	97,17	94,5	91,96	92,79	100	26,96
BE en LT	18,77	100	28,68	61,79	96,2	91,57	84,44	36,19
BE en HT	30,26	91,3	59,66	88,98	92,92	91,3	100	27,49
Puntaje AAFH	29,94	95,41	67,42	85,2	94,7	87,89	88,25	32,78

Fuente: elaboración propia.

Ancho de banda promedio

Figura 4.10. ABW en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.9. Valores absolutos de ABW para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	734,642	748,913	740,9	740,367	743,26	744,232	754,758	548,66
RT en HT	673,402	676,277	619,48	621,227	623,702	655,85	619,423	379,2
BE en LT	743,924	748,913	741,78	741,084	748,241	745,743	772,922	548,66
BE en HT	703,35	676,66	644,73	680,507	704,981	704,771	707,801	379,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.10. Valores relativos de ABW para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	97,33	99,23	98,16	98,09	98,48	98,61	100	72,69
RT en HT	99,57	100	91,6	91,86	92,23	96,98	91,59	56,07
BE en LT	96,25	96,89	95,97	95,88	96,81	96,48	100	70,99
BE en HT	99,37	95,6	91,09	96,14	99,6	99,57	100	53,57
Puntaje ABW	98,13	97,93	94,21	95,49	96,78	97,91	97,9	63,33

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.11. Valores absolutos de ABW para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	991,554	1077,276	1033,683	1053,038	1066,372	1047,380	1055,425	958,930
RT en HT	992,681	1040,918	1046,693	1046,411	1039,509	1046,035	1045,938	894,270
BE en LT	982,968	1077,093	991,540	1021,845	1059,555	1066,642	1064,955	958,930
BE en HT	957,679	1042,819	1017,210	1059,024	1045,004	1039,344	1046,834	894,270

Fuente: elaboración propia.

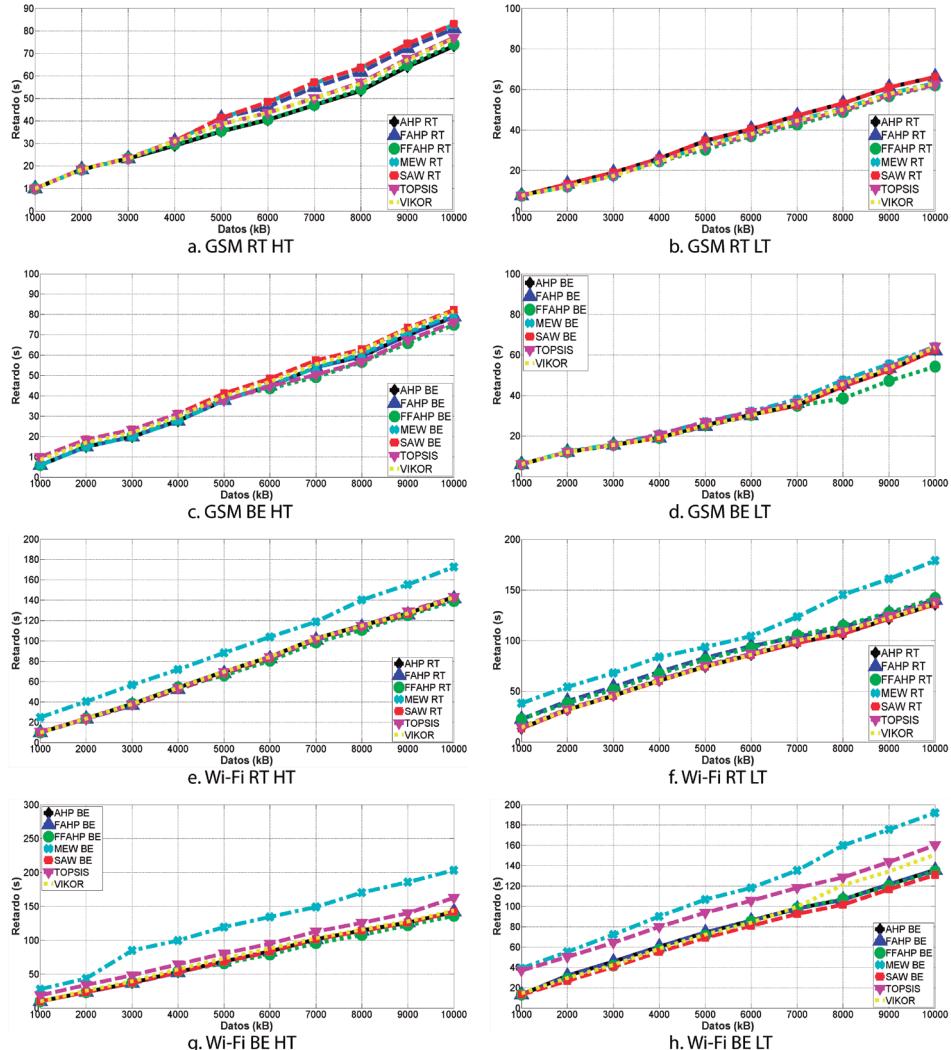
Tabla 4.12. Valores relativos de ABW para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	92,04	100	95,95	97,75	98,99	97,22	97,97	89,01
RT en HT	94,84	99,45	100	99,97	99,31	99,94	99,93	85,44
BE en LT	91,26	100	92,06	94,87	98,37	99,03	98,87	89,03
BE en HT	90,43	98,47	96,05	100	98,68	98,14	98,85	84,44
Puntaje ABW	92,14	99,48	96,02	98,15	98,84	98,58	98,91	86,98

Fuente: elaboración propia.

Retardo promedio acumulativo

Figura 4.11. AAD en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.13. Valores absolutos de AAD para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	63,178	66,182	62,319	62,954	66,186	66,186	62,067	357,6
RT en HT	82,733	83,037	76,944	76,485	73,379	81,074	74,004	503,9
BE en LT	64,157	62,578	64,176	63,8	62,696	62,214	54,265	228,1
BE en HT	79,814	82,225	76,178	81,614	78,76	78,765	74,854	503,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.14. Valores relativos de AAD para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	98,24	93,78	99,6	98,59	93,78	93,78	100	17,36
RT en HT	88,69	88,37	95,37	95,94	100	90,51	99,16	14,56
BE en LT	84,58	86,72	84,56	85,05	86,55	87,22	100	23,79
BE en HT	93,79	91,04	98,26	91,72	95,04	95,03	100	14,85
Puntaje AAD	91,33	89,98	94,45	92,83	93,84	91,64	99,79	17,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.15. Valores absolutos de AAD para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	178,98	135,964	138,744	136,849	135,956	140,162	141,894	170,5
RT en HT	172,778	142,418	143,102	143,023	143,227	141,636	139,044	223,5
BE en LT	192,058	130,912	160,272	150,969	135,956	135,735	134,615	170,5
BE en HT	203,33	142,089	162,822	144,13	142,045	142,14	136,226	223,5

Fuente: elaboración propia.

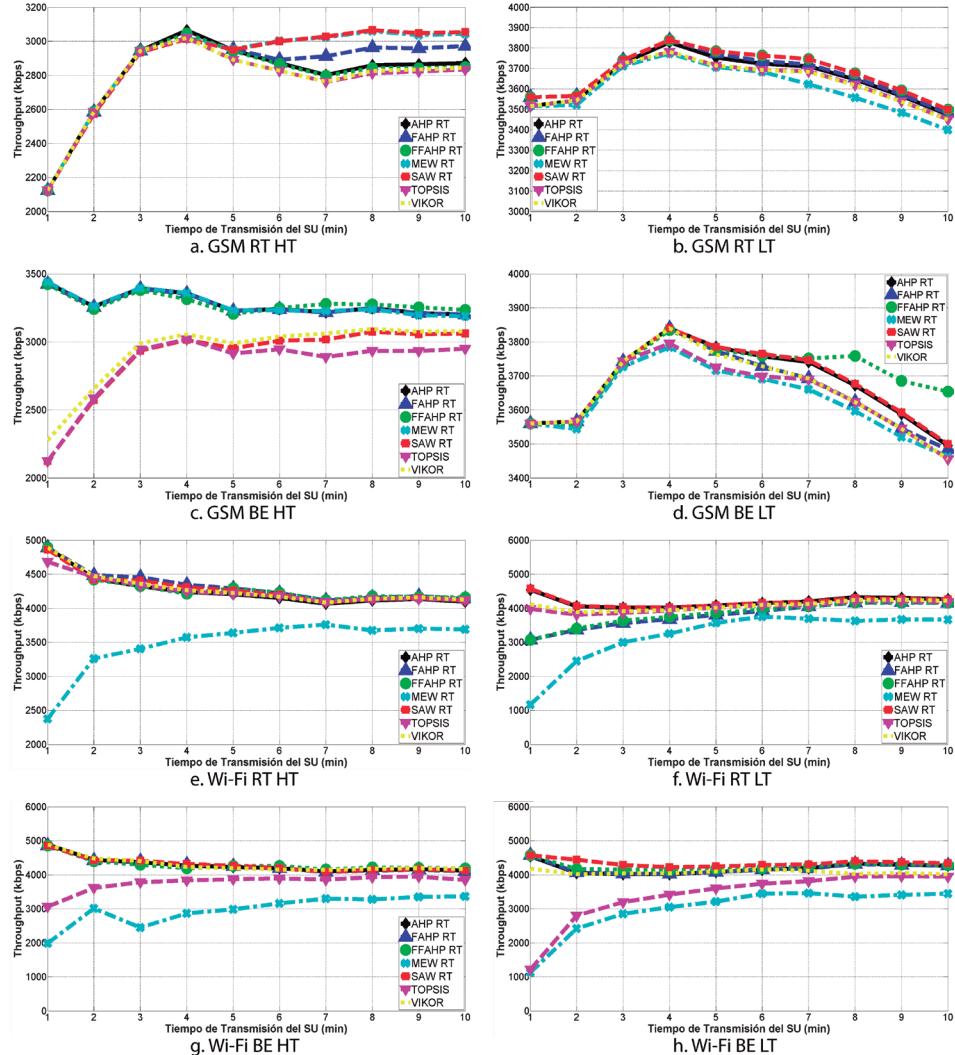
Tabla 4.16. Valores relativos de AAD para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	75,96	99,99	97,99	99,35	100	97	95,82	79,74
RT en HT	80,48	97,63	97,16	97,22	97,08	98,17	100	62,21
BE en LT	68,16	100	81,68	86,71	96,29	96,45	97,25	76,78
BE en HT	67	95,87	83,67	94,52	95,9	95,84	100	60,95
Puntaje AAD	72,9	98,37	90,13	94,45	97,32	96,87	98,27	69,92

Fuente: elaboración propia.

Throughput promedio acumulativo

Figura 4.12. AAT en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.17. Valores absolutos de AAT para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	3400	3499	3451	3449	3474	3480	3499	2029
RT en HT	3044	3054	2834	2845	2872	2973	2850	1002
BE en LT	3462	3499	3456	3456	3495	3484	3654	2029
BE en HT	3187	3061	2950	3078	3200	3200	3236	1002

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.18. Valores relativos de AAT para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	97,17	100	98,63	98,57	99,29	99,46	100	57,99
RT en HT	99,67	100	92,8	93,16	94,04	97,35	93,32	32,81
BE en LT	94,75	95,76	94,58	94,58	95,65	95,35	100	55,53
BE en HT	98,49	94,59	91,16	95,12	98,89	98,89	100	30,96
Puntaje AAT	97,52	97,59	94,29	95,36	96,97	97,76	98,33	44,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.19. Valores absolutos de AAT para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	3664	4260	4184	4226	4266	4154	4154	3701
RT en HT	3689	4111	4122	4125	4097	4137	4160	2992
BE en LT	3445	4341	3942	4014	4266	4272	4280	3701
BE en HT	3368	4121	3851	4162	4129	4107	4187	2992

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.20. Valores relativos de AAT para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	85,89	99,86	98,08	99,06	100	97,37	97,37	86,76
RT en HT	88,68	98,82	99,09	99,16	98,49	99,45	100	71,92
BE en LT	79,36	100	90,81	92,47	98,27	98,41	98,59	85,26
BE en HT	80,44	98,42	91,98	99,4	98,61	98,09	100	71,46
Puntaje AAT	83,59	99,28	94,99	97,52	98,84	98,33	98,99	78,85

Fuente: elaboración propia.

Evaluación comparativa

De las tablas 4.21 a la 4.28 se presentan los porcentajes comparativos del desempeño de cada algoritmo por EM, con enfoque RT y BE, y por tipo de escenario, tanto para la red GSM como para la Wi-Fi. En dichas tablas ANS significa ‘puntaje promedio normalizado’.

Tabla 4.21. Evaluación comparativa global por EM para red GSM

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	83,3	85,89	90,37	88,02	91,5	88,52	100	10,63
AAFH	88,79	94,38	92,21	92,89	93,24	100	90,22	1,38
ABW	100	99,8	96,01	97,31	98,62	99,78	99,77	64,54
AAD	91,52	90,17	94,65	93,03	94,04	91,83	100	17,68
AAT	99,18	99,25	95,89	96,98	98,62	99,42	100	45,07
Puntaje Global	93,64	93,99	94,28	93,96	95,74	95,17	99,7	34,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.22. Evaluación comparativa por EM con RT para red GSM

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	81,77	86,56	90,28	90,79	95,41	89,27	100	10,84
AAFH	89,69	97,17	84,8	80,59	77,51	100	67,26	1,41
ABW	98,83	100	95,24	95,34	95,72	98,17	96,17	64,63
AAD	93,86	91,46	97,9	97,68	97,3	92,54	100	16,03
AAT	98,42	100	95,72	95,87	96,67	98,41	96,66	45,4
Puntaje RT	93,42	94,77	94,65	94,67	95,83	94,87	97,39	33,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.23. Evaluación comparativa por EM con BE para red GSM

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	84,83	85,2	90,46	85,23	87,59	87,78	100	10,42
AAFH	75,92	78,95	86,84	92,11	95,69	86,47	100	1,17
ABW	97,81	96,25	93,53	96,01	98,21	98,03	100	62,28
AAD	89,19	88,88	91,41	88,39	90,8	91,13	100	19,32
AAT	96,62	95,18	92,87	94,85	97,27	97,12	100	43,25
Puntaje BE	91,89	91,22	91,98	91,29	93,67	93,48	100	33,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.24. Evaluación comparativa global por escenario para red GSM

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	92,96	95,43	95,88	95,35	94,96	95,13	99,23	40,29
RT en HT	92,73	92,91	92,25	92,83	95,54	93,38	94,41	27,48
BE en LT	88,3	90,52	88,86	88,67	90,14	89,8	100	40,61
BE en HT	94,94	91,37	94,5	93,33	96,59	96,58	99,33	26,51
ANS RT	95,92	97,31	97,19	97,21	98,4	97,41	100	34,9
ANS BE	91,89	91,22	91,98	91,29	93,67	93,48	100	33,59
ANS LT	90,98	93,33	92,73	92,37	92,91	92,82	100	40,61
ANS HT	96,87	95,12	96,39	96,09	99,17	98,05	100	27,87
Total ANS	92,23	92,56	92,87	92,55	94,31	93,72	98,24	33,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.25. Evaluación comparativa global por EM para red Wi-Fi

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	65,47	99,29	87,85	94,58	100	97,27	98,7	58,84
AAFH	31,38	100	70,66	89,3	99,26	92,12	92,5	34,36
ABW	92,62	100	96,52	98,66	99,36	99,1	99,43	87,43
AAD	74,11	100	91,62	96,02	98,93	98,48	99,9	71,08
AAT	84,2	100	95,68	98,23	99,56	99,04	99,71	79,42
Puntaje Global	78,25	99,84	92,49	96,74	99,44	98,34	99,28	73,58

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.26. Evaluación comparativa por EM con RT para red Wi-Fi

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	71,8	100	98,54	99,6	99,86	98,04	98,25	60,07
AAFH	37,16	100	95,26	99,82	99,63	88,61	88,55	35,43
ABW	93,69	100	98,25	99,13	99,42	98,85	99,22	87,47
AAD	79,16	100	98,76	99,47	99,73	98,77	99,09	71,83
AAT	87,87	100	99,25	99,77	99,91	99,06	99,35	79,87
Puntaje RT	82,26	100	98,62	99,5	99,72	98,44	98,74	74,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.27. Evaluación comparativa por EM con BE para red Wi-Fi

EM	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
AAH	59,02	98,44	76,97	89,4	100	96,35	99,03	57,51
AAFH	25,64	100	46,18	78,82	98,86	95,6	96,41	33,29
ABW	91,55	100	94,78	98,19	99,28	99,35	99,62	87,4
AAD	68,52	99,3	83,83	91,88	97,43	97,49	100	69,83
AAT	80,46	99,91	92,04	96,62	99,13	98,94	100	78,91
Puntaje BE	74,05	99,45	86,14	93,76	98,93	98,01	99,6	72,81

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.28. Evaluación comparativa global por escenario para red Wi-Fi

Escenario	MEW	SAW	TOPSIS	VIKOR	AHP	FAHP	FFAHP	RA
RT en LT	79,09	99,96	96,9	98,72	99,66	96,2	95,45	79,64
RT en HT	83,9	97,96	98,28	98,2	97,71	98,65	99,98	67,38
BE en LT	72,71	99,35	82,7	88,33	98,14	96,69	96,78	77,35
BE en HT	73,6	96,87	87,38	96,7	97,05	96,69	99,71	66,49
ANS RT	82,26	100	98,62	99,5	99,72	98,44	98,74	74,19
ANS BE	74,35	99,85	86,49	94,14	99,33	98,4	100	73,1
ANS LT	76,16	100	90,11	93,85	99,24	96,78	96,45	78,77
ANS HT	78,87	97,57	92,97	97,6	97,53	97,82	100	67,04
Total ANS	77,33	98,54	91,32	95,49	98,14	97,06	97,98	72,72

Fuente: elaboración propia.

Resultados del algoritmo proactivo predictivo PPTS

Los resultados del algoritmo PPTS se basan fundamentalmente en la clasificación de los SH presentada en la tabla 3.14, debido a que estos tipos de SH describen de manera adecuada el nivel de precisión en la predicción realizada por los modelos de series de tiempo que se van comparar.

La figura 4.13 describe el AAH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.29 y 4.31 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las

tabla 4.30 y 4.32 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.14 describe el AAFH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.33 y 4.35 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.34 y 4.36 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.15 describe el AAPH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.37 y 4.39 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.38 y 4.40 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

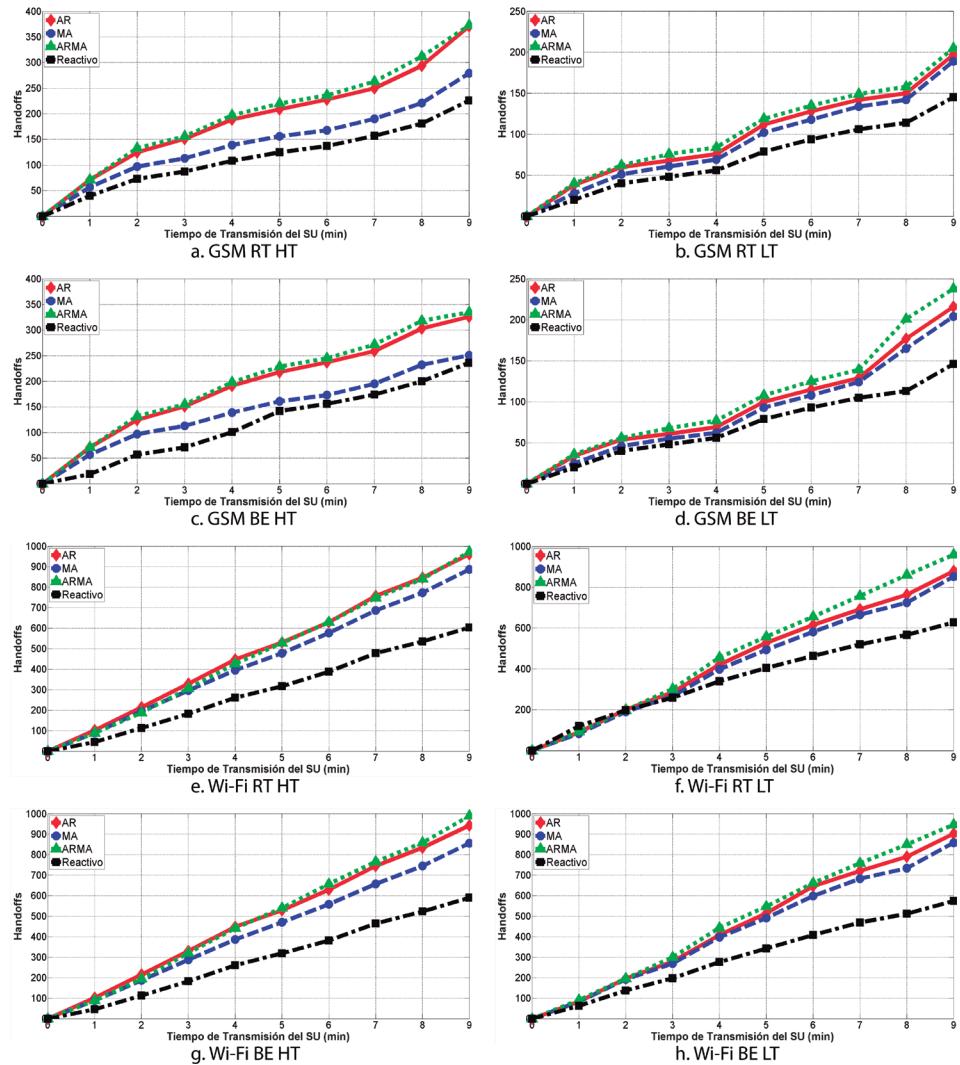
La figura 4.16 describe el AAIH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de 10000 kB, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.41 y 4.43 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.42 y 4.44 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.17 describe el AAEH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.45 y 4.47 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.46 y 4.48 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

La figura 4.18 describe el AAUH que se presenta en cada algoritmo de SH durante una transmisión de diez minutos, para una traza de HT y LT con enfoque RT y BE, en una red GSM y Wi-Fi. Las tablas 4.49 y 4.51 muestran los correspondientes valores absolutos de cada algoritmo para cada red, y las tablas 4.50 y 4.52 muestran los porcentajes comparativos de desempeño entre todos los algoritmos para cada red.

Handoff total promedio acumulativo

Figura 4.13. AAH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.29. Valores absolutos de AAH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactiva
RT en LT	197	189	205	145
RT en HT	371	279	373	226
BE en LT	216	204	238	146
BE en HT	326	251	335	236

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.30. Valores relativos de AAH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactiva
RT en LT	73,6	76,72	70,73	100
RT en HT	60,92	81	60,59	100
BE en LT	67,59	71,57	61,34	100
BE en HT	72,39	94,02	70,45	100
Puntaje AAH	68,63	80,83	65,78	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.31. Valores absolutos de AAH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactiva
RT en LT	879	852	959	628
RT en HT	961	887	972	604
BE en LT	903	859	947	574
BE en HT	943	857	990	590

Fuente: elaboración propia.

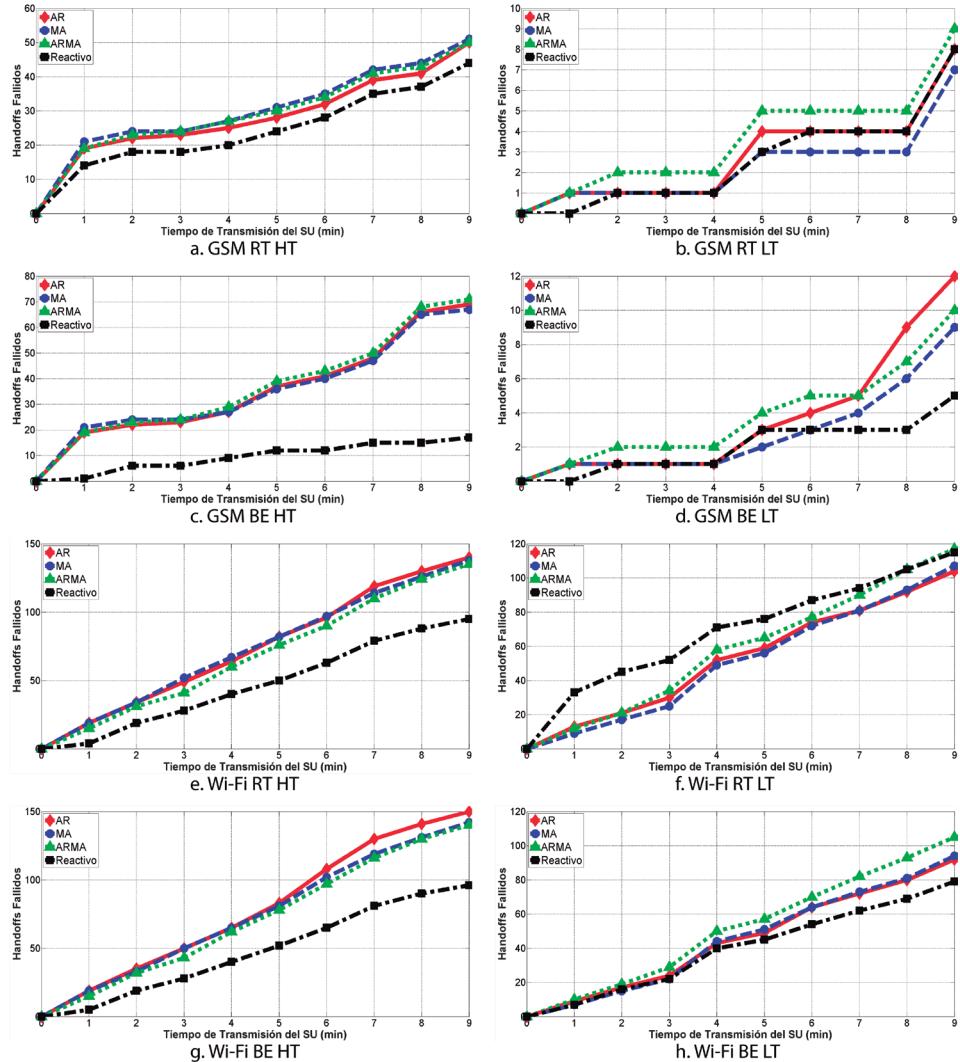
Tabla 4.32. Valores relativos de AAH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactiva
RT en LT	71,44	73,71	65,48	100
RT en HT	62,85	68,09	62,14	100
BE en LT	63,57	66,82	60,61	100
BE en HT	62,57	68,84	59,6	100
Puntaje AAH	65,11	69,37	61,96	100

Fuente: elaboración propia.

Handoff fallido promedio acumulativo

Figura 4.14. AAFH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.33. Valores absolutos de AAFH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	8	7	9	8
RT en HT	50	51	50	44
BE en LT	12	9	10	6
BE en HT	69	67	71	17

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.34. Valores relativos de AAFH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	87,5	100	77,78	87,5
RT en HT	88	86,27	88	100
BE en LT	50	66,67	60	100
BE en HT	24,64	25,37	23,94	100
Puntaje AAFH	62,54	69,58	62,43	96,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.35. Valores absolutos de AAFH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	104	107	117	115
RT en HT	140	138	135	95
BE en LT	92	94	105	79
BE en HT	150	142	140	96

Fuente: elaboración propia.

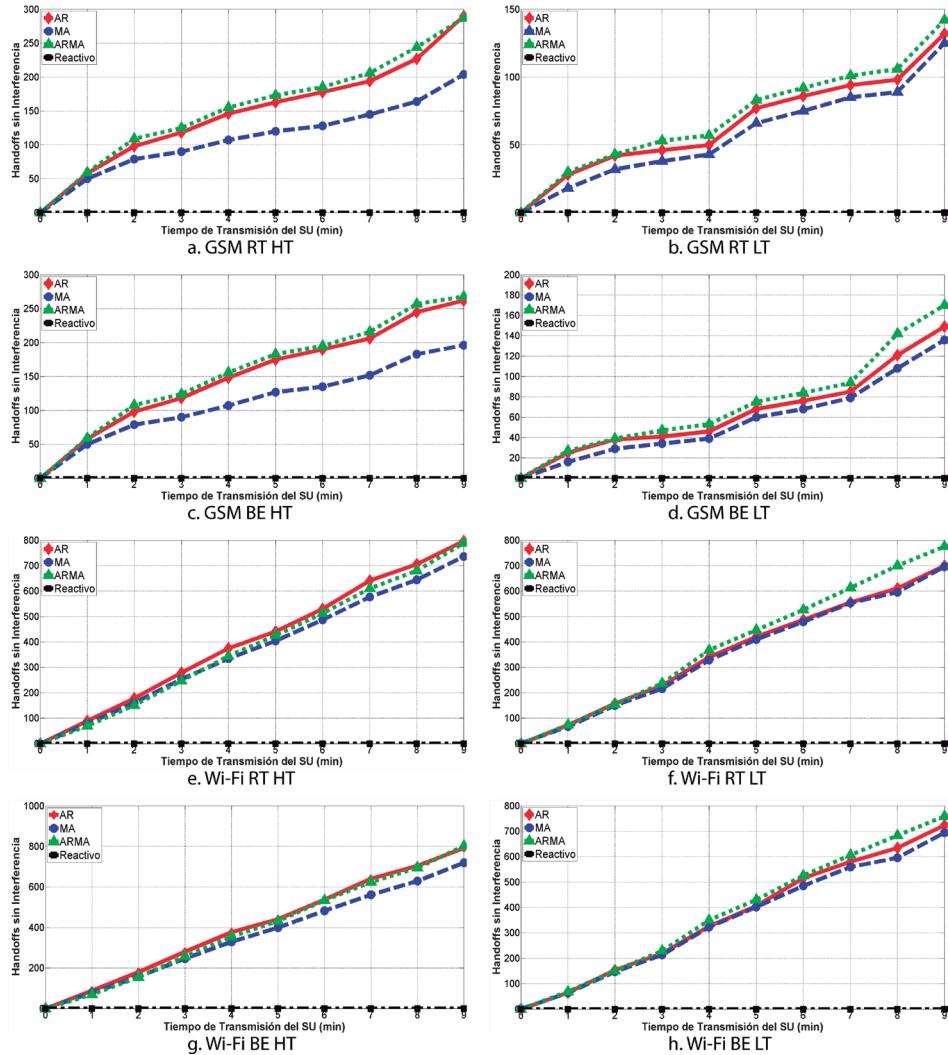
Tabla 4.36. Valores relativos de AAFH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	100	97,2	88,89	90,43
RT en HT	67,86	68,84	70,37	100
BE en LT	85,87	84,04	75,24	100
BE en HT	64	67,61	68,57	100
Puntaje AAFH	79,43	79,42	75,77	97,61

Fuente: elaboración propia.

Handoff sin interferencia promedio acumulativo

Figura 4.15. AAPH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.37. Valores absolutos de AAPH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	67,01	66,14	69,27	0
RT en HT	78,17	73,12	76,94	0
BE en LT	68,98	66,67	71,43	0
BE en HT	80,37	78,09	80	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.38. Valores relativos de AAPH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	96,74	95,48	100	0
RT en HT	100	93,54	98,43	0
BE en LT	96,57	93,34	100	0
BE en HT	100	97,16	99,54	0
Puntaje AAPH	98,33	94,88	99,49	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.39. Valores absolutos de AAPH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	79,64	81,69	80,81	0
RT en HT	82,93	82,98	81,17	0
BE en LT	80,07	80,79	80,04	0
BE en HT	83,99	83,9	81,01	0

Fuente: elaboración propia.

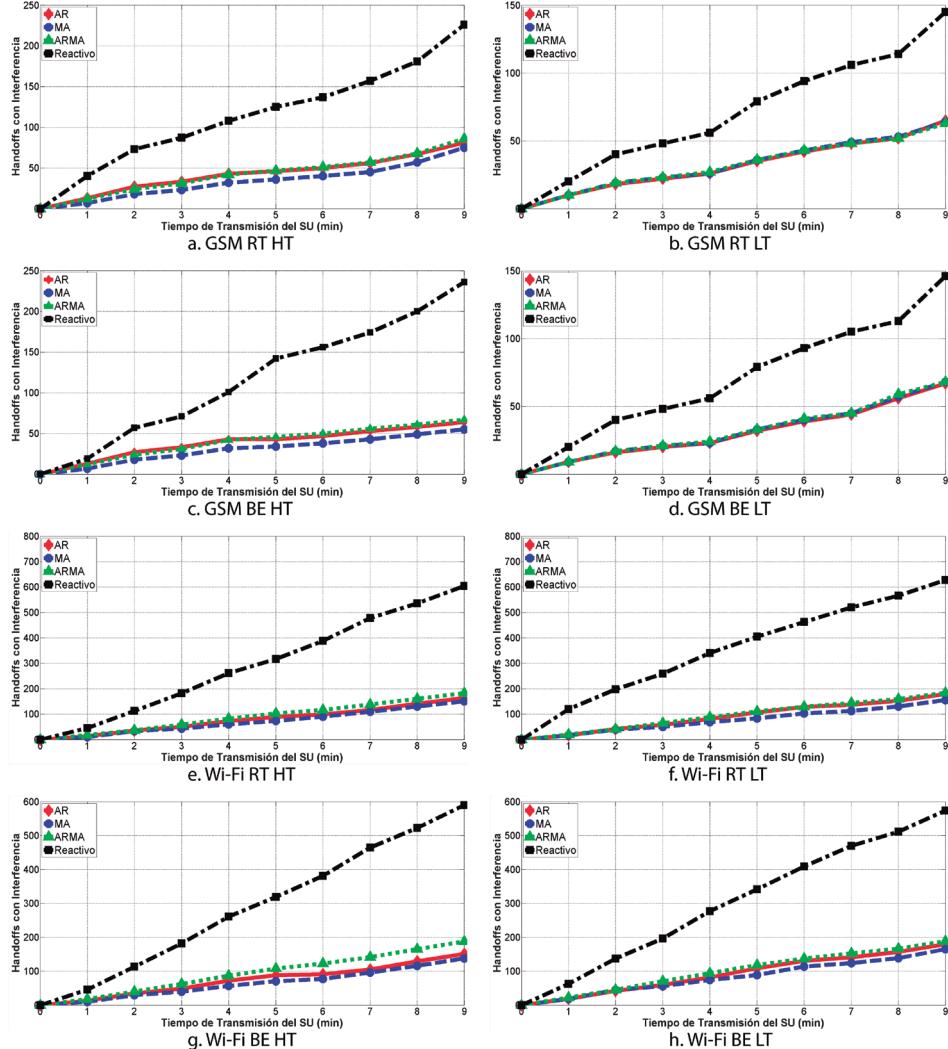
Tabla 4.40. Valores relativos de AAPH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	97,49	100	98,92	0
RT en HT	99,94	100	97,82	0
BE en LT	99,11	100	99,07	0
BE en HT	100	99,89	96,45	0
Puntaje AAPH	99,14	99,97	98,07	0

Fuente: elaboración propia.

Handoff con interferencia promedio acumulativo

Figura 4.16. AAIH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.41. Valores absolutos de AAIH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	32,99	33,86	30,73	100
RT en HT	21,83	26,88	23,06	100
BE en LT	31,02	33,33	28,57	100
BE en HT	19,63	21,91	20	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.42. Valores relativos de AAIH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	93,15	90,76	100	30,73
RT en HT	100	81,21	94,67	21,83
BE en LT	92,1	85,72	100	28,57
BE en HT	100	89,59	98,15	19,63
Puntaje AAIH	96,31	86,82	98,21	25,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.43. Valores absolutos de AAIH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	20,36	18,31	19,19	100
RT en HT	17,07	17,02	18,83	100
BE en LT	19,93	19,21	19,96	100
BE en HT	16,01	16,1	18,99	100

Fuente: elaboración propia.

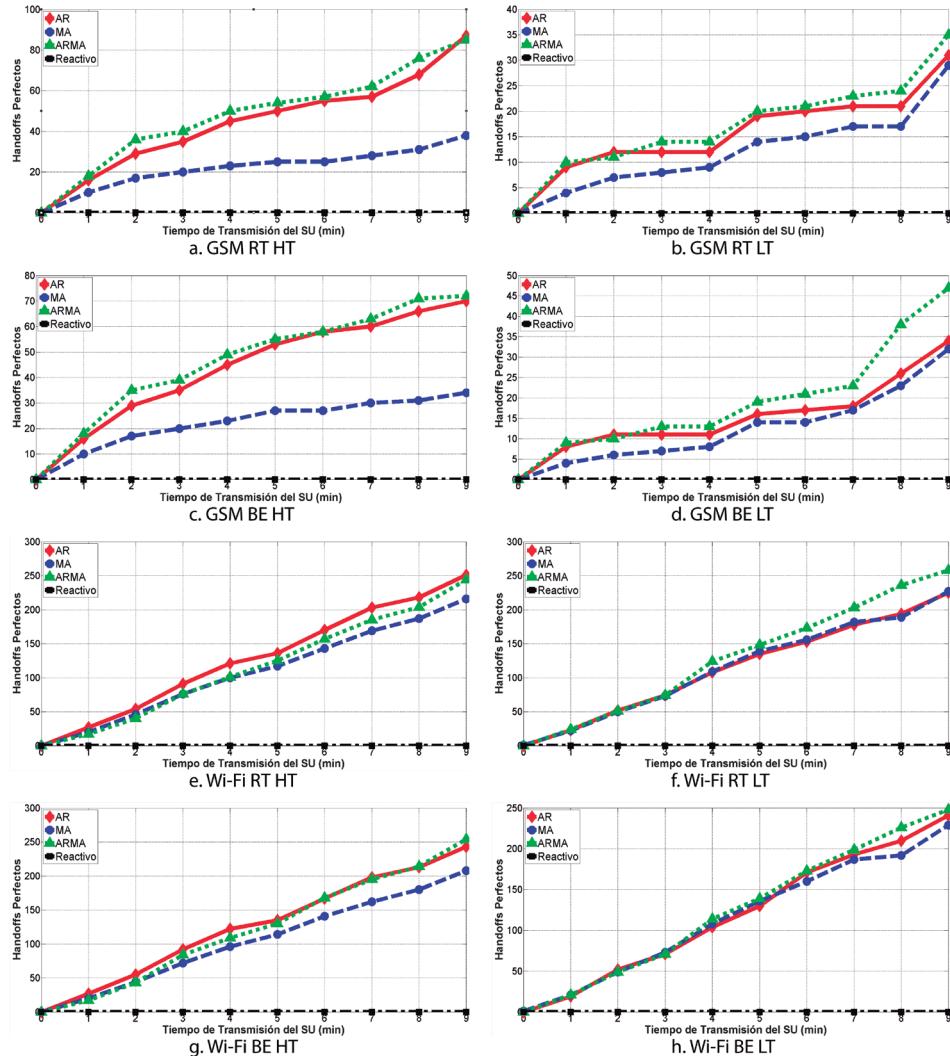
Tabla 4.44. Valores relativos de AAIH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	89,93	100	95,41	18,31
RT en HT	99,71	100	90,39	17,02
BE en LT	96,39	100	96,24	19,21
BE en HT	100	99,44	84,31	16,01
Puntaje AAIH	96,51	99,86	91,59	17,64

Fuente: elaboración propia.

Handoff perfecto promedio acumulativo

Figura 4.17. AAEH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.45. Valores absolutos de AAEH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	15,74	15,34	17,07	0
RT en HT	23,45	13,62	22,79	0
BE en LT	15,74	15,69	19,33	0
BE en HT	21,47	13,55	21,49	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.46. Valores relativos de AAEH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	92,21	89,87	100	0
RT en HT	100	58,08	97,19	0
BE en LT	81,43	81,17	100	0
BE en HT	99,91	63,05	100	0
Puntaje AAEH	93,39	73,04	99,3	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.47. Valores absolutos de AAEH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	25,6	26,64	26,9	0
RT en HT	26,12	24,35	25,1	0
BE en LT	26,69	26,66	26,19	0
BE en HT	25,77	24,27	25,66	0

Fuente: elaboración propia.

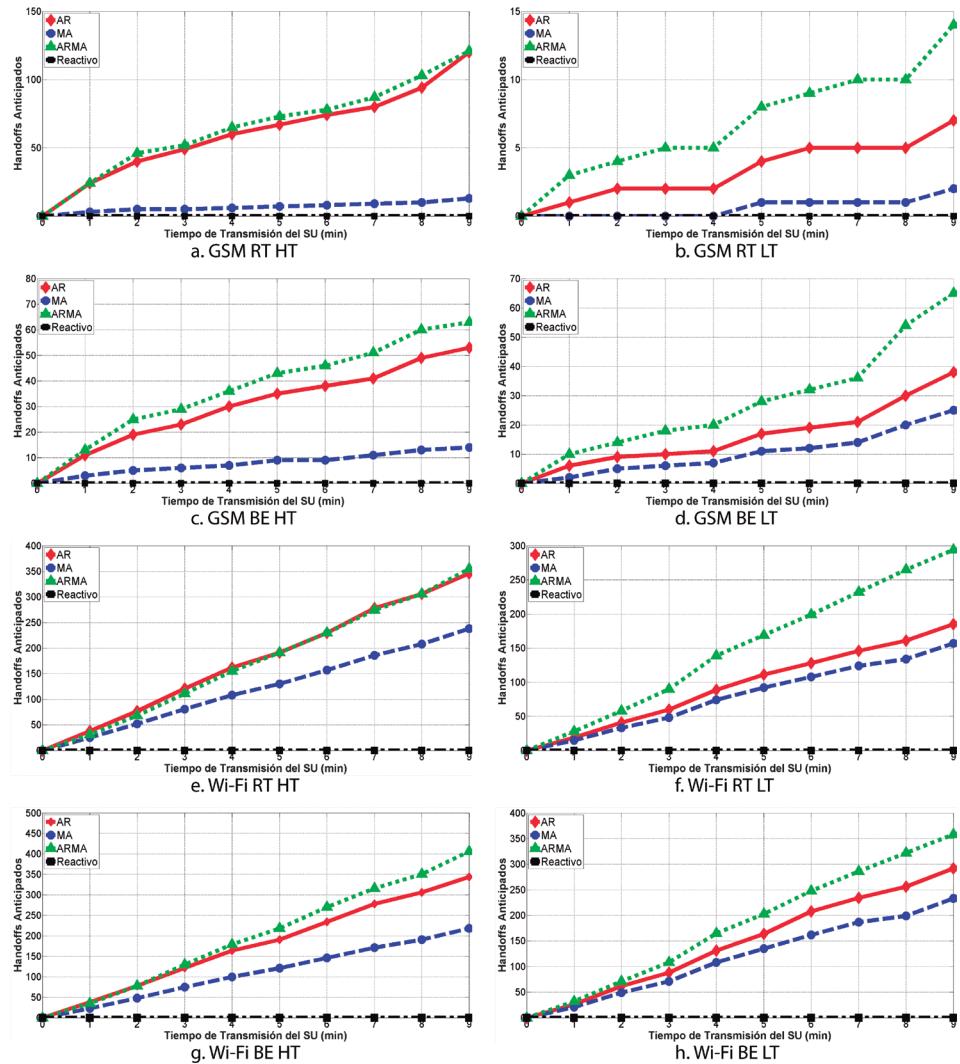
Tabla 4.48. Valores relativos de AAEH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	95,17	99,03	100	0
RT en HT	100	93,22	96,09	0
BE en LT	100	99,89	98,13	0
BE en HT	100	94,18	99,57	0
Puntaje AAEH	98,79	96,58	98,45	0

Fuente: elaboración propia.

Handoff anticipado promedio acumulativo

Figura 4.18. AAUH en cada escenario



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.49. Valores absolutos de AAUH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	3,55	1,06	6,83	1
RT en HT	32,35	4,66	32,44	1
BE en LT	9,64	6,35	13,17	1
BE en HT	16,26	5,58	18,81	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.50. Valores relativos de AAUH para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	28,17	94,34	14,64	100
RT en HT	3,09	21,46	3,08	100
BE en LT	10,37	15,75	7,59	100
BE en HT	6,15	17,92	5,32	100
Puntaje AAUH	11,95	37,37	7,66	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.51. Valores absolutos de AAUH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	21,05	18,43	30,66	1
RT en HT	36	26,83	36,52	1
BE en LT	32,34	27,12	37,8	1
BE en HT	36,48	25,44	41,01	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.52. Valores relativos de AAUH para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	4,75	5,43	3,26	100
RT en HT	2,78	3,73	2,74	100
BE en LT	3,09	3,69	2,65	100
BE en HT	2,74	3,93	2,44	100
Puntaje AAUH	3,34	4,2	2,77	100

Fuente: elaboración propia.

Evaluación comparativa

De la tabla 4.53 a la 4.60 se presentan los porcentajes comparativos del desempeño de cada algoritmo por EM, con enfoque RT y BE, y por tipo de escenario, tanto para la red GSM como para la Wi-Fi.

Tabla 4.53. Evaluación comparativa global por EM para red GSM

EM	AR	MA	ARMA	Reactiva
AAH	68,63	80,83	65,78	100
AAFH	64,55	71,82	64,44	100
AAPH	98,83	95,37	100	0
AAIH	98,07	88,4	100	25,65
AAEH	94,05	73,55	100	0
AAUH	11,95	37,37	7,66	100
Puntaje global	73,62	74,63	73,98	47,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.54. Evaluación comparativa por EM con RT para red GSM

EM	AR	MA	ARMA	Reactiva
AAH	67,26	78,86	65,66	100
AAFH	93,6	99,35	88,42	100
AAPH	99,14	95,25	100	0
AAIH	99,22	88,34	100	27
AAEH	97,47	75,03	100	0
AAUH	15,63	57,9	8,86	100
Puntaje global	75,63	79,16	74,67	47,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.55. Evaluación comparativa por EM con BE para red GSM

EM	AR	MA	ARMA	Reactivo
AAH	69,99	82,8	65,9	100
AAFH	37,32	46,02	41,97	100
AAPH	98,52	95,47	100	0
AAIH	96,94	88,47	100	24,32
AAEH	90,67	72,11	100	0
AAUH	8,26	16,84	6,46	100
Puntaje global	71,65	70,15	73,31	46,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.56. Evaluación comparativa global por escenario para red GSM

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	76,59	89,52	76,63	47,9
RT en HT	72,56	66,91	70,58	46,37
BE en LT	68,68	68,98	72,99	47,71
BE en HT	74,18	70,91	73,18	45,93
ANS RT	95,54	100	94,33	59,88
ANS BE	97,74	95,69	100	63,92
ANS LT	91,65	100	94,4	60,32
ANS HT	100	93,92	97,97	62,9
Total ANS	73	74,08	73,35	46,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.57. Evaluación comparativa global por EM para red Wi-Fi

EM	AR	MA	ARMA	Reactivo
AAH	65,11	69,37	61,96	100
AAFH	81,37	81,36	77,63	100
AAPH	99,17	100	98,1	0
AAIH	96,65	100	91,72	17,66
AAEH	100	97,76	99,66	0
AAUH	3,34	4,2	2,77	100
Puntaje global	72,5	73,89	70,43	45,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.58. Evaluación comparativa por EM con RT para red Wi-Fi

EM	AR	MA	ARMA	Reactivo
AAH	67,15	70,9	63,81	100
AAFH	88,14	87,19	83,63	100
AAPH	98,72	100	98,37	0
AAIH	94,82	100	92,9	17,67
AAEH	99,53	98,04	100	0
AAUH	3,77	4,58	3	100
Puntaje global	72,59	74,45	71,32	45,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.59. Evaluación comparativa por EM con BE para red Wi-Fi

EM	AR	MA	ARMA	Reactivo
AAH	63,07	67,83	60,11	100
AAFH	74,94	75,83	71,91	100
AAPH	99,61	100	97,81	0
AAIH	98,48	100	90,53	17,66
AAEH	100	97,04	98,85	0
AAUH	2,92	3,81	2,55	100
Puntaje global	72,32	73,25	69,45	45,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.60. Evaluación comparativa global por escenario para red Wi-Fi

Escenario	AR	MA	ARMA	Reactivo
RT en LT	71,81	75,58	72,41	45,47
RT en HT	72,41	72,38	69,29	45,4
BE en LT	72,17	73,76	70,86	45,84
BE en HT	72,34	72,61	67,92	45,2
ANS RT	97,5	100	95,8	61,16
ANS BE	98,73	100	94,81	62,16
ANS LT	96,41	100	95,94	61,14
ANS HT	99,83	100	94,63	62,49
Total ANS	72,18	73,58	70,12	45,48

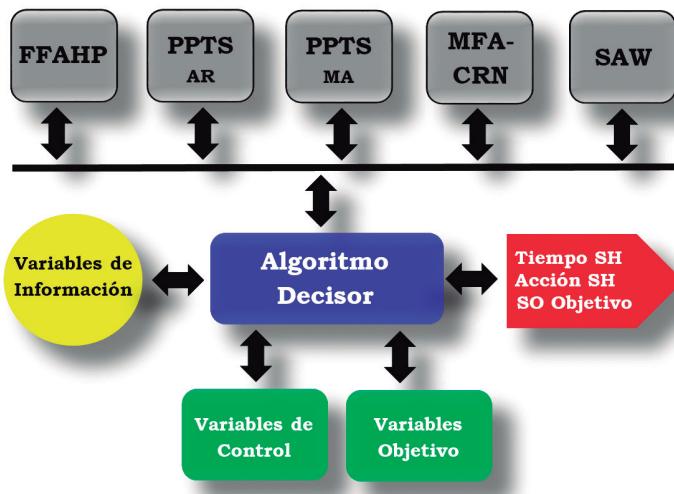
Fuente: elaboración propia.

Modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo

La figura 4.19 describe el modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo, en tanto que la tabla 4.61 muestra las reglas de selección del algoritmo decisor.

La implementación del algoritmo decisor en la herramienta de simulación se realizó a partir de una función adicional que procesa la información entregada por la función *criteria_values*, para tomar la decisión de qué algoritmo de SH seleccionar a partir de las reglas fijas descritas por la tabla 4.61. Posteriormente, se entrega esta información a la función *handoff_models* para que ejecute el algoritmo de SH seleccionado. La selección del algoritmo de SH que se va a utilizar se realiza de forma dinámica cada vez que un SU inicia una nueva transmisión de información.

Figura 4.19. Modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF definitivo



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.61. Reglas de selección del algoritmo decisor

Tipo de red	Clase de aplicación	Patrón de tráfico PU	Nivel de tráfico	Algoritmo seleccionado
GSM	RT	Cualquiera	Cualquiera	FFAHP
GSM	BE	Conocido	LT	PPTS-MA
GSM	BE	Conocido	HT	PPTS-AR
GSM	BE	Desconocido	Cualquiera	FFAHP

Tipo de red	Clase de aplicación	Patrón de tráfico PU	Nivel de tráfico	Algoritmo seleccionado
Wi-Fi	RT	Cualquiera	LT	SAW
Wi-Fi	RT	Cualquiera	HT	FFAHP
Wi-Fi	BE	Conocido	Cualquiera	PPTS-MA
Wi-Fi	BE	Desconocido	LT	SAW
Wi-Fi	BE	Desconocido	HT	FFAHP

Fuente: elaboración propia.

V. Discusión

En la figura 4.1, EA-GSM (824 MHz - 849 MHz) se presenta un ciclo de trabajo inferior al 25 %, mientras que la porción restante (850 MHz - 873 MHz), correspondiente al enlace descendente, exhibe un ciclo de trabajo superior al 75 %. En la figura 4.2 se observa que la mayoría de los canales tiene una disponibilidad superior al 90 %. Al comparar la figura 4.2 con la figura 4.3 se puede analizar que aun cuando las dos están correlacionadas, su variaciones son diferentes: mientras la primera indica la probabilidad de encontrar el canal desocupado, la segunda estima durante cuánto tiempo puede permanecer desocupado. La figura 4.4, por su parte, muestra que la porción del espectro con bajo nivel de SINR representa SO; también se observa una relación inversamente proporcional entre el valor de SINR y ETA en cada canal.

La figura 4.5 describe la interfaz de usuario de las herramientas de simulación desarrolladas, las cuales permiten realizar múltiples análisis y evaluaciones comparativas del desempeño de diversos algoritmos de SH desarrollados y propuestos en la literatura actual. También permiten analizar la variación del desempeño de dichos algoritmos a partir de la modificación de variables de interés visualizadas en esta misma figura.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran un muy bajo desempeño del algoritmo de SH RA en las EM: AAH, AAFH, ABW, AAD y AAT, tanto en LT como HT, para una red GSM y para una Wi-Fi, respectivamente. Sin embargo, es el algoritmo más utilizado para comparar los modelos propuestos de la literatura actual.

Si se analiza el desempeño de los algoritmos híbridos de SH, FAHP y FFAHP, junto a los más relevantes, seleccionados de la literatura actual, tales como: VIKOR, TOPSIS, SAW, MEW y AHP, se observa lo siguiente: con respecto a AAH, en la figura 4.8, y de la tabla 4.1 a la tabla 4.4, se observa que FFAHP tiene el mejor desempeño en GSM, con un amplio margen,

mientras que en Wi-Fi el mejor es SAW, seguido muy de cerca por AHP y FFAHP. Con respecto a AAFH, en la figura 4.9, y de la tabla 4.5 a la tabla 4.8, se observa que FAHP tiene el mejor desempeño en GSM, mientras que en Wi-Fi el mejor es SAW, seguido de cerca por AHP. Con respecto a ABW, en la figura 4.10, y de la tabla 4.9 a la tabla 4.12, se observa que MEW tiene el mejor desempeño en GSM, seguido de cerca por SAW, FAHP y FFAHP, mientras que en Wi-Fi el mejor es SAW, seguido de cerca por FFAHP, FAHP, AHP y VIKOR. Con respecto a AAD, en la figura 4.11, y de la tabla 4.13 a la tabla 4.16, se observa que FFAHP tiene el mejor desempeño en GSM, con un amplio margen, mientras que en Wi-Fi el mejor es SAW, seguido de cerca por FFAHP. Con respecto a AAT, en la figura 4.12, y de la tabla 4.17 a la tabla 4.20, se observa que FFAHP tiene el mejor desempeño en GSM, seguido de cerca por FAHP y SAW, mientras que en Wi-Fi el mejor es SAW, seguido de cerca por FFAHP, FAHP y AHP.

De la tabla 4.21 a la tabla 4.24 se realiza una comparación global de cada algoritmo de SH en los cuatro escenarios planteados en la metodología para la red GSM, y se observa que en el puntaje global general el algoritmo FFAHP tiene el mejor desempeño, con un margen del 4% con respecto al segundo. Sin embargo, es interesante analizar qué algoritmos son los mejores en cada escenario. En el caso de RT en LT, BE en LT y BE en HT, el algoritmo FFAHP tiene el mejor desempeño; solo en el escenario RT en HT ocupa el segundo lugar, con una diferencia de 1,13% con respecto al algoritmo AHP (el mejor en RT en HT). Dada la reducida diferencia, se puede afirmar que el algoritmo FFAHP es el dominante en la red GSM en sus cuatro escenarios. En el caso de un análisis por EM para aplicaciones sensibles al retardo, el algoritmo más adecuado es FFAHP, pero si se requiere un nivel alto de *throughput* entonces el algoritmo más adecuado es SAW; en el caso de requerir ambas la mejor combinación la tiene FFAHP.

De la tabla 4.25 a la tabla 4.28 se lleva a cabo una comparación global de cada algoritmo de SH en los cuatro escenarios planteados en la metodología para la red Wi-Fi, y se observa que en el puntaje global general el algoritmo SAW tiene el mejor desempeño, seguido de cerca por AHP, FFAHP y FAHP, con un margen de 0,4, 0,56 y 1,48%, respectivamente. Sin embargo, es interesante analizar qué algoritmos son los mejores en cada escenario. En el caso de RT en LT y BE en LT, el mejor es SAW, y para RT en HT y BE en HT, el mejor es FFAHP. De lo anterior se concluye que para la red Wi-Fi en escenarios de tráfico alto el algoritmo que mejor se adapta es FFAHP, mientras que para escenarios de tráfico bajo el ideal es SAW. En el caso de un análisis por EM, SAW es el algoritmo más adecuado, tanto para aplicaciones

sensibles al retardo como para las que requieren un nivel alto de *throughput*; solo en el caso de HT para aplicaciones sensibles al retardo que no requieren un nivel alto de *throughput*, FFAHP tiene mejor desempeño que SAW.

Al analizar el desempeño del algoritmo proactivo predictivo de SH, PPTS, combinado con las series de tiempo más relevantes, seleccionadas de la literatura actual, tales como: AR, MA y ARMA, junto a la versión reactiva de PPTS, se observa lo siguiente: con respecto a AAH, en la figura 4.13, y de la tabla 4.29 a la tabla 4.32, se observa que PPTS-Reactivo tiene el mejor desempeño, tanto en GSM como en Wi-Fi, seguido en ambos por PPTS-MA. Con respecto a AAFH, en la figura 4.14, y de la tabla 4.33 a la tabla 4.36, PPTS-Reactivo tiene el mejor desempeño, tanto en GSM como en Wi-Fi, seguido en ambos por PPTS-MA. Con respecto a AAPH, en la figura 4.15, y de la tabla 4.37 a la tabla 4.40, se observa que PPTS-ARMA tiene el mejor desempeño en GSM, seguido de cerca por PPTS-AR, mientras que en Wi-Fi el mejor es PPTS-MA, seguido de cerca por PPTS-AR. Con respecto a AAIH, en la figura 4.16, y de la tabla 4.41 a la tabla 4.44, se observa que PPTS-ARMA tiene el mejor desempeño en GSM, mientras que en Wi-Fi el mejor es PPTS-MA. Con respecto a AAEH, en la figura 4.17, y de la tabla 4.45 a la tabla 4.48, se observa que PPTS-ARMA tiene el mejor desempeño en GSM, mientras que en Wi-Fi el mejor es PPTS-AR, seguido de cerca por PPTS-ARMA. Con respecto a AAUH, en la figura 4.18, y de la tabla 4.49 a la tabla 4.52, se observa que pptS-Reactivo tiene el mejor desempeño, tanto en GSM como Wi-Fi, seguido en ambos por PPTS-MA.

De la tabla 4.53 a la tabla 4.56 se hace una comparación global de cada algoritmo de SH en los cuatro escenarios planteados en la metodología para la red GSM, y se observa que en el puntaje global general el algoritmo PPTS-MA tiene el mejor desempeño, con un margen de apenas 0,73% con respecto al segundo. Por tanto, es interesante analizar qué algoritmos son los mejores en cada escenario. En el caso de RT en HT y BE en HT, el algoritmo PPTS-AR tiene el mejor desempeño, mientras que para RT en LT, el mejor es PPTS-MA, y finalmente, para BE en LT, el mejor es PPTS-ARMA. Si se promedian los resultados se puede concluir que PPTS-AR es el mejor algoritmo para HT, con un margen de 2,03% con respecto al segundo, y PPTS-MA es el mejor en LT, con un margen de 5,6% con respecto al segundo.

De la tabla 4.57 a la tabla 4.60 se realiza una comparación global de cada algoritmo de SH en los cuatro escenarios planteados en la metodología para la red Wi-Fi, y se observa que en el puntaje global general el algoritmo PPTS-MA tiene el mejor desempeño, con un margen de apenas 1,4% con respecto

al segundo. Por tanto, es interesante analizar qué algoritmos son los mejores en cada escenario. En el caso de RT en LT, BE en LT y BE en HT, el algoritmo PPTS-MA tiene el mejor desempeño, mientras que para RT en HT, el mejor es PPTS-AR, pero con un margen de tan solo 0,03% con respecto a PPTS-MA. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que PPTS-MA es el algoritmo dominante en todos los escenarios para la red Wi-Fi.

La ventaja más significativa del algoritmo PPTS es su capacidad para reducir el nivel de interferencia. En la red GSM el algoritmo PPTS-ARMA tiene el mejor desempeño en este aspecto, con un margen de apenas 1,97% con respecto a PPTS-AR, sin embargo, con el objetivo de no tener múltiples modelos de predicción se seleccionó PPTS-AR sobre PPTS-ARMA, debido a su buen desempeño general y al pequeño margen de diferencia con este. En la red Wi-Fi el algoritmo PPTS-MA es el mejor, con un margen de 3,35% sobre el segundo (PPTS-AR). Sin embargo, el algoritmo PPTS también tiene una desventaja significativa: el incremento en el valor de AHH de 23,75 y 38,46%, en GSM y Wi-Fi, respectivamente, debido a las imprecisiones en la predicción del algoritmo.

A partir de los resultados obtenidos, se propone un modelo adaptativo multivariable de SH basado en un multimodelo capaz de seleccionar el algoritmo de SH desarrollado que permita obtener el mejor desempeño, de conformidad con las características de los recursos espectrales y los requerimientos de QoS del SU. La figura 4.19 describe el modelo adaptativo multivariable de SH MAPFF propuesto, mientras que la tabla 4.61 resume las reglas de decisión del algoritmo decisor del modelo MAPFF. Con respecto a la figura 4.19 se observa que el algoritmo FAHP no hace parte del modelo adaptativo multivariable, debido a que en la gran mayoría de los escenarios el desempeño de FAHP, a pesar de estar dentro de los tres mejores, siempre fue superado por FFAHP, y en las pocas EM en las cuales fue el mejor, cuando se promediaba con las demás EM su desempeño resultaba afectado. En su reemplazo apareció el algoritmo SAW, y este mostró un desempeño sobresaliente, sobre todo en la red Wi-Fi. El algoritmo PPTS se combinó con los modelos AR y MA, los cuales mostraron el mejor balance de desempeño para las EM utilizadas en los diferentes escenarios.

Con respecto a la tabla 4.61, esta se realizó de la siguiente forma: para la red GSM con enfoque RT se busca un algoritmo que proporcione un bajo nivel de retardo (por el enfoque RT) y alto nivel de *throughput* (por la cantidad de información que requieren transmitir SU4 y SU10); el algoritmo que mejor balance muestra en estas dos EM es FFAHP.

Para la red GSM con enfoque BE (SU2) se tiende a aprovechar el hecho de que el patrón de tráfico sea conocido, a fin de hacer predicciones sobre la ocupación de las SO; para LT el mejor desempeño lo tiene PPTS-MA y para HT el mejor desempeño lo tiene PPTS-AR. Si el patrón de tráfico es desconocido, el algoritmo que tiene el mejor desempeño en términos de *throughput* es FFAHP, tanto en LT como en HT. El algoritmo PPTS no se tiene en cuenta para aplicaciones con enfoque RT, debido a que su incremento en AHH afecta AAD y AAT. En cambio, en el caso de aplicaciones con enfoque BE, es interesante poder reducir el nivel de interferencia a pesar de la reducción en AAD y AAT.

Para la red Wi-Fi la explicación es muy similar, con la diferencia de los algoritmos que muestran el mejor desempeño en determinados casos.

La variable *patrón de tráfico* solo se considera para las aplicaciones con enfoque BE, ya que en el caso de RT su aporte en promedio es negativo. En algunos casos el mejor algoritmo es el mismo tanto para LT como para HT, y por dicha razón la variable nivel de tráfico toma el valor de cualquiera en la tabla 4.61.

VII. Conclusiones

Conclusiones

Los algoritmos de asignación de espectro son las herramientas que permiten dar solución al problema del uso eficiente del espectro radioeléctrico, además de aportar a diferentes tópicos como caracterización de canales, políticas locales o requisitos de usuario. Las ventajas y las desventajas en la adopción de un algoritmo u otro para la asignación de espectro están en función de las necesidades específicas del propósito que se desea lograr, y su implementación depende de las necesidades de procesamiento de la señal, los tiempos de respuesta, la disponibilidad de los datos, la capacidad de almacenamiento, la capacidad de aprendizaje y la robustez, entre otros aspectos.

Las soluciones para el *handoff* espectral deben ser escalables y optimizar la detección y la selección del canal objetivo, teniendo en cuenta la carga de tráfico, el comportamiento del usuario, los niveles de interferencia, la caracterización del espectro, la clase de aplicación y la necesidad de múltiples canales de frecuencia.

En la práctica, las redes de radio cognitiva deben enfrentar retos de tipo heterogéneo como, por ejemplo, las infraestructuras de las redes actuales, y por tal razón se evidencia la necesidad de contar con un modelo de *handoff* espectral capaz de adaptar su principio de funcionamiento para lograr el mejor desempeño en la movilidad espectral de los usuarios secundarios. Con lo anterior en mente, se realiza la propuesta de un modelo adaptativo multivariable de *handoff* espectral basado en un multimodelo que selecciona el mejor algoritmo de *handoff* espectral, de acuerdo con las características de los recursos espectrales y los requerimientos del SU.

De conformidad con los resultados alcanzados, se puede concluir que no hay un algoritmo que se desempeñe de forma excelente en todas las métricas de evaluación y para todos los escenarios de simulación (tipo de red, clase de

aplicación, nivel de tráfico). Cada algoritmo se puede desempeñar de forma satisfactoria en determinadas métricas de evaluación y para ciertos escenarios, por lo que una propuesta interesante es el diseño de un modelo adaptativo multivariable de *handoff* espectral que permita cambiar su comportamiento de acuerdo con los requerimientos de la aplicación que se esté desarrollando durante la comunicación del usuario secundario. Los modelos de tipo proactivo son más útiles en redes de radio cognitiva que han sido muy bien modeladas, mientras que para las demás es más conveniente un modelo de tipo reactivo e híbrido.

El modelo *adaptativo multivariable predictivo realimentado difuso de handoff espectral* denominado MAPFF, desarrollado en esta investigación, es una herramienta para la toma de decisiones que permite aprovechar efectivamente las oportunidades espectrales. En este documento se presentó la validación del desempeño del algoritmo propuesto, a través de datos reales de ocupación espectral capturados en experimentos realizados en la banda de frecuencia GSM y Wi-Fi. Sin embargo, la aplicación del algoritmo también se puede extender a otras bandas de frecuencia, siempre que se cuente con la información estadística necesaria y suficiente.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas para todas las métricas y escenarios de evaluación, el modelo adaptativo multivariable MAPFF de *handoff* espectral es una técnica comparativamente sencilla, con un costo de procesamiento relativamente bajo que proporciona un eficiente y eficaz proceso de selección de canales de frecuencia, con un bajo nivel de retardo, un alto nivel de *throughput* y una reducida tasa de *handoff* espectral. Lo anterior permite mejorar y fortalecer el desempeño de las estrategias de *handoff* espectral en las redes de radio cognitiva, en especial en las proactivas.

Esta investigación propone un modelo adaptativo multivariable MAPFF de *handoff* espectral, conformado por los algoritmos para la toma de decisiones multicriterio desarrollados: *Feedback Fuzzy Analytical Hierarchical Process* (FFAHP) y *Proactive Predictive based on Time Series* (PPTS), junto con el algoritmo MCDM SAW. Dicho modelo selecciona de forma dinámica e inteligente la mejor oportunidad espectral con base en los criterios de decisión: probabilidad de disponibilidad del canal, tiempo estimado de disponibilidad del canal, relación señal a ruido más interferencia y ancho de banda, seleccionados cuidadosamente a través del método Delphi modificado. El modelo adaptativo multivariable MAPFF de *handoff* espectral selecciona uno de los anteriores algoritmos, de acuerdo con el tipo de red, la clase de aplicación y el nivel de tráfico, en el que se desarrolle la comunicación del SU.

Para evaluar el nivel de desempeño de los algoritmos desarrollados se realiza un análisis comparativo entre estos y los algoritmos de *handoff* espectral más relevantes en la literatura actual. A diferencia de los trabajos relacionados, la evaluación comparativa se validó a través de tres novedosas herramientas de simulación desarrolladas en Matlab, con trazas de datos reales de ocupación espectral capturados en la banda de frecuencia GSM y Wi-Fi, que modelan el comportamiento real de los PU. En la evaluación de desempeño se tuvieron en cuenta dos tipos de red: GSM y Wi-Fi, dos clases de aplicaciones: tiempo-real y mejor-esfuerzo, dos niveles de tráfico: tráfico alto y tráfico bajo, y diez métricas de evaluación: número de *handoff* promedio acumulado, número de *handoff* fallidos promedio acumulado, ancho de banda promedio, retardo promedio acumulado, *throughput* promedio acumulado, *fairness*, número de *handoff* sin interferencia promedio acumulado, número de *handoff* con interferencia promedio acumulado, número de *handoff* perfecto promedio acumulado, número de *handoff* anticipado promedio acumulado.

El análisis de ocupación espectral realizado a la banda de frecuencia GSM, específicamente al enlace ascendente (824 MHz - 849 MHz), evidencia una gran disponibilidad de oportunidades espectrales con características excelentes, tal y como lo ratifican: su ciclo de trabajo normalizado del 25 %, su alta probabilidad de disponibilidad superior al 90 % para la mayoría de los canales, su excelente tiempo de disponibilidad estimado, superior a cinco segundos para más de la mitad de los canales, y su buen nivel de relación señal a interferencia más ruido en la mayoría de los canales.

Contribuciones de la 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, Colombia.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, en dos tipos de redes: GSM y Wi-Fi.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, con dos tipos de enfoque: RT y BE, de acuerdo con la clase de aplicación que puede ejecutar el SU.
- 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: GSM-RT-LT, GSM-RT-HT, GSM-BE-LT, GSM-BE-HT, Wi-Fi-RT-LT, Wi-Fi-RT-HT, Wi-Fi-BE-LT y Wi-Fi-BE-HT.
- Evaluación y validación de los algoritmos de SH desarrollados, bajo nueve EM: AAH, AAFH, ABW, AAD, AAT, AAPH, AAIH, AAEH y AAUH.
- 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 lógica difusa que mejora el manejo de la subjetividad y de la incertidumbre en la información y en las evaluaciones de criterios, denominado FAHP.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH híbrido basado en la realimentación del algoritmo FAHP, que aumenta el nivel de precisión en la evaluación de las SO al tener en cuenta su desempeño reciente, denominado FFAHP.
- Diseño y desarrollo de un algoritmo de SH proactivo predictivo basado en series de tiempo que reduce el nivel de interferencia entre el PU y el SU, denominado PPTS.
- Desarrollo de una gran variedad de algoritmos de SH relevantes, relacionados en la literatura actual, y modificados apropiadamente para evaluar su desempeño en las aplicaciones de RT y BE, así como su comparación con los algoritmos propuestos.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación novedosa para evaluar el desempeño de algoritmos de SH híbridos, basada en los datos de ocupación espectral reales, que permite modificar varios parámetros de interés para analizar el comportamiento del desempeño de cada algoritmo en diferentes situaciones, denominada Cognitive Radio Networks.
- Diseño y desarrollo de una herramienta de simulación novedosa para evaluar el desempeño de algoritmos de SH proactivo-predictivos, 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, denominado Cognitive Radio Networks Prediction.

Investigación futura

Como trabajo futuro se proponen cinco directrices: la primera consiste en realizar una modificación al algoritmo FFAHP para que pueda autoconfigurar los pesos de los criterios de decisión con base en las estadísticas históricas recientes de dichos criterios. La segunda consiste en realizar una evaluación y validación con los algoritmos de aprendizaje autónomo más relevantes en la literatura actual, por ejemplo, el uso de máquinas de soporte vectorial para realizar procesos de clasificación y el aprendizaje por refuerzo para desarrollar la parte de adaptación. La tercera consiste en realizar una evaluación y validación de los algoritmos aquí propuestos, así como los de aprendizaje autónomo y teoría de juegos, en una red de tipo distribuido y ad-hoc, utilizando mecanismos colaborativos. La cuarta consiste en mejorar el algoritmo decisor para que seleccione la estrategia de SH que se va a utilizar de forma más inteligente, a través de un algoritmo de aprendizaje con decisiones variables, e incorporar en la herramienta de *software* un módulo multiusuario que permita evaluar de forma dinámica el desempeño del algoritmo decisor. La quinta consiste en realizar una evaluación y validación con equipos de radio cognitiva que emulen una red de radio cognitiva en lugar de simulaciones, aun con datos de ocupación espectral reales.

Referencias bibliográficas

- Abbas, N., Nasser, Y., & Ahmad, K. El. (2015). Recent advances on artificial intelligence and learning techniques in cognitive radio networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (1), 1-20.
- Aguilar, J., & Navarro, A. (2011). Radio cognitiva - estado del arte. *Sistemas y Telemática*, 9(16), 31-53.
- 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.
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. En *International Symposium on Information Theory* (pp. 267-281). Academinaí Kiado, Budapest.
- Akin, S., & Fidler, M. (2016). On the transmission rate strategies in cognitive radios. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(3), 2335-2350.
- Akter, L., Natarajan, B., & Scoglio, C. (2008). Modeling and forecasting secondary user activity in cognitive radio networks. En *17th International Conference on Computer Communications and Networks*. August 3-7, 2008. (pp. 1-6). St. Thomas, US Virgin Islands.
- Akyildiz, I. F., & Li, Y. (2006). *OCRA: OFDM-based cognitive radio networks*. Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report.
- 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.
- 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.
- Almasaeid, H. M., & Kamal, A. E. (2010). Receiver-based channel allocation for wireless cognitive radio mesh networks. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum* (pp. 1-10). 6 Apr - 09 Apr 2010. Singapur, Singapur.
- Alnwaimi, G., Arshad, K., & Moessner, K. (2011). Dynamic spectrum allocation algorithm with interference management in co-existing networks. *IEEE Communications Letters*, 15(9), 932-934.
- Alsarhan, A., & Agarwal, A. (2009). Cluster-based spectrum management using cognitive radios in wireless mesh network. En *International Conference on Computer Communications and Networks* (pp. 1-6). August 3–6, 2009. San Francisco, C.A., Estados Unidos.
- Al-Surmi, I., Othman, M., & Mohd Ali, B. (2012). Mobility management for IP-based next generation mobile networks: Review, challenge and perspective. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(1), 295-315.
- Anderson, T. W. (1980). *Maximum likelihood estimation for vector autoregressive moving-average models, directions in time series*. Institute of Mathematical Statistics. Stanford University, Stanford, California, Estados Unidos.
- Bâlan, I. M., Moerman, I., Sas, B., & Demeester, P. (2012). Signalling minimizing handover parameter optimization algorithm for LTE networks. *Wireless Networks*, 18(3), 295-306.
- Bari, F., & Leung, V. (2007). Application of ELECTRE to network selection in a heterogeneous wireless network environment. En *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (pp. 3810-3815). 11-15 march 2007. Hong Kong, China.
- Bennai, M., Sydor, J., & Rahman, M. (2010). Automatic channel selection for cognitive radio systems. En *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications* (pp. 1831-1835). IEEE. 26 Sep - 30 Sep 2010. Estambul, Turquia.

- Bkassiny, M., Li, Y., & Jayaweera, S. K. (2013). A survey on machine-learning techniques in cognitive radios. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(3), 1136-1159.
- Bolstad, W. M. (2007). *Introduction to bayesian statistics*. John Wiley and Sons. New Jersey, Estados Unidos.
- Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, 26(2), 211-252.
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control* (Revised Ed). Oakland, California: Holden-Day.
- Brillinger, D. R. (2001). *Time series: data analysis and theory*. Oakland, California: Holden-Day.
- Brockwell, P. J. (2001). On continuous-time ARMA processes. En *Handbook of statistics* (pp. 249-276). Ámsterdam: Elsevier.
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (1991). *Time series: theory and methods*. Nueva York: Springer Verlag.
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (2002). *Introduction to time series and forecasting* (2.^a ed.). Nueva York: Springer.
- Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2341-2354.
- Büyüközkan, G., Kahraman, C., & Ruan, D. (2004). A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection. *International Journal of General Systems*, 33(2-3), 259-280.
- Byun, S. S., Balasingham, I., & Liang, X. (2008). Dynamic spectrum allocation in wireless cognitive sensor networks: Improving fairness and energy efficiency. En *IEEE Vehicular Technology Conference*. 21-24 Sept. 2008, Calgary, Canada.
- Cárdenas-Juárez, 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). 24 Feb - 26 Feb 2016, Cholula, México.
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655. doi:[http://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](http://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)

- Chen, D., Zhang, Q., & Jia, W. (2008). Aggregation aware spectrum assignment in cognitive ad-hoc networks. En *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. 15 May - 17 May 2008, Singapur, Singapur..
- Chen, T., Zhang, H., Maggio, G. M., & Chlamtac, I. (2007). CogMesh: A cluster-based cognitive radio network. En *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (pp. 168-178). 18 Apr - 20 Apr 2007, Dublin, Irlanda.
- 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.
- Cheng, X., & Jiang, M. (2011). Cognitive radio spectrum assignment based on artificial bee colony algorithm. En *IEEE International Conference on Communication Technology* (pp. 161-164).
- Cho, J., & Lee, J. (2013). Development of a new technology product evaluation model for assessing commercialization opportunities using Delphi method and fuzzy AHP approach. *Expert Systems with Applications*, 40(13), 5314-5330.
- Chou, C. T., Shankar, S., Kim, H., & Shin, K. G. (2007). What and how much to gain by spectrum agility? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(3), 576-587.
- Choudhary, D., & Shankar, R. (2012). An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India. *Energy*, 42(1), 510-521.
- Christian, I., Moh, S., Chung, I., & Lee, J. (2012). Spectrum mobility in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 50(6), 114-121.
- Correa, E. (2004). *Series de tiempo: conceptos básicos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Cortés, J. (2011). *Metodología para la implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones TIC's para soportar una estrategia de cadena de suministro esbelta* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Csurgai-Horvath, L., & Bito, J. (2011). Primary and secondary user activity models for cognitive wireless network. En *International Conference on Telecommunications* (pp. 301-306). 08 May - 11 May 2011, Ayia Napa, Cyprus.

- Dadallage, S., Yi, C., & Cai, J. (2016). Joint beamforming, power and channel allocation in multi-user and multi-channel underlay MISO cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(5), 3349-3359.
- Dadios, E. P. (2012). *Fuzzy logic: Algorithms, techniques and implementations*. InTech. Rijeka, Croatia.
- Delgado, M., & Rodríguez, B. (2016). Opportunities for a more efficient use of the spectrum based in cognitive radio. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 610-616.
- Del-Ser, J., Matinmikko, M., Gil-López, S., & Mustonen, M. (2010). A novel Harmony search based spectrum allocation technique for cognitive radio networks. En *International Symposium on Wireless Communication Systems* (pp. 233-237). 19 Sep - 22 Sep 2010, York, United Kingdom.
- Devore, J. L. (2001). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (5.a ed.). México: Thomson.
- Ding, L., Melodia, T., Batalama, S. N., Matyjas, J. D., & Medley, M. J. (2010). Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4), 1969-1979.
- Duan, J., & Li, Y. (2011). An optimal spectrum *handoff* scheme for cognitive radio mobile ad hoc networks. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 11(3), 11-16.
- ETSI. (2012). *3GPP TS 23.107 version 11.0.0 Release 11*.
- Federal Communications Commission. (2003). *Notice of proposed rulemaking and order*. Washington, D.C.: autor.
- Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems: An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley. Boston, MA, Estados Unidos.
- Ferro, R. A., Pedraza, L. F., & Hernández, C. (2011). Maximización del throughput en una red de radio cognitiva basado en la probabilidad de falsa alarma. *Tecnura*, 15(30), 64-70.
- Fonte, J. P., & Mora, F. E. (2008, June). *Implementación de protocolos de capar de enlace de datos en los simuladores Omnet++ Y NS-2*. Quito: EPN..
- Forero, F. (2012). *Detección de códigos de usuarios primarios para redes de radio cognitiva en un canal de acceso DCMA*. Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Fraser, A. M. (2008). *Hidden Markov models and dynamical systems*. SIAM. (Society for Industrial and Applied Mathematics). Filadelfia, Estados Unidos.
- Fu, J., Wu, J., Zhang, J., Ping, L., & Li, Z. (2010, October). A novel AHP and GRA based handover decision mechanism in heterogeneous wireless networks. En *International Conference on Information Computing and Applications* (pp. 213-220). Tangshan, China, October 15-18, 2010.
- Fudenberg, D., & Tirole, J. (1991). *Game Theory*. MIT Press. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=pFPHKwXro3QC>
- Gallardo-Medina, J. R., Pineda-Rico, U., & Stevens-Navarro, E. (2009). VIKOR method for vertical *handoff* decision in beyond 3G wireless networks. En *International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*. 10 Nov - 13 Nov 2009, Toluca, México.
- Garrett, M. W., & Willinger, W. (1994). Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic. En *ACM Sigcomm* (pp. 269-280). En ACM SIGCOMM computer communication review, 24(4), (pp. 269-280). ACM.
- Gavrilovska, L., Atanasovski, V., Macaluso, I., & Dasilva, L. A. (2013). Learning and reasoning in cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(4), 1761-1777.
- Giupponi, L., & Pérez-Neira, A. I. (2008). Fuzzy-based spectrum *handoff* in cognitive radio networks. En *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. 15 May - 17 May 2008, Singapur, Singapur.
- Gódor, G., & Déári, G. (2007). Novel network selection algorithm for various wireless network interfaces. En *IST Mobile and Wireless Communications Summit* (pp. 1-5). Budapest, Hungría 01 Jul - 05 Jul 2007.
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*, 3(2), 95-99.
- Green, K. C., Armstrong, J. S., & Graefe, A. (2007). Methods to elicit forecasts from groups: Delphi and prediction markets compared. *Social Science Research Network*, 8, 17-20.
- Guerrero, V. M. (2003). *Análisis estadístico de series de tiempo económicas* (2.a ed.). México: Thomson.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time series analysis*. New Jersey: Princeton University Press.

- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier. San Francisco, CA, Estados Unidos.
- Han, Z., & Liu, K. J. R. (2008). *Resource allocation for wireless networks: basics, techniques, and applications*. Reino Unido: Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Harvey, A. C. (1993). *Time series models*. Pearson. New York, Estados Unidos.
- Hasswa, A., Nasser, N., & Hassanein, H. (2006). Tramcar: A context-aware cross-layer architecture for next generation heterogeneous wireless networks. En *IEEE International Conference on Communications* (vol. 1, pp. 240-245). 11 Jun - 15 Jun 2006. Estambul, Turquia.
- Haykin, S. (1998). *Neural networks: A Comprehensive foundation* (2.a ed.). Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos: Prentice Hall PTR. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- He, A., Bae, K. K., Newman, T. R., Gaeddert, J., Kim, K., Menon, R., et al (2010). A survey of artificial intelligence for cognitive radios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4), 1578-1592.
- 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., Giral, D., & Páez, I. (2015a). Benchmarking of the performance of spectrum mobility models in cognitive radio networks. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(21).
- Hernández, C., Giral, D., & Páez, I. (2015b). Hybrid algorithm for frequency channel selection in Wi-Fi networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 9(12), 1212-1215.
- Hernández, C., Giral, D., & Santa, F. (2015). MCDM spectrum handover models for cognitive wireless networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 9(10), 679-682.
- Hernández, C., Páez, I., & Giral, D. (2015). Modelo AHP-VIKOR para *handoff* espectral en redes de radio cognitiva. *Tecnura*, 19(45), 29-39.
- Hernández, C., Pedraza L. F., & Martínez F. (2016). Algoritmos para asignación de espectro en redes de radio cognitiva. *Tecnura*, 20(48), 69-88.

- Hernández, C., Pedraza, L. F., & Rodriguez-Colina, E. (2016). Fuzzy fee-dback algorithm for the spectral *handoff* in cognitive radio networks. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (80), 47-62.
- Hernández, C., Salcedo, O., & Pedraza, L. F. (2009). An ARIMA model for forecasting Wi-Fi data network traffic values. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 65-69.
- Hernández, C., Salgado, C., & Salcedo, O. (2013). Performance of multivariable traffic model that allows estimating *throughput* mean values. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (67), 52-62. Hernández, C., Vasquez, H., & Páez, I. (2015). Proactive spectrum *handoff* model with time series prediction. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 10(21), 42259-42264.
- Hernández, C., Salgado, C., López, H., & Rodríguez-Colina, E. (2015). Multivariable algorithm for dynamic channel selection in cognitive radio networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1-17.
- Hernández-Guillen, J., Rodríguez-Colina, E., Marcelín-Jiménez, R., & Pascoe-Chalke, M. (2012). CRUAM-MAC: A novel cognitive radio MAC protocol for dynamic spectrum access. En *IEEE Latin-America Conference on Communications* (pp. 1-6). Ecuador: IEEE. Cuenca, Ecuador.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill. Ciudad de México.
- Hong, M., Kim, J., Kim, H., & Shin, Y. (2008). An adaptive transmission scheme for cognitive radio systems based on interference temperature model. En *IEEE Consumer Communications and Networking Conference* (pp. 69-73). 10 Jan - 12 Jan 2008, Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Hoven, N., Tandra, R., & Sahai, A. (2005). Some fundamental limits on cognitive radio. *Wireless Foundations EECS, University of California, Berkeley*.
- Höyhtyä, M., Mustonen, M., Sarvanko, H., Hekkala, A., Katz, M., Mämälä, A., et al. (2008). *Cognitive radio: An intelligent wireless communication system. Research Report VTT-R-02219-08*.
- Hübner, R. (2007). *Strategic supply chain management in process industries: An application to specialty chemicals production network design* (vol. 594). Springer Science & Business Media. Berlin, Alemania.

- 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.*
- IEEE Standards Coordinating Committee 41 on Dynamic Spectrum. (2008). *1900.1-2008 - IEEE standard definitions and concepts for dynamic spectrum access: terminology relating to emerging wireless networks, system functionality, and spectrum management. IEEE Standard 1900.1-2008.* Recuperado de papers2://publication/uuid/ 6010BFFD-CE4E-4C69-A2B0-0539E75F5422
- Inwhee, J., Won-Tae, K., & Seokjoon, H. (2007). A network selection algorithm considering power consumption in hybrid wireless networks. En *International Conference on Computer Communications and Networks* (pp. 1240-1243). 13 Aug - 16 Aug 2007, Honolulu, HI, Estados Unidos.
- Issariyakul, T., Pillutla, L. S., & Krishnamurthy, V. (2009). Tuning radio resource in an overlay cognitive radio network for TCP: Greed isn't good. *IEEE Communications Magazine*, 47(7), 57-63.
- Jayaweera, S., & Christodoulou, C. (2011). *Radiobots: architecture, algorithms and realtime reconfigurable antenna designs for autonomous, self-learning future cognitive radios*. Albuquerque, Nuevo Mexico: Universidad de Nuevo Mexico.
- Ji, Z., & Liu, K. J. R. (2007). Cognitive radios for dynamic spectrum access - dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview. *IEEE Communications Magazine*, 45(5), 88-94.
- Jiang, C., Chen, Y., & Liu, K. J. R. (2014). Multi-channel sensing and access game: Bayesian social learning with negative network externality. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(4), 2176-2188.
- Jiménez, G. (2015). *Ventajas y desventajas de las simulaciones*. Recuperado el 12 de agosto del 2015, de [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060015/Lecciones/Capitulo VI/ventajas.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060015/Lecciones/Capitulo%20VI/ventajas.htm)
- Kaleem, F. (2012). *VHITS: vertical handoff initiation and target selection in a heterogeneous wireless network*. (Tesis de doctorado). Universidad Internacional de Florida.
- Kanodia, V., Sabharwal, A., & Knightly, E. (2004). MOAR: A multi-channel opportunistic auto-rate media access protocol for ad hoc networks. En *IEEE International Conference on Broadband Networks* (pp. 600-610). 25-29 Oct. 2004, San Jose, California, Estados Unidos.

- Kassar, M., Kervella, B., & Pujolle, G. (2008). An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 31(10), 2607-2620.
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. *Energy*, 35(6), 2517-2527.
- 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). 23 Nov. - 25 Nov. 201, 2Penang, Malasia.
- Kibria, M. R., Jamalipour, A., & Mirchandani, V. (2005). A location aware three-step vertical *handoff* scheme for 4G/B3G networks. En *Global Telecommunications Conference* (vol. 5, pp. 2752-2756). 28 Nov.- 2 Dec. 2005, St. Louis, Estados Unidos.
- Kim, H., & Shin, K. G. (2008). Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(5), 533-545.
- Kim, W., Kassler, A. J., Di Felice, M., & Gerla, M. (2010). Urban-X: Towards distributed channel assignment in cognitive multi-radio mesh networks. En *IFIP Wireless Days*. 20-22 Oct. 2010, Venice, Italia.
- Köksal, M. (2008). *A survey of network simulators supporting wireless networks*. Middle East Technical University. Ankara, Turquia.
- Kondareddy, Y. R., Agrawal, P., & Sivalingam, K. (2008). Cognitive radio network setup without a common control channel. En *IEEE Military Communications Conference*. 16 Nov - 19 Nov 2008, San Diego, CA, Estados Unidos.
- 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.
- Lahby, M., Cherkaoui, L., & Adib, A. (2013). Hybrid network selection strategy by using M-AHP/E-TOPSIS for heterogeneous networks. En *International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications* (pp. 1-6). May 8, 2013 - May 9, 2013, Rabat, Marruecos.
- Lahby, M., Leghris, C., & Adib, A. (2011). A hybrid approach for network selection in heterogeneous multi-access environments. En *International*

- Conference on New Technologies, Mobility and Security* (pp. 1-5). 7 Feb - 10 Feb 2011, Paris, Francia.
- Lee, W. Y., & Akyildiz, I. F. (2008). Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(10), 3845-3857.
- Lertsinsrubtavee, A., & Malouch, N. (2016). Hybrid spectrum sharing through adaptive spectrum *handoff* and selection. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 15(11), 2781-2793.
- Li, X., & Zekavat, S. A. (2008). Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems. En *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (pp. 894-899). March 31 2008-April 3 2008., Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Liu, F., Xu, Y., Guo, X., Zhang, W., Zhang, D., & Li, C. (2013). A spectrum *handoff* strategy based on channel reservation for cognitive radio network. En *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications* (pp. 179-182). 6-7 November 2013, Zhangjiajie, Hunan, China.
- Liu, S. M., Pan, S., Mi, Z. K., Meng, Q. M., & Xu, M. H. (2010). A simple additive weighting vertical *handoff* algorithm based on SINR and AHP for heterogeneous wireless networks. En *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation* (vol. 1, pp. 347-350). 11 May - 12 May 2010, Changsha, China.
- 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.
- Ma, L., Shen, C. C., & Ryu, B. (2007). Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks. En *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (pp. 547-558). 18 Apr - 20 Apr 2007, Dublin, Irlanda.

- Marinho, J., & Monteiro, E. (2012). Cognitive radio: Survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. *Wireless Networks, 18*(2), 147-164.
- Masonta, M. T., Mzyece, M., & Ntlatlapa, N. (2013). Spectrum decision in cognitive radio networks: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 15*(3), 1088-1107.
- Matinmikko, M., Del-Ser, J., Rauma, T., & Mustonen, M. (2013). Fuzzy-logic based framework for spectrum availability assessment in cognitive radio systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 31*(11), 2173-2184.
- Matlab. (2015). *Matlab getting starte guide*. Recuperado el 19 de agosto del 2015, de http://www.mathworks.com/academia/student_version/learnmatlab.pdf
- Mehbodniya, A., Kaleem, F., Yen, K. K., & Adachi, F. (2012). A fuzzy MADM ranking approach for vertical mobility in next generation hybrid networks. En *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops* (pp. 262-267). 03 Oct - 05 Oct 2012, St. Petersburg, Rusia.
- Méndez, L., Rodríguez-Colina, E., & Medina, C. (2013). Toma de decisiones basadas en el algoritmo de Dijkstra's. Una solución para radio cognitiva. *Redes de Ingeniería, 4*(2), 35-42.
- Mir, U., Merghem-Boulaquia, L., Esseghir, M., & Gaïti, D. (2011). Dynamic spectrum sharing for cognitive radio networks using multiagent system. En *IEEE Conference on Consumer Communications and Networking* (pp. 658-663). 9 Jan - 12 Jan 2011, Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Miranda, E. (2001). Improving subjective estimates using paired comparisons. *IEEE Software, 18*(1), 87-91.
- Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications, 6*(4), 13-18.
- Na, D.-H., Nan, H., & Yoo, S.-J. (2007). Policy-based dynamic channel selection architecture for cognitive radio networks. En *International Conference on Communications and Networking in China* (pp. 1190-1194). IEEE. 22nd-24th Aug 2007, Shanghai, China.
- Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., & Vazirani, V. V. (2007). *Algorithmic game theory* (vol. 1). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

- OMNet++. (2015). *User manual OMNeT++*. Recuperado el 19 de agosto del 2015, de <https://omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.htm>
- Ormond, O., Murphy, J., & Muntean, G. (2006). Utility-based intelligent network selection in beyond 3G systems. En *IEEE International Conference on Communications* (vol. 4, pp. 1831-1836).
- Ozger, M., & Akan, O. B. (2016). On the utilization of spectrum opportunity in cognitive radio networks. *IEEE Communications Letters*, 20(1), 157-160.
- Páez, 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.
- Patil, S. K., & Kant, R. (2014). A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of knowledge management adoption in supply chain to overcome its barriers. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 679-693.
- 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*. Bogotá: 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.
- Petrova, M., Mahonen, P., & Osuna, A. (2010). Multi-class classification of analog and digital signals in cognitive radios using support vector machines. En *International Symposium on Wireless Communication Systems* (pp. 986-990). 19 Sep - 22 Sep 2010M, York, Reino Unido.
- Pham, C., Tran, N. H., Do, C. T., Moon, S. Il, & Hong, C. S. (2014). Spectrum *handoff* model based on hidden Markov model in cognitive radio networks. En *International Conference on Information Networking* (pp. 406-411). IEEE. 10 Feb. - 12 Feb. 2014, Phuket, Tailandia.
- Pla, V., Vidal, J. R., Martínez-Bauset, J., & Guijarro, L. (2010). Modeling and characterization of spectrum white spaces for underlay cognitive radio networks. En *IEEE International Conference on Communications*. Mayo 23-17 de 2010, Cape Town, South Africa.
- 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.
- Ramírez Pérez, C., & Ramos Ramos, V. M. (2010). Handover vertical: un problema de toma de decisión múltiple. En *Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico*. 24 al 26 de noviembre 2010, Cuernavaca, Morelos, México.
- Ramírez-Pérez, C., & Ramos-R, V. (2013). On the effectiveness of multi-criteria decision mechanisms for vertical handoff. En *International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (pp. 1157-1164). March 25-28, 2013, Barcelona, Spain.
- Rodríguez, A. B., Ramírez, L. J., & Chahuan, J. (2015). Nueva Generación de heurísticas para redes de fibra óptica WDM (Wavelength División Multiplexing) bajo tráfico dinámico. *Información Tecnológica*, 26(5), 135-142.
- Rodríguez-Colina, E., Ramírez, P., Carrillo, A., & Ernesto, C. (2011). Multiple attribute dynamic spectrum decision making for cognitive radio networks. En *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks* (pp. 1-5).
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Safavian, S. R., & Landgrebe, D. (1991). A survey of decision tree classifier methodology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3), 660-674.
- Sgora, A., Vergados, D. D., & Chatzimisios, P. (2010). An access network selection algorithm for heterogeneous wireless environments. En *The IEEE symposium on Computers and Communications* (pp. 890-892). Junio 22 al 25 de 2010, Riccione, Italia.
- Shun-Fang, Y., Jung-Shyr, W., & Hsu-Hung, H. (2008). A vertical media-independent handover decision algorithm across Wi-Fi networks. En *International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*. 5-7 May 2008, Surabaya, Indonesia.
- Song, Q., & Jamalipour, A. (2005). A network selection mechanism for next generation networks. En *IEEE International Conference on Communications* (vol. 2, pp. 1418-1422).

- Song, Y., & Xie, J. (2010). Proactive spectrum *handoff* in cognitive radio ad hoc networks based on common hopping coordination. En *IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 1-2). Marzo 15 al 19. San Diego, CA, Estados Unidos.
- Sriram, K., & Whitt, W. (1986). Characterizing superposition arrival processes in packet multiplexers for voice and data. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 4(6), 833-846.
- Steenkiste, P., Sicker, D., Minden, G., & Raychaudhuri, D. (2009). *Future directions in cognitive radio network research. NSF workshop report*. Recuperado de https://www.cs.cmu.edu/~prs/NSF_CRN_Report_Final.pdf
- Stevens-Navarro, E., & Wong, V. (2007). A vertical *handoff* decision algorithm for heterogeneous wireless networks. En *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (pp. 3199-3204). Marzo 11 al 15 de 2007, Hong Kong, China.
- Stevens-Navarro, E., & Wong, V. W. S. (2006). Comparison between vertical *handoff* decision algorithms for heterogeneous wireless networks. En *IEEE Vehicular Technology Conference* (vol. 2, pp. 947-951).
- Stevens-Navarro, E., Gallardo-Medina, R., Pineda-Rico, U., & Acosta-Elías, J. (2012). Application of MADM method VIKOR for vertical *handoff* in heterogeneous wireless networks. *IEICE Transactions on Communications*, 95(2), 599-602.
- Stevens-Navarro, E., Lin, Y., & Wong, V. W. S. (2008). An MDP-based vertical *handoff* decision algorithm for heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(2), 1243-1254.
- Stevens-Navarro, E., Martínez-Morales, J. D., & Pineda-Rico, U. (2012). Evaluation of vertical *handoff* decision algorithms based on MADM methods for heterogeneous wireless networks. *Journal of Applied Research and Technology*, 10(4), 534-548.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). Reinforcement learning: an introduction. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 9(5), 1054.
- Taj, M. I., & Akil, M. (2011). Cognitive radio spectrum evolution prediction using a rtificial neural networks based multivariate time series modelling. En *Wireless Conference Sustainable Wireless Technologies* (pp. 1-6). VDE. April 27-29, 2011, Vienna, Austria.

- Tanino, T., Tanaka, T., & Inuiguchi, M. (2003). *Multi-objective programming and goal programming: theory and applications*. Berlin, Alemania: Springer Science & Business Media.
- Tragos, E., Zeadally, S., Fragkiadakis, A., & Siris, V. (2013). Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(3), 1108-1135.
- Trigui, E., Esseghir, M., & Merghem-Boulahia, L. (2012). Multi-agent systems negotiation approach for *handoff* in mobile cognitive radio networks. En *International Conference on New Technologies, Mobility and Security* (pp. 1-5). 7 May - 10 May, 2012, Estambul, Turquia.
- 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.
- Tuan, T. A., Tong, L. C., & Premkumar, A. B. (2010). An adaptive learning automata algorithm for channel selection in cognitive radio network. En *IEEE International Conference on Communications and Mobile Computing* (vol. 2, pp. 159-163). 12 al 14 de Abril de 2010, Shenzhen, China.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2004). *User manual OPNET*. Recuperado el 19 de agosto del 2015, de http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OPNET_Modeler_Manual.pdf
- Valenta, V., Maršálek, R., Baudoin, G., Villegas, M., Suárez, M., & Robert, F. (2010). Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations. En *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks* (pp. 2-6). Jun 16, 2010 - Jun 18, 2010, Cannes, France.
- Van, B., Prasad, R. V., & Niemegeers, I. (2012). A survey on *handoffs* - Lessons for 60 GHz based wireless systems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(1), 64-86.
- Villavicencio, J. (2014). *Introducción a series de tiempo*. Recuperado el 10 de diciembre de 2014, de http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/Link-Click.aspx?fileticket=4_BxecUaZmg=
- Wang, C. W., & Wang, L. C. (2009). Modeling and analysis for proactive-decision spectrum *handoff* in cognitive radio networks. En *IEEE International Conference on Communications* (pp. 1-6).
- Wang, L.-C., & Wang, C.-W. (2008). Spectrum *handoff* for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensins? En *IEEE International*

- Conference on High Performance, Computing and Communications* (pp. 343-348). 25 Sep. - 27 Sep. 2008, Dalian, China.
- 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.
- Wang, X., Wong, A., & Ho, P.-H. (2010). Dynamically optimized spatiotemporal prioritization for spectrum sensing in cooperative cognitive radio. *Wireless Networks*, 16(4), 889-901.
- Wei, Q., Farkas, K., Prehofer, C., Mendes, P., & Plattner, B. (2006). Context-aware handover using active network technology. *Computer Networks*, 50(15), 2855-2872.
- Wei, Y., Li, X., Song, M., & Song, J. (2008). Cooperation radio resource management and adaptive vertical handover in heterogeneous wireless networks. En *International Conference on Natural Computation* (vol. 5, pp. 197-201).
- Weingart, T., Sicker, D. C., & Grunwald, D. (2007). A statistical method for reconfiguration of cognitive radios. *IEEE Wireless Communications*, 14(4), 34-40.
- Willkomm, D., Machiraju, S., Bolot, J., & Wolisz, A. (2008). Primary users in cellular networks: a large-scale measurement study. En *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (pp. 401-411). 14-17 Oct. 2008, Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- Woods, W. A. (1986). Important issues in knowledge representation. *Proceedings of the IEEE*, 74(10), 1322-1334.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. Glasgow, Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
- Wu, Y., Yang, K., Zhao, L., & Cheng, X. (2009). Congestion-aware proactive vertical *handoff* algorithm in heterogeneous wireless networks. *IET Communications*, 3(7), 1103.
- Wu, Y., Yang, Q., Liu, X., & Kwak, K. (2016). Delay-Constrained optimal transmission with proactive spectrum *handoff* in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 15(3), 627-640.
- Xian, X., Shi, W., & Huang, H. (2008). Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation. En *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (pp. 1439-1443). 3-5 June 2008. Singapur, Singapur.

- Xu, G., & Lu, Y. (2006). Channel and modulation selection based on support vector machines for cognitive radio. En *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 4-7). 22 Sep - 24 Sep 2006, Wuhan, China.
- Xu, Y., Anpalagan, A., Wu, Q., Shen, L., Gao, Z., & Wang, J. (2013). Decision-Theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: strategies, challenges and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(4), 1689-1713.
- 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.
- Yang, P., Sun, Y., Liu, C., Li, W., & Wen, X. (2013). A novel fuzzy logic based vertical *handoff* decision algorithm for heterogeneous wireless networks. En *International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications* (pp. 1-5). 24 Jun. - 27 Jun. 2013, Atlantic City, NJ, Estados Unidos.
- Yang, S. F., & Wu, J. S. (2008). A IEEE 802.21 handover design with QOS provision across WLAN and WMAN. En *International Conference on Communications, Circuits and Systems* (pp. 548-552). 25-27 May 2008, Fujian, China.
- Yang, S. J., & Tseng, W. C. (2013). Design novel weighted rating of multiple attributes scheme to enhance *handoff* efficiency in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 36(14), 1498-1514.
- Yi-Bing, L., & Ai-Chun, P. (2000). Comparing soft and hard *handoffs*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49(3), 192-798.
- Yifei, W., Yinglei, T., Li, W., Mei, S., & Xiaojun, W. (2013). QoS provisioning energy saving dynamic access policy for overlay cognitive radio networks with hidden Markov channels. *China Communications*, 10(12), 92-101.
- Ying, W., Jun, Y., Yun, Z., Gen, L., & Ping, Z. (2008). Vertical handover decision in an enhanced media independent handover framework. En *Wireless Communications and Networking Conference* (pp. 2693-2698). March 31 2008-April 3 2008, Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Yonghui, C. (2010). Study of the bayesian networks. En *IEEE International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies* (vol. 1, pp. 172-174). 17 Apr - 18 Apr 2010, Shenzhen, China.

- Yoon, K. P., & Hwang, C.-L. (1995). *Multiple attribute decision making: an introduction* (vol. 104). Thousand Oaks, Estados Unidos: Sage Publications.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zapata, J. A., Arango, M. D., & Adarme, W. (2012). Applying fuzzy extended analytical hierarchy (FEAHP) for selecting logistics software. *Ingiería e Investigación*, 32(1), 94-99.
- Zhang, W. (2004). Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks. En *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (vol. 2, pp. 653-658). 21 al 25 de marzo de 2004, Atlanta, Estados Unidos.
- Zhang, Y., Tay, W. P., Li, K. H., Esseghir, M., & Gaïti, D. (2016). Opportunistic Spectrum access with temporal-spatial reuse in cognitive radio networks. En *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 3661-3665). 20 al 25 de marzo de 2016, Shangai, China.
- Zhao, Y., Mao, S., Neel, J. O., & Reed, J. H. (2009). Performance evaluation of cognitive radios: Metrics, utility functions, and methodology. *Proceedings of the IEEE*, 97(4), 642-658.
- Zheng, H., & Cao, L. (2005). Device-centric spectrum management. En *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (pp. 56-65). 8 Nov. - 11 Nov. 2005. Baltimore, MD, Estados Unidos.

Anexos

Anexo A. Pseudocódigo función *input_data*

A continuación se describe el pseudocódigo correspondiente a la función *input_data*.

```
function [Available,SINR,BW] = input_data(Power,Threshold,Noise_floor,AW_fixed,Multichannel)
```

```
[f,c]=size(Power); % f: fila y c: columna
```

```
%% Disponibilidad
```

```
Available=zeros(f,c);
```

```
for i=1:f % i: Posición en fila
```

```
for j=1:c % j: Posición en columna
```

```
if Power(i,j)>Threshold % Power: Matriz de potencia
```

```
    Available(i,j)=0;
```

```
else
```

```
    Available(i,j)=1;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
%% SINR
```

```
SINR=Power>Noise_floor; % SINR: Calculo SINR  
%% Ancho de banda  
[f,c]=size(Available);  
BW=zeros(f,c);  
for i=1:f  
    for j=1:c  
        Availability=Available(i,j);  
        switch Availability  
            case 0  
                BW(i,j)=AW_fixed; % BW: Bandwitch  
            case 1  
                count=0;  
                for d=1:Multichannel  
                    if (j+d)>c  
                        break  
                    else  
                        if Available(i,j+d)==1  
                            count=count+1;  
                        end  
                    end  
                end  
                for d=1:Multichannel  
                    if (j-d)<1  
                        break  
                    else  
                        if Available(i,j-d)==1  
                            count=count+1;  
                        end  
                    end  
                end  
            end  
        end  
    end  
end
```

```
break
else
    if Available(i,j-d)==1
        count=count+1;
    else
        break
    end
end
end
BW(i,j)=AW_fixed*(count+Available(i,j));
end
end
end
end
```

Anexo B. Pseudocódigo función *criteria_values*

A continuación se describe el pseudocódigo correspondiente a la función *criteria_values*.

```
function [AP,ETA,PSINR,PBW] = Criteria_values
(Available,SINR,BW,Ptime,Rtime)
[~,c]=size(Available);
ETA=zeros(1,c);
AP=zeros(1,c);
PSINR=zeros(1,c);
PBW=zeros(1,c);
k=1; m=0; %Variables auxiliares
```

```
for j=1:c  
    %Promedio de disponibilidad [PA]  
    AP(1,j)=mean(Available((Ptime:Ptime+Rtime),j));  
  
    %Promedio de SINR y Promedio de ancho de banda  
    S=SINR((Ptime:Ptime+Rtime),j);  
    S(S==0)=[];  
    PSINR(1,j)=mean(S);  
    PSINR(isnan(PSINR))=0;  
    PBW(1,j)=mean(BW((Ptime:Ptime+Rtime),j));  
  
    %Tiempo medio de disponibilidad  
    for i=Ptime:Ptime+Rtime  
        if Available((Ptime:Ptime+Rtime),j)==0  
            t=mean(Available((Ptime:Ptime+Rtime),j));  
        else  
            if Available(i,j)==1  
                m=m+1;  
                t(1,k)=m;  
            else  
                k=k+1;  
                m=0;  
            end  
        end  
    end
```

end

t(t==0)=[];

k=1; m=0;

ETA(1,j)=mean(t);

ETA(isnan(ETA))=0; % Busca los NaN en la matriz ETA y los hace cero (0)

clear t

end

q=max(ETA);

w=max(PSINR);

e=max(PWA);

AP=100*AP;

ETA=(100/q)*ETA;

PSINR=(100/w)*PSINR;

PBW=(100/e)*PWA

Anexo C. Pseudocódigo función *ranking*

A continuación se describe el pseudocódigo correspondiente a la función *ranking*.

Input data: W, AP, ETA, PSINR, PBW

Output data: RankingF, Score

function [RankingF,ScoreF]= Ranking_AHP_BE(W,AP,ETA,PSINR,PBW)

Average=[AP;ETA;PSINR;PBW]

%Start Algorithm

```
%Finish Algorithm  
ScoreF=sort(Ranking,'descend');  
RankingF=zeros(1,c);  
u=0;  
for i=1:c  
[l]=find(Ranking==ScoreF(i));  
if RankingF(1,i)~=0  
u=0;  
elseif length(l)>1  
[~,n]=size(l);  
for h=i:(i+n)-1  
u=u+1;  
RankingF(1,h)=l(u);  
end  
else  
RankingF(1,i)=1;  
end  
end  
end
```

Donde, *ScoreF* es el vector de puntuación que contiene de manera descendente la puntuación obtenida según el modelo de *handoff* utilizado. *RankingF* es el vector que contiene las posiciones a las que debe saltar el *core*.

Anexo D. Pseudocódigo función *core*

A continuación se describe el pseudocódigo correspondiente a la función *core*.

```
while i<=r+1
```

```
time=time+1;  
Fk(1,time)=RankingF(j);  
F_used(1,time)=i-1;  
F_busy(1,time)=i-1;
```

```
Availability=Available(i,RankingF(j));
```

```
switch Availability  
case 0  
if Update_Score==1;  
RankingF=RankingF_last;  
Update_Score=0;  
end  
Free(1,time)=Available(i,RankingF(j));  
BW(1,time)=BW(i,RankingF(j));  
F_used(2,time)=Handoffs;
```

```
j=j+1; %% Aumenta la columna  
Handoffs=Handoffs+1;  
if Available(i,RankingF(j-1))==0 &&  
Available(i,RankingF(j))==0  
Bloking=Bloking+1;  
F_busy(2,time+1)=Bloking;  
else
```

F_busy(2,time+1)=Bloking;

end

case 1

Free(1,time)=Available(i,RankingF(j));

BW(1,time)=BW(i,RankingF(j));

F_used(2,time)=Handoffs;

i=i+1; % % Aumenta la fila

if Available(i-1,RankingF(j))==1 && Available(i,RankingF(1))==0 &&
j~=1

Blokings=Blokings+1;

F_busy(2,time+1)=Blokings;

else

F_busy(2,time+1)=Blokings;

end

if j~=1

Handoffs=Handoffs+1;

j=1;

end

end

if i==(Ptime+Rtime)+1

Ptime=(i-Rtime)-1;

[AP,ETA,PSINR,PBW] = Criteria_values (Available,SINR,BW,Ptime,Rtime);

Ptime=i;

```
function [RankingF,ScoreF]=Ranking_AHP_BE(W,AP,ETA,PSINR,PBW)
end
end
```

Donde:

Time es el tiempo en minutos de simulación.

RankingF es el vector de posiciones para establecer el orden de los saltos de columna.

F_used almacena las frecuencias usadas.

F_busy almacena las frecuencias que se encuentran ocupadas.

Blokings es la variable que se utiliza como contador de las frecuencias ocupadas.

Update_Score: es la variable que se utiliza para actualizar el vector de posiciones.

Autores

César Augusto Hernández Suárez

Ingeniero Electrónico con Especialización en Interconexión de Redes, Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación 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.

Ingrid Patricia Páez

Ingeniera Electricista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniera Industrial y Doctora en Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad de Cantabria, Santander, España. Actualmente se desempeña como docente en dedicación exclusiva del Departamento de Ingeniería de Sistemas

e Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Su área de interés son los sistemas de comunicación inalámbrica.

Diego Armando Giral Ramírez

Ingeniero Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes. Se desempeñó como joven investigador de Colciencias en el 2014. Actualmente es profesor 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 e integrante del grupo de investigación Armos.



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