

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información



SELECCIÓN DE RED EN ENTORNOS INALÁMBRICOS LTE

Tesis que presenta
Iván Marino Martínez Bolívar
Para obtener el grado de
Maestro en ciencias y tecnologías de la información

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos

Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa

Sinodales:

Dr. Rolando Menchaca Méndez, Centro de Investigación en Computación, IPN (Presidente)

Dr. Miguel López Guerrero, Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa (Vocal)

Dr. Francisco de Asís López Fuentes, Departamento de Tecnologías de la Información, UAM-Cuajimalpa (Vocal)

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa (Secretario)

México, D.F. 2 de Septiembre 2015

**SELECCIÓN DE RED EN ENTORNOS
INALÁMBRICOS LTE**

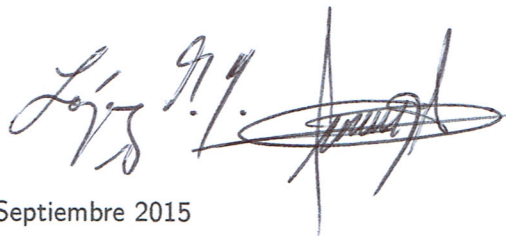
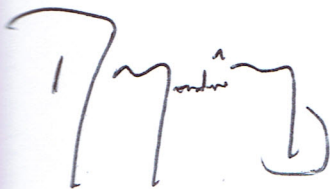
Tesis que presenta
Iván Marino Martínez Bolívar
Para obtener el grado de
Maestro en ciencias y tecnologías de la información

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos
Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa

Sociales:

Dr. Rolando Menchaca Méndez, Centro de Investigación en Computación, IPN (Presidente)
Dr. Miguel López Guerrero, Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa (Vocal)
Dr. Francisco de Asís López Fuentes, Departamento de Tecnologías de la Información, UAM-Cuajimalpa (Vocal)
Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM-Iztapalapa (Secretario)



México, D.F. 2 de Septiembre 2015

A Mamá, Papá y las Pitufas

Agradecimientos

Le agradezco a Dios el haberme permitido iniciar y concluir de la mejor forma esta etapa de mi vida.

A mis padres, y en especial a mi mamá, por su apoyo, fueron ellos una gran motivación y ancla a lo largo de este proceso.

A mis hermanas, por estar allí siempre que las necesité.

*Al Doctor Ramos por todo el tiempo y empeño que invirtió, de él me llevo dos grandes lecciones de vida: la primera que es mas importante la dimensión humana que cualquier otra, y la segunda derivada de esta frase **No se espera que seas el mejor de todos, se espera que cada cosa que hagas, la hagas con tu mejor esfuerzo y de la mejor forma posible, un ladrillo a la vez.***

A todos los amigos y camaradas que encontré en México, fueron de gran apoyo durante todo este tiempo, en especial a las Familia Quintero y Trejo, a Juan y a Edgar.

*A **WiNetSys** nuestro equipo de trabajo, Nayeli, Carlos, Ernesto, Leonardo, Oscar, Salvador, y Asalia, de ellos me llevo el compañerismo y la acogida característica de los Mexicanos.*

*Por último a la **Alianza del pacifico**, el **CONACYT**, y en su nombre los gobiernos de **México** y **Colombia** por haber depositado su confianza en mi, las dos becas que me otorgaron en su momento fueron de gran ayuda en la consecución de mis metas. Gracias por la oportunidad!*

Resumen

En este proyecto de tesis de maestría estudiamos una técnica denominada *direccionamiento de tráfico en entornos inalámbricos LTE*, que es empleada para dar solución al problema de la congestión en las redes de acceso LTE (*Long Term Evolution - Evolución a Largo Plazo*). La congestión es una condición en la que la cantidad de usuarios es tal que se sobrepasa la capacidad de la red, haciendo que la calidad de servicio que ésta le otorga disminuya drásticamente.

Específicamente, en nuestro proyecto, tomamos como base una técnica de direccionamiento de tráfico denominada *traffic offloading* vía femtoceldas, que busca reorganizar a los usuarios dentro de la red de acceso, a tal suerte que los parámetros de calidad de servicio que la red otorga sean mejores. Esto lo hace derivando tráfico de entidades denominadas macroceldas (*estación base con cobertura del orden de los kilómetros*), a femtoceldas (*estación base con cobertura del orden de los metros*); de esta manera, cuando la macrocelda se satura (*es decir, la cantidad de usuarios sobrepasa su capacidad total*), el mecanismo deriva tráfico de la macrocelda hacia las femtoceldas.

Sin embargo, al emplear la técnica de *traffic offloading* se prevé que la cantidad de femtoceldas que existirá en el entorno será considerable. Esto genera un nuevo problema: *la selección de red*, y consiste en seleccionar cuál de las femtoceldas disponibles es la más adecuada, en función de las necesidades del usuario y de sus características propias. Cuando hablamos de necesidades del usuario nos referimos al tipo de aplicación que ejecuta y, por características propias nos referimos al rendimiento de cada femtocelda, en función de diferentes parámetros como el caudal de datos (*throughput*) o la latencia.

Diferentes modelos y teorías matemáticas se han aplicado al problema de la selección de red. Una de las más empleadas es la teoría de la toma de decisiones, denominada MADM (*Multiple Attribute Decision Making - Toma de decisiones con atributos múltiples*), que modela el problema mediante la asignación de pesos a las diferentes características de cada opción en función de un objetivo en particular, y selecciona la opción que más convenga. Uno de los mecanismos MADM que ha sido poco estudiado en la literatura es ANP (*Analytic Network Process - Proceso Analítico de red*) que permite configurar el problema como una red, donde cada nodo puede ser un criterio, un conjunto de criterios o incluso una alternativa, los enlaces indican relaciones de precedencia de un nodo con otro, y la decisión es tomada de acuerdo a la comparación por pares de los nodos.

En este trabajo, proponemos entonces un mecanismo de selección de red basado en ANP llamado NetANPI (*Network Selection ANP Based mechanism with Ideal network comparison - Mecanismo de selección de red basado en ANP que incluye comparación con red ideal*) aplicable a *traffic offloading* vía femtoceldas en LTE. El mecanismo permite seleccionar la femtocelda que mejor convenga en función del tipo de aplicación que ejecuta el usuario, las características propias de cada opción, y una comparación entre cada una de las opciones con

una opción ideal.

Para validar el funcionamiento de NetANPI, ejecutamos simulaciones numéricas que lo comparan con los mecanismos de selección de red más citados en la literatura para cuatro tipos de aplicación diferentes: interactivo, *streaming*, *background* (tráfico de fondo) y conversacional.

Introducimos también una manera de comparar diferentes mecanismos de direccionamiento de red del tipo MADM que emplea la teoría de la utilidad. Esta metodología nos permite hacer una clasificación de los diferentes mecanismos para cada tipo de aplicación y, de esta manera, concluir cuál de los mecanismos tiene mejor rendimiento para cada tipo de aplicación. La conclusión a la que llegamos es que el mecanismo NetANPI que proponemos presenta mejor rendimiento para las aplicaciones del tipo conversacional e interactivo.

Lista de acrónimos

A

ABC *Always Best Connected.*

AHP *Analytic Hierarchy Process.*

ANP *Analytic Network Process.*

B

BOCR *Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos.*

BSR *Buffer Status Report.*

C

CN *Core Network.*

CP *Cyclic Prefix.*

CQI *Channel Quality Indicator.*

D

DMRS *DeModulation Reference Signal.*

E

ELECTRE *Elimination Et Choix Traduisant la REalité.*

eNodeB *evolved Node B.*

EPC *Evolved Packet Core.*

F

F-GW *Femto Gateway.*

FDD *Frequency Division Duplexing.*

FDM *Frequency Division Multiplexing.*

G

GRA *Grey Relational Analysis.*

H**HARQ** *Hybrid Automatic Repeat Request.***HSS** *Home Subscriber Service node.***HWN** *Heterogeneous Wireless Networks.***I****IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers.***IMS** *IP Multimedia Subsystem.***ISI** *InterSymbol Interference.***L****LTE** *Long Term Evolutian.***M****MAC** *Medium-Access Control.***MADM** *Multiple Attribute Decision Making.***MCS** *Modulation and Coding Scheme.***MIMO** *Multiple Input Multiple Output.***N****NetANPI** *Network Selection ANP Based mechanism with Ideal network comparison.***NO** *Nivel de Ocupación.***O****OFDMA** *Orthogonal Frequency Division Multiple Access.***P****P-GW** *Packet data network Gateway.***PAPR** *Peak-to-Average Power Ratio.***PDCP** *Packet Data Convergence Protocol.***PHR** *Power Headroom Report.***PP** *Pérdida promedio de Paquetes.***PRB** *Physical RB.*

Q**QCI** *QoS Class identifier.***QoS** *Quality of Service.***R****RAN** *Radio Access Network.***RB** *Resource Block.***RE** *Resource Element.***RF** *Radio Frecuencia.***RLC** *Radio-Link Control protocol.***RP** *Retardo por Paquete promedio.***S****S-GW** *Serving Gateway.***SAW** *Simple Additive Weighting.***SC-FDMA** *Single Carrier FDMA.***SMS** *Short Message Service.***SNDR** *Signal-to-Noise plus Distortion Ratio.***SNR** *Signal-to-Noise Ratio.***SRS** *Sounding Reference Signal.***T****TCP** *Transmission Control Protocol.***TDD** *Time Division Duplexing.***TDM** *Time Division Multiple Access.***TF** *Transport Format.***TOPSIS** *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution.***TP** *Throughput Promedio.***TTI** *Transmision Time Interval.***U****UE** *User Equipment.***UMTS** *Universal Mobile Telecommunications System.*

V**VoLTE** *Voice over LTE.*

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	V
Lista de acrónimos	VII
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos particulares	3
1.3. Metodología de investigación	3
1.4. Aportes	4
1.5. Organización de la idónea comunicación de resultados	4
2. Marco Teórico	5
2.1. <i>Traffic offloading</i> y arquitectura de LTE	5
2.2. Acceso al medio en LTE	6
2.2.1. PDCP - <i>Packet Data Convergence Protocol</i>	7
2.2.2. RLC - <i>Radio-Link Control protocol</i>	8
2.2.3. MAC - <i>Medium-Access Control</i>	8
2.3. Capa física en LTE	10
2.3.1. Estructura de los recursos de transmisión	11
2.4. Problema de selección de red	13
2.5. Mecanismos de selección de red basados en MADM	14
2.5.1. SAW - <i>Simple Additive Weighting Algorithm</i>	15
2.5.2. GRA - <i>Grey Relational Analysis</i>	15
2.5.3. TOPSIS - <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>	16
2.5.4. ELECTRE - <i>Elimination Et Choix Traduisant la REalité</i>	17
2.5.5. AHP - <i>Analytic Hierarchy Process</i>	18
2.5.6. ANP - <i>Analytic Network Process</i>	19

3. ANP y el problema de selección de red - NetANPI	22
3.1. Tipos de aplicación	22
3.1.1. Conversacional	22
3.1.2. <i>Streaming</i>	22
3.1.3. Interactiva	22
3.1.4. <i>Background</i>	22
3.2. Criterios de selección	23
3.3. NetANPI - <i>Mecanismo de selección de red basado en ANP que incluye comparación con red ideal</i>	23
3.3.1. Comparación por pares en NetANPI	24
3.3.2. Creación de la supermatriz	25
4. Evaluación de NetANPI	27
4.1. Teoría de la utilidad y el problema de selección de red	27
4.2. Escenario de evaluación	29
5. Resultados	32
5.1. Parámetros de rendimiento	32
5.2. Comparación con teoría de la utilidad	32
6. Conclusiones y trabajo futuro	37
A. Anexos	38
A.1. Proceso de normalización	38
A.1.1. Suma ponderada	38
A.1.2. Normalización de la raíz cuadrada	38
A.1.3. Normalización del tipo costo-beneficio	38
A.2. Mecanismo de selección ANP sin comparar con red ideal	38

Índice de figuras

1.1. Esquema del problema.	3
2.1. Arquitectura de una red LTE, (a) RAN y (b) EPC.	6
2.2. Arquitectura de una red LTE con <i>traffic offloading</i>	6
2.3. Arquitectura de protocolos RAN.	7
2.4. Esquema general de un calendarizador en LTE	9
2.5. Estructura básica de recursos de transmisión en LTE (CP normal)	12
2.6. (a) Estructura jerárquica (b) Red	20
2.7. Supermatriz ANP.	21
3.1. Ejemplo de nivel de ocupación en LTE	23
3.2. Diagrama de NetANPI	25
3.3. Supermatriz de NetANPI	26
3.4. Vector de prioridades totales, resultado de la Ecuación 2.20	26
4.1. Funciones de utilidad para distintos valores de ζ	29
4.2. Distancia euclidiana.	31
5.1. Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo interactivo.	33
5.2. Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo conversacional.	34
5.3. Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo <i>streaming</i>	35
5.4. Comparación con teoría de la utilidad.	36
A.1. Diagrama de ANP sin comparar con red ideal.	39
A.2. Supermatriz ANP sin comparar con red ideal.	39

Índice de tablas

2.1. Identificadores QoS en LTE	10
2.2. Parámetros CQI en LTE	11
2.3. Escala de índices en AHP	19
3.1. Comparación con valores ideales.	24
3.2. Comparación por pares de los parámetros de QoS vs. Ocupación	25
3.3. Comparación por pares del grupo QoS de NetANPI.	25
4.1. Parámetros de las funciones de utilidad.	29
4.2. Parámetros estándar de redes LTE.	30
4.3. Parámetros de simulación.	30

Introducción

Estudios recientes prevén que el acceso a Internet en los próximos años se incrementará radicalmente impulsado principalmente por las redes inalámbricas [1], esto debido a la necesidad cultural de estar conectados en todo momento. Este hecho impone grandes retos en el diseño e implementación de este tipo de redes debido al incremento súbito de usuarios que tendrán.

Surge entonces la necesidad de diseñar redes que permitan lidiar con un gran número de usuarios y que al mismo tiempo brinden parámetros de QoS (*Quality of Service* - Calidad de Servicio) a los usuarios. Éstos deben ir de la mano con las necesidades de cada usuario, es decir, de las características de la aplicación que éste ejecute. La arquitectura de red que por sus características se perfila como la ideal para dar solución a este problema en forma óptima es LTE, ya que está diseñada de tal forma que los servicios de red que ofrece están sujetos a especificaciones de QoS acordes al tipo de aplicación y a los recursos de red disponibles para cada uno de los usuarios.

En la arquitectura de red LTE, el encargado de repartir los recursos de red a cada uno de los usuarios es el *eNodeB* (*evolved Node B* - Nodob evolucionado) mediante un mecanismo de planificación (*scheduling* en inglés) basado en la información de los requerimientos de cada usuario y los recursos de transmisión disponibles. Sin embargo, en ocasiones no basta sólo con hacer esta distribución ya que el número de usuarios sobrepasa la capacidad de la red. Es allí donde es necesario hacer uso de mecanismos de traspaso de red que permitan distribuir el tráfico de mejor manera. Todo esto sin dejar de lado los parámetros de QoS que la red otorga a cada uno de los usuarios. Una de las técnicas más utilizadas para distribuir mejor el tráfico y así mejorar los parámetros QoS de cada usuario es una técnica denominada *traffic offloading*.

Traffic offloading, es una técnica que permite lidiar con la alta demanda de tráfico de redes celulares derivando éste de macroceldas a femtoceldas o de las macroceldas a otro tipo de red inalámbrica como WiFi [2]. La aplicación de esta técnica trae consigo un nuevo reto, el que tiene el usuario a la hora de seleccionar cuál es la femtocelda o la red WiFi que más le convenga a sus necesidades ya que se prevé que en el futuro existirán una gran cantidad de femtoceldas y redes WiFi con su rango de cobertura traslapado en todo momento y lugar. A este problema en la literatura se le conoce como el *problema de la selección de red*. Para nuestra investigación, lo que pretendemos entonces es crear un mecanismo de selección de red aplicable a la técnica de *traffic offloading* vía femtoceldas en redes LTE.

En la literatura, podemos encontrar diversas teorías matemáticas que se han aplicado al problema de la selección de red [3]. Una de las más utilizadas, es un conjunto de técnicas provenientes de la teoría de la toma de decisiones denominadas MADM que permiten abordar el problema de la toma de decisión en entornos donde existe multiplicidad de criterios que pueden ser contradictorios entre sí. Lo que hacen estos métodos, en términos generales, es asignar pesos a cada uno de los criterios en función de un objetivo que depende directamente de quién esté tomando la decisión. Para nuestro problema en particular, hablar de multiplicidad de criterios se traduce como todos aquellos parámetros de red (como por ejemplo el caudal de datos, la latencia o la tasa

de pérdida de paquetes) que pueden llegar a caracterizar determinada femtocelda en un momento dado. El objetivo dependiente del usuario que tome la decisión, se traduce como el usuario que toma la decisión de cuál femtocelda elegir en función de los parámetros de QoS que cada una le ofrece y en función del tipo de aplicación que ejecute.

Uno de los métodos MADM que en la literatura ha sido poco estudiado y por la forma aborda la selección de red puede llegar a ser un gran nicho de oportunidad es ANP (*Analytic Network Process*), propuesto por Thomas L. Saaty [4]. Este método, a diferencia de los demás métodos MADM que configuran el problema de forma plana o jerárquica, permite la interrelación de cada elemento perteneciente a la toma de decisión de una forma mucho más dinámica, adaptándose así de mejor manera a su naturaleza. Esto lo hace configurándolo en forma de red donde cada nodo puede ser un criterio, un conjunto de criterios o incluso una alternativa, y los enlaces indican la relación de precedencia de un nodo con otro.

En este orden de ideas, en esta investigación buscamos crear un mecanismo de selección de red basado en ANP que pueda aplicarse dentro de la técnica de *traffic offloading* vía femtoceldas en redes LTE, que le permita a cada usuario seleccionar la opción que más le convenga, dependiendo de las características propias de cada femtocelda, y en función de sus propios requerimientos de QoS.

1.1. Planteamiento del problema

El problema que abordaremos es el de desarrollar un mecanismo de selección de red basado en ANP que se pueda emplear dentro de la técnica de *traffic offloading* en redes LTE vía femtoceldas, que le permita al usuario seleccionar la femtocelda que más le convenga de acuerdo a sus requerimientos de QoS y a las características propias de cada opción. A continuación, presentamos el escenario general donde se aplicará el mecanismo.

En un área geográfica determinada se encuentra desplegada la RAN (*Radio Access Network* - Red de Acceso de Radio) de una red LTE con celdas de diferentes tamaños, en términos del área de cobertura, macroceldas (*del orden de los miles de metros*) y femtoceldas (*del orden las decenas de metros*) que permiten ofrecer una cobertura total, como se puede observar en la Figura 1.1. En este contexto, el mecanismo de selección de red tiene lugar en el momento en que la macrocelda se satura de conexiones y es necesario que los usuarios se desplacen hacia las femtoceldas a tal suerte que en ellas reciban mejores parámetros de QoS.

Teniendo claro este contexto, surgen los siguientes interrogantes que resolveremos más adelante a fin de dar una solución factible al problema.

- ¿Qué parámetros se deben tener en cuenta para seleccionar una red u otra, una vez se determine que existe la necesidad de hacer un traspaso de red?
- ¿Seleccionar ANP como núcleo de decisión ofrece ventajas para tomar la decisión?
- ¿De qué manera el mecanismo de selección de red debe incorporar dentro de su funcionamiento los requerimientos de QoS de cada tipo de aplicación/usuario y las características propias de cada femtocelda?

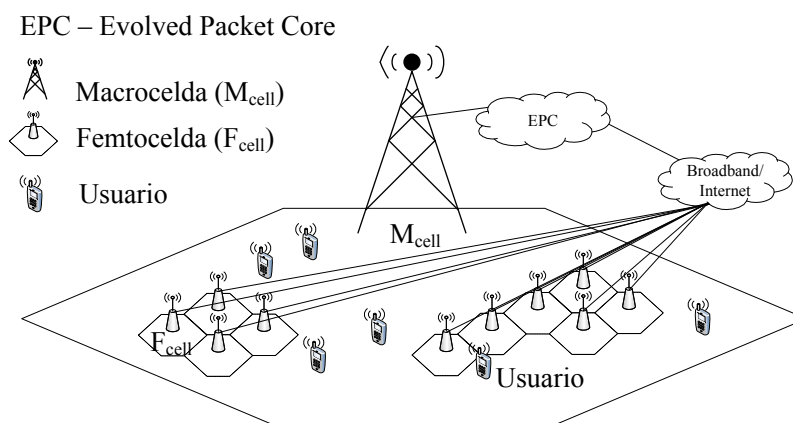


Figura 1.1: Esquema del problema.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar un mecanismo de selección de red que utilice como núcleo de decisión ANP (*Analytic Network Process*), enmarcado en la técnica de direccionamiento de tráfico en redes LTE denominada *traffic offloading* vía femtoceldas, que considere los requerimientos de QoS de los usuarios.

1.2.2. Objetivos particulares

- Estudiar la técnica de *traffic offloading* para redes LTE.
- Estudiar los diferentes mecanismos de selección de red propuestos en la literatura
- Crear e implementar numéricamente un mecanismo de selección de red basado en ANP para *traffic offloading* en LTE.
- Validar mediante simulaciones numéricas el comportamiento del mecanismo propuesto comparándolo con los mecanismos de selección de red del tipo MADM más representativos.

1.3. Metodología de investigación

Para el desarrollo de este trabajo de investigación empleamos la siguiente metodología:

- Estudio del funcionamiento y arquitectura de redes del tipo LTE
- Estudio de la técnica de *traffic offloading* en redes LTE
- Revisión del estado del arte en mecanismos de selección de red
- Diseño e implementación de un mecanismo de selección de red basado en ANP
- Implementación de los mecanismos de selección de red basados en MADM más utilizados
- Determinación del escenario de simulación y de los parámetros de desempeño

- Simulación numérica de los mecanismos de selección de red basados en MADM
- Evaluación de los mecanismos de selección de red empleando la teoría de la utilidad
- Análisis e interpretación de los resultados de las simulaciones numéricas
- Redacción de la idónea comunicación de resultados

1.4. Aportes

La contribución de este trabajo es un mecanismo de selección de red para redes LTE al que llamamos NetANPI (*Mecanismo de selección de red basado en ANP que incluye comparación con red ideal*), aplicable al mecanismo de direccionamiento conocido como *traffic offloading* vía femtoceldas en redes LTE. Este mecanismo basa su funcionamiento en el algoritmo de toma de decisión ANP. Permite tomar la decisión de acuerdo al tipo de aplicación que ejecute el usuario y a los parámetros de rendimiento de cada femtocelda, incorpora también la comparación con una opción ideal (*diferente para cada tipo de aplicación y basada en el estándar 3GPP TS 23.107*).

También se propone y desarrolla una metodología de evaluación de diferentes mecanismos MADM que emplea la teoría de la utilidad. Ésta consiste en incorporar un mecanismo de selección de red basado en ella para comparar los resultados de cada mecanismo con los suyos empleando la distancia euclidiana, de esta manera se obtiene un ranking de los mecanismos evaluados.

1.5. Organización de la idónea comunicación de resultados

El documento se encuentra organizado como sigue: inicialmente, presentamos el planteamiento del problema, seguido a esto los objetivos de la investigación, indicando los límites sobre los que está enmarcado.

Seguidamente presentamos el marco teórico indicando el contexto del problema, en él explicamos con mayor profundidad cómo funciona la técnica de *traffic offloading* en LTE, la arquitectura de LTE, la estructura de recursos en la capa física y presentamos también el trabajo que se ha hecho en torno al problema de selección de red.

Luego, nos detenemos a explicar nuestra propuesta de mecanismo de selección de red basado en ANP y por último presentamos la metodología de evaluación del mecanismo que proponemos, el escenario de evaluación, los resultados y las conclusiones.

2.1. *Traffic offloading* y arquitectura de LTE

Debido al aumento del uso de dispositivos móviles como teléfonos inteligentes, tablets o laptops, el tráfico de datos en las redes celulares ha crecido en gran medida en los últimos años [2]. Este incremento causa ineludiblemente congestión en las redes, haciendo que los parámetros de QoS otorgados por la red a los usuarios decrezcan drásticamente. Una de las soluciones que se le ha dado a este problema en las redes LTE es una técnica denominada *traffic offloading*, tiene lugar principalmente en la red de acceso, y consiste en derivar tráfico de la macrocelda a diferentes femtoceldas, de modo que los usuarios reciban mejores parámetros de QoS.

Para hacer un poco más claro esto, vamos a detenernos a mirar cómo es la arquitectura de las redes LTE y de esta forma ubicar dónde tiene lugar esta técnica y a qué nos referimos con los términos macrocelda y femtocelda. En la Figura 2.1, presentamos de forma general la arquitectura de una red LTE. Como podemos ver, está compuesta por dos subsistemas que trabajan en paralelo, por un lado la red de acceso RAN y por otro la CN (*Core Network - Red Central*) también conocida como EPC *Evolved Packet Core - Red Central Evolucionada*. La primera se encarga de todos los componentes de radio de la red, como por ejemplo del algoritmo planificación (*scheduling*) o de los esquemas de modulación y codificación de las cuales hablaremos más adelante en la Sección 2.3, y la segunda se encarga de todas las funciones que no tienen relación directa con la interfaz de radio, como son la autenticación, la comunicación con otras redes y las bases de datos de usuarios.

Como podemos ver en la Figura 2.1(a) el EPC está compuesto por cuatro nodos diferentes: el MME (*MME - Mobility Management Entity - Entidad de manejo de movilidad*), encargado del plano de control, el S-GW (*S-GW - Serving Gateway - Servicio de Pasarela con redes exteriores*) que permite la interconexión entre el EPC y la RAN, el P-GW *Packet data network Gateway - Servicio de pasarela de la red de datos*, encargado de la asignación de direcciones IP a los UE (*User Equipment - Equipo de Usuario*), y de conectar la red con redes externas como Internet, y por último el HSS (*Home Subscriber Service node - Nodo de servicio de suscriptores locales*), que es una base de datos en tiempo real de todos los suscriptores activos y no activos que pertenecen a la red, contiene información relacionada con cada usuario como saldo, perfil de QoS y las llaves de identidad.

Por otro lado, en la Figura 2.1(b) presentamos la red de acceso de LTE, que está compuesta únicamente por el eNodeB, nodo que cumple la función de interconectar a cada uno de los usuarios a la red. Se encarga también de manejar todo lo relacionado con la capa MAC (*Medium-Access Control*), en lo concerniente con la planificación (*Scheduling*) de los recursos, de la multicanalización, entre otros. Dependiendo de la cobertura de las antenas del eNodeB, se hace una diferenciación entre macroceldas, y femtoceldas, la primera con una cobertura mayor a 100 m y la segunda con una cobertura menor a 100 m diseñada para entornos de interiores [2,5,6].

De esta manera, las femtoceldas pueden conectarse al EPC como ya mostramos en la Figura 2.1(b) con un enlace de datos al S-GW y de control al MME, o bien a través de una red externa de banda ancha o Internet, este esquema se presenta en la Figura 2.2. En este caso, interviene un nuevo nodo en el EPC, el F-GW (*Femto*

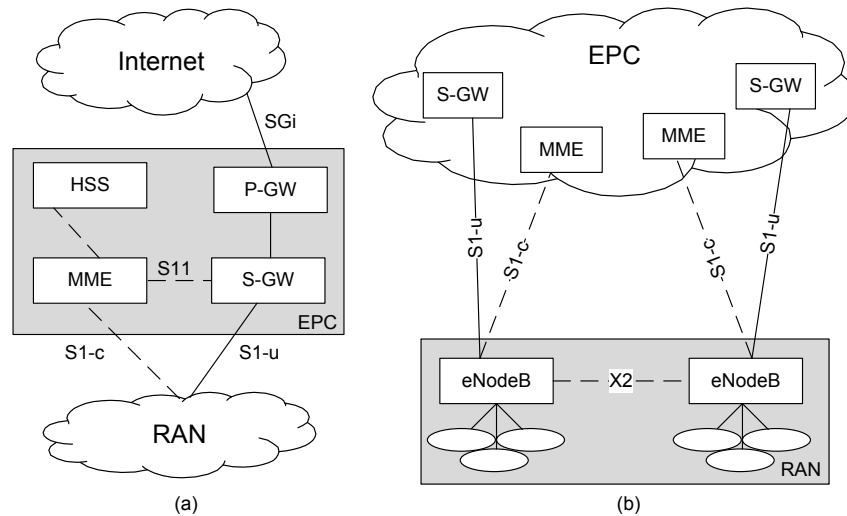


Figura 2.1: Arquitectura de una red LTE, (a) RAN y (b) EPC.

Gateway - Nodo pasarela femto) encargado de hacer la interconexión de las femtoceldas con el EPC.

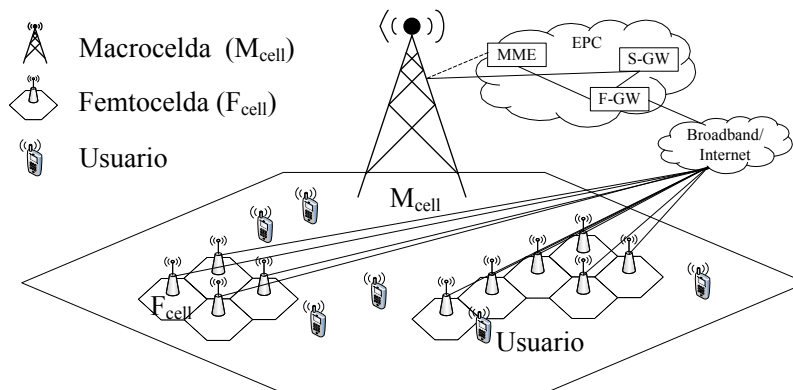


Figura 2.2: Arquitectura de una red LTE con *traffic offloading*.

La técnica de *traffic offloading* en LTE tiene lugar en la red de acceso de LTE en el momento en que la macrocelda se satura, y los parámetros de QoS de los usuarios se ven reducidos en gran medida. En ese momento, si el usuario está en condiciones de hacer el traspaso de red de la macrocelda a alguna femtocelda, ejecuta la técnica de *traffic offloading* y hace el respectivo traspaso (*handover*).

2.2. Acceso al medio en LTE

Como se vio en la sección anterior, la arquitectura LTE está dividida en dos partes: la red de acceso RAN y la red central EPC. La primera, compuesta de un nodo: el *eNodeB*, encargado de gestionar los recursos de RF (Radio Frecuencia) de los que la red dispone, repartiéndolos a cada uno de los *UE* presentes en la RAN, de acuerdo a sus requerimientos de QoS. Para ello, dentro de la pila de protocolos de la RAN, existen

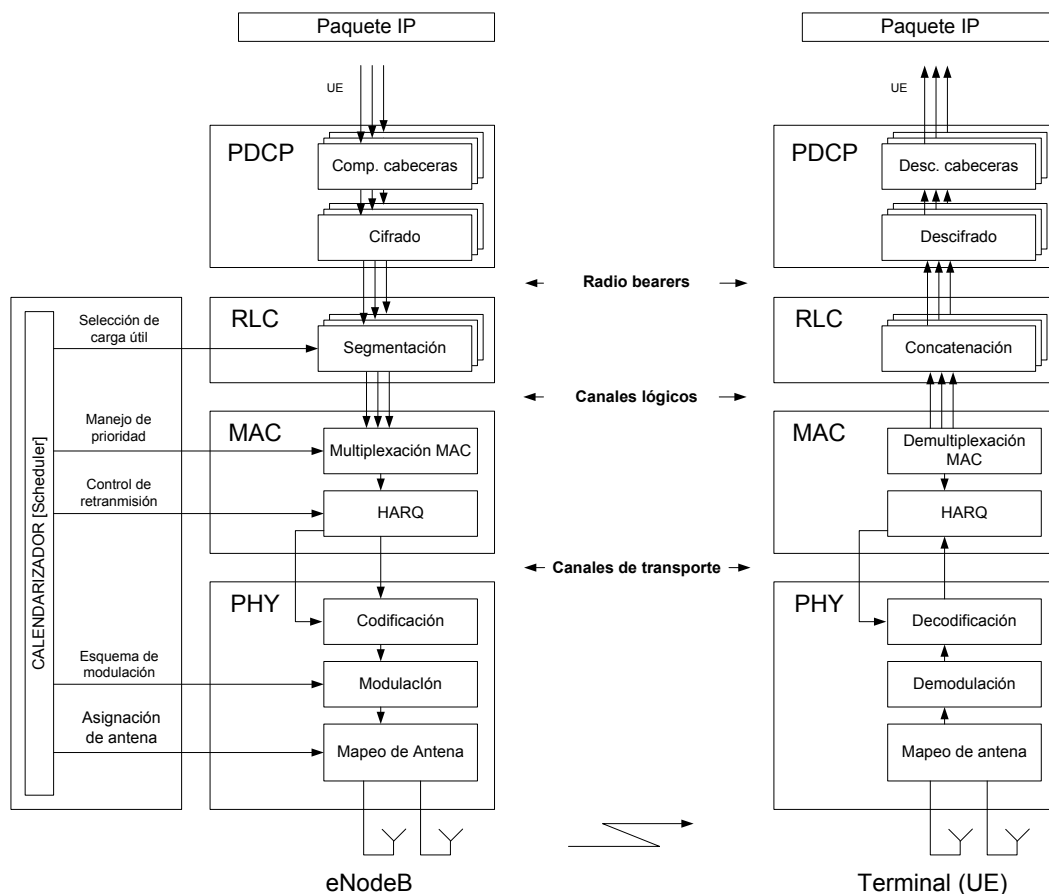


Figura 2.3: Arquitectura de protocolos RAN.

tres diferentes protocolos entre la capa física *PHY* y la capa de aplicación, éstos son el PDCP (*Packet Data Convergence Protocol* - Protocolo de Convergencia de Datos) , RLC (*Radio-Link Control protocol* - Protocolo de Enlace de Radio) y la MAC *Medium Access Control* - Protocolo de Acceso al Medio. A continuación se presenta una explicación de cada uno de ellos haciendo especial énfasis en la subcapa MAC, ya que es la encargada de repartir los recursos RF [7, 8] a los UE. El esquema general de la pila de protocolos de la RAN se presenta en la Figura 2.3

2.2.1. PDCP - *Packet Data Convergence Protocol*

El protocolo PDCP es el primer intermediario entre el paquete IP y la capa física, su función es reducir el tamaño de los paquetes IP que recibe a fin de disminuir el número de bits que se transmitirán, esto lo hace aplicando el algoritmo *ROHC* - *Robust Header Compression* que reduce el tamaño de las cabeceras IP. Además de esto también se encarga de cifrar la información. Existe una entidad PDCP por cada *bearer* o flujo de datos configurado [7, 8].

2.2.2. RLC - *Radio-Link Control protocol*

El protocolo RLC es el encargado de la segmentación y concatenación, de manejar las retransmisiones y de entregar los paquetes en orden a las capas superiores. El RLC provee a su capa superior los *bearers* sobre los que efectúa la disminución de cabeceras y recibe de la subcapa MAC los canales lógicos [7, 8].

2.2.3. MAC - *Medium-Access Control*

La subcapa MAC tiene tres tareas principales: manejar la multicanalización de los canales lógicos locales, efectuar el control y corrección de errores mediante un mecanismo llamado HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request* - Petición de repetición automática híbrida) y hacer la planificación de los recursos de RF [7, 8].

Multiplexación

La subcapa MAC proporciona al RLC los canales lógicos. Están definidos de acuerdo al tipo de información que llevan, se clasifican en dos grupos, los de control y los de tráfico. Los primeros llevan información de señalización y los segundos llevan la información de interés que se desea transmitir. En la subcapa MAC cada uno de estos canales lógicos son mapeados o multicanalizados con su correspondiente canal de transporte. Posteriormente, en la capa física se mapean los canales de transporte en su respectivo canal físico.

Cada canal de transporte se organiza en diferentes *bloques de transporte*. En cada TTI (*Transmission Time Interval* - Intervalo de Tiempo de Transmisión) se transmite a lo más uno de estos bloques. Para el caso de un esquema de multicanalización en espacio MIMO (*Multiple Input Multiple Output* - Múltiple entrada Múltiple Salida), se puede transmitir más de un bloque por TTI. A cada uno de los bloques de transmisión se le asocia un TF (*Transport Format* - Formato de Transporte) que define cómo se transmite cada uno de los bloques en la interfaz de radio, es decir, define el esquema de modulación y codificación y el mapeo de antena. Variando el TF, la subcapa MAC define diferentes velocidades de transmisión.

Calendarización en LTE

El calendarizador (*scheduler* en inglés) en LTE es una entidad localizada en la subcapa MAC del eNodeB encargada de asignar los recursos RF compartidos entre todos los usuarios. Existen de dos tipos: el de subida y el de descarga, cada uno de ellos adecuado a su esquema propio de modulación (*OFDMA en downlink* y *SC-FDMA en uplink*) [7, 9]. Este esquema es uno de los principales diferenciadores de LTE con las demás tecnologías inalámbricas. Sin embargo, no está estandarizado por el 3GPP, más allá de indicar en el estándar TS 36.213 que existen de dos tipos: periódicos y aperiódicos. Es por esta razón que su correcto diseño es fundamental para LTE. En este sentido, se espera que un esquema de calendarización óptimo considere los siguientes puntos:

- Potencia limitada de los UE.
- Mejora del caudal de datos (*throughput*).
- Equidad (*fairness*).
- Satisfacción de requerimientos de QoS

Para lograr esto, el calendarizador divide en dos etapas su tarea: en tiempo y en frecuencia. Tiene acceso a la unidad fundamental de RF en LTE: los RB (*Resource Blocks* - Bloque de Recurso). Por otro lado, recibe los reportes de las colas de cada uno de los UE empleando los BSR (*Buffer Status Report* - Reporte del Estado del Buffer), y también tiene conocimiento de la calidad del canal percibida por el usuario en cada

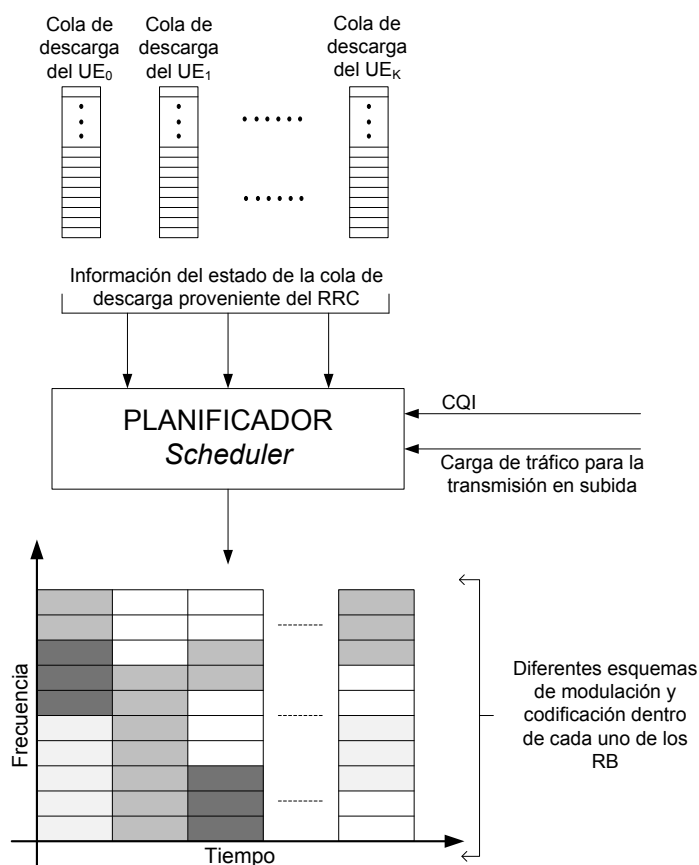


Figura 2.4: Esquema general de un calendarizador en LTE

uno de los RB a través de: los CQI (*Channel Quality Indicator* - Indicador del estado del Canal), DMRS (*DeModulation Reference Signal* - Señal de referencia de la demodulación) y SRS (*Sounding Reference Signal* - Señal de sondeo de referencia), recibe reportes del estado de la batería de los usuarios, mediante el PHR (*Power Headroom Report* - Reporte de potencia de cabeceras), y tiene en cuenta los requerimientos de QoS de cada usuario mediante un parámetro denominado QCI (*QoS Class identifier* - Identificador de Clase de QoS)

El calendarizador determina entonces en cuál(es) RB, con determinado MCS (*Modulation and Coding Scheme* - Esquema de modulación y codificación), y en cada TTI, transmite cada uno de los usuarios en función de las condiciones del canal, expresadas en los reportes de CQI, SRS y DMRS, del estado de la batería de los UE y de los requerimientos de QoS, representados en el parámetro QCI de los usuarios. El esquema general se presenta en la Figura 2.4.

Cada calendarizador se diferencia de los demás por la **función de utilidad** y el **algoritmo de asignación** que emplea. El primero define la medida de utilidad y el segundo la forma como reparte los recursos. Como se puede observar, la tarea del calendarizador no es fácil, ya que incorpora una gran cantidad de parámetros con una gran dinamicidad.

Tabla 2.1: Identificadores QoS en LTE

QCI	Prioridad	Retardo esperado (ms)	Tasa de error de paquete	Aplicación
1	2	100	10^{-2}	Conversación de voz
2	4	150	10^{-3}	Conversación de vídeo
3	5	300	10^{-6}	Juego en tiempo real
4	3	50	10^{-3}	Vídeo no-conversacional
5	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6	7	100	10^{-3}	Voz o vídeo en juegos interactivos
7	6	300	10^{-6}	vídeo <i>streaming</i>
8	8	300	10^{-6}	Tráfico TCP
9	9	300	10^{-6}	Otros

Parámetros recibidos por el calendarizador

QCI - QoS Class Identifier LTE ofrece QoS con varias clases de servicio, diferenciando cada una de ellas con el QCI, cada una de ellas asociada a un requerimiento diferente de BER (*Bit Error Rate*) y de retardo. Cada clase de servicio está asociada a un flujo de datos o *bearer* [10, 11].

La distribución que tiene cada una de las clases de servicio atiende al tipo de aplicación que se ejecute en el UE, en este sentido, en una aplicación del tipo juego en tiempo real se le da mayor prelación a la latencia que en una aplicación del tipo voz-conversacional. Esto se puede observar de mejor manera en la Tabla 2.1, proveniente del estándar 3GPP TS 36.213.

CQI: El CQI es un reporte de la calidad del canal percibido por los UE, estandarizado en la norma 3GPP TS 36.213. El cómo se obtiene no está especificado por el 3GPP, sin embargo, está ligado a parámetros como la SNR (*Signal-to-Noise Ratio* - Relación Señal a Ruido), SINR (*Relación Señal a Ruido más Interferencia*) o la SNDR (*Signal-to-Noise plus Distortion Ratio* - Relación Señal a Ruido más Distorsión) [7, 12]. Estos reportes pueden ser periódicos o no, siempre en relación con el TTI.

BSR: El BSR es un reporte periódico elaborado por los usuarios que lleva cuenta del estado del buffer en cada momento; es enviado por el usuario hacia el eNodeB en cada intervalo de transmisión (TTI) o en un múltiplo del mismo. Está estandarizado por el 3GPP en la norma TS 36.3215.4.5 y la unidad que utiliza es el tamaño del bufer en bits.

SRS: Sounding Reference Signal, definido en la norma TS 136.213, funciona de manera similar que los reportes CQI, y pretende reportar periódicamente la calidad de canal ascendente.

2.3. Capa física en LTE

La capa física, de cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico, es aquella que se encarga de la transmisión y recepción de una secuencia no estructurada de bits a través del medio físico, en ella se definen parámetros como la potencia de transmisión o el esquema de modulación. En LTE se definen dos diferentes esquemas de acceso al medio: uno para el enlace descendente y otro para el ascendente.

Para el enlace descendente, LTE emplea OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal), un esquema de acceso múltiple y modulación, en el que el

Tabla 2.2: Parámetros CQI en LTE

Índice CQI	Modulación	Tasa de código	Eficiencia espectral
0	NA	NA	NA
1	QPSK	78/1024	0.1523
2	QPSK	120/1024	0.2344
3	QPSK	193/1024	0.3770
4	QPSK	308/1024	0.6016
5	QPSK	449/1024	0.8770
6	QPSK	602/1024	1.1758
7	16QAM	378/1024	1.4766
8	16QAM	490/1024	1.9141
9	16QAM	616/1024	2.4063
10	64QAM	466/1024	2.7305
11	64QAM	567/1024	3.3223
12	64QAM	666/1024	3.9023
13	64QAM	772/1024	4.5234
14	64QAM	873/1024	5.1152
15	64QAM	948/1024	5.5547

ancho de banda se divide en diferentes subportadoras, pero a diferencia de un esquema de FDM (*Frequency Division Multiplexing* - Multicanalización por División de Frecuencia) tradicional, en OFDMA las subportadoras se traslapan, esto sólo es posible haciendo que el espacio de separación (*en frecuencia*) de una subportadora con otra sea tal que se permita la ortogonalidad entre ellas, a tal suerte que la interferencia de una con otra sea mínima. Además del esquema OFDMA, LTE emplea HARQ, un esquema ideado para solucionar el problema del desvanecimiento selectivo en frecuencia presente en el medio inalámbrico.

OFDM surge como respuesta al problema que tienen los esquemas de transmisión de grandes velocidades con una única portadora donde el tiempo de símbolo T_s es mucho más pequeño que el retardo de propagación generando ISI (*InterSymbol Interference* - interferencia intersímbolo). Para hacer que esto no pase, en OFDM se paraleliza la comunicación, es decir, el flujo de datos de alta velocidad se hace pasar por un conversor *Serie/Paralelo* que genera M flujos de datos, y luego se modula cada uno de ellos en una portadora diferente. De esta forma, el tiempo de símbolo T_s se incrementa en un factor de M de tal forma que sea mayor que el tiempo de propagación.

OFDMA es entonces una extensión de OFDM que permite que diferentes usuarios tengan acceso separado a cada una de las portadoras al mismo tiempo. Adicionalmente, OFDMA también permite multicanalización en tiempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) de tal manera que se generan bloques de recursos en tiempo y frecuencia que se reparten entre todos los usuarios.

2.3.1. Estructura de los recursos de transmisión

Los recursos de transmisión en LTE poseen tres dimensiones: tiempo, frecuencia y espacio. En frecuencia referido a las subportadoras proporcionadas por el esquema OFDMA, en tiempo referido a las ranuras de tiempo T_s proporcionadas por el esquema TDMA y en espacio proporcionado por los diferentes puertos de antena que

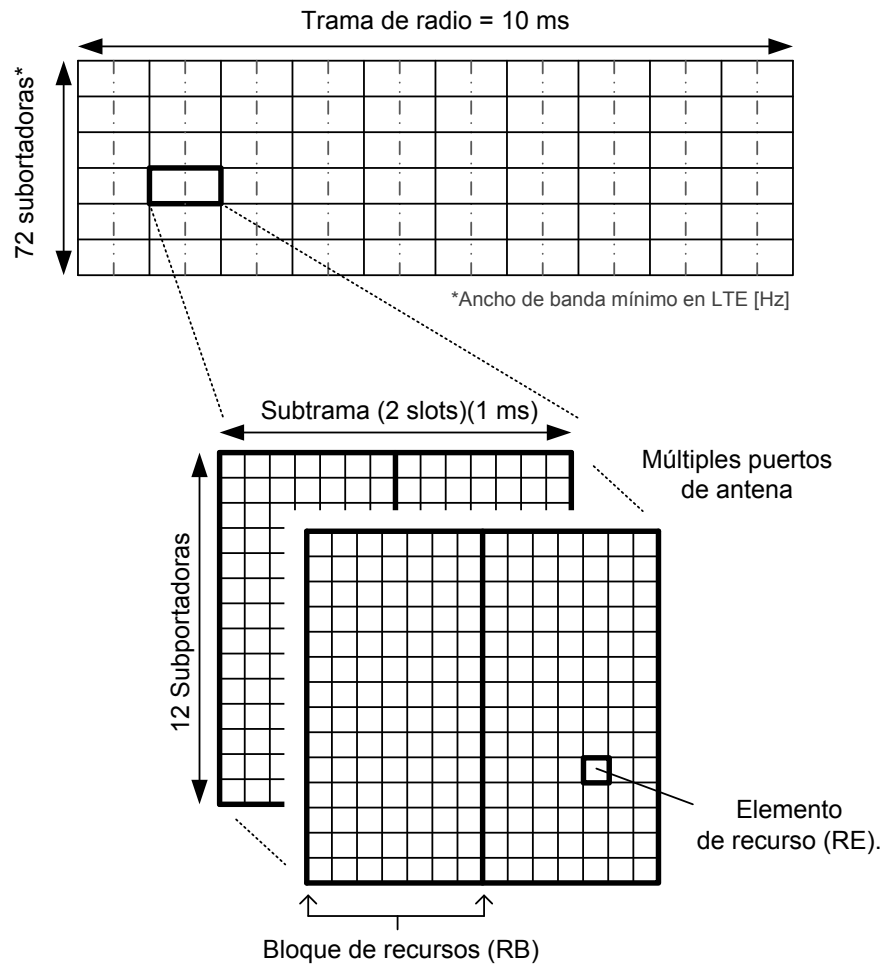


Figura 2.5: Estructura básica de recursos de transmisión en LTE (CP normal)

posee el eNodeB.

Los recursos en tiempo y frecuencia de cada antena dentro del eNodeB se dividen de la siguiente manera: la unidad más grande de tiempo se compone de una trama de 10 ms que se subdivide a su vez en subtramas de 1 ms y cada una de ellas en ranuras de 0.5 ms. Cada ranura se compone de siete símbolos OFDM en el caso de un tamaño normal de *CP-Cyclic Prefix* o seis en el caso de CP extendido. En el dominio de la frecuencia, los recursos están agrupados en unidades de 12 subportadoras que ocupan en conjunto un ancho de banda total de 180 MHz con un espacio entre subportadoras de 15 kHz. A cada unidad de 12 subportadoras con una duración de una ranura de tiempo se le denomina Bloque de Recurso *RB - Resource Block*. Este esquema se puede observar de forma gráfica en la Figura 2.5.

En la Figura 2.5 todos los recursos son empleados para descarga, este caso recibe el nombre de *Estructura de*

trama tipo 1, y emplea un esquema FDD (*Frequency Division Duplexing* - Díplexión por división de frecuencia), en el que las frecuencias de bajada y subida son diferentes. Para el caso de emplear TDD (*Time Division Duplexing* - Dúplexo por división de tiempo) se emplea un esquema muy similar con la diferencia de que los RB se reparten, algunos son empleados para enlaces ascendentes y otros para enlaces descendentes, y también se incluyen algunas subtramas con periodo de guarda para evitar conflictos entre los canales de bajada y subida adyacentes.

Una de las principales desventajas que tiene OFDM es que su PAPR (*Peak to Average Power Ratio* - Relación de potencia Pico-Promedio) es alta, la PAPR es una medida de la relación entre la potencia media de la señal y la potencia de los picos (*un pico en este contexto indica una señal de alta potencia por un corto periodo de tiempo*). Esto quiere decir que OFDM mantiene una potencia promedio baja pero la potencia de los picos es alta. Esto tipifica un gran problema para el enlace de subida ya que bajo la presencia de picos de alta frecuencia el diseño de filtros es más difícil. Por este motivo se emplea SC-FDMA (*Single Carrier FDMA* - FDMA de Única Frecuencia) en el enlace ascendente. SC-FDMA se diferencia de OFDMA en que todas las subportadoras son moduladas con el mismo esquema de modulación.

2.4. Problema de selección de red

El desarrollo creciente de tecnologías inalámbricas en los últimos años ha revolucionado el mundo de las comunicaciones, esto se ve reflejado en la gran diversidad que existe hoy en día de redes inalámbricas desplegadas por todas partes, trabajando juntas para proveer a los usuarios servicios de banda ancha inalámbrica de gran calidad. Ejemplos de estas tecnologías son las WWAN (*Wireless Wide Area Networks*) como las tecnologías GSM, UMTS, 3G, y 4G, que proveen gran cobertura. Por otro lado, están tecnologías de menor cobertura como IEEE 802.11 y todas sus variantes o tecnologías como Bluetooth, Zigbee o femtoceldas LTE [3, 13, 14].

Estos dos tipos de redes de acceso inalámbrico en la actualidad se despliegan con sus áreas de cobertura superpuestas, a fin de que el servicio de acceso inalámbrico esté acorde a los requerimientos de QoS de los usuarios en todo momento. A este tipo de redes que tienen diferentes tipos de tecnologías de acceso se les denomina HWN (*Heterogeneous Wireless Networks* - Redes Inalámbricas Heterogéneas), y están diseñadas para conjuntar la gran cobertura que tienen las redes WWAN con el acceso de gran velocidad, bajo costo y bajo nivel de cobertura de las redes 802.11 y femtoceldas LTE, para de esta forma lograr que el usuario goce en todo momento de servicio de banda ancha de gran calidad de forma inalámbrica.

Sin embargo, la implementación de las redes HWN, trae consigo, grandes retos ya que hacer que diferentes tipos de tecnologías converjan no es tarea fácil. En este sentido, el bien conocido concepto ABC (*Always Best Connected* - Siempre la mejor Conexión), presentado en [15], presenta un esquema general de las características que deben tener estas redes y los diferentes componentes que la soportan.

Según el principio ABC, los terminales de una red HWN deben tener la capacidad de seleccionar en todo momento y lugar la red de acceso que más se adecue a los requerimientos de QoS de los usuarios, dependiendo estos últimos del tipo de aplicación que ejecuten. Además de ello, las terminales también deben tener la capacidad de tomar esta decisión incluso si existe una sesión en curso, es decir deben tener la capacidad de trasladarse de una red de acceso a otra sin importar las circunstancias. ABC establece diferentes componentes necesarios para ello, como por ejemplo: descubrimiento de red, selección de red, ejecución del proceso de handover, autenticación, y autorización.

De todos éstos, la selección de red es un componente clave y es el problema que nos atañe en esta investigación. Se refiere específicamente a la toma de decisión de cual red de acceso es la que mejor se adapta a los requerimientos de QoS del usuario en función de la aplicación que este ejecute, no se ocupa por ejemplo de la obtención de los parámetros de desempeño, ni de la ejecución del procedimiento de traspaso (handover).

En la literatura podemos encontrar diversos métodos matemáticos aplicados a este problema, dentro de ellos los más representativos son, la lógica difusa, la optimización combinatoria, la teoría de la utilidad, la teoría de la toma de decisiones con soluciones del tipo MADM (the Multi Attribute Decision Making theory), y recientemente la teoría de juegos [3, 13, 14]. A continuación presentamos los mecanismos de decisión del tipo MADM que empleamos en esta investigación y nuestra propuesta de aplicación de ANP, un mecanismo del tipo MADM aplicado al problema de selección de red en *traffic offloading* en redes LTE.

2.5. Mecanismos de selección de red basados en MADM

En la literatura podemos encontrar diversos trabajos que abordan el problema de la selección de red aplicando diversas técnicas del tipo MADM [16–24]. Uno de los primeros en hacerlo fue Wenhui Zhang en [20], donde hace una comparación de dos de los mecanismos más conocidos SAW (*Simple Additive Weighting* - Ponderación Aditiva Simple) y TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* - Técnica para ordenar por Preferencia de Similitud) para aplicaciones del tipo conversacional y de *background*. Después en [25] Stevens-Navarro y Wong comparan cuatro mecanismos SAW, TOPSIS, GRA (*Grey Relational Analysis* - Análisis Relacional de Grey) y MEW (*Multiplicative Exponent Weighting* - Ponderación Multiplicativa Exponencial) para aplicaciones del tipo conversacional, *streaming*, interactiva y *background*, concluyendo que el método que mejores resultados arroja para aplicaciones del tipo *background* es GRA. En [26], Vaca y Ramos presentan un mecanismo de selección de red que toma en consideración la incertidumbre de los datos dentro del proceso de decisión. En [27], Ramirez y Ramos presentan un mecanismo de decisión jerárquico basado en AHP (*Analytic Hierarchy Process* - Proceso Analítico Jerárquico). En [28], los mismos autores presentan una comparación de varios mecanismos MADM concluyendo que la etapa de normalización es de gran importancia dentro de la toma de decisión.

Más recientemente en [19] se presenta una comparación de AHP y ANP junto con el algoritmo de Mahalanobis, concluyendo que ANP proporciona mejor rendimiento, ya que permite la inclusión de una gran cantidad de parámetros de decisión, además de permitir que el problema sea planteado en una estructura diferente a la jerarquía. La propuesta más reciente de la aplicación de ANP a este problema se presenta en [29], en éste se hace un híbrido entre TOPSIS y ANP y se concluye que la dinamicidad de los parámetros es un factor importante a tener en cuenta. A continuación, presentamos los mecanismos del tipo MADM mayormente utilizados en la literatura para el problema de selección de red.

A continuación presentamos los mecanismos MADM más citados en la literatura, mismos que emplearemos mas adelante en la evaluación del mecanismo de selección de red que proponemos en este trabajo, para ello definimos las siguientes variables:

- N número de alternativas
- M número de criterios
- X es la matriz de decisión con M filas y N columnas
- $x_{i,j}$ es el elemento (i, j) de la matriz X .

- $r_{i,j}$ es el valor normalizado de la matriz X de acuerdo a algún proceso de normalización del Anexo 1.

2.5.1. SAW - Simple Additive Weighting Algorithm

Es el más conocido de todos los mecanismos por su simplicidad. Presentado en [20], consiste básicamente en normalizar los parámetros de acuerdo a si son un costo o beneficio, luego multiplicar cada uno de los valores de las opciones por un vector de pesos, al final se suman los valores obtenidos por cada opción y se obtiene un vector de prioridades de las opciones. El mecanismo tiene los siguientes pasos:

- Se normalizan los parámetros de las opciones de acuerdo a si el parámetro es un costo o beneficio (*ver Anexo 1*)
- Se calcula el vector de prioridades u_i como sigue:

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

Donde ω_j es el vector de pesos y satisface que $\sum_{j=1}^M \omega_j = 1$.

2.5.2. GRA - Grey Relational Analysis

Este mecanismo proviene del análisis relacional de Grey presentado en [20], consiste en generar un vector de referencia, luego se calcula el coeficiente de Gray. El vector sirve como punto de comparación para obtener el vector de preferencias. El procedimiento que sigue es:

- Se genera el vector de referencia $x_0(i)$ con $i \in \{1, \dots, M\}$, éste puede ser, una opción ideal, o aquella opción que mejor se adecuaría al problema, o bien cualquier otro vector de referencia que se considere conveniente.
- Se normaliza de acuerdo a si el parámetro es un costo o un beneficio (*ver Anexo 1*).
- Se calcula el coeficiente de Grey:

$$\gamma(x_o, X(i, j)) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,j}(i) + \zeta \Delta_{\max}} \quad i = 1, \dots, M \quad (2.2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta_{0,j} &= |x_0(i) - X(i, j)| \\ \Delta_{\min} &= \min_{j \in N} \{ \min_{j \in M} \{ |x_0(i) - X(i, j)| \} \} \\ \Delta_{\max} &= \max_{j \in N} \{ \max_{i \in M} \{ |x_0(i) - X(i, j)| \} \} \end{aligned}$$

y el parámetro ζ está definido $\zeta \in [0, 1]$.

- Se calcula el grado relacional de Gray $\Gamma(x_0, x_i)$ para cada una de las opciones como sigue

$$\Gamma(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^N \omega_j \gamma(x_0(j), x_i(j)) \quad (2.3)$$

Donde ω_j es el vector de pesos, la opción con mayor valor de $\Gamma(x_0, x_i)$, es aquella que tiene mayor preferencia.

2.5.3. TOPSIS - *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

Este método, como su nombre lo indica busca la opción que tenga mayor similitud a una solución ideal, esto lo hace calculando dos distancias euclidianas: una con respecto a una solución ideal positiva, y otra con respecto a una solución ideal negativa, selecciona aquella opción que tenga la menor distancia hacia la solución positiva y la mayor con respecto hacia la negativa [30]. El procedimiento que sigue se presenta a continuación:

- Se normalizan los atributos de las opciones de acuerdo a si son costos o beneficios empleando la fórmula de la raíz cuadrada (ver Anexo 1).
- Se calcula la matriz de ponderaciones normalizada $v_{i,j}$:

$$v_{i,j}(x) = \omega_i * r_{i,j}(x), i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M \quad (2.4)$$

Donde ω_i es el vector de pesos, N es el número de alternativas y M , el número de criterios. Después se calculan dos puntos, el PIS - punto ideal positivo y el NIS - punto ideal negativo

$$\text{PIS} = \{(\max_i v_{i,j} | i \in J_1), (\min_i v_{i,j} | i \in J_2), i = 1, \dots, N\} \quad (2.5)$$

$$\text{NIS} = \{(\min_i v_{i,j} | i \in J_1), (\max_i v_{i,j} | i \in J_2), i = 1, \dots, N\} \quad (2.6)$$

Donde J_1 y J_2 son los atributos de beneficio y costo, respectivamente.

- Se calculan los valores de separación de distancia euclidiana positivo y negativo D_i^* y D_i^- :

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{i,j} - v_j^*]^2} \quad (2.7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{i,j} - v_j^-]^2} \quad (2.8)$$

Donde v_j^* y v_j^- son las soluciones ideal positiva y negativa respectivamente.

- Por último, se calcula el vector de similitudes a PIS como sigue:

$$C_k^* = \frac{D_k^-}{D_k^* + D_k^-} \quad (2.9)$$

Este vector es el ranking de las alternativas.

2.5.4. ELECTRE - *Elimination Et Choix Traduisant la REalité*

Este método modela el problema de la toma de decisiones partiendo de tres cosas: un conjunto de acciones (alternativas), un conjunto de consecuencias (aspectos o atributos) y un modelo de sistema de preferencias donde a cada una de las acciones se les asigna una de dos posibilidades: concordancia o discordancia. Al final, se obtiene un vector que indica el nivel de preferencia de cada una de las acciones u opciones [30].

Existen diferentes propuestas de ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la REalité* - Eliminación y Elección que traducen la realidad), cada una evoluciona de la anterior. Para esta investigación, hemos seleccionado la que se presenta en [23,28] aplicada al problema de selección de red, en ella se varía la forma de normalizar los atributos, de manera que tengan mayor prelación aquellas que mejor se adecuen a una red de referencia, las propiedades de esta red. El procedimiento que sigue es:

- Primero se calcula el valor absoluto de la diferencia de las dos redes para cada criterio, siendo x_j^{ref} el vector de propiedades de la red ideal.

$$\hat{r}_{i,j} = |x_{i,j} - x_j^{\text{ref}}|, i = 1, \dots, M \quad (2.10)$$

- Luego se normaliza:

$$r_{i,j} = \frac{\max_{i \in N} \{\hat{r}_{i,j}\} - \hat{r}_{i,j}}{\max_{i \in N} \{\hat{r}_{i,j}\} - \min_{i \in N} \{\hat{r}_{i,j}\}} \quad (2.11)$$

- Después se calcula la importancia relativa de los criterios, con ω_j , como el vector de pesos de las propiedades de las redes

$$\check{r}_{i,j} = \omega_j * r_{i,j}, \quad j = 1, \dots, M \quad (2.12)$$

- Ahora se definen dos matrices, una de concordancia C_{set} y una de discordancia D_{set} como sigue:

$$C_{\text{set}}(k, l) = \{\omega_j | \check{r}_{k,j} \geq \check{r}_{l,j}\} \quad (2.13)$$

$$D_{\text{set}}(k, l) = \{\omega_j | \check{r}_{k,j} < \check{r}_{l,j}\} \quad (2.14)$$

Donde $j = 1, \dots, M$, $k = 1, \dots, N$ y $l = 1, \dots, N$. Los elementos de la matriz de concordancia son:

$$C_{k,l} = \sum_{j \in C_{\text{set}}(k,l)} \omega_j \quad (2.15)$$

De manera similar, la matriz de discordancia es:

$$D_{k,l} = \frac{\sum_{j \in D_{set}(k,l)} |\check{r}_{k,j} - \check{r}_{l,j}|}{\sum_{j=1}^N |\check{r}_{k,j} - \check{r}_{l,j}|} \quad (2.16)$$

- Por último, el vector de concordancia \check{c}_i queda así:

$$\check{c}_i = \sum_{j=1}^N (C_{i,j} - C_{j,i}), i = 1, \dots, N \quad (2.17)$$

Es este vector, el que indica la prelación que se le da a una opción con respecto a la otra.

2.5.5. AHP - Analytic Hierarchy Process

Este mecanismo propuesto en [31], aborda el problema de la toma de decisiones, descomponiéndolo en un sistema jerárquico de elementos interrelacionados. El nivel más alto de la jerarquía es el objetivo, los niveles intermedios los criterios y sub-criterios y en el nivel más bajo las alternativas [31]. Para ello, lleva a cabo los siguientes pasos:

- Definir la naturaleza del problema
- Construir un sistema jerárquico
- Seleccionar un modelo de evaluación adecuado
- Determinar la mejor alternativa

El método de evaluación que se emplea con más frecuencia es el método de los eigenvalores o valores propios, también se han propuesto otros que emplean lógica difusa, media geométrica, programación lineal. Inicialmente, se normalizan los valores de acuerdo a si son costos o beneficios de la forma como se presenta en el Anexo 1.

Una vez hecho esto, se crea una matriz que representa la comparación de pesos relativos de los n atributos denotados como $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. En esta matriz los atributos son comparados subjetivamente por pares, es decir denotan la importancia de un atributo con respecto a otro, en relación al criterio que se encuentra por encima suyo en la jerarquía; es así como la matriz resultante es una recíproca $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ y por lo tanto $a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j}$, donde ω se refiere al peso de cada criterio.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{ni} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

De manera general, la matriz \mathbf{A} se puede reescribir como:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \dots & \omega_1/\omega_j & \dots & \omega_1/\omega_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \omega_i/\omega_1 & \dots & \omega_i/\omega_j & \dots & \omega_i/\omega_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \omega_n/\omega_1 & \dots & \omega_n/\omega_j & \dots & \omega_n/\omega_n \end{bmatrix}$$

Se plantea entonces la siguiente ecuación matricial:

$$(\mathbf{W} - nI)\omega = 0 \tag{2.18}$$

Donde \mathbf{W} , es la matriz de pesos definida anteriormente, I es la matriz identidad y ω es la matriz de eigenvectores que permitirá seleccionar la mejor opción. Para ello, se selecciona el eigenvector ω con su respectivo eigenvalor de mayor valor $\lambda_{\text{máx}}$ que satisfaga la siguiente ecuación:

$$(\mathbf{A} - \lambda_{\text{máx}}\mathbf{I})\omega = 0 \tag{2.19}$$

El vector ω obtenido asigna a cada una de las opciones un peso subjetivo que permite tomar la decisión final entre todas las opciones. Este vector es normalizado, y se define la escala presentada en la Tabla 2.3 con índices subjetivos para el rango de valores que se puede obtener en este vector. De esta manera, el criterio que tenga el mayor valor es aquel que satisface de mejor manera el problema en cuestión.

Tabla 2.3: Escala de índices en AHP

Ponderación	1	3	5	7	9	2, 4, 6, 8
índice	Igual	Moderado	Demostrable	Fuerte	Extremo	Intermedios

2.5.6. ANP - Analytic Network Process

AHP permite abordar problemas del tipo MADM organizando este en forma de jerarquía y haciendo comparaciones por pares de los diferentes parámetros dentro de cada nivel. Este enfoque hace que problemas donde no exista una relación de precedencia clara de un criterio a otro no puedan ser abordados de la mejor manera. Además de esto AHP está limitado a un número pequeño de parámetros [31], es por ello que Thomas L Saaty, mismo autor de AHP, propone una mejora denominada ANP. Básicamente ANP a diferencia de AHP plantea el problema en forma de red, donde cada nodo puede ser un criterio, un grupo de criterios, o una alternativa, todos ellos dentro de la red atienden a un nodo objetivo o de control. De igual manera que en AHP, se hace una comparación por pares entre los nodos que estén conectados entre sí.

La diferencia entre una red y una jerarquía como la que se tiene en AHP está en cómo se hacen las conexiones entre los nodos y en la agrupación de los elementos: es una jerarquía, cuando no hay ninguna conexión entre los elementos de un mismo nivel o de un nivel inferior con un nivel superior (por ejemplo de las alternativas hacia los criterios), y una red cuando si la hay. En la Figura 2.6 se presenta esto de forma gráfica.

Este esquema de red se representa en una supermatriz, los valores que toma ésta corresponden al vector de prioridades (eigenvector) resultado de la comparación por pares que se hace entre cada uno los elementos de cada nodo con los elementos de los nodos con los que tiene conexión, estas comparaciones por pares se hacen de la misma manera que AHP [4, 30]. Formalmente, en la Ecuación 2.7 se presenta la supermatriz en forma

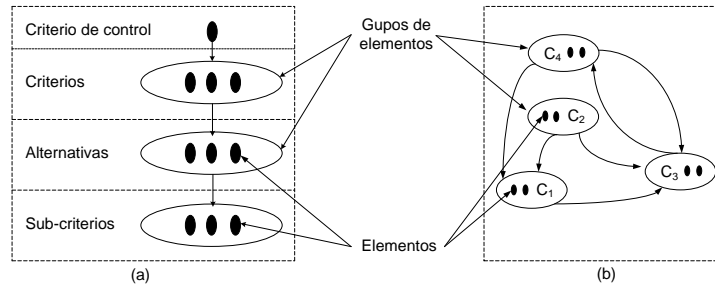


Figura 2.6: (a) Estructura jerárquica (b) Red

general. C_m denota el m -ésimo grupo/nodo, e_{mn} denota el n -ésimo elemento en el m -ésimo grupo, W_{ij} es el eigenvector principal proveniente de la comparación por pares de los elementos del j -ésimo grupo con los elementos del i -ésimo grupo. En caso de que el grupo j -ésimo no tenga ninguna relación con el grupo i -ésimo, $W_{ij} = 0$.

ANP y el problema de selección de red - NetANPI

A continuación, presentamos un mecanismo de selección de red basado en ANP que llamamos NetANPI *Mecanismo de selección de red basado en ANP que incluye comparación con red ideal* y aplicable al mecanismo de direccionamiento de tráfico *traffic offloading* vía femtoceldas en redes LTE. Inicialmente, presentaremos los tipos de aplicación que tendremos en cuenta para modelar los requerimientos de QoS de los usuarios de acuerdo al estándar TS 23.107 del 3GPP, seguido a esto los criterios de selección o los parámetros que caracterizan cada opción/femtocelda y por último el modelo de ANP que diseñamos para este problema en específico.

3.1. Tipos de aplicación

Para este trabajo, consideramos cuatro clases de aplicación: conversacional, *streaming*, interactiva y *background* cada una de ellas con requerimientos de QoS diferentes, que se encuentran definidos en el estándar TS 23.107 del 3GPP y presentados a continuación.

3.1.1. Conversacional

Esta clase de aplicación, como su nombre lo indica permite a los usuarios comunicarse entre sí empleando la voz. Es de especial interés en LTE ya que por naturaleza es una red de paquetes. La aplicación de este tipo que se ejecuta dentro de LTE es VoIP, o de forma más general VoLTE. También caen dentro de este tipo las aplicaciones que permiten hacer vídeo-conferencia. Su principal característica en términos de los requerimientos de QoS es que requiere que a lo largo de la conversación el retardo no varíe de forma significativa y que sea pequeño.

3.1.2. Streaming

Esta clase de aplicaciones permite al usuario ver/escuchar vídeo/voz en tiempo real, se caracteriza por ser en una sola vía, es decir: un vídeo/audio alojado en un servidor que se envía en tiempo real hacia el usuario. En términos de los requerimientos de QoS este tipo de aplicación exige que la variación del retardo se mantenga de la misma forma que en la clase conversacional, pero no exige que el retardo extremo a extremo sea pequeño.

3.1.3. Interactiva

Este tipo de aplicaciones permite al usuario/máquina solicitar datos desde un equipo remoto de forma activa, es decir: requiere retroalimentación para funcionar y siempre hay una entidad remota esperando por una respuesta dentro de un tiempo estimado. Ejemplos de estas aplicaciones son: la navegación web o la consulta de datos a un servidor. En términos de requerimientos de QoS es la más exigente de todas, ya que requiere retardos de ida y vuelta muy pequeños en comparación con las demás y también que la tasa de error sea muy baja.

3.1.4. Background

Dentro de este grupo caen las aplicaciones en donde se envían y reciben archivos de datos en segundo plano; ejemplos de estas aplicaciones son el envío y recepción de correo electrónico o SMS. En términos de requerimientos QoS es el tipo de aplicación mas laxo, su único requerimiento es que se mantenga el contenido del

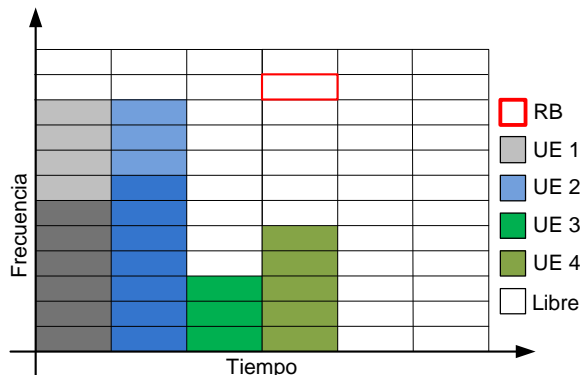


Figura 3.1: Ejemplo de nivel de ocupación en LTE

mensaje y que éste llegue en algún momento.

3.2. Criterios de selección

Cuando hablamos de criterios de selección, nos referimos a las características de las opciones/femtoceldas que pueden describir el rendimiento de la red en el momento en que el mecanismo de selección de red entra en acción. En este sentido, son todos aquellos parámetros que los mecanismos de selección de red tienen en cuenta en función del tipo de aplicación, tenemos en cuenta entonces tres parámetros de QoS: El *throughput*, el retardo extremo a extremo y la tasa de pérdida de paquete. Además de éstos también consideramos el nivel de ocupación, parámetro que describiremos más adelante.

- NO - Nivel de Ocupación de las redes:

Este parámetro se define como el porcentaje de RB (*resource blocks*) que la red tiene disponibles para asignar en el momento en que se ejecuta el traspaso de red visto más en detalle en la Sección 2.3.1. A manera de ejemplo en la Figura 3.1 se presenta una distribución aleatoria de una red de acceso LTE, donde los RB en blanco son aquellos que se encuentran disponibles para la asignación, en este caso el nivel de ocupación es del 39% (0.39). Este parámetro está ligado al algoritmo de planificación que tiene la capa MAC de la red LTE [7].

- TP - *Throughput*: Es el *throughput* alcanzable promedio por usuario en la femtocelda.
- RP - Retardo por paquete: Entendido como el retardo extremo a extremo promedio.
- PP - Pérdida de paquetes: Entendida como la tasa promedio de pérdida de paquetes en la RAN.

3.3. NetANPI - Mecanismo de selección de red basado en ANP que incluye comparación con red ideal

Como indicamos anteriormente en la Subsección 2.5.6, emplear ANP aplicado al problema de selección de red nos permite modelar el problema como una red de grupos de criterios interconectados entre sí, permitiendo de esta manera que pueda existir relación de dependencia de un criterio al otro o incluso de las alternativas

Tabla 3.1: Comparación con valores ideales.

	Conversacional		Streaming		<i>Background</i>		Interactivo	
	Ideal	Peso	Ideal	Peso	Ideal	Peso	Ideal	Peso
TP	200 kbps	0.175	3 Mbps	0.45	1 Mbps	0.33	500 kbps	0.15
RP	100 ms	0.65	300 ms	0.30	300 ms	0.33	75 ms	0.75
PP	10^{-4}	0.175	10^{-4}	0.25	10^{-8}	0.33	10^{-6}	0.15

hacia los criterios [4]. A partir de este esquema de red, se hace una comparación por pares entre cada uno de los grupos/nodos con los que tenga relación, seguido a ello se forma una supermatriz conformada por los eigenvectores resultado de las comparaciones hechas de la misma manera que en ANP y, por último se aplica la Ecuación 2.20 de la que se obtiene un vector de prioridades de las opciones, siendo éste el resultado último del mecanismo.

El mecanismo de selección de red basado en ANP que proponemos aprovecha la posibilidad que tiene ANP de incluir dentro del mecanismo de selección de red la influencia de las alternativas hacia las criterios, esto dicho de otra manera, nos permite comparar cada opción consigo misma. Este hecho a primera vista puede sonar raro debido a que es difícil decir que una femtocelda tiene mejor *throughput* que latencia por ejemplo, pero, se puede lograr si se compara cada una de las femtoceldas con una femtocelda ideal, esta comparación la hacemos aplicando el mecanismo de selección de red ELECTRE presentado en [23,28]. El vector de prioridades obtenido se incluye dentro de la supermatriz, incorporando así dentro del mecanismo de selección de red la comparación de cada una de las opciones con una opción ideal, esta opción ideal es diferente para cada tipo de aplicación y es presentada en la Tabla 3.1 y se basan en investigaciones anteriores que caracterizan este tipo de aplicaciones en redes LTE [32–34].

ANP además de ofrecer la posibilidad de incluir dentro del mecanismo de decisión influencia de las opciones hacia las alternativas, también permite hacer grupos de criterios. En nuestra propuesta NetANPI incorporamos esta posibilidad incluyendo un grupo de criterios de QoS, que engloba los tres parámetros que mencionamos antes en la Subsección 3.2 y el parámetro de ocupación se considera separadamente, el esquema general de NetANPI se presenta en la Figura 3.2.

3.3.1. Comparación por pares en NetANPI

Como ya indicamos anteriormente, uno de los puntos principales que caracterizan a mecanismos como ANP o AHP es la comparación por pares que se hace entre los elementos de la jerarquía en AHP o entre los grupos de ANP. A continuación, presentamos la comparación por pares de nuestra propuesta. La primera de las comparaciones se hace entre la ocupación de la red y los parámetros de QoS con respecto al criterio referencia (mejor red), ésta es presentada en la Tabla 3.2. Seguido a esto se hace la comparación del grupo de QoS, es decir se hace comparación por pares de una de las redes con respecto a la demás para cada cada uno de los parámetros de QoS antes mencionados. Esta comparación se presenta en la Tabla 3.3

La selección de los pesos es puramente subjetiva, pero se basa en los requerimientos de QoS definidos en el estándar TS 23.107 del 3GPP. Por ejemplo, una aplicación del tipo interactiva es muy restrictiva en su requerimiento de retardo extremo a extremo, por esta razón seleccionamos una relación de seis a uno. Un caso similar es el de una aplicación del tipo conversacional donde seleccionamos una relación de cuatro a uno, ya que es igualmente restrictiva en el retardo extremo a extremo; pero no tanto como la anterior. Por otro lado

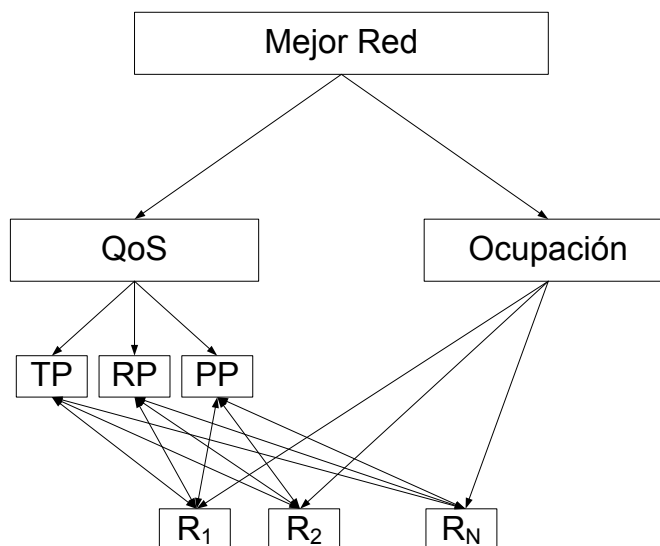


Figura 3.2: Diagrama de NetANPI

Tabla 3.2: Comparación por pares de los parámetros de QoS vs. Ocupación

	QoS	NO
QoS	1	$\frac{1}{2}$
NO	2	1

Tabla 3.3: Comparación por pares del grupo QoS de NetANPI.

	Conversacional			Streaming			<i>Background</i>			Interactivo		
	TP	RP	PP	TP	RP	PP	TP	RP	PP	TP	RP	PP
TP	1	$\frac{1}{4}$	1	1	2	2	1	1	1	1	$\frac{1}{6}$	1
RP	4	1	4	$\frac{1}{2}$	1	1	1	1	1	6	1	6
PP	1	$\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{2}$	1	1	1	1	1	1	$\frac{1}{6}$	1

tenemos el caso de una aplicación del tipo *background* donde no existe preferencia de un criterio a otro.

3.3.2. Creación de la supermatriz

Para crear la supermatriz correspondiente al diagrama de red de la Figura 3.2, seguimos los siguientes pasos:

- A partir de las comparaciones hechas anteriormente por cada uno de los grupos de criterios, se plantea una matriz como la de la Ecuación 2.5.5 por cada grupo de criterios.
- Se resuelve la ecuación matricial de la Figura 2.7, por cada una de las matrices planteadas en el paso anterior.
- De la solución de cada ecuación matricial, se obtienen los vectores de prioridad locales que conforman una supermatriz como de la Figura 2.7. Específicamente para NetANPI, la supermatriz obtenida se presenta en la Figura 3.3.

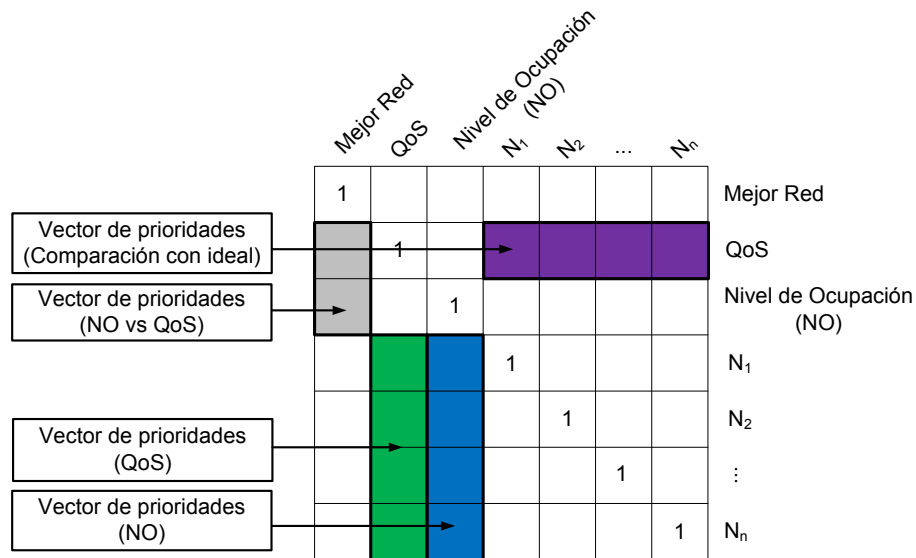


Figura 3.3: Supermatriz de NetANPI

Una vez obtenida la supermatriz se resuelve la Ecuación 2.20 obteniendo la matriz de la Figura 3.4, de esta matriz se obtiene el vector de prioridades de las opciones.

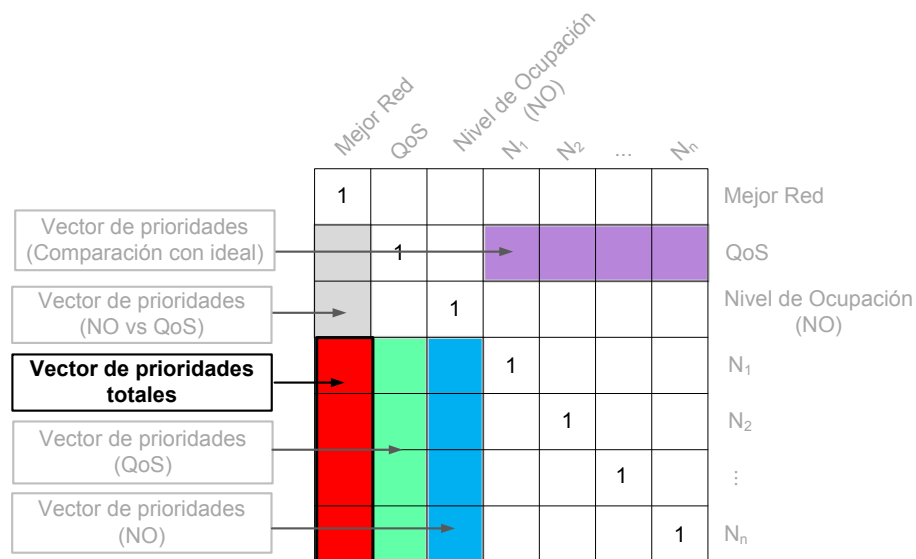


Figura 3.4: Vector de prioridades totales, resultado de la Ecuación 2.20

Evaluación de NetANPI

En este capítulo describimos cómo evaluamos el rendimiento de nuestro mecanismo de selección de red en comparación con los mecanismos MADM más citados en la literatura y presentados a detalle en la Sección 2.5. Para ello, inicialmente presentamos una metodología de evaluación que permite comparar diferentes mecanismos de selección de red a partir de la teoría de la utilidad, seguido a esto presentamos los parámetros de las simulaciones numéricas que llevamos a cabo y por último los resultados de las mismas. En este sentido, en este capítulo resolveremos dos preguntas; la primera sobre cómo evaluar diferentes mecanismos de decisión de manera objetiva y la segunda sobre cómo caracterizar diferentes redes LTE para realizar simulaciones numéricas de dichos mecanismos.

4.1. Teoría de la utilidad y el problema de selección de red

Como precisamos anteriormente en la definición del problema, en este proyecto lo que buscamos es hacer una comparación numérica de los mecanismos de selección de red del tipo MADM descritos en la Sección 2.5 con nuestra propuesta NetANPI. Sin embargo, como pudimos observar en mecanismos como ANP o AHP existe un componente subjetivo a la hora de hacer las comparaciones por pares, esto hace que comparar un mecanismo con otro no sea una tarea fácil. Por esta razón, en este proyecto incorporamos un mecanismo de selección de red que nos sirve como punto de comparación para todos los demás, éste se basa en la teoría de la utilidad y es presentado a continuación. La manera en que comparamos los resultados de este mecanismo con los demás se presenta más adelante y se basa en la distancia euclidiana.

En el entorno de la toma de decisiones y proveniente de la teoría de la economía, la utilidad se refiere al nivel de satisfacción que un bien o servicio le proporciona a un consumidor [16, 35, 36]. De allí que la utilidad pueda variar de un consumidor a otro cuando se habla del mismo bien o servicio. Esto aterrizado a nuestro problema, el consumidor es el usuario que quiere seleccionar una red u otra en términos de sus propiedades y, que el nivel de satisfacción sea diferente se refleja en el tipo de aplicación.

Existen dos grandes tipos de funciones de utilidad, las multicriterio y las unicriterio, las primeras permiten modelar varios criterios al mismo tiempo y las segundas, uno a la vez. Para nuestro caso emplearemos diferentes funciones de utilidad, una para cada parámetro y tipo de aplicación, luego se hace la suma ponderada de cada utilidad, obteniendo así la utilidad total por opción. Definimos dos tipos de parámetros, del tipo “*upward*” y del tipo “*downward*”; los primeros proporcionan mayor utilidad cuando tienen un valor alto y los segundos todo lo contrario. Se puede hacer la analogía con el término empleado en ANP y AHP cuando se establece que existen criterios del tipo costo o beneficio

En el ámbito de las redes inalámbricas, sin embargo, obtener un valor demasiado pequeño, tendiente a cero; o demasiado alto, tendiente a infinito no es posible. Por ejemplo un retardo de ida y vuelta de cero, no es posible, o un *throughput* infinito, tampoco. Por lo que para cualquier tipo de aplicación, en caso de que se tenga un criterio del tipo “*upward*” la utilidad debe ser 1 o máxima cuando se alcance cierto nivel determinado y mantenerse allí así su valor sea mayor. Caso contrario, la utilidad debe ser 0 cuando no se alcance el valor

mínimo; en caso de que el criterio sea del tipo “downward” sucede todo lo contrario. Se observa entonces que la función de utilidad que más se adecua es este problema es la función sigmoide presentada en [36], ya que proporciona las siguientes características:

- Es doblemente derivable.
- Es una función creciente.
- Es un función cóncava para todo x_j mayor que determinado valor.
- Es una función convexa para todo x_j menor que determinado valor.

Definimos entonces la función de utilidad, para un criterio del tipo “upward” x tal que: $x_\alpha \leq x \leq x_\beta < \infty$ y un punto medio x_m como sigue:

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < x_\alpha \\ \frac{\left(\frac{x-x_\alpha}{x_m-x_\alpha}\right)^\zeta}{1+\left(\frac{x-x_\alpha}{x_m-x_\alpha}\right)^\zeta} & \text{si } x_\alpha \leq x \leq x_m \\ 1 - \frac{\left(\frac{x_\beta-x}{x_\beta-x_m}\right)^\gamma}{1+\left(\frac{x_\beta-x}{x_\beta-x_m}\right)^\gamma} & \text{si } x_m < x \leq x_\beta \\ 1 & \text{si } x > x_\beta \end{cases} \quad (4.1)$$

Donde γ y ζ son parámetros que determinan la pendiente definidos como:

$$\gamma = \frac{\zeta(x_\beta - x_m)}{x_m - x_\alpha} \quad (4.2)$$

$$\zeta \geq \max\left\{\frac{2(x_m - x_\alpha)}{x_\beta - x_m}, 2\right\} \quad (4.3)$$

Un valor de ζ grande implica que el tipo de aplicación es elástica, es decir un cambio mínimo en el parámetro en cuestión afecta en gran medida el rendimiento de la aplicación, o dicho de otro modo la utilidad cambia drásticamente de un punto a otro. La función $1 - u(x)$ se emplea para un criterio del tipo “downward”. En la Figura 4.1 se presentan diferentes funciones de utilidad para diferentes valores de ζ , en ella se observa de forma gráfica, la función de utilidad para un parámetro elástico ($\zeta = 15$), un criterio inelástico ($\zeta = 3$) y un compromiso entre lo dos ($\zeta = 7$).

La utilidad total que una opción/femtocelda puede tener es:

$$U_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N u_i \quad (4.4)$$

Donde u_i es la utilidad que tiene una opción determinada para el parámetro i , y N es el número total de parámetros en consideración.

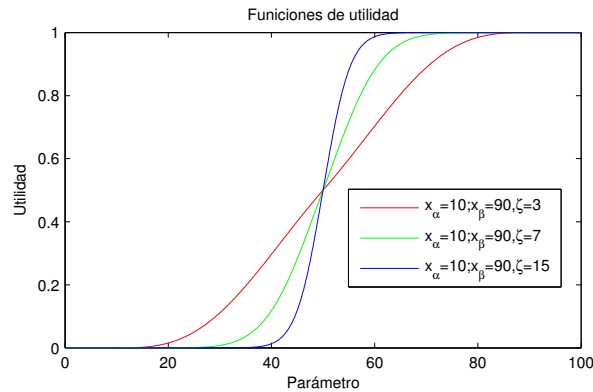
Figura 4.1: Funciones de utilidad para distintos valores de ζ

Tabla 4.1: Parámetros de las funciones de utilidad.

	TP			RP			PP			NO		
	x_α	x_β	ζ	x_α	x_β	ζ	x_α	x_β	ζ	x_α	x_β	ζ
Conversacional	65 kbps	200 kbps	3	100 ms	250 ms	9	10^{-6}	2×10^{-4}	3	0	0.75	3
Streaming	500 kbps	3 Mbps	7	200 ms	300 ms	3	10^{-8}	10^{-6}	5	0	0.75	3
<i>Background</i>	100 kbps	1 Mbps	3	300 ms	350 ms	5	10^{-8}	10^{-6}	3	0	0.75	3
Interactiva	100 kbps	500 kbps	5	65 ms	75 ms	12	10^{-6}	10^{-4}	3	0	0.75	3

Definimos entonces, una función de utilidad diferente para cada uno de los parámetros y clases de aplicación en las secciones 3.1 y 3.2, los parámetros de x_α , y x_β se presentan en la Tabla 4.1 y representan valores estándar de cada tipo de aplicación en redes LTE [37]. El valor de ζ se selecciona de acuerdo a la elasticidad de cada tipo de aplicación para cada parámetro. Como indicamos antes, una aplicación es inelástica respecto a determinado parámetro si una pequeña variación del mismo impacta dramáticamente el rendimiento de la aplicación. En [32, 38] se definen qué aplicaciones del tipo interactivo son las más inelásticas en su requerimiento de retardo extremo a extremo y qué aplicaciones de vídeo en tiempo real son inelásticas en su requerimiento de *throughput*; los valores de ζ fueron seleccionados de acuerdo a este principio. Por ejemplo, en el caso de una aplicación interactiva seleccionamos $\zeta = 12$ en el parámetro de retardo extremo a extremo, caso contrario es una aplicación del tipo *background* donde seleccionamos $\zeta = 3$ ya que no es una aplicación inelástica para ningún parámetro.

4.2. Escenario de evaluación

Como indicamos anteriormente, en esta investigación buscamos evaluar numéricamente los mecanismos de selección de red basados en MADM más citados con NetANPI, para lograr esto ejecutamos diferentes simulaciones numéricas. Los mecanismos MADM que evaluaremos son AHP, ANP (*sin incluir la comparación con red ideal, ver Anexo 2 para más detalles*), TOPSIS, ELECTRE, SAW, GRA y nuestro mecanismo NetANPI. Todos ellos programados en C++ empleando la librería ITPP, ya que provee clases y funciones de álgebra matricial, y estadísticas que permiten implementar este tipo de mecanismos eficientemente.

Para la simulación numérica, asumimos que dentro de un espacio determinado se despliega una red LTE cuya macrocelda se encuentra saturada y por lo tanto los parámetros de QoS que otorga a los usuarios disminuyen drásticamente. En ese momento se activa el mecanismo de direccionamiento de tráfico *traffic offloading* y los

Tabla 4.2: Parámetros estándar de redes LTE.

Parámetro	Media μ	Desviación estándar σ	Valor mínimo $(\mu - 2\sigma)$	Valor máximo $(\mu + 2\sigma)$
NO	50 %	22.7 %	0 %	100 %
TP	7.5 Mbps	3.75 Mbps	1 bps	15 Mbps
RP	175 ms	87.5 ms	1 μ s	350 ms
PP	10 %	5 %	10^{-9}	0.2

usuarios deben hacer uso del mecanismo de selección de red. Para simular esta situación asumimos que dentro del rango de cobertura del usuario existen diferentes femtoceldas, y que el usuario tiene acceso a la información relacionada con los parámetros de rendimiento de cada alternativa. En ese momento, se activa el algoritmo de selección de red y el usuario selecciona cuál es la opción que mejor le conviene.

Definimos entonces diferentes escenarios en donde el usuario tiene 2, 3, 4, ..., 20 alternativas dentro de su rango de cobertura. Los requerimientos de QoS de los usuarios se definen de acuerdo al tipo de aplicación que ejecute (interactiva, streaming, conversacional y *background*), y se ejecutan todos los algoritmos de selección de red antes mencionados en paralelo para definir cuál de ellos es el mejor.

Para cada punto de decisión ejecutamos 300,000 simulaciones, los parámetros de las alternativas fueron generados de acuerdo a una distribución normal con parámetros μ y σ presentados en la Tabla 4.2 y seleccionados de acuerdo a valores estándar de redes LTE [37], asumiendo que las femtoceldas se encuentran en estado estable. En la Tabla 4.3, se detallan los parámetros de simulación.

Tabla 4.3: Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Número de alternativas en cada punto de decisión	2, 3, ..., 20
Tipo de aplicación	<i>Streaming</i> , interactiva, <i>background</i> y conversacional
Número de simulaciones por punto de decisión	300,000
Intervalo de confianza	95 %
Mecanismo de referencia	Función de utilidad Sigmoide
Mecanismos MADM evaluados	NetANPI, AHP, ANP, GRA, SAW, TOPSIS, ELECTRE
Criterios de selección	NO, TP, RP, PP

Como indicamos anteriormente, debido a que los mecanismos de selección basados en MADM incorporan subjetividad dentro del proceso de toma de decisión, es difícil determinar si un mecanismo es mejor que otro. Por esta razón, empleamos la teoría de la utilidad para comparar los mecanismos y así determinar cuál es mejor para cada tipo de aplicación, incorporando un mecanismo de selección de red basado en ella aplicando los siguientes pasos:

- Se ejecuta el mecanismo de selección de red presentado en la Sección 4.1 y adaptado de [36] al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones de los demás mecanismos MADM.
- Se calcula la distancia euclidiana de acuerdo a la Ecuación 4.5 para cada punto seleccionado por cada método y el punto seleccionado por el mecanismo que emplea funciones de utilidad (ver Figura 4.2 para más detalles).
- Se hace un ranking de los mecanismos de acuerdo a la distancia euclidiana obtenida, a menor distancia el mecanismo será el más adecuado para determinado tipo de aplicación.

$$d_E(P, Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}. \quad (4.5)$$

Donde $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, y $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ son los n puntos en el espacio euclidiano n -dimensional.

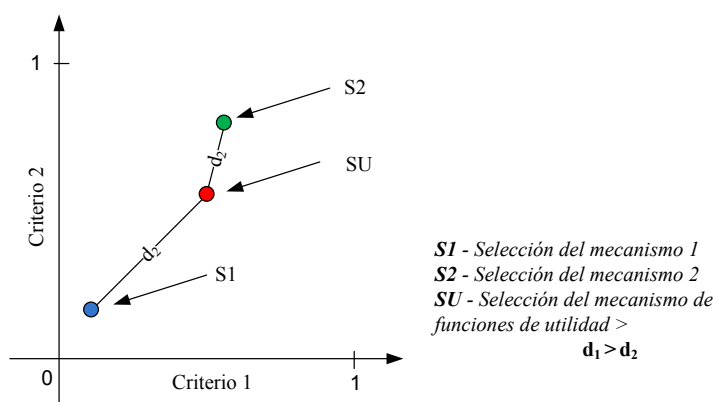


Figura 4.2: Distancia euclidiana.

En esta sección se exponen los resultados obtenidos de la simulación numérica descrita en detalle en el capítulo anterior. En la primera parte, presentamos diferentes gráficas que comparan los mecanismos con respecto a los diferentes parámetros de rendimiento de las femtoceldas para cada tipo de aplicación, y en la segunda parte los resultados obtenidos de la comparación empleando la teoría de la utilidad.

5.1. Parámetros de rendimiento

A continuación presentamos una serie de gráficas comparativas de los parámetros de rendimiento otorgados por cada uno de los mecanismos evaluados. En términos generales, todos los mecanismos otorgan mejores parámetros de rendimiento a medida que el número de opciones se incrementa, esto debido a que aumenta la posibilidad de encontrar redes que se adecuen a los parámetros requeridos por cada tipo de aplicación.

En la Figura 5.1 presentamos los resultados obtenidos para las simulaciones numéricas para una aplicación del tipo interactivo. En este caso, el mecanismo que mejor *throughput* otorga es ELECTRE seguido por TOPSIS. En términos de la pérdida de paquetes TOPSIS tiene el mejor rendimiento, seguido por AHP y ELECTRE que tienen rendimientos muy similares. NetANPI selecciona las opciones con mejor retardo extremo a extremo y ANP (sin incluir comparación con red ideal) las opciones con mejor nivel de ocupación. El mecanismo que presenta el peor rendimiento en la mayoría de los casos es SAW.

En la Figura 5.2 presentamos los resultados obtenidos para las simulaciones numéricas para una aplicación del tipo conversacional. Los resultados son similares al caso interactivo debido a que tienen requerimientos de QoS similares. En este caso, el mecanismo que mejor *throughput* otorga es ELECTRE seguido por NetANPI, el mecanismo que selecciona las opciones con mejor retardo extremo es NetANPI y el que presenta el peor rendimiento en todos los casos es SAW.

En la Figura 5.3 presentamos los resultados obtenidos para las simulaciones numéricas para una aplicación del tipo *streaming*, en este caso el mecanismo que mejor *throughput* otorga es ELECTRE seguido por NetANPI, GRA y AHP, el mecanismo que selecciona las opciones con mejor retardo extremo es NetANPI seguido por AHP y el mecanismo que presenta el peor rendimiento en la mayoría los casos es SAW.

5.2. Comparación con teoría de la utilidad

En esta sección presentamos los resultados de la comparación de los diferentes mecanismos de selección de red empleando la teoría de la utilidad y la distancia euclidiana de la Sección 4.1. Esta metodología, como explicamos anteriormente, permite comparar objetivamente todos los mecanismos de selección y arroja como resultado una clasificación de los mecanismos evaluados. La distancia euclidiana para cada uno de los mecanismos de acuerdo a la simulación se presenta en la Figura 5.4.

Los resultados nos indican que para aplicaciones del tipo *streaming* y *background* el mecanismo que presenta

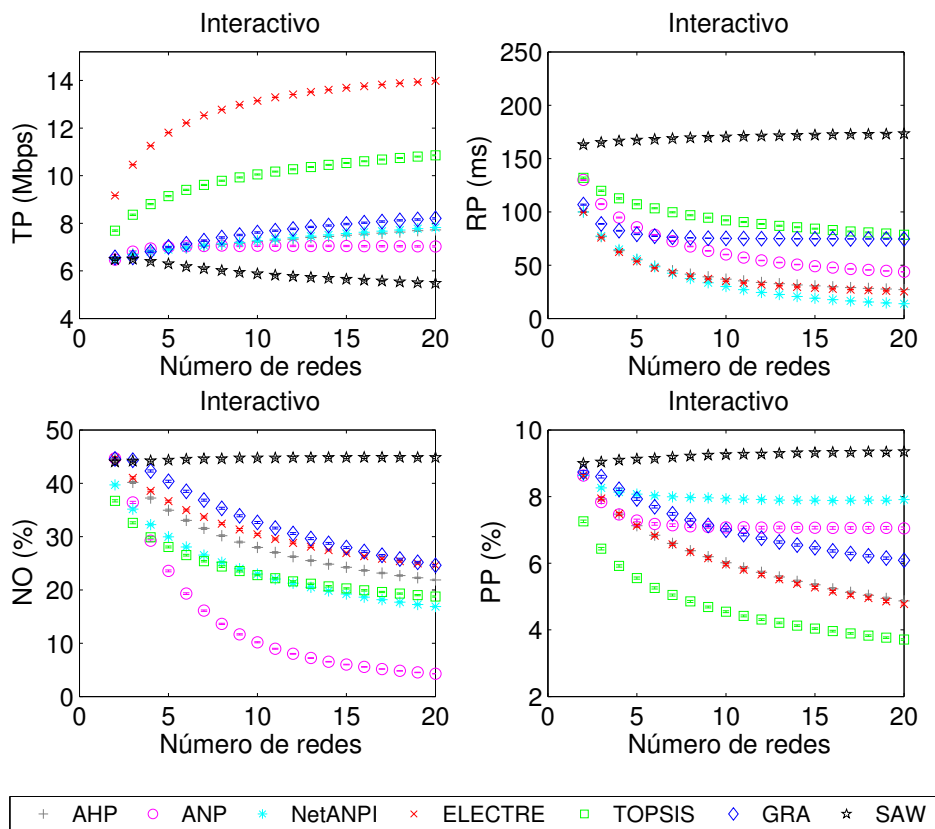


Figura 5.1: Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo interactivo.

mejores resultados es ANP, para el caso de las aplicaciones del tipo conversacional e interactivo funciona mejor nuestro mecanismo NetANPI. En todos los casos, el mecanismo que mayor distancia euclidiana tiene es SAW. También observamos que no existe gran diferencia de un mecanismo a otro cuando el número de opciones es pequeño, ya que la distancia es muy similar para los casos de dos a cuatro opciones.

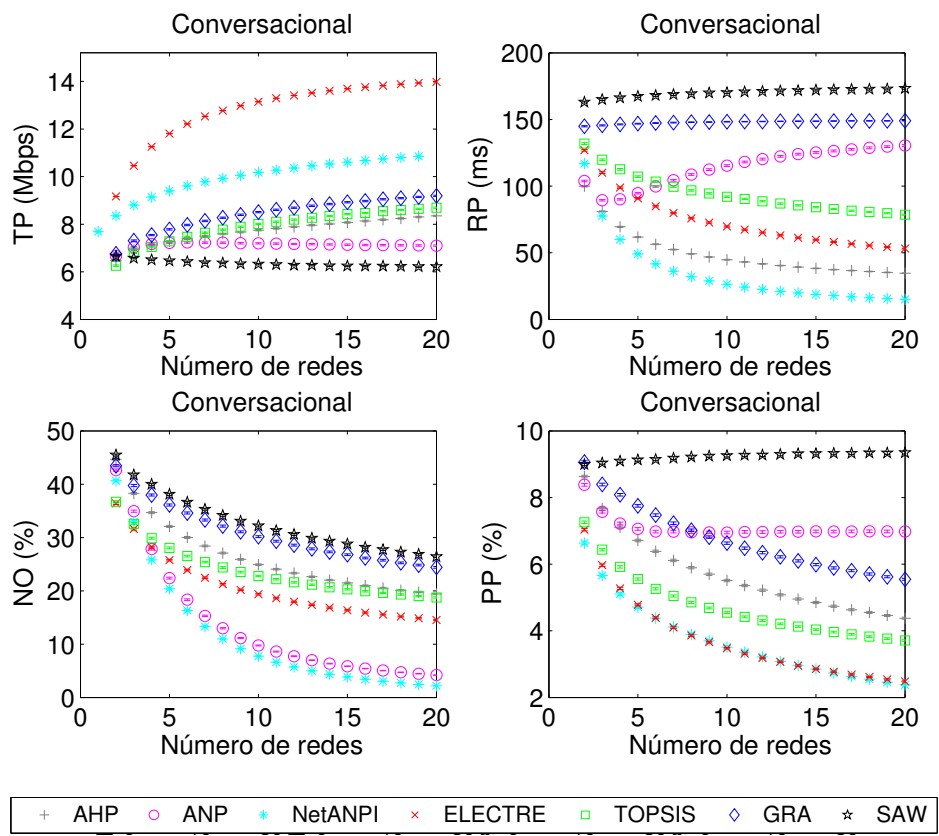


Figura 5.2: Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo conversacional.

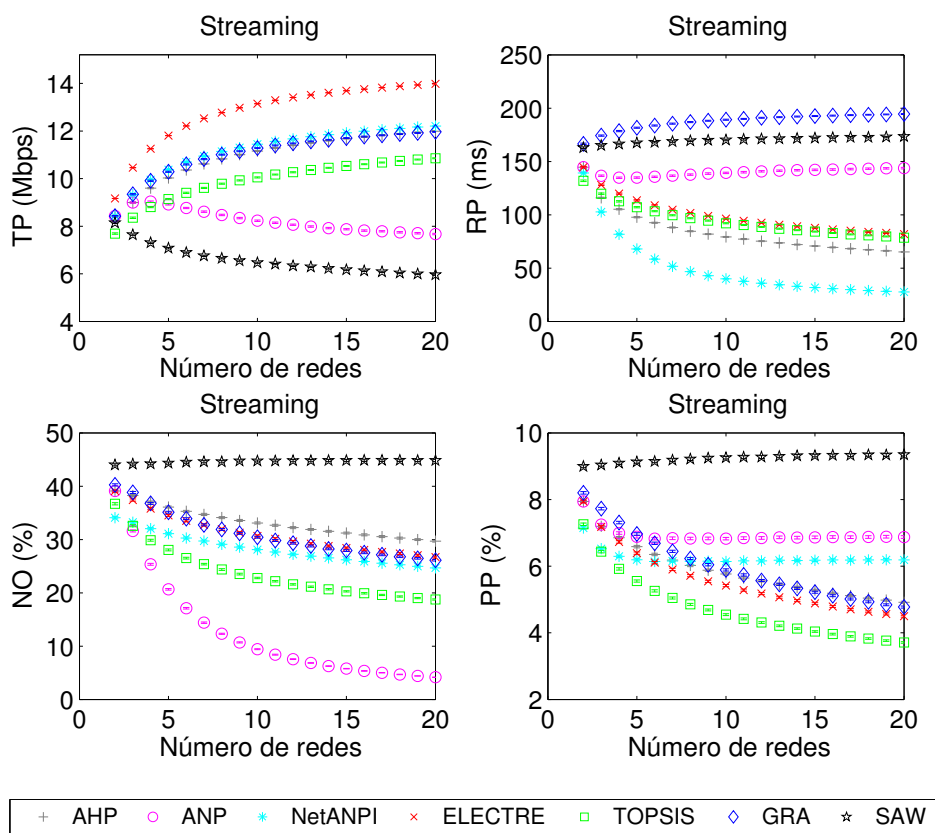


Figura 5.3: Parámetros de rendimiento, aplicación del tipo *streaming*.

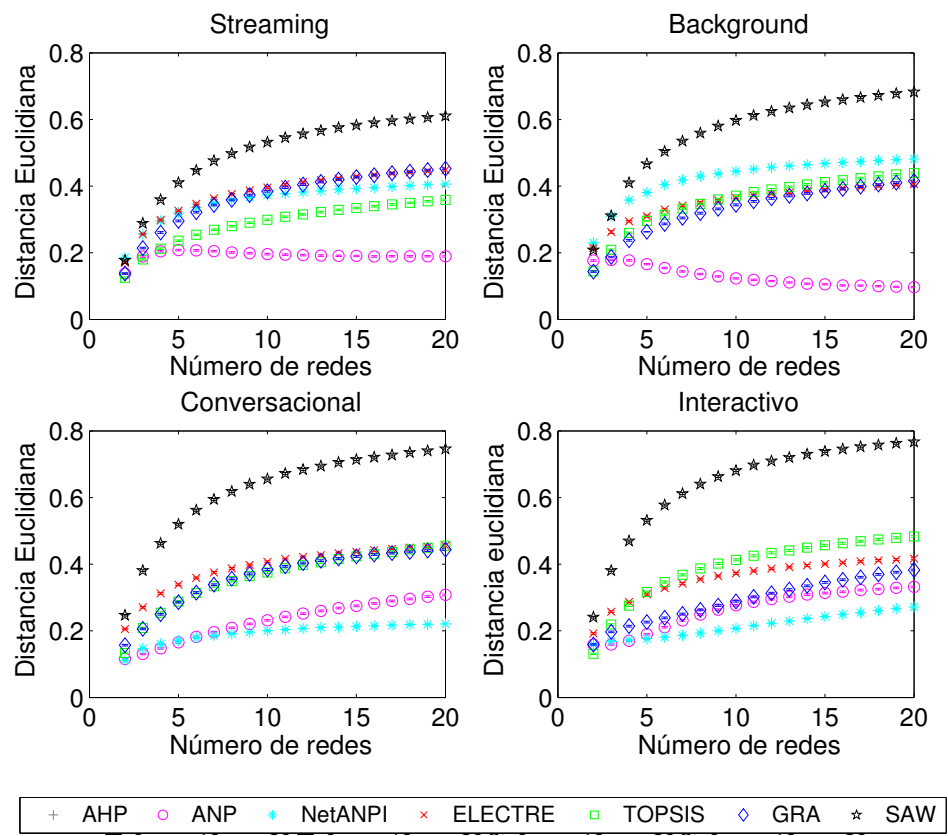


Figura 5.4: Comparación con teoría de la utilidad.

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo, propusimos un mecanismo de selección de red basado en ANP que toma en consideración la comparación de las opciones con un ideal para cuatro tipos de aplicaciones diferentes y aplicable a la técnica de *traffic offloading* en LTE denominado NetANPI. También, propusimos una metodología de comparación de diferentes mecanismos de selección de red basada en la teoría de la utilidad.

Ejecutamos diferentes simulaciones numéricas para comparar el rendimiento de los mecanismos de selección de red basados en MADM con NetANPI. A partir de estas simulaciones, demostramos que NetANPI selecciona las opciones con la mejor latencia para aplicaciones del tipo interactivo y conversacional, evidenciamos que ELECTRE selecciona en todos los casos el mejor *throughput* y que el mecanismo de selección con menor rendimiento es SAW.

A partir de la comparación de los mecanismos empleando la teoría de la utilidad hicimos evidente que la mejor opción para aplicaciones del tipo conversacional e interactivo es NetANPI. Para aplicaciones del tipo *background* y *streaming*, el mecanismo que mejor desempeño tiene es ANP sin incluir la comparación con una red ideal, esto se debe a que al ser aplicaciones muy laxas en sus requerimientos, la inclusión de una red ideal puede llegar a ser incluso contraproducente, ya que descartan opciones que podrían adecuarse mejor a los requerimientos específicos de la aplicación. De acuerdo a los resultados de las simulaciones, también demostramos que para los casos donde no existe gran cantidad de opciones (2-4) no existe gran diferencia de un mecanismo con otro.

Como trabajo futuro y proveniente de la revisión de la literatura que hicimos, en lo concerniente a las diferentes técnicas matemáticas que han sido empleadas para modelar el problema de la selección de red, además de ANP, una de las técnicas que también ha sido poco estudiada es la teoría de juegos. Esta se perfila como una buena alternativa ya que además de permitir que los usuarios seleccionen aquella opción que mejor se acople con sus necesidades, tiene también en cuenta la decisión que pueden tomar los demás usuarios, haciendo que el sistema llegue a un punto de equilibrio en el que se aproveche al máximo su capacidad total.

A.1. Proceso de normalización

Una constante en todos los mecanismos tendientes a solucionar el problema de la toma de decisiones es la normalización de los diferentes parámetros que caracterizan a cada una de las opciones, A continuación, se presentan algunas de las formas más representativas en las que se lleva a cabo este proceso. Definimos $r_{i,j}$ como el valor normalizado, $x_{i,j}$ es el elemento (i, j) de la matriz.

A.1.1. Suma ponderada

Es el más básico de todos, lo que hace es dividir cada elemento del vector entre la suma de todos los demás.

$$r_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i=1}^N x_{i,j}} \quad (\text{A.1})$$

A.1.2. Normalización de la raíz cuadrada

Este tipo de normalización permite evidenciar las diferencias pequeñas entre los elementos lo que hace es calcular la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores al cuadrado.

$$r_{i,j} = \sqrt{\frac{x_{i,j}}{\sum_{i=1}^N x_{i,j}^2}} \quad (\text{A.2})$$

A.1.3. Normalización del tipo costo-beneficio

Este tipo de normalización se lleva a cabo cuando se dividen los parámetros en dos tipos: costo o "downward", en caso de que sea un parámetro que tenga mayor preferencia si su valor es menor, y del tipo "upward" o beneficio, si tiene mayor preferencia cuando su valor es mayor. En las Ecuaciones A.3 y A.4 se presenta cada una de ellas, respectivamente.

$$r_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\hat{x}_i} \quad (\text{A.3})$$

$$r_{i,j} = \frac{\hat{x}_i}{x_{i,j}} \quad (\text{A.4})$$

Donde \hat{x} es el valor mínimo y máximo en cada caso.

A.2. Mecanismo de selección ANP sin comparar con red ideal

A fin de comparar nuestro mecanismo NetANPI con los demás, evaluamos también un mecanismo ANP de base que no tiene en cuenta la comparación con una red ideal. En este caso, también agrupamos los criterios de QoS dentro de un nodo y consideramos separadamente la ocupación. El esquema general se presenta en la Figura A.1, y la supermatriz en la Figura A.2(a). Se sigue el mismo procedimiento matemático que en NetANPI, después de hacer el análisis matricial de eigenvalores el vector de prioridades totales se presenta en la Figura A.2(b)

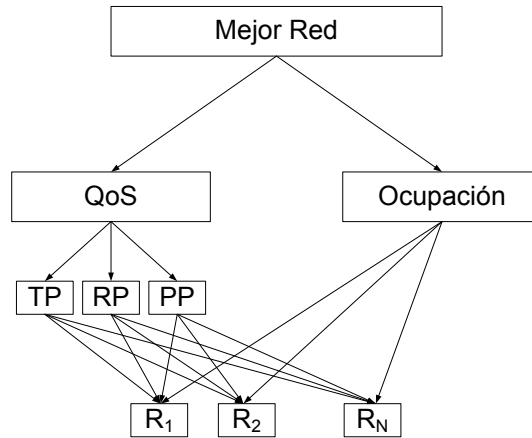


Figura A.1: Diagrama de ANP sin comparar con red ideal.

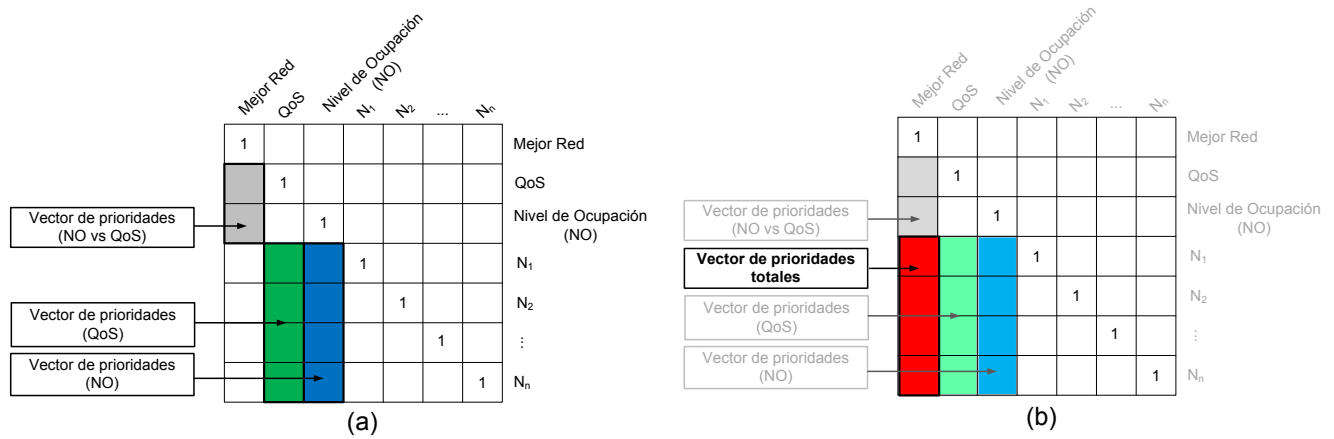


Figura A.2: Supermatriz ANP sin comparar con red ideal.

Referencias

- [1] Ericsson, "Mobility report", tech. rep., 2014.
- [2] A. Aijaz, H. Aghvami, and M. Amani, "A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives," *IEEE Wireless Communications.*, vol. 20, no. 2, pp. 104–112, 2013.
- [3] L. Wang and G.-S. G.S. Kuo, "Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks – a tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 271–292, 2013.
- [4] T. L. Saaty, "Fundamentals of the analytic network process - dependence and feedback in decision-making with a single network," *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 129–157, 2004.
- [5] B. Han, P. Hui, V. A. Kumar, M. V. Marathe, G. Pei, and A. Srinivasan, "Cellular traffic offloading through opportunistic communications," in *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Challenged networks - CHANTS*. ACM Press, 2010.
- [6] R. Maallawi, N. Agoulmine, B. Radier, and T. ben Meriem, "A comprehensive survey on offload techniques and management in wireless access and core networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2014.
- [7] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*, 1st ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2009.
- [8] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 1st ed. Academic Press, 2011.
- [9] N. Abu-Ali, A.-E. M. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, "Uplink scheduling in LTE and LTE-advanced: Tutorial, survey and evaluation framework," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239–1265, 2014.
- [10] H. Pham, X. N. Vu, and S.-H. Hwang, "Service class-aided scheduling for LTE," in *13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2011, pp. 39–43.
- [11] B. M. Sesia S., Toufik I., *The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Chichester, UK: Wiley, 2009.
- [12] J. Lim, H. Myung, K. Oh, and D. Goodman, "Proportional fair scheduling of uplink single-carrier FDMA systems," in *17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PRIMRC)*, 2006.
- [13] X. Yan, Y. A. Sekercioglu, and S. Narayanan, "A survey of vertical handover decision algorithms in fourth generation heterogeneous wireless networks," *Computer Networks*, vol. 54, no. 11, pp. 1848–1863, 2010.
- [14] M. Kassar, B. Kervella, and G. Pujolle, "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks," *Computer Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2607–2620, 2008.
- [15] E. Gustafsson and A. Jonsson, "Always best connected," *IEEE Wireless Communications.*, vol. 10, no. 1, pp. 49–55, feb 2003.
- [16] L. Wang and G.-S. G. Kuo, "Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks a tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 271–292, 2013.

- [17] M. Lahby, L. Cherkaoui, and A. Adib, "An intelligent network selection strategy based on MADM methods in heterogeneous networks," *Computing Research Repository (CoRR)*, vol. abs/1204.1383, 2012.
- [18] J. D. Martinez-Morales, U. Pineda-Rico, and E. Stevens-Navarro, "Performance comparison between MADM algorithms for vertical handoff in 4G networks," in *7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2010.
- [19] M. Lahby, L. Cherkaoui, and A. Adib, "Novel validation approach for network selection algorithm by applying the group MADM," in *International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, 2013, pp. 1–4.
- [20] W. Zhang, "Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks," in *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2004.
- [21] S. Maaloul, M. Afif, and S. Tabbane, "A comparative study of AHP vs ANP models for weighting the context-awareness criteria process in the radio access network's selection," in *10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2013, pp. 1–5.
- [22] S. Datta, S. Dhar, R. N. Bera, and A. Ray, "ANP based vertical handover algorithm for vehicular communication," in *1st International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 2012.
- [23] F. Bari and V. Leung, "Application of ELECTRE to network selection in a heterogeneous wireless network environment," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2007.
- [24] J. Gallardo-Medina, U. Pineda-Rico, and E. Stevens-Navarro, "VIKOR method for vertical handoff decision in beyond 3g wireless networks," in *6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, nov 2009.
- [25] E. Stevens-Navarro and V. Wong, "Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks," in *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference (VTC)*, 2006.
- [26] R.-A. Vaca-Ramirez and V. Ramos, "A vertical handoff decision algorithm which considers the uncertainty during the decision making process," in *International IFIP Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, 2009, pp. 1–6.
- [27] C. Ramirez-Perez and V. Ramos, "A QoS hierarchical decision scheme for vertical handoff," in *8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDCS)*, Mar. 2012, pp. 1–4.
- [28] —, "On the effectiveness of multi-criteria decision mechanisms for vertical handoff," in *27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2013, pp. 1157–1164.
- [29] M. Lahby, L. Cherkaoui, and A. Adib, "An intelligent network selection strategy based on MADM methods in heterogeneous networks," *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 4, no. 1, pp. 83–96, 2012.
- [30] J.-J. H. Gwo-Hshiang Tzeng, *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.
- [31] T. Saaty, *Decision Making with Dependence and Feedback The Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh, 1996.
- [32] L. A. DaSilva, "Pricing for QoS-enabled networks: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 3, no. 2, pp. 2–8, 2000.
- [33] M. Marchese, *QoS Over Heterogeneous Networks*. Wiley Publishing, 2007.
- [34] A. Elnashar, M. A. El-saidny, and M. R. Sherif, *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks*. Wiley-Blackwell, 2014.
- [35] P. Fishburn, *Utility theory for decision making*. New York: Wiley, 1970.

- [36] Q.-T. Nguyen-Vuong, Y. Ghamri-Doudane, and N. Agoulmine, "On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks," in *IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, 2008.
- [37] A. ElNashar, M. A. El-Saidny, and M. Sherif, *Design Deployment And Performance Of 4G LTE Networks*. Wiley, 2014.
- [38] S. Shenker, "Fundamental design issues for the future Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 1176–1188, 1995.