



Universitat de les
Illes Balears



Treball Final de Grau

Assignació de recursos ràdio en xarxes femtocel·lulars

MARÍA ÁNGELES DENTI VILA

Tutor

Jaume Ramis Bibiloni

Escola Politècnica Superior
Universitat de les Illes Balears
Palma, 5 de setembre de 2016

SUMARI

Sumari	i
Índex de figures	iii
Acrònims	v
Resum	vii
1 Introducció	1
2 Tecnologies utilitzades	3
2.1 LTE	3
2.1.1 Introducció	3
2.1.2 Evolució de Global System for Mobile communications (GSM) fins a Long Term Evolution (LTE)	4
2.1.3 Característiques generals	5
2.2 Femtocel·les	8
2.2.1 Introducció	8
2.2.2 Característiques	9
2.2.3 Aspectes tècnics de les femtocel·les	9
2.2.4 Infraestructura de la xarxa	10
2.2.5 Estandarització pel 3rd Generation Partnership Project (3GPP)	12
3 Desenvolupament	15
3.1 Model de sistema	15
3.2 Round Robin	18
3.3 Algoritme DS-aware	19
3.3.1 Assignació de subcanals amb qualitat de servei garantida	19
4 Resultats i discussió	21
4.1 Introducció	21
4.2 Estructura cel·lular	21
4.3 Resultats i discussió	24
4.3.1 Estudi de la capacitat total a mesura que augmenta el nombre de femtocel·les	25
4.3.2 Estudi de la capacitat total a mesura que augmenta la taxa mínima Ru	28

4.3.3	Estudi del nombre d'usuaris sensibles al retard Delay-Sensitive (DS) que assoleixen la taxa de requeriment de qualitat de servei Quality of Service (QoS) mínima R_u	32
4.3.4	Conclusió	33
5	Conclusions	35
	Bibliografia	37

ÍNDIX DE FIGURES

2.1	Evolució de la xarxa desde GSM fins a LTE	4
2.2	Evolució de la xarxa desde GSM fins a LTE: velocitats	4
2.3	Interfícies X2 i S1	5
2.4	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) and Single Carrier Frequency Divison Multiple Access (SC-FDMA)	7
2.5	Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)	8
2.6	Home eNB (HeNB)	8
2.7	Estructura de xarxa femtocel·lular	11
2.8	Estructura de connexió d'una femtocel·la dins una casa	11
3.1	Model de sistema: topologia	15
3.2	Gràfic del sistema	17
3.3	Planificador Round Robin	18
4.1	Diagrama de la macrocel·la	22
4.2	Diagrama de la macrocel·la (ampliació)	23
4.3	Round Robin: Capacitat total per totes les femtocel·les vs nombre de femto- cel·les K	25
4.4	Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb cap usu- ari DS vs nombre de femtocel·les K	26
4.5	Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb nombre aleatori d'usuaris DS vs nombre de femtocel·les K	27
4.6	Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb 2/2 i 3/4 usuaris sensibles al retard vs nombre de femtocel·les K	27
4.7	Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les vs nombre de femtocel·les K	28
4.8	Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les i tots els usuaris DS vs Ru	29
4.9	Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs 1 i 2 usuaris DS de 2 i 4 usuaris respectivament	29
4.10	Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs 1 i 2 usuaris 'best-effort' de 2 i 4 usuaris respectivament	30
4.11	Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs Ru	31
4.12	Algoritme DS-aware: Capacitat total usuaris DS per 10 femtocel·les vs Ru	31
4.13	Algoritme DS-aware: Capacitat total usuaris 'best-effort' per 10 femtocel·les vs Ru	32

4.14 Algoritme DS-aware: Percentatge d'usuaris DS que assoleixen la taxa mínima Ru vs taxa mínima Ru	33
--	----

ACRÒNIMS

ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line

IP Internet Protocol

HSPA High Speed Packet Access

3GPP 3rd Generation Partnership Project

LTE Long Term Evolution

E-UTRAN Evolved Universal Terrestrial Access Network

E-UTRA Evolved Universal Terrestrial Access

EPS Evolved Packet System

3GPP2 3rd Generation Partnership Project 2

GSM Global System for Mobile communications

GPRS General Packet Radio Service

SINR signal-tointerference-plus-noise ratio

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

TDD Time Division Duplexing

FDD Frequency Division Duplexing

SC-FDMA Single Carrier Frequency Divison Multiple Access

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

MAC Medium Access Control

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

eNB evolved NodeB

HeNB Home evolved NodeB

TTI	Transmission Time Interval
TB	Transport Block
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
ARQ	Automatic Repeat Request
FEC	Forward Error Correction
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
EPC	Evolved Packet Core
QoS	Quality of Service
VoIP	Voice over IP
2G	Second generation
3G	Third generation
TDMA	Time Division Multiple Access
TFG	Treball de Fi de Grau
MBS	Macro Base Station
FBS	Femto Base Station
DS	Delay-Sensitive
DT	Delay-Tolerant
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
AWGN	Additive white Gaussian noise
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
IMS	Internet Media Sub-System
SIP	Session Initiation Protocol
RAN	Radio Access Network
UMA	Unlicensed Mobile Access
PLMN ID	“Public Land Mobile Network Identification

RESUM

Un dels temes més controvertits dins les diferents comunitats de normalització que treballen en la definició dels sistemes 4G són les femtocel·les. Una femtocel·la és una estació base petita i de poca cobertura (normalment sols dóna cobertura a una casa o a una oficina). Aquesta estació base es troba connectada a la xarxa troncal a través d'una connexió de banda ampla (ADSL o fibra).

S'ha demostrat que la major part del tràfic produït pels usuaris es troba a l'interior de les cases i/o edificis. Moltes vegades aquest tràfic es troba limitat per la poca cobertura cel·lular que arriba a l'interior dels habitatges. Per tal de resoldre aquest problema, es va pensar a encaminar tot aquest tràfic originat a l'interior dels edificis cap a la xarxa cel·lular a través d'una estació base femto. Així els usuaris tindran una major capacitat i es podrien estalviar recursos de l'estació base macro, fet que implica una reducció de costos de manteniment i d'instal·lació de l'operador. Les femtocel·les operen en una banda de freqüència amb llicència i subjecta a regulacions. Estan classificades en diferents grups, oberts o tancats. Els grups tancats són els que l'estació base femto sols proporciona servei als usuaris registrats, mentre que en els grups oberts dóna servei a tots els usuaris que es trobin dins el seu radi de cobertura.

L'objectiu d'aquest Treball de Fi de Grau (TFG) és estudiar l'assignació de recursos ràdio en un sistema heterogeni amb diferents femtocel·les de grup-tancat repartides dins el radi de cobertura d'una estació base macro (macrocel·la), definit d'acord amb els requisits 4G. Es distingirà entre dos tipus d'usuaris, uns amb requeriments de qualitat de servei (QoS) i altres 'best-effort'. La idea és calcular la interferència que poden experimentar els usuaris femto i, posteriorment, derivar la relació senyal-renou més interferència (SNIR). A partir d'això, es pot extreure la capacitat de cada un dels usuaris femto. Aquesta informació proporcionarà una bona indicació sobre els rendiments assolibles i per tant, permetrà estudiar la forma d'optimitzar els diferents paràmetres de rendiment del sistema.

INTRODUCCIÓ

Les xarxes sense fils es quedaven enrere a l'hora de cobrir les necessitats de la societat actual, per això es va crear un nou estàndard de comunicacions mòbils anomenat **LTE**, desenvolupat per l'organització **3GPP**.

Aquest nou estàndard utilitza una interfície ràdio (a nivell físic) completament nova respecte a Universal Mobile Telecommunications System (**UMTS**) (Third generation (**3G**)) i **GSM** (Second generation (**2G**)). Aquesta interfície es basa en **OFDMA** per l'enllaç de baixada (Downlink) i en **SC-FDMA** per l'enllaç de pujada (Uplink). La modulació elegida per part del **3GPP** pel seu nou estàndard fa que les diferents tecnologies d'antenes (Multiple-Input Multiple-Output (**MIMO**)) tinguin una major facilitat d'implementació.

LTE es va desenvolupar, en gran part, per cobrir les següents necessitats:

- El volum de dades consumit per la societat fa necessària una major velocitat de descàrrega i de pujada.
- Tant operadors com fabricants volen un estàndard menys complex i que sigui menys costós que els estàndards que hi ha hagut fins ara.
- Es tracta d'un estàndard robust per fer front a la competitivitat d'aquest sector en el futur.

LTE és una tecnologia estable que permet altes taxes de bits amb baixa latència. La taxa de baixada pot arribar a pics de 173 Mbps i la de pujada fins a pics de 86 Mbps, amb dues antenes base i dues antenes en el terminal (pot arribar fins a 300 Mbps de baixada si es tenen 4x4 antenes).

Tot i que **LTE** és un estàndard robust i estable, la cobertura cel·lular convencional (normalment macrocel·lular) dins els edificis es veu afectada per les pèrdues, fet que

genera que moltes vegades aquesta cobertura sigui insuficient per a les necessitats dels usuaris.

Una de les solucions proposades per a la solució d'aquest problema va ser la creació de petites xarxes a través de microcel·les, però es tracta d'una solució que pot resultar molt costosa i poc eficient per als proveïdors. Per això, es va pensar en la instal·lació d'antenes femtocel·lulars a l'interior dels edificis, també conegudes com a *Home base-stations*. Es tracta d'una solució senzilla i còmoda, tant per l'usuari com per als operadors de serveis, ja que l'usuari tindrà un augment de la capacitat (per tant, del rendiment) dins l'edifici o la casa i per als proveïdors és una solució que ajuda a estalviar recursos de l'estació base macrocel·lular, així com una reducció dels costos de manteniment i d'instal·lació.

Així, el tràfic produït a l'interior dels edificis pot ser encaminat a la xarxa mòbil utilitzant una estació base femto. Normalment, aquesta estació base femto es connecta a la xarxa del proveïdor de servei a través d'una connexió de banda ampla cablejada, com Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) o fibra òptica. L'estació base femto es comunica amb el telèfon mòbil de l'usuari i les cridades de veu es converteixen en paquets de veu sobre Internet Protocol (IP) (Voice over IP (VoIP)). Aquests paquets es transmeten a través d'aquesta connexió de banda ampla.

A l'estudi realitzat a n'aquest Treball de Fi de Grau (TFG) es considera un entorn on es té una macrocel·la amb estació base macro (Macro Base Station (MBS)) en el centre. Dins el radi de cobertura de la macrocel·la es repartiran una sèrie de femtocel·les. Dins cada una de les femtocel·les hi haurà diferents usuaris (usuaris sensibles al retard (DS i usuaris 'best-effort').

Tenint en compte aquest context, es realitza l'assignació dels recursos ràdio als usuaris femto, distingint entre usuaris sensibles al retard DS i usuaris no sensibles al retard. Aquesta assignació s'ha realitzat amb diferents algorismes i planificadors, com l'Algorisme DS-aware [1] i el planificador Round Robin. Així, es realitzaran diferents estudis en distints entorns i es compararà l'eficiència de cada un dels mètodes.

Després d'aquesta petita introducció feta del context, la definició i la solució proposta al problema d'aquest TFG, en els següents capítols s'anirà desenvolupant i aprofundint en cada un d'aquests punts.

En el següent capítol (capítol 2) s'explicaran de forma més extensa i amb més detall les tecnologies involucrades en el problema considerat. A continuació, en el tercer capítol, s'explicarà el desenvolupament del problema i de la solució, explicant el model del sistema, les passes seguides per a l'obtenció de la solució i els algorismes utilitzats a l'assignació dels recursos als usuaris. El quart capítol és on es mostraran els resultats obtinguts i on es farà una anàlisi en profunditat de cada un dels diferents resultats. Finalment, en el darrer capítol s'argumentaran les principals conclusions extretes d'aquest TFG.

TECNOLOGIES UTILITZADES

En aquest capítol s'explicarà de forma més detallada cada una de les tecnologies involucrades en el desenvolupament d'aquest estudi.

Per començar, s'explicarà què és **LTE** i es donarà una visió amb més detall del seu funcionament i en què consisteix. Seguidament, es definiran què són les femtocel·les, quan són un element útil i, finalment, els pros i les contres que té la seva utilització.

2.1 LTE

2.1.1 Introducció

L'augment de l'ús de dades en telèfons mòbils, com poden ser ús d'aplicacions, jocs online o la descàrrega de contingut multimèdia, implica la necessitat de noves tecnologies per moure tot aquest nou tràfic provocat per les noves necessitats de la societat actual, ja que la tecnologia que hi havia fins al moment (**UMTS**) es quedava enrere i no podia fer front a totes aquestes noves demandes.

Per això **3GPP** va voler avançar-se als seus competidors sobre altres tecnologies amb l'ús d'**LTE**, oferint millor qualitat de servei (**QoS**) per realitzar qualsevol tipus de tràfic de dades extrem-a-extrem utilitzant el protocol d'Internet (**IP**). També ofereix la possibilitat de realitzar tràfic de veu sobre IP (**VoIP**) i suportar altres tipus de serveis com poden ser vídeo streaming, jocs en línia, vídeo en temps real, etc...

LTE o el Evolved Universal Terrestrial Access Network (**E-UTRAN**), introduït en el Release8 de **3GPP**, és la part d'accés al Sistema de paquets evolucionat (Evolved Packet System (**EPS**)). Els principals requisits per l'accés a la nova xarxa són alta eficiència espectral, altes velocitats de dades pic, temps d'anada i tornada curta, flexibilitat en la freqüència i en l'amplada de banda.

2.1.2 Evolució de GSM fins a LTE

GSM va ser desenvolupat per dur a terme serveis en temps real, utilitzant una commutació de circuits (Fig. 2.2), ja que a través d'una connexió de circuits commutats els serveis de dades aconseguien unes taxes molt baixes.

El primer pas cap a la solució de la commutació de paquets utilitzant el protocol IP ve donada amb l'evolució de GSM a General Packet Radio Service (GPRS), utilitzant el mateix medi de transmissió i mètode d'accés, Time Division Multiple Access (TDMA) [2].

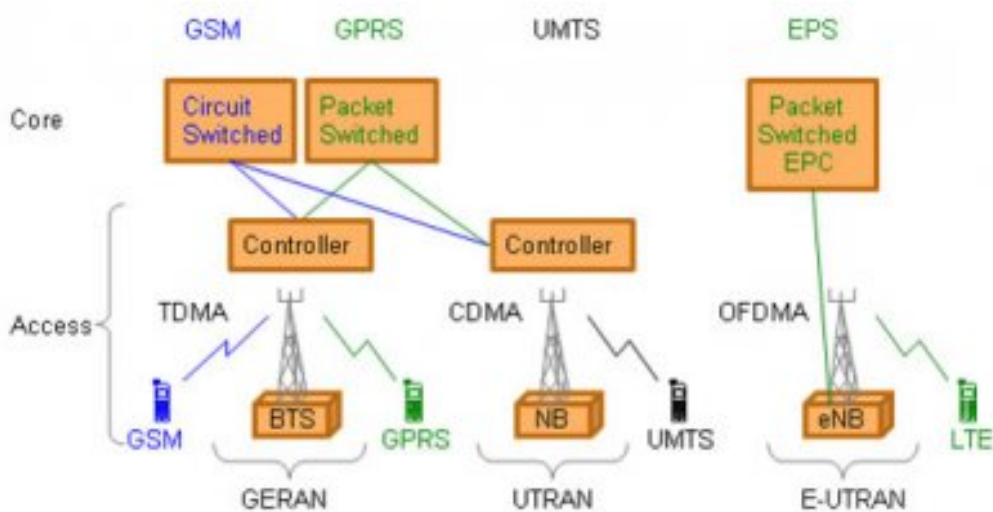


Figura 2.1: Evolució de la xarxa desde GSM fins a LTE

Per aconseguir majors velocitats de dades amb UMTS, es va desenvolupar una nova tecnologia d'accés Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA). La xarxa d'accés amb UMTS emula una connexió de circuits commutats per a serveis en temps real i connexió de commutació de paquets per serveis de comunicació de dades (Fig. 2.2). En UMTS, l'adreça IP s'assigna a l'estació base de l'usuari quan s'estableix un servei de comunicació de dades i s'alliberen quan s'abandona el servei. Els serveis de comunicació de dades entrants, per tant, segueixen dependent de la central de commutació de circuits per paginació.

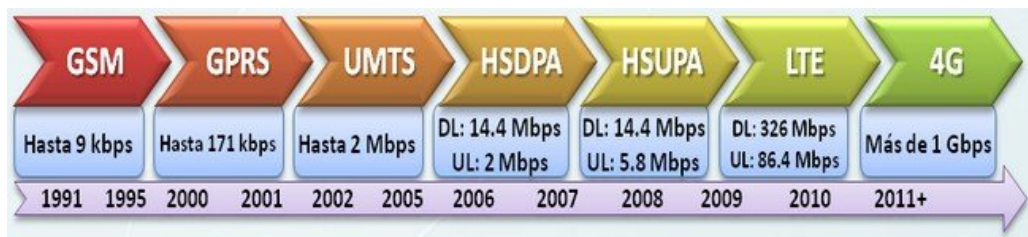


Figura 2.2: Evolució de la xarxa desde GSM fins a LTE: velocitats

El sistema **EPS** es basa pràcticament tot en **IP**. Tant els serveis en temps real com els serveis de comunicació de dades es realitzaran pel protocol **IP**. L'adreça **IP** s'assigna quan el mòbil està encès i s'allibera quan s'apaga. La nova solució d'accés al medi a **LTE** es basa en Orthogonal Frequency Division Multiplexing (**OFDM**), i en la combinació de la modulació d'ordre superior (fins 64QAM), amb grans amplades de banda (fins a 20 MHz) i en la multiplexació espacial en l'enllaç descendent (fins 4x4). Gràcies a tot això es poden aconseguir altes taxes de velocitat, tant de baixada com de pujada. La taxa de dades màxima teòrica l'enllaç ascendent és de 75 Mbps, i en l'enllaç descendent, utilitzant la multiplexació espacial, la taxa pot arribar fins a 300 Mbps.

2.1.3 Característiques generals

La xarxa d'accés **LTE** és una xarxa d'estacions base, evolved NodeB (**eNB**), formant una arquitectura plana (Fig. 2.3). No hi ha cap controlador intel·ligent centralitzat, i les estacions eNBs s'interconnecten mitjançant la interfície X2 i es connecten cap a la xarxa central per la interfície S1 (Fig. 2.3). La raó per distribuir la intel·ligència entre les estacions base a **LTE** és per accelerar l'establiment de la connexió i reduir el temps requerit per als traspassos. Per a l'usuari final, el temps de preparació de la connexió per a una sessió en temps real és fonamental en molts casos, sobretot en els jocs *online*. El temps per a un traspàs és essencial per als serveis en temps real on els usuaris finals tendeixen a acabar les trucades si el lliurament tarda massa temps [2].

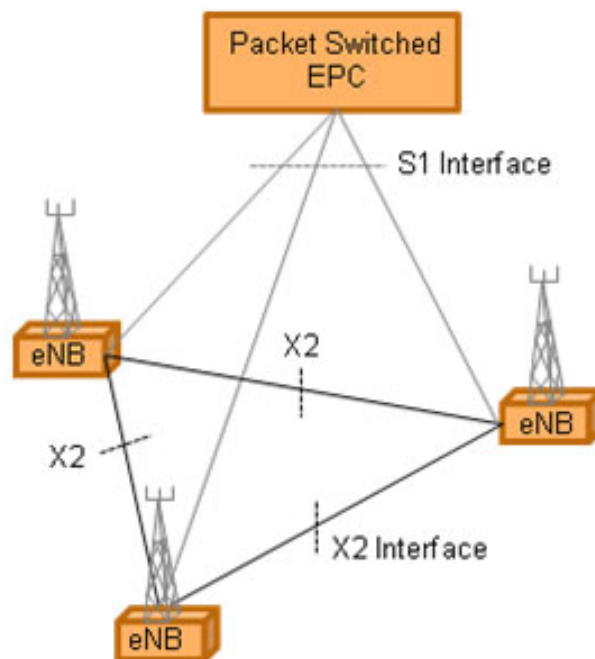


Figura 2.3: Interfícies X2 i S1

Un altre avantatge de distribuir la xarxa és que la capa de protocol Medium Access Control (**MAC**), que és responsable de la planificació, està present només a l'usuari i a l'estació base. Això permet una comunicació ràpida entre l'**eNB** i l'usuari.

El planificador és un component clau per a la consecució d'un recurs de ràdio de forma ràpida i eficient. La transmissió de l'interval de temps (Transmission Time Interval (**TTI**)) s'estableix en només 1 ms.

Durant cada **TTI**, el planificador de l'**eNB** ha de:

- Considerar l'entorn físic ràdio. Els usuaris informen de la seva qualitat de ràdio rebuda, com un input per al planificador per decidir quin esquema de modulació i codificació utilitzar. La solució es basa en una adaptació ràpida per canalitzar les variacions, utilitzant Hybrid Automatic Repeat Request (**HARQ**) (Hybrid Automatic Repeat Request) i adaptant les taxes.

HARQ és una combinació de codificació Forward Error Correction (**FEC**) de taxa alta i control d'errors Automatic Repeat Request (**ARQ**). Les dades originals es codifiquen amb **FEC** i els bits de paritat poden ser directament enviats amb el missatge o transmesos per petició d'un usuari que ha rebut i detectat un missatge amb errors.

- Donar prioritat a les necessitats de qualitat de servei **QoS** entre els usuaris. **LTE** és compatible amb serveis en temps real, tan sensibles al retard, així com serveis de comunicació de dades que requereixen velocitats altes.
- Informar els usuaris dels recursos de ràdio assignats. L'**eNB** planifica l'enllaç de pujada i de baixada de cada usuari. Per a cada usuari planificat en un **TTI**, les dades d'usuari es transportaran en un Transport Block (**TB**). A l'enllaç de baixada pot haver-hi un màxim de dos **TB** generats per cada usuari per cada **TTI**, si s'utilitza multiplexació espacial.

El **TB** es transporta per un canal de transport. **LTE** té un menor nombre de canals comparat amb **UMTS**. Des del punt de vista de l'usuari només hi ha un canal de transport compartit en cada direcció. El **TB** que és enviat per un canal, pot contenir bits multiplexats de diferents serveis.

Per tal d'aconseguir una alta eficiència espectral ràdio, així com habilitar una planificació eficient en temps i domini de freqüència, el **3GPP** va elegir un accés múltiple utilitzant múltiples portadores. Per l'enllaç descendent, es va seleccionar **OFDMA** i per a l'enllaç ascendent **SC-FDMA** (Fig. 2.4) [2].

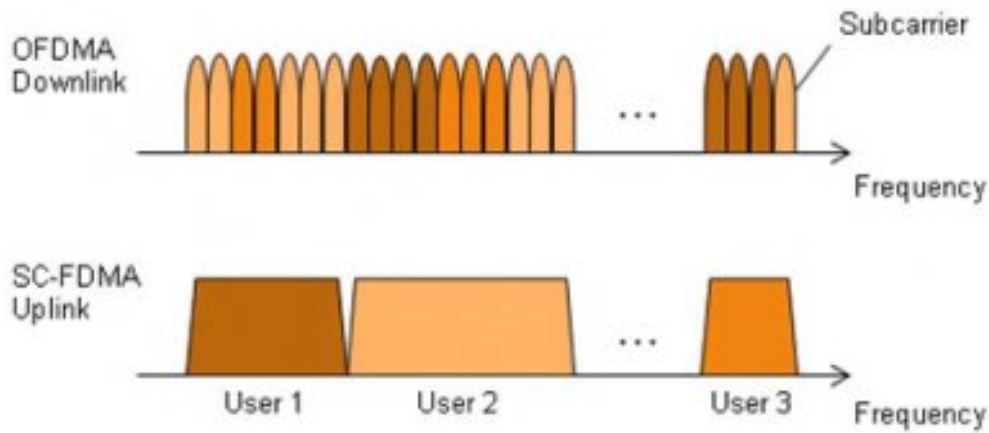


Figura 2.4: OFDMA and SC-FDMA

OFDM és una tecnologia multiportadora que subdivideix l'amplada de banda disponible en una multitud de subportadores ortogonals de banda estreta mútua. Aquestes subportadores OFDMA es poden compartir entre diversos usuaris. La solució OFDMA genera una elevada Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), fet que provoca que es requereixin costoses etapes de potència amb altes exigències de linealitat, el que augmenta el consum d'energia per al remitent. Això no és problema en el eNB, però conduiria a terminals molt cars. Per tant es va seleccionar una solució diferent per a l'usuari. Com es mostra a la Fig. 2.4, la solució de SC-FDMA genera un senyal amb característiques de portadora simple, per tant, amb un PAPR baixa.

Per habilitar el possible desplegament a tot el món, es dona suport a la major quantitat de requisits normatius com sigui possible. LTE està desenvolupat per a una sèrie de bandes de freqüència, bandes operatives Evolved Universal Terrestrial Access (E-UTRA), que actualment van des de 700 MHz fins a 2,7 GHz. Les amplades de banda disponibles també són flexibles a partir d'1,4 MHz fins a 20 MHz. LTE també està preparat per suportar tant la tecnologia de dúplex per divisió de temps (Time Division Duplexing (TDD)), així com dúplex per divisió de freqüència (Frequency Division Duplexing (FDD)). En el Release8 hi ha 15 bandes especificades per FDD i 8 bandes per TDD. En el Release9 es van afegir quatre bandes més per FDD. Al Release9 també es varen afegir, per exemple, serveis Multimèdia Broadcast Multicast (MBMS), i Home evolved NodeB (HeNB), (Fig. 2.5). MBMS s'utilitza per proporcionar informació de difusió a tots els usuaris, per exemple, la publicitat, i multicast a un grup tancat de subscriptors a un servei específic, per exemple, la transmissió de televisió. HeNBs són introduïdes principalment per proporcionar cobertura en interiors, a les llars o oficines. La HeNB és un eNB de baixa potència que s'utilitza en petites cel·les o femtocel·les. Normalment pertanyen al client, desplegadas sense cap planificació de xarxa i connectades a l'Evolved Packet Core (EPC) dels operadors [2].

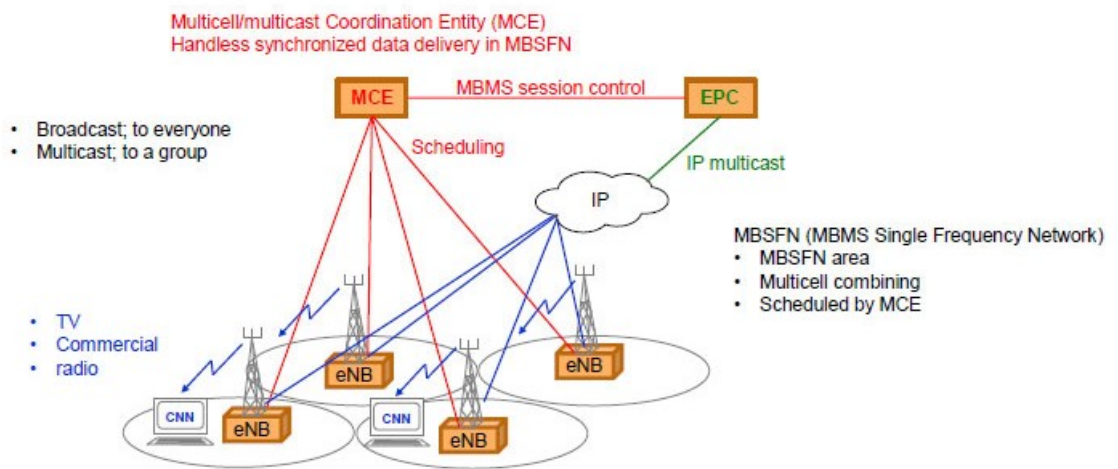


Figura 2.5: MBMS

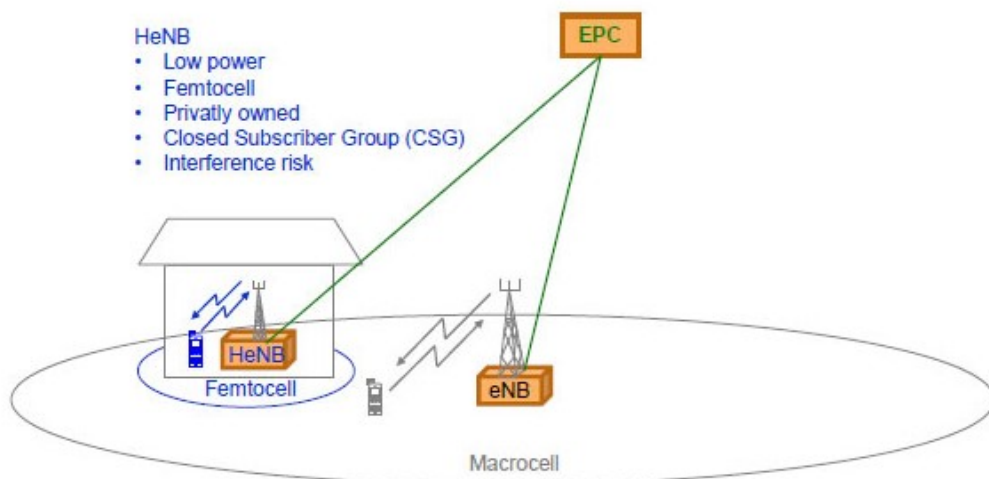


Figura 2.6: Home eNB (HeNB)

2.2 Femtocel·les

2.2.1 Introducció

El volum de dades generat per els usuaris en xarxes sense fils cada vegada augmenta de forma més significativa. Diversos estudis [3] han demostrat que més del 50% del tràfic sense fils de cridades de veu i més del 70% del tràfic de dades són generats a l'interior de cases i/o edificis, cosa que fa que els estàndards de 3GPP, High Speed Packet Access (HSPA), o el de 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2), LTE, no proporcionin una bona cobertura a l'interior dels edificis i, per tant, el servei que rep

l'usuari no és l'esperat.

Aquest problema es va intentar solucionar amb la instal·lació de microcel·les dins la macrocel·la, però aquesta és una solució molt cara per a les operadores, ja que requereix la instal·lació de moltes estacions base dins una mateixa macrocel·la.

Per això es va pensar en la instal·lació de femtocel·les a l'interior dels edificis que tinguessin problemes amb la cobertura rebuda per l'estació base macro. Una femtocel·la és una estació base de petites dimensions i de poca potència, alhora que són bastant econòmiques. Ha estat especialment dissenyada per l'ús dins cases, llars o petits negocis. Aquesta estació base femto es troba connectada a la xarxa del proveïdor a través d'una connexió de banda ampla, per on passa tot el tràfic rebut a la xarxa cel·lular. Així, les cridades de veu es converteixen en paquets de veu sobre IP.

Les femtocel·les operen en una banda de freqüència amb llicència, subjectes a regulacions (a diferència de les xarxes WI-FI). En funció de si les estacions base femto proporcionen servei d'usuaris registrats o a qualsevol usuari, poden ser classificades com a grup-tancat (sols usuaris registrats) o grup-obert (qualsevol usuari).

2.2.2 Característiques

Les característiques principals a favor de l'ús d'estacions base femto són:

- **Millora la capacitat i la cobertura.** A conseqüència de la poca distància entre mòbil i estació base, les femtocel·les poden transmetre amb una menor energia i millor relació senyal-renou (signal-to-interference-plus-noise ratio (**SINR**)). A causa de la reducció d'interferències, es poden assignar més usuaris en una determinada regió de l'espectre, augmentant l'eficiència espectral de la zona.
- **Millora la fiabilitat de les macrocel·les.** Les femtocel·les alliberen tràfic a les estacions base macro. Això permet que les macrocel·les puguin proporcionar tots els seus recursos als usuaris mòbils.
- **Reducció dels costos.** El desplegament de xarxes femtocel·lulars reduirà notablement la necessitat d'afegir noves estacions base macro. Un estudi recent [4] mostra com els costos operatius d'una macrocel·la ronda els 60 milions de dòlars, pels 200 dòlars a l'any per femtocel·la.
- **Millora la satisfacció dels clients.** La mala cobertura a l'interior dels edificis pot produir una insatisfacció per part dels clients, animant-els a canviar d'operador. La cobertura millorada per les femtocel·les pot reduir aquesta motivació dels usuaris a canviar d'operador mòbil.

2.2.3 Aspectes tècnics de les femtocel·les

La potencial capacitat de les femtocel·les es pot verificar ràpidament amb la llei de Shannon, la qual explica la capacitat dels enllaços sense fils, en bits per segon, en una

amplada de banda pel càlcul de la **SINR**.

La **SINR** és una funció calculada mitjançant la recepció de potència desitjada i la interferència rebuda.

Les femtocel·les tenen una potència de transmissió reduïda mentre que mantenen una bona cobertura a l'interior dels edificis. Les pèrdues per penetració aïllen a les femtocel·les de les transmissions d'altres femtocel·les i de les macrocel·les parcialment.

Alguns dels beneficis de les femtocel·les són els explicats a continuació:

- Es redueix la distància entre usuari i estació base, per tant, s'aconsegueix una recepció de la senyal més forta.
- La baixa potència de transmissió de les femtocel·les fa que aquestes provoquin menys interferències al senyal de les macrocel·les veïnes.
- Una femtocel·la pot donar servei d'un a quatre usuaris de forma eficient, assignant una bona part dels seus recursos a cada una dels seus usuaris. En canvi, una macrocel·la té un gran radi de cobertura i molts usuaris dins ell. Això fa que sigui més complicat garantir una bona qualitat de servei **QoS** a tots els seus usuaris.

2.2.4 Infraestructura de la xarxa

Introducció

A continuació, es realitzarà una petita descripció de la infraestructura d'un sistema femtocel·lular.

A la Fig. 2.7 es pot veure com el punt d'accés a la femtocel·la es troba al centre de l'habitatge, oferint serveis de veu i dades als dispositius. Aquest punt es troba connectat amb el router encarregat d'oferir connectivitat **ADSL** mitjançant el distribuïdor contractat per l'usuari. Un cop dins de la xarxa **IP**, aquesta es troba connectada amb la macrocel·la de l'operador mòbil, de manera que aquesta és la xarxa encarregada de gestionar la mateixa xarxa femtocel·la.

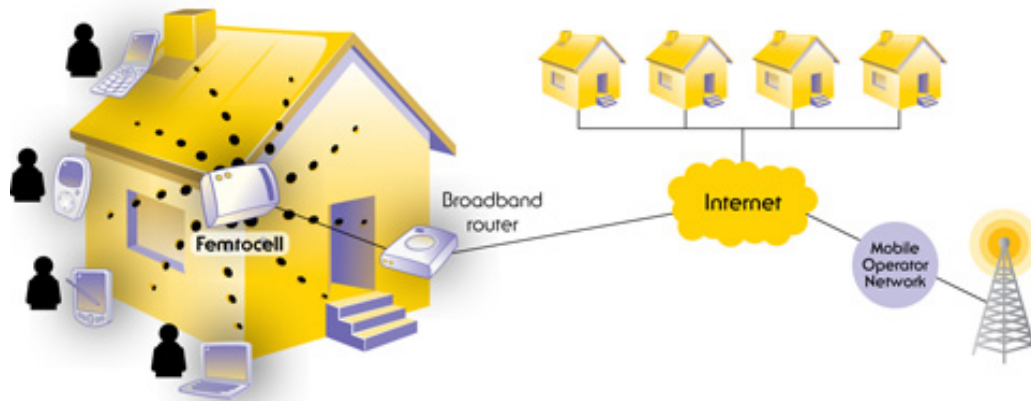


Figura 2.7: Estructura de xarxa femtocel·lular

A la següent Fig. 2.8 es pot veure en detall un punt d'accés a través de la connexió **ADSL**. La femtocel·la s'encarrega de donar servei als terminals mòbils, mentre que la connexió **ADSL** permet als ordinadors accedir a la xarxa Wi-Fi, i al telèfon fix accedir a la xarxa mitjançant **VoIP**.

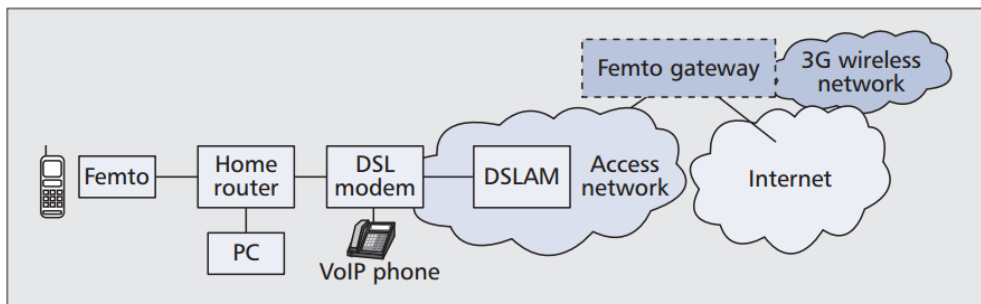


Figura 2.8: Estructura de connexió d'una femtocel·la dins una casa

Arquitectures

En l'entorn de les femtocel·les, les operadores hi han de proporcionar una interfície segura i escalable a les femtocel·les a través d'**IP**. Els controladors de la xarxa ràdio (Radio Network Controller (**RNC**)) estan equipats per manejar des de desenes fins a centenars de macrocel·les. Per tal de proporcionar un servei cap a Internet igual a les femtocel·les, s'han proposat tres interfícies de xarxa, de les quals les interfícies basades en l'**IMS/SIP** i **UMA** són les arquitectures més elegides [5].

- **Iu-b sobre IP**: les **RNC** connecten les femtocel·les a través de les interfícies dels estàndards Iu-CS (commutació de circuits) i Iu-PS (commutació de paquets) presents a les xarxes macrocel·lulars. Les deficiències d'aquesta arquitectura són la manca d'escalabilitat i que la interfície encara no ha estat estandarditzada.

- **Internet Media Sub-System (IMS)/acSIP:** la interfície **IMS**/Session Initiation Protocol (**SIP**) dóna una xarxa central situada entre la femtocel·la i l'operador. La interfície **IMS** converteix el tràfic de l'usuari en paquets **IP** i utilitza **VoIP** mitjançant el protocol **SIP**, i coexisteix amb la macrocel·la. Els principals avantatges són l'escalabilitat i la normalització ràpida.
- **Porta d'enllaç Radio Access Network (RAN) basada en Unlicensed Mobile Access (UMA):** hi ha una Xarxa d'Accés Ràdio (**RAN**) passarel·la entre la xarxa **IP** i la xarxa de l'operador que es dedica a afegir a la xarxa tot el tràfic generat per les femtocel·les. Aquesta porta d'enllaç es connecta a la xarxa de l'operador a través d'una interfície estàndard Iu-PS/CS. Entre la femtocel·la i la porta d'accés **RAN**, el protocol **UMA** fa ús dels túnels segurs **IP** per al transport dels senyals generats per les femtocel·les sobre Internet. Els serveis habilitats per **UMA** requereixen terminals duals per a la commutació entre a la Wi-Fi i l'accés mòbil exterior. La integració del client **UMA** dins de les femtocel·les, en lloc del mòbil, permetria futurs desplegaments d'ajuda a dispositius heretats.

2.2.5 Estandarització pel 3GPP

La tecnologia femtocel·lular es va començar a fer més popular a finals de la primera dècada d'aquest segle, i es presentava com la solució per explotar totes les possibilitats que ofereixen els sistemes macrocel·lulars de l'època (**UMTS** i **3G**). Com qualsevol altra nova tecnologia que és llançada al mercat, és necessari un procés d'estandardització per aconseguir una economia d'escala i, sobretot, l'acceptació dels fabricants i consumidors.

Aspectes radioelèctrics

Les xarxes femtocel·lulars han de conviure amb una xarxa de grans dimensions, a la qual pot accedir qualsevol usuari, com és el cas de la convivència entre femtocel·les i macrocel·les. Per aquesta raó és necessari fer un estàndard de manera que qualsevol empresa interessada en la fabricació de productes amb la tecnologia femtocel·lular resolguin els següents problemes radioelèctrics:

- **Control de les interferències:** la tecnologia femtocel·lular ha de conviure amb molts de tipus de dispositius, xarxes WiFi, macrocel·les, altres femtocel·les, etc... per això és crucial un bon control de les interferències pel correcte funcionament de totes les tecnologies.
- **Aspectes legals:** una femtocel·la es pot reduir a una petita estació base transmetent en l'espectre adquirit per l'operador. Per tant ha de complir amb les lleis i regulació de cada país.
- **Instal·lació:** la instal·lació d'estacions base femtocel·lulars no ha de suposar cap problema, ja que han de ser els mateixos usuaris els que s'han d'encarregar d'ella. La situació elegida no ha de suposar cap problema o molestia.

Interacció entre femtocel·les i macrocel·les

El **3GPP** preveu diferents situacions en les quals un usuari pot fer ús dels serveis macrocel·lulars i els serveis femtocel·lulars:

- Estació base femtocel·lular fora de la cobertura macrocel·lular.
- Estació base femtocel·lular dins de la cobertura macrocel·lular.
- Estació base femtocel·lular dins de la cobertura macrocel·lular, totes dues dins la mateixa freqüència.
- Estació base femtocel·lular dins de la cobertura macrocel·lular, totes dues en diferents freqüències.

La principal prioritat dels dispositius dels usuaris serà trobar un sistema femtocel·lular que li ofereixi servei. En cas de no trobar-ne cap, començarà a realitzar una recerca de serveis subministrats per una macrocel·la propera. El **3GPP** proposa utilitzar una estructura jeràrquica per a la recerca i selecció de cel·les, en la qual els dispositius de l'usuari podran cercar cobertura d'una femtocel·la, encara que es tingui bona cobertura a través d'una macrocel·la. Per tant, només començarà a cercar solucions fora de les femtocel·les, quan la cobertura oferta d'aquestes sigui molt feble o nul·la. A més, els nodes femtocel·lulars poden estar configurats per esperar a una sèrie d'usuaris concrets o per preveure una gran mobilitat d'identitats d'usuaris, com per exemple, en un hotel oferint servei als seus clients.

El **3GPP** també contempla la possibilitat d'utilitzar diferents "Public Land Mobile Network Identification (**PLMN ID**) en macrocel·les i femtocel·les. Algún dels avantatges que ofereix aquest tipus de configuració és un consum més baix de la bateria dels dispositius, ja que serà necessària menys potència de transmissió i reduir el trànsit de senyalització en el nucli central de la xarxa. En contra, els operadors no estan preparats per manejar diferents identificadors per a un mateix dispositiu, i les actuals targetes SIM no serien vàlides per a aquest tipus de configuració. A causa d'aquesta propietat, és necessari definir la forma de selecció del tipus d'identificador del terminal. Hi ha dues possibilitats. La primera d'elles és manual: la xarxa macrocel·lular no necessita cercar dispositius i oferir-los els paràmetres necessaris per donar-los servei. Es tracta d'un mecanisme robust que aconseguiria reduir el trànsit de senyalització. El principal inconvenient és que l'usuari haurà de canviar manualment aquest paràmetre. La segona es basa en la utilització d'una **PLMN ID** equivalent, en aquest cas serà necessari afegir una llista de **PLMN ID** que haurà de ser actualitzada periòdicament.

DESENVOLUPAMENT

3.1 Model de sistema

Com es pot veure en la Fig. 3.1 [1], s'ha considerat una xarxa dual **OFDMA**, on hi ha una estació base macro (**MBS**) omnidireccional en el centre. A més, es tenen K estacions base femto (Femto Base Station (**FBS**)) repartides dins el radi de cobertura de la **MBS**. Dins el radi de cobertura de les diferents femtocel·les es troben F usuaris actius i, dins

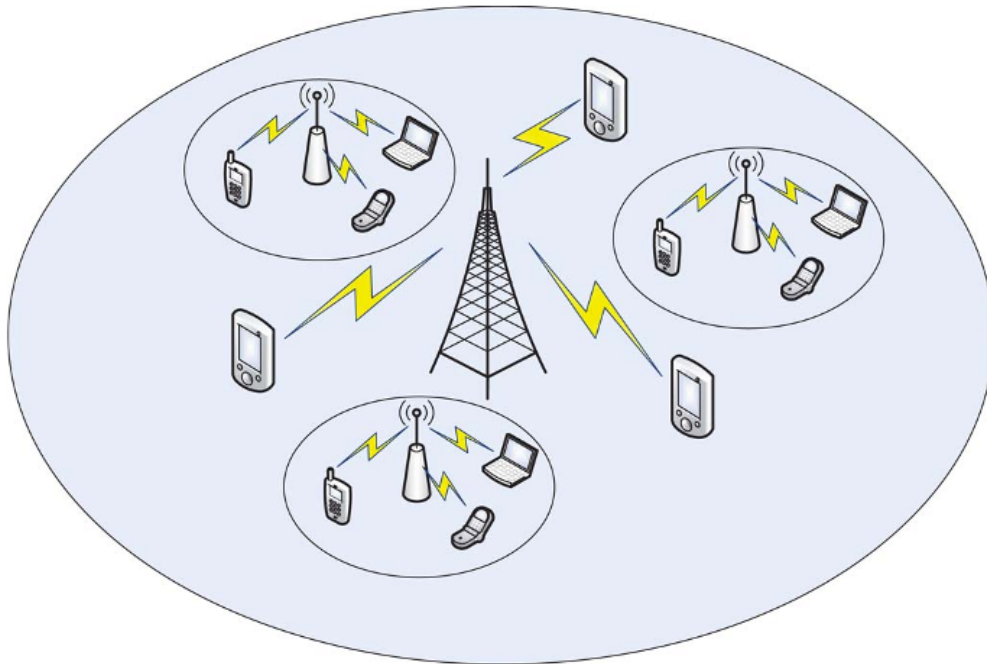


Figura 3.1: Model de sistema: topologia

el radi de cobertura de la macrocel·la, M usuaris actius. Es considera que es tenen K co-canal superposats sobre la macrocel·la.

Totes les femtocel·les són d'accés tancat i situades en cases residencials suburbanes. S'assumeix una distribució de potència equitativa per a tots els canals.

El sistema **OFDMA** té una amplada de banda B , dividida en N subcanals. Les pèrdues per esvaïments de cada subportadora s'assumeix que són les mateixes dins un subcanal, però pot variar entre els diferents subcanals. Se suposa que els esvaïments de canal es compon de les pèrdues de gran escala (pèrdues per la distància i Shadowing) i les pèrdues de petita escala (esvaïments Rayleigh, variables entre diferents subcanals d'un mateix usuari).

A més, també s'assumeix que el guany de cada subcanal n de cada usuari u dins la femtocel·la k cap a la **MBS** és $g_{k,u,n}^{FM}$, així com el guany de cada subcanal n de cada usuari u dins la femtocel·la k cap a la **FBS** k és $g_{k,u,n}^F$, on $k \in \{1,2,\dots,N\}$, $u \in \{1,2,\dots,F\}$ i $n \in \{1,2,\dots,N\}$.

Es defineixen els usuaris sensibles al retard (**DS**) i els usuaris tolerants al retard (Delay-Tolerant (**DT**)), on $|\text{DS}| + |\text{DT}| = F$, $\text{DS} \cap \text{DT} = \Phi$. Els usuaris femto sensibles al retard tenen una taxa mínima de requeriment de qualitat de servei (**QoS**) R_u .

$p_{k,u,n}^F$ és defineix com la potència de transmissió des de l'estació base femto k a un usuari femto u en un subcanal n , i $p_{w,n}^M$ com la potència de transmissió des de l'estació base macro a un usuari macro w ($w \in \{1,2,\dots,M\}$) en un subcanal n .

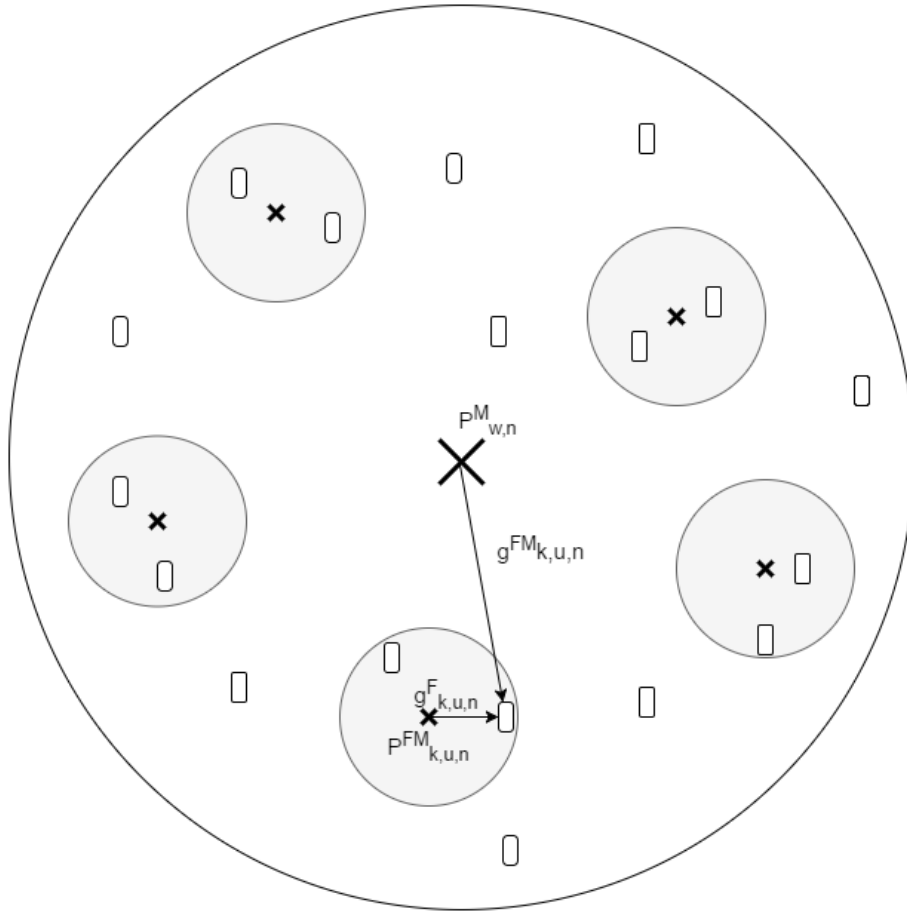


Figura 3.2: Gràfic del sistema

La matriu que indica els subcanals assignats es defineix com $\mathbf{A} = [a_{k,u,n}]_{k,u,n}$ on $a_{k,u,n} = 1$ significa que el subcanal n ha estat assignat a l'usuari femto u de la femtocel·la k , i $a_{k,u,n} = 0$ en els altres casos (canal n no assignat a l'usuari femto u de la femtocel·la k).

D'aquesta forma, la **SINR** rebuda a l'usuari femto u sobre el canal n , de l'estació femto k es calcula de la següent forma:

$$\gamma_{k,u,n}^F = \frac{p_{k,u,n}^F g_{k,u,n}^F}{p_{k,u,n}^M g_{w,n}^{FM} + \sigma^2} \quad (3.1)$$

on $p_{k,u,n}^M g_{k,u,n}^{FM}$ és la interferència ($I_{k,u,n}$) causada per la macrocèl·la, i σ^2 és la potència de renou blan additiu gaussià (Additive white Gaussian noise (**AWGN**)).

Com es pot observar a l'equació 3.1, la interferència de co-canal entre femtocel·les s'assumeix com a part del renou tèrmic per culpa de les pèrdues per penetració i a la baixa potència de transmissió de l'estació base femto [5], [6], a femtocel·les repartides en entorns suburbans [7], on la interferència interfemtocel·lular és negligible compara-

da amb la interferència creuada [5],[8].

La fórmula basada en la capacitat de Shannon en un subcanal n d'un usuari femto u en una femtocel·la k és la següent:

$$C_{k,u,n}^F = \log_2(1 + \gamma_{k,u,n}^F). \quad (3.2)$$

3.2 Round Robin

Un planificador és un algoritme amb el qual es reparteixen els diferents recursos d'una determinada forma.

Un dels mètodes que s'han utilitzat per repartir els recursos és el planificador Round Robin, es tracta d'un planificador molt senzill d'aplicar. És un mètode per seleccionar tots els elements d'un grup de forma equitativa i en un ordre racional, normalment es comença pel primer element de la llista fins a arribar al darrer, realitzant torns, i començant pel primer una altra vegada fins a acabar els recursos a repartir.

A continuació s'explica com s'ha aplicat el planificador Round Robin en el problema plantejat en aquest Treball de Fi de Grau (TFG). Primer s'ha assignat un valor aleatori, comprès entre 0 i 1, a cada un dels usuaris de cada femtocel·la. Aquest valor serà el que determini l'ordre dels usuaris a l'hora d'assignar els recursos dins cada una de les femtocel·les, on l'usuari amb el valor més gran es designarà com el primer usuari.

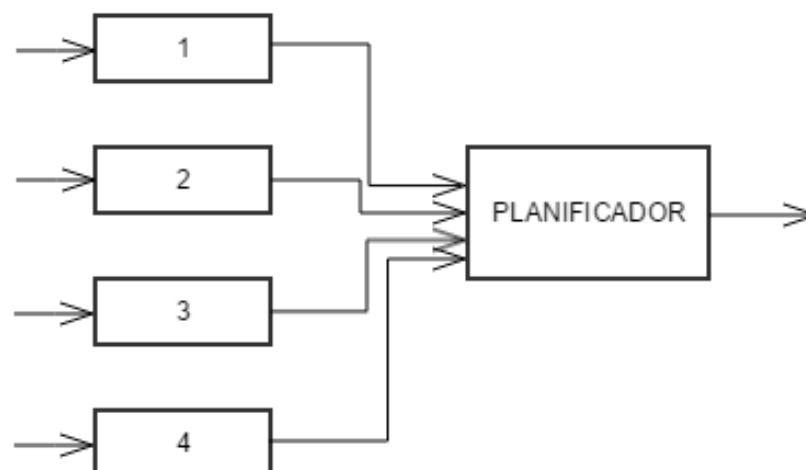


Figura 3.3: Planificador Round Robin

Una vegada es té l'ordre dels usuaris, s'assignen els recursos seguint aquest ordre establert fins a repartir tots els recursos entre tots els usuaris.

A partir d'aquí es pot calcular la capacitat de cada un dels usuaris per a cada femtocel·la.

3.3 Algoritme DS-aware

En aquest Treball de Fi de Grau (TFG), per realitzar l'assignació dels recursos ràdio també s'ha utilitzat l'Algoritme DS-aware. Es tracta d'un algoritme de poca complexitat però amb el qual s'aconsegueix una assignació dels subcanals més eficient que amb Round Robin i heterogènia, per tal de garantir la qualitat de servei (QoS) requerida pels usuaris sensibles al retard (DS).

3.3.1 Assignació de subcanals amb qualitat de servei garantida

A continuació s'explicarà així com es realitza l'assignació dels recursos als diferents usuaris de les femtocel·les pas a pas [1].

- Per a cada un dels subcanals s'assigna la mateixa potència. S'inicialitza la matriu d'indicadors d'assignació de subcanals $a_{k,u,n} = 0, \forall k, u, n$.
- Es calcula $g_{k,u,n}^F$ i $I_{k,u,n}$ per a tots els usuaris i tots els canals de cada una de les femtocel·les, d'acord amb el procediment que es detallarà al següent capítol.
- Per cada femtocel·la:
 - Primerament, entre tots els usuaris sensibles al retard DS, se cerca

$$n^* = \operatorname{argmax}_{n \in N} (g_{k,u,n}^F / I_{k,u,n}). \quad (3.3)$$

Una vegada es té l'usuari DS que té un major valor de n^* , s'assigna aquest subcanal a aquest usuari (per tant, $a_{k,u,n^*} = 1$).

- A continuació es comprova si la capacitat del subcanal assignat satisfà el valor de la taxa mínima requerida R_u . Si és així, es realitza aquesta mateixa recerca al següent usuari DS.

En el cas que no satisfaci la taxa mínima R_u , es torna a cercar un altre subcanal per aquest usuari, d'acord amb l'equació 3.3, i així fins que la suma de la capacitat de tots els subcanals assignats satisfaci aquest valor de taxa mínima requerida R_u .

Es pot donar el cas que la suma de tots els subcanals assignats a un usuari sensible al retard DS no sigui suficient per superar el valor de la taxa mínima establerta R_u .

- Una vegada s'han assignat els subcanals als usuaris sensibles al retard (DS), s'assignen la resta de subcanals (si en queden lliures) entre tots els usuaris de la femtocel·la (inclosos els usuaris sensibles al retard DS).

Aquesta assignació es realitza cercant

$$(u^*, n^*) = \operatorname{argmax}_{u \in F, n \in N} (g_{k,u,n}^F / I_{k,u,n}) \quad (3.4)$$

entre tots els usuaris de la femtocel·la. Una vegada es troba aquest usuari i aquest subcanal, s'assigna el subcanal al corresponent usuari ($a_{k,u,n^*} = 1$). Aquest pas es realitza fins a tenir tots els subcanals disponibles assignats als usuaris.

- Una vegada s'han repartit tots els subcanals entre els usuaris de totes les femtocel·les, es pot calcular la capacitat de cada un dels usuaris i la capacitat total del sistema.

RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.1 Introducció

Per començar, s'explicarà i es mostrarà l'estructura cel·lular de la qual es realitzarà l'estudi, on es detallaran les característiques de l'estació base macro i de les diferents estacions base femto, a més de les de cada un dels usuaris. Una vegada explicada l'estructura cel·lular, es mostraran i es comentaran els diferents resultats obtinguts en les diferents simulacions, serà on es donarà una visió del comportament dels diferents algorismes estudiats en el capítol anterior per a diferents situacions.

Algunes de les simulacions s'han realitzat amb un nombre aleatori d'usuaris sensibles al retard **DS** per tal de mostrar com seria un cas real on no es sap quants usuaris **DS** es tindran per femtocel·la. Altres simulacions s'han realitzat amb un nombre d'usuaris **DS** conegut per estudiar detalladament el seu comportament.

4.2 Estructura cel·lular

A continuació es descriurà l'entorn cel·lular considerat a l'hora de realitzar les simulacions, tal com es pot veure en la Fig. 4.1.

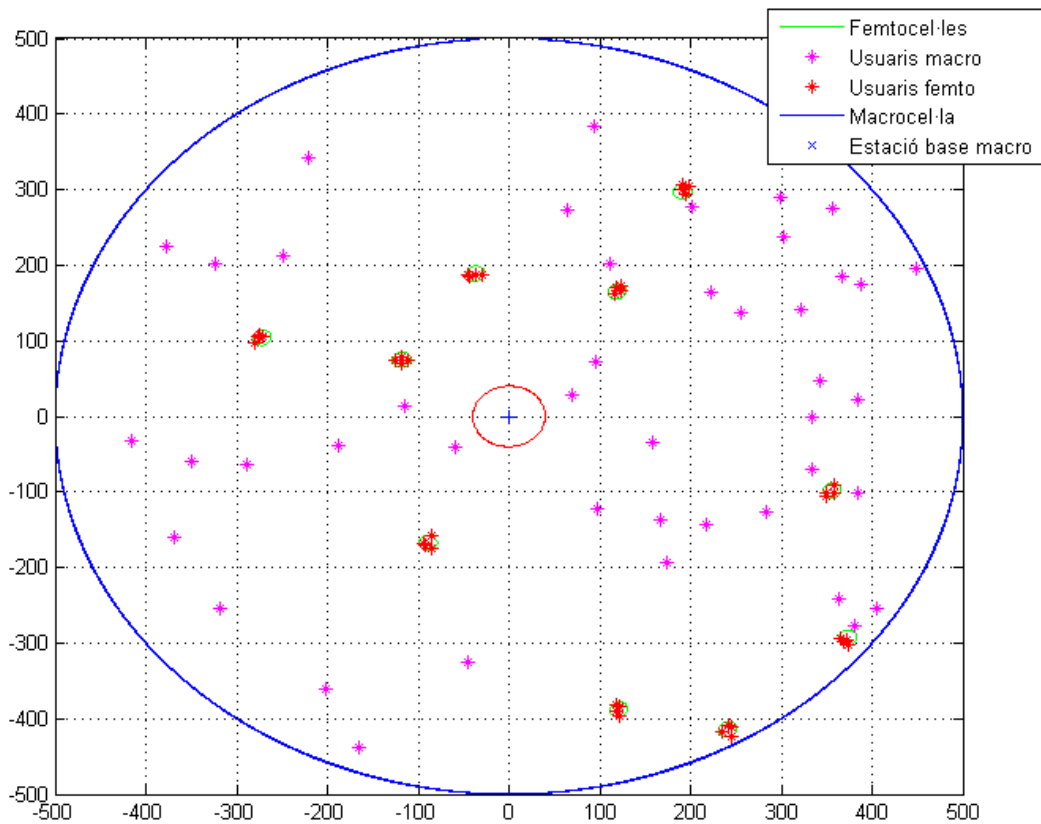


Figura 4.1: Diagrama de la macrocel·la

L'estació base macro (**MBS**) es troba en el centre d'una circumferència, per tant es tracta d'una macrocel·la circular amb un radi de 500 metres. Totes les femtocel·les i tots els usuaris es troben com a mínim a 40 metres de distància de la **MBS**; dins aquest radi no hi ha cap usuari ni cap estació. A més, cada femtocel·la té un radi de cobertura de 10 metres i tots els usuaris macro han d'estar a una distància mínima de 15 metres de l'estació base femto **FBS**.

La Fig. 4.2 mostra l'ampliació d'un detall de la figura anterior (Fig. 4.1), on es pot veure com es troben repartits els diferents usuaris dins les femtocel·les i alguns dels usuaris macro, així com també es pot observar que es compleix amb les distàncies anteriorment marcades.

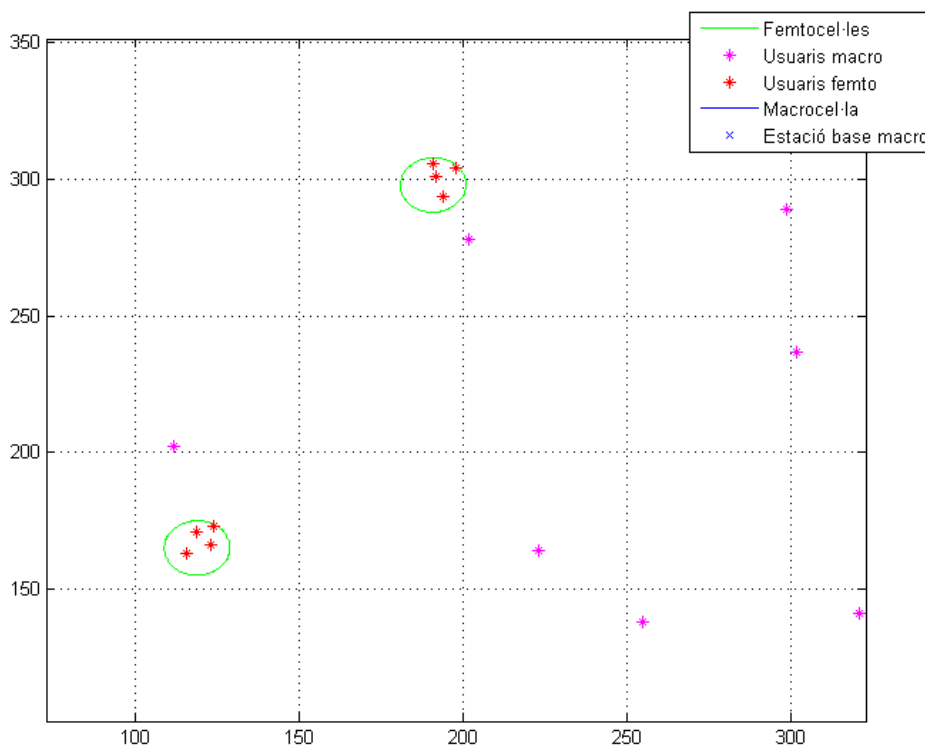


Figura 4.2: Diagrama de la macrocel·la (ampliació)

Els usuaris femto estan uniformement distribuïts dins el radi de cobertura de la seva estació base femto (FBS) que els dona servei. La freqüència de les portadores és de 2GHz, i l'amplada de banda (B) és de 10MHz. Es tenen 50 canals (N) i el nombre d'usuaris macro (M) és 50. La densitat espectral de potència (AWGN) és $\sigma^2 = (B/N)N_0$, on $N_0 = -174$ dBm/Hz.

S'assumeix que les pèrdues de canal estan compostes per les pèrdues de propagació amb la distància, el Shadowing i els esvaïments Rayleigh.

Els models de pèrdues de propagació pels usuaris femto es basen en [9]. Les pèrdues per propagació dependran de si l'usuari és dins el mateix edifici que l'estació base, del tipus d'edifici i de la distància entre estació base i usuari. Per tant, s'haurà d'estudiar dos casos diferents: pèrdues per propagació entre FBS i usuaris femto, i entre MBS i usuaris femto.

Per el càlcul de les pèrdues de propagació amb la distància entre estació base femto FBS i usuari femto es considera que es troben dins el mateix edifici i a la mateixa planta. El resultat obtingut és en dB.

La fórmula utilitzada per aquest cas és [9]:

$$PL(dB) = 38.46 + 20\log_{10}R + 0.7d_{2D,indoor} + 18.3n^{((n+2)/(n+1)-0.46)} \quad (4.1)$$

on R i $d_{2D,indoor}$ estan calculades en metres (m), i n és el nombre de plantes penetrades.

En aquest cas, l'últim terme de l'equació es pot menysprear, ja que l'usuari es troba a la mateixa planta de l'estació base femto.

Per les pèrdues de propagació amb la distància entre estació base macro **MBS** i usuari femto s'ha utilitzat la següent fórmula [9]:

$$PL(dB) = 15.3 + 37.6\log_{10}R + L_{ow} \quad (4.2)$$

on R està calculada en metres (m) i les pèrdues per penetració són de 10dB.

El shadowing és un tipus d'esvaïment produït pels obstacles que impedeixen la visió directa entre l'estació base i l'estació mòbil. Es tracta d'un esvaïment que depèn del medi i de l'entorn en el que es troba. Per al càlcul d'aquests esvaïments es considera una variància aleatòria amb distribució Gaussiana, de mitjana nul·la i desviació típica σ_{shad} . Per això, el càlcul dels esvaïments per Shadowing es realitzen multiplicant la desviació típica per un nombre aleatori amb una distribució normal. Així, cada un dels usuaris tindrà un valor d'esvaïment Shadowing diferent, ja que depèn dels obstacles de l'entorn físic de cada un dels usuaris.

En el nostre estudi, el valor de la desviació típica del càlcul del Shadowing entre estació femto i usuari femto és $\sigma = 10$ dB.

Els esvaïments Rayleigh són un model estadístic per veure com afecte l'entorn de propagació a un senyal ràdio. Aquests esvaïments són produïts per la propagació multicamí i pel moviment del mòbil o de l'entorn, on es produeixen múltiples fronts d'ona. L'amplitud del senyal rebut X és la suma dels fasors complexos, cada un amb magnitud i fase, associats als components multicamí. Es poden descompondre en fase i quadratura. Les components segueixen una distribució ortogonal gaussiana i el mòdul, una distribució de Rayleigh.

La potència de transmissió de la **MBS** és de 47Bm i la de les **FBS** és de 20 dBm, repartides equitativament entre els diferents canals.

4.3 Resultats i discussió

A aquesta secció es mostraran i es discutiran els resultats obtinguts en les diferents simulacions. S'estudiarà el comportament del sistema aplicant els diferents algorismes proposats i en situacions distintes.

4.3.1 Estudi de la capacitat total a mesura que augmenta el nombre de femtocel·les

La capacitat total és la suma de la capacitat de tots els usuaris de totes les femtocel·les.

La Fig. 4.3 mostra els resultats obtinguts realitzant una assignació de canals amb el planificador Round Robin. Aquests resultats són per a 2 i per a 4 usuaris per cada femtocel·la. Es va incrementant el nombre de femtocel·les de 10 en 10, des de 10 fins a 50 femtocel·les.

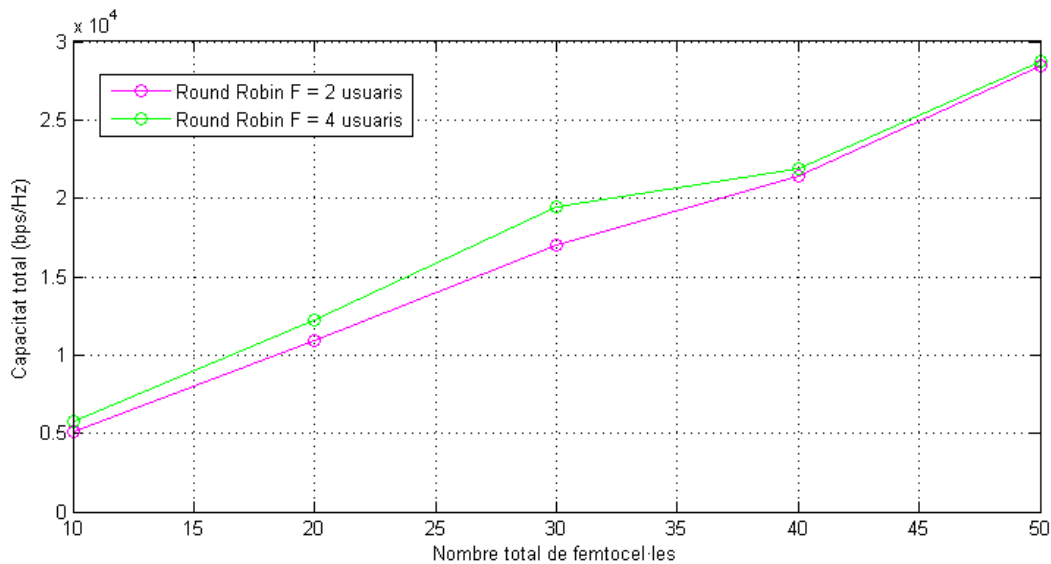


Figura 4.3: Round Robin: Capacitat total per totes les femtocel·les vs nombre de femtocel·les K

Els resultats obtinguts en aquesta gràfica són els esperats: la capacitat total va incrementant a mesura que augmenta el nombre de femtocel·les. Es tracta d'un increment de la capacitat total gairebé lineal amb K. Es podrien esperar millors resultats amb altres planificadors o algorismes.

Aquests valors tan poc eficients són deguts al fet que, al realitzar l'assignació dels canals als usuaris de forma aleatòria, sense tenir en compte quin usuari és millor per a cada canal, la capacitat total no és l'òptima.

A continuació s'estudiaran els resultats obtinguts aplicant l'Algorisme DS-aware. La gràfica de la Fig. 4.4 mostra els resultats obtinguts amb aquest algorisme per F = 2 i F = 4 usuaris per femtocel·la. Cap d'aquests usuaris són sensibles als retards ($DS_u = 0$). A més es va augmentant el valor de K des de 10 fins a 50 femtocel·les.

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

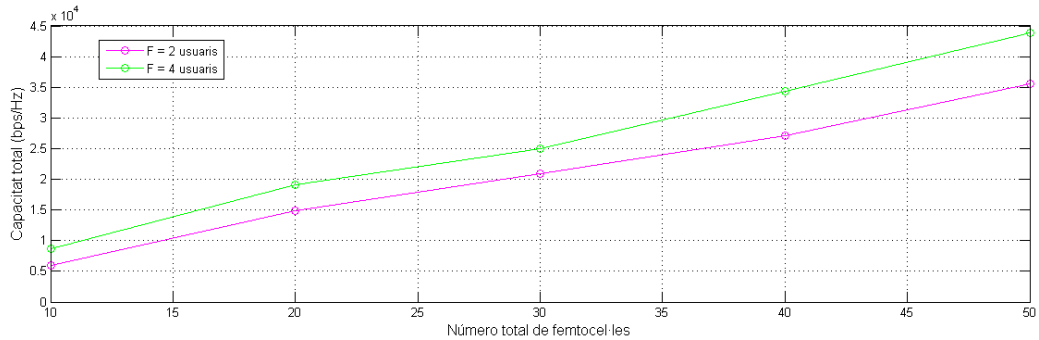


Figura 4.4: Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb cap usuari DS vs nombre de femtocel·les K

Si es comparen els resultats aconseguits utilitzant l'assignació de canals Round Robin i l'assignació de canals mitjançant l'Algoritme DS-aware amb cap dels usuaris sensibles als retards, es pot observar com amb l'Algoritme DS-aware s'aconsegueix una assignació més eficient, ja que s'obté una notable millora en els valors de la capacitat total obtinguda, pel fet que es realitza l'assignació dels canals als usuaris amb millor capacitat per a cada un d'ells.

El percentatge de millora de l'assignació de recursos mitjançant l'Algoritme DS-aware és més notable en el cas de tenir 4 usuaris i un valor gran de femtocel·les, on es dona una millora de més del 50% sobre la utilització del planificador Round Robin. En canvi, en el cas de tenir 2 usuaris per femtocel·la, es té un percentatge de millora entorn del 25% en els diferents valors de femtocel·les. En promitj, de millora de l'assignació de recursos mitjançant l'Algoritme DS-aware sobre la utilització de Round Robin és del 27% en el cas de tenir 2 usuaris per femtocel·la, i del 48% en el cas de tenir 4 usuaris per femtocel·la.

La Fig. 4.5 mostra la capacitat total de totes les femtocel·les a mesura que es va augmentant el nombre de femtocel·les dins el radi de l'estació MBS. Aquests són els resultats obtinguts en les diferents simulacions realitzades amb 2 i 4 usuaris a mesura que es va incrementant el nombre de femtocel·les de 10 fins a 50, utilitzant l'Algoritme DS-aware de baixada. Les simulacions s'han realitzat amb un nombre aleatori d'usuaris sensibles al retard, per tal de simular un cas real on no es coneix el nombre dels usuaris DS que es té dins cada una de les femtocel·les. La taxa mínima requerida és $R_u = 9$ bps/Hz (per a tots els usuaris).

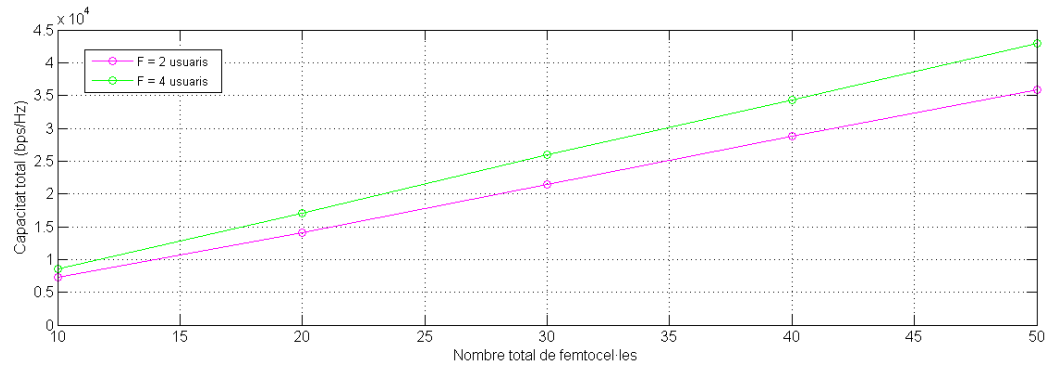


Figura 4.5: Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb nombre aleatori d'usuaris **DS** vs nombre de femtocel·les **K**

Si es comparen els resultats de les gràfiques de la Fig. 4.4 i la Fig. 4.5 es pot apreciar com quasi no hi ha diferència entre no tenir cap usuari **DS** o tenir un nombre aleatori d'ells. Aquest fet és deu al fet que es tenen pocs usuaris a cada femtocel·la i això fa que els resultats puguin variar de forma molt poc notable. Es pot veure que el comportament de la capacitat total a mesura que augmenta el nombre de femtocel·les és pràcticament lineal. A mesura que va augmentant el nombre de femtocel·les es fa més notable la diferència del nombre total de la capacitat entre quatre i dos usuaris. Això és degut al fet que al tenir més usuaris dins cada femtocel·la, és possible assignar d'una forma més eficient els canals als usuaris (major diversitat espacial).

Estudi de la capacitat total a mesura que augmenta el nombre de femtocel·les per a diferent nombre d'usuaris sensibles al retard **DS**

La següent figura (Fig. 4.6) mostra el comportament de l'assignació de canals amb l'Algoritme DS-aware. Aquest estudi s'ha realitzat amb dos casos diferents. En el primer cas, es té 4 usuaris per cada femtocel·la, dels quals 3 usuaris són sensibles al retard i sols un usuari no ho és. En el segon cas, es té 2 usuaris per femtocel·la i tots els usuaris són sensibles al retard (**DS**). En els dos casos es va incrementant el nombre de femtocel·les des de 10 fins a 50.

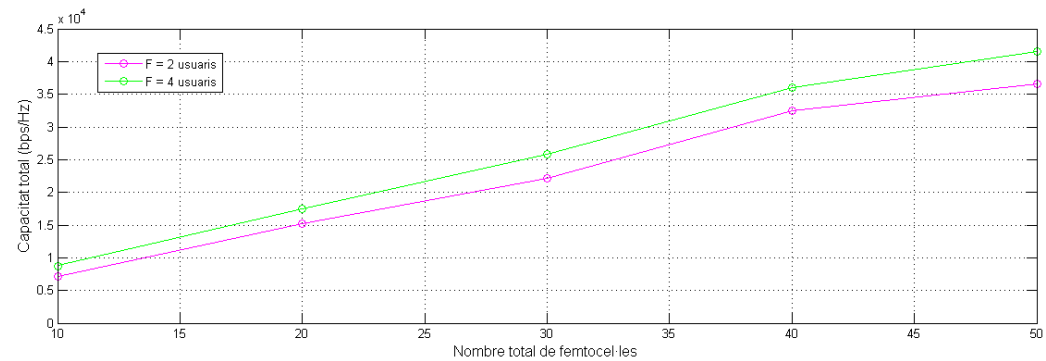


Figura 4.6: Algoritme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les amb 2/2 i 3/4 usuaris sensibles al retard vs nombre de femtocel·les **K**

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Comparant la Fig. 4.6 amb les dues gràfiques anteriors, es fa evident que tenir un nombre d'usuaris **DS** major (en promig) restringeix en major mesura la flexibilitat a l'hora d'assignar els canals. Això es tradueix en una menor diferència entre la capacitat assolida pels dos casos (Fig. 4.3 i Fig. 4.5), especialment apreciable per un major nombre de femtocel·les.

La Fig. 4.7 mostra la gràfica amb un nombre més elevat d'usuaris ($F = 8$ i $F = 10$). El nombre d'usuaris sensibles al retard és aleatori i K augmenta des de 10 fins a 50 femtocel·les. El valor de la taxa mínima també és de 9 bps/Hz.

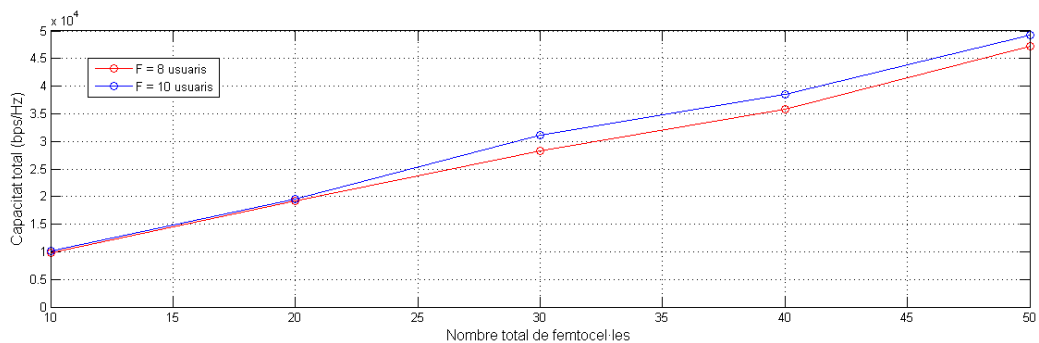


Figura 4.7: Algorisme DS-aware: Capacitat total per totes les femtocel·les vs nombre de femtocel·les K

A la gràfica de la 4.7 es pot veure com al augmentar el nombre d'usuaris, la capacitat total no augmenta de forma tan significativa. Per exemple, al tenir 10 femtocel·les el valor de la capacitat total és pràcticament el mateix amb 8 usuaris que amb 10 usuaris. Aquest fet és degut a què al tenir molts més usuaris dins cada femtocel·la, l'assignació dels recursos es realitza de forma més eficient (aprofitament de la diversitat) que en casos on es tenen pocs usuaris per femtocel·la, aconseguint una assignació més eficaç dels recursos i, per tant, encara que s'augmenti el nombre d'usuaris, el valor de la capacitat ja no augmentarà de forma tan notable.

4.3.2 Estudi de la capacitat total a mesura que augmenta la taxa mínima R_u

En aquesta subsecció es mostrarà i s'analitzarà el comportament de la capacitat total a mesura que es va augmentant la taxa mínima R_u . S'aniran estudiant diferents casos per tal d'aconseguir una visió profunda sobre com va variant aquest comportament segons va variant l'entorn.

En aquest estudi es mostraran tan sols els resultats dels usuaris sensibles al retard (**DS**). S'ha de tenir en compte que una vegada s'ha satisfet la taxa mínima requerida (R_u) per aquests usuaris **DS**, els recursos que no han estat repartits en aquest moment, s'han repartit entre tots els usuaris de cada una de les femtocel·les, incloent-hi els usuaris sensibles al retard **DS**.

La Fig. 4.8 mostra el comportament de la capacitat total a mesura que es va augmentant la taxa mínima R_u des d'1 fins a 20 bps/Hz. En aquest cas s'han realitzat les simulacions amb tots els usuaris sensibles al retard (DS) i amb 10 femtocel·les ($K = 10$).

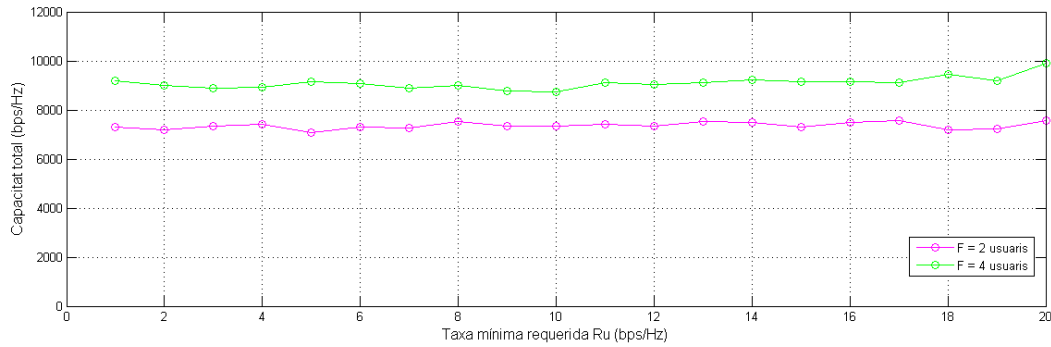


Figura 4.8: Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les i tots els usuaris DS vs R_u

Els resultats obtinguts a aquesta gràfica són els esperats. Al tenir uns valors de la taxa mínima R_u molt baixos, els usuaris sensibles al retard poden assolir aquest valor fàcilment, ja que el valor de la capacitat és més elevat.

Per poder observar més clarament què passa si augmenta la taxa mínima R_u , es realitzarà el mateix experiment però amb valors més alts de R_u . En aquest cas, el valor de la taxa mínima (R_u) augmentarà des de 50 fins a 1000 bps/Hz. El nombre de femtocel·les també serà de 10 femtocel·les. Aquestes simulacions es realitzaran per dos casos. En el primer cas, es tendran 2 usuaris per femtocel·la, dels quals sols 1 usuari serà DS. En el segon cas, es tendran 4 usuaris, dels quals 2 dels usuaris seran DS.

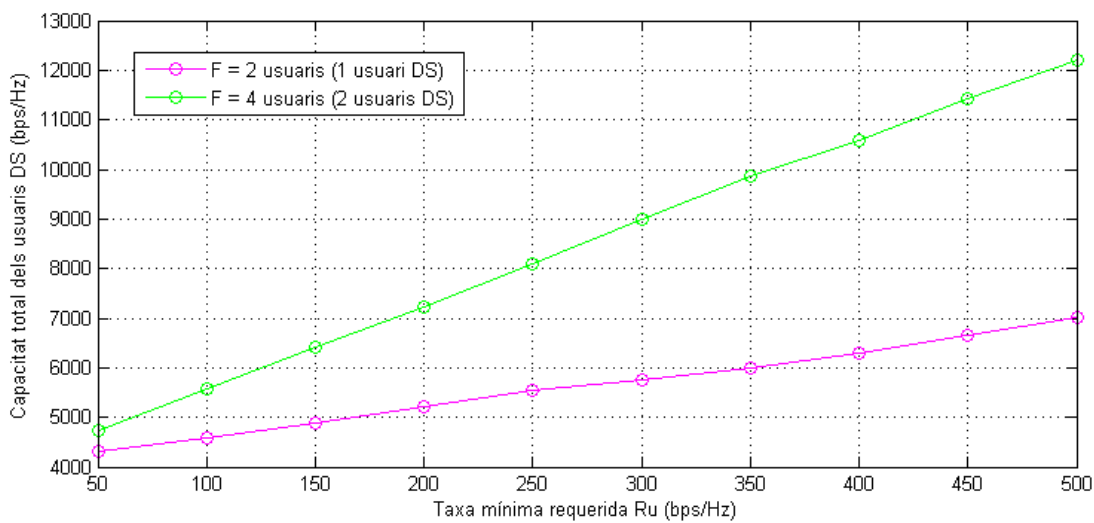


Figura 4.9: Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs 1 i 2 usuaris DS de 2 i 4 usuaris respectivament

La Fig 4.9 mostra els resultats dels usuaris sensibles al retard **DS**. Es pot observar que a mesura que s'augmenta el valor de la taxa mínima R_u , la capacitat total també augmenta. Aquest increment es deu a què a mesura que s'augmenta la taxa mínima R_u , els usuaris **DS** necessitaran més recursos per assolir aquesta taxa i, per tant, augmentarà la capacitat total dels usuaris **DS**.

Ara s'estudiarà el comportament de la capacitat total dels usuaris 'best-effort'. Aquest estudi també s'ha realitzat per dos casos. Un dels casos amb 1 usuari 'best-effort' dels 2 usuaris per femtocel·la. A l'altre cas, es tenen 2 usuaris 'best-effort' dels 4 usuaris de la femtocel·la. El valor de la taxa mínima (R_u) augmenta des de 50 fins a 1000 bps/Hz i el nombre de femtocel·les també és de 10 femtocel·les.

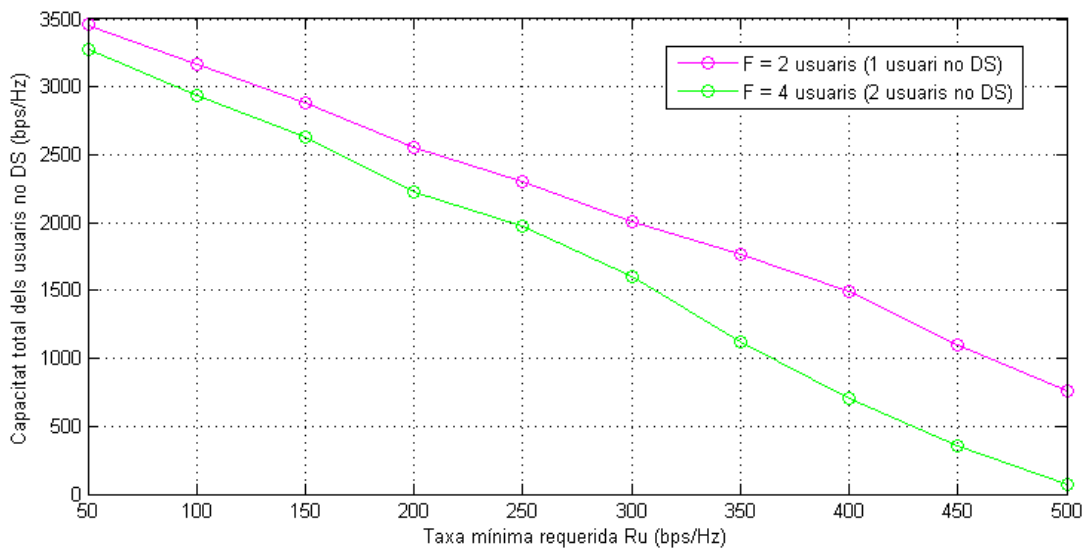


Figura 4.10: Algorisme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs 1 i 2 usuaris 'best-effort' de 2 i 4 usuaris respectivament

A la Fig. 4.10 es pot observar el comportament de la capacitat total dels usuaris no sensibles al retard a mesura que augmenta la taxa mínima requerida R_u . Hi ha la meitat dels usuaris sensibles al retard **DS** per femtocel·la. A mesura que augmenta el valor de la taxa mínima R_u , la capacitat total dels usuaris 'best-effort' va disminuint. Aquest fet es degut a què els usuaris **DS** necessiten més recursos per assolir aquesta taxa i, per tant, queden menys recursos per repartir entre els usuaris 'best-effort'.

Per tal de comprovar com augmenta el valor de la capacitat en funció del nombre d'usuaris, s'han realitzat diferents simulacions amb diferent nombre d'usuaris dins cada femtocel·la. Aquest estudi s'ha realitzat amb 10 femtocel·les ($K = 10$) variant el nombre d'usuaris (F) dins cada una d'elles. El nombre d'usuaris sensibles al retard (**DS**) és aleatori per a cada una de les simulacions. El valor de R_u va augmentant des d'1 fins a 20 bps/Hz.

4.3. Resultats i discussió

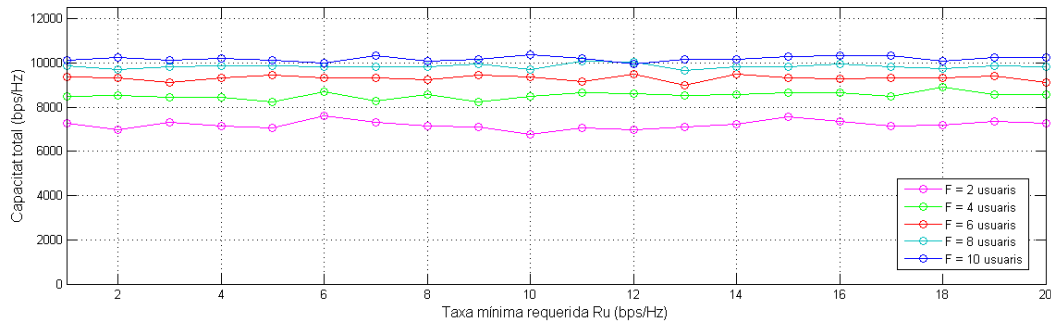


Figura 4.11: Algoritme DS-aware: Capacitat total per 10 femtocel·les vs R_u

A la Fig. 4.11 es pot observar que amb diferents valors d'usuaris (F) el comportament també és quasi lineal (com hem vist a la Fig. 4.8), això és deu a què en tenir valors baixos de la taxa mínima R_u , els usuaris sensibles al retard assoleixen fàcilment aquest valor. A més també es pot observar com la capacitat total no augmenta de forma proporcional a l'augment d'usuaris per femtocel·la, aquest fet és conseqüència de la diversitat del sistema.

Ara analitzarem el comportament del sistema augmentant el valor de la taxa mínima des de 50 fins a 500 bps/Hz. Á més es tenen 6 i 8 usuaris a cada una de les 10 femtocel·les. Es tenen 3 usuaris sensibles al retard **DS** per cada femtocel·la. Aquests resultats es mostren a la Fig. 4.12.

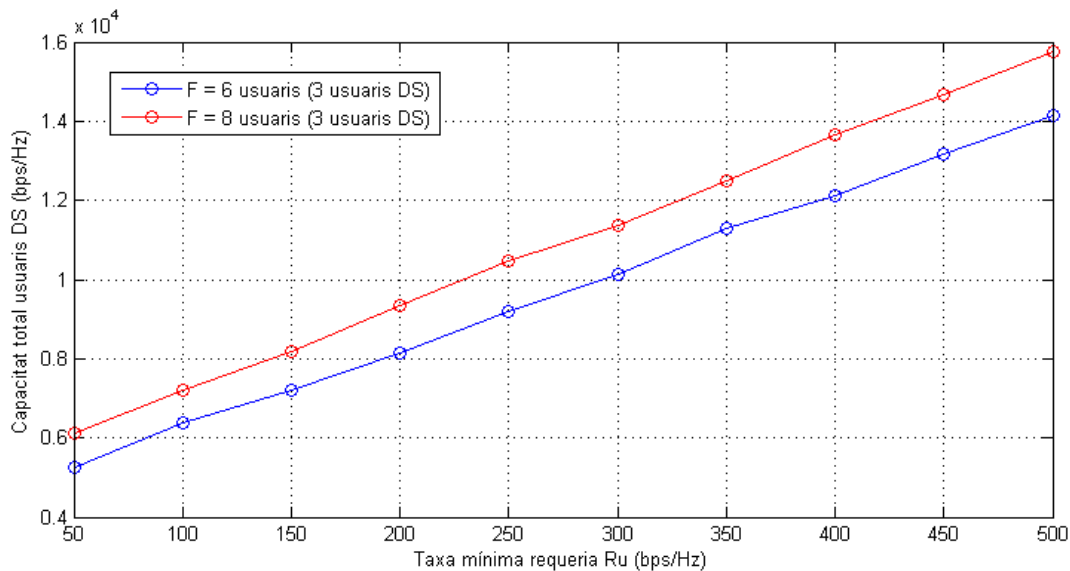


Figura 4.12: Algoritme DS-aware: Capacitat total usuaris **DS** per 10 femtocel·les vs R_u

Els resultats obtinguts a aquesta gràfica són els esperats. Es veu com augmenta la capacitat total a mesura que augmenta el valor de la taxa mínima R_u , ja que els usuaris sensibles al retard **DS** necessiten més recursos assignats per assolir la taxa mínima

requerida R_u .

A continuació es mostraran els resultats obtinguts amb les mateixes condicions anteriors però pels usuaris 'best-effort'.

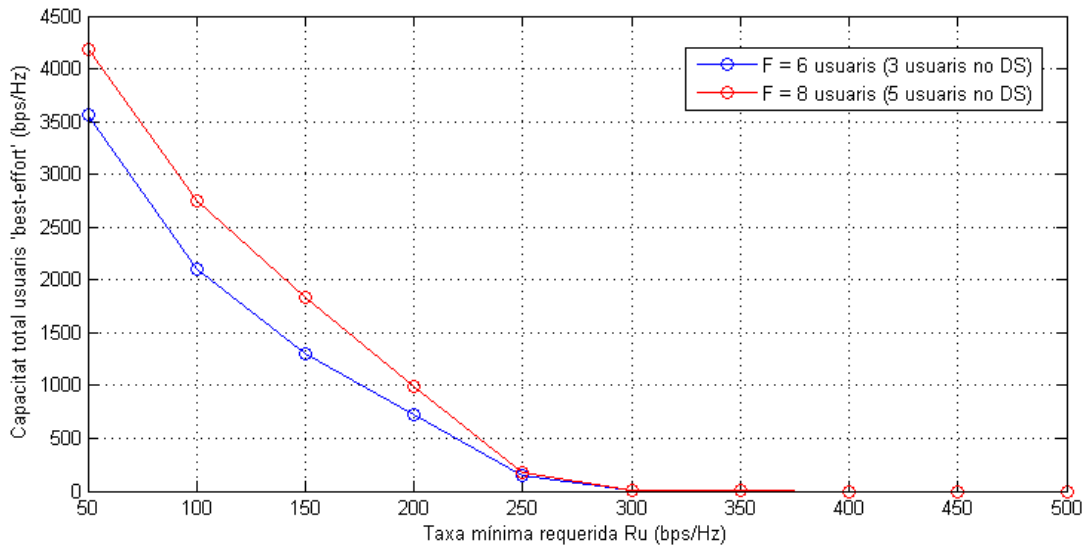


Figura 4.13: Algoritme DS-aware: Capacitat total usuaris 'best-effort' per 10 femtocel·les vs R_u

Com es pot veure a la Fig. 4.13, a mesura que augmenta la taxa mínima requerida R_u , la capacitat total dels usuaris 'best-effort' disminueix. Com s'ha explicat anteriorment, això es deu a que els usuaris DS necessiten més recursos. En aquest cas, al tenir més usuaris per femtocel·la, la capacitat total dels usuaris no sensibles al retard, es quasi nula a partir dels 300 bps/Hz. Per tant, després d'assignar els recursos als usuaris DS, ja no queden recursos lliures per assignar als usuaris 'best-effort'.

4.3.3 Estudi del nombre d'usuaris sensibles al retard DS que assoleixen la taxa de requeriment de qualitat de servei QoS mínima R_u

En aquest apartat s'estudiarà el nombre d'usuaris sensibles al retard DS que assoleixen la taxa mínima requerida R_u . Si un usuari DS aconsegueix superar el llindar establert, es garanteix que tindrà una qualitat del servei bona.

S'han realitzat diferents simulacions per estudiar el percentatge d'usuaris que assoleixen el valor de la taxa mínima R_u necessària per garantir una bona QoS, per tant, que el valor de la capacitat total per usuari superi aquest valor R_u .

Aquest estudi s'ha realitzat amb diferent nombre d'usuaris F ($F = 2$ usuaris i $F = 4$ usuaris), tots ells són usuaris sensibles al retard (DS) i el nombre de femtocel·les és 10 ($K = 10$). El valor de la taxa mínima R_u anirà variant des de 50 fins a 500 bps/Hz.

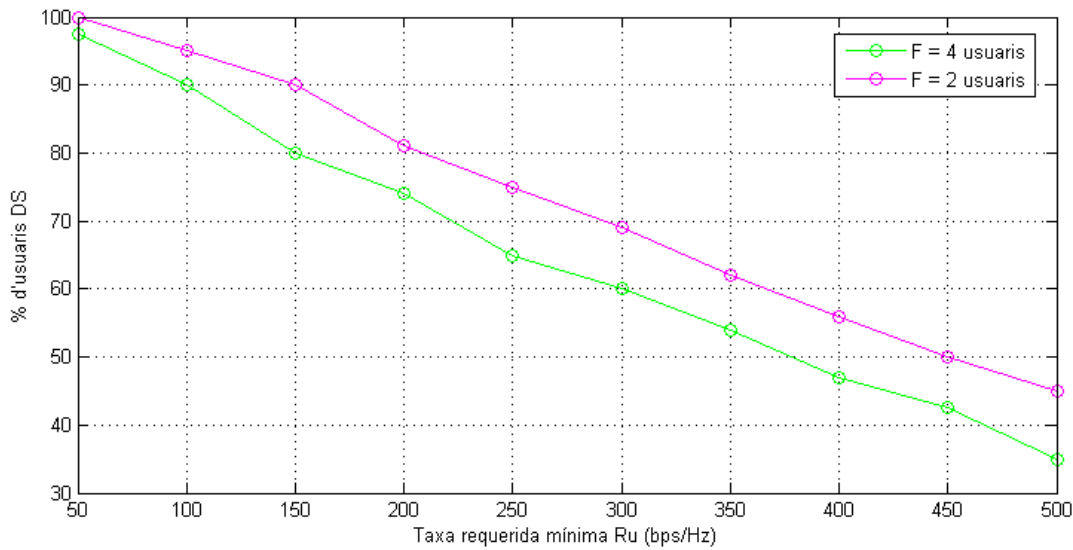


Figura 4.14: Algoritme DS-aware: Percentatge d'usuaris DS que assolixen la taxa mínima Ru vs taxa mínima Ru

La figura 4.14 mostra el percentatge els usuaris DS que aconseguixen superar el valor de la taxa mínima requerida Ru. Com es pot observar, el percentatge d'usuaris va disminuint a mesura que es va augmentant el valor de la taxa mínima Ru, ja que a mesura que augmenta aquest valor, cada usuari necessita més recursos assignats.

A més, si a cada femtocel·la es tenen més usuaris DS, es necessitarien més recursos per aconseguir que tots els usuaris assolixin el llindar de la taxa mínima, per tant, el percentatge d'usuaris DS que ho aconseguixen va disminuint a mesura que augmenta el valor de la taxa mínima de qualitat de servei QoS Ru.

4.3.4 Conclusió

Una vegada finalitzat aquest capítol es poden extreure distintes conclusions dels estudis realitzats:

- S'ha pogut comprovar que amb la utilització de l'Algoritme DS-aware s'han obtingut resultats més eficients que amb la utilització del planificador Round Robin.
- S'ha pogut comprovar que amb la utilització de l'Algoritme DS-aware s'han obtingut resultats més eficients que amb la utilització del planificador Round Robin.
- A més, s'ha pogut veure com l'Algoritme DS-aware es més eficient per un nombre més baix d'usuaris sensibles al retard DS.
- L'Algoritme DS-aware possibilita garantir el requisit de qualitat de servei (QoS) dels usuaris, fet que no permet el planificador Round Robin.

CONCLUSIONS

En aquest Treball de Fi de Grau (TFG), s'ha considerat un entorn amb una macrocel·la i diferents femtocel·les a l'interior del seu radi de cobertura. Dins aquest context, s'ha investigat com assignar els diferents subcanals entre femtocel·les que comparteixen l'espectre radioelèctric tenint en compte els usuaris amb requisit de qualitat de servei QoS.

Per realitzar aquesta assignació de recursos i així estudiar el seu comportament, s'han proposat dues formes diferents de realitzar aquesta assignació, una amb el planificador Round Robin i una altra amb un algoritme de distribució de baixa complexitat que assegura els requisits de QoS dels usuaris sensibles al retard DS, l'Algoritme DS-aware.

S'ha pogut demostrar que amb el planificador Round Robin s'obtenen pitjors resultats que amb la utilització de l'Algoritme DS-aware.

En l'entorn considerat, el nombre màxim recomenable d'usuaris per femtocel·la no ha de superar els quatre, per tal d'assegurar un bon rendiment del sistema. També s'ha comprovat que al tenir quatre usuaris en lloc de tenir-ne menys, s'obté una milloria de la capacitat total gràcies a la diversitat del sistema i a què hi ha més flexibilitat a l'hora d'elegir el millor usuari per a cada un dels recursos.

Una altra conclusió que s'ha pogut extreure d'aquest estudi és l'augment de la capacitat total a mesura que augmenta el valor de la taxa mínima requerida R_u . Aquest augment de la capacitat es produeix a partir d'un valor alt de la taxa mínima R_u (a partir d'uns 100 bps/Hz).

En futurs treballs podria ser interessant per a l'estudi tenir en compte els guanys entre femtocel·les. També es podria estudiar com afecten les diferents femtocel·les als usuaris macro que es troben al seu voltant i aplicar altres algorismes d'assignació de

5. CONCLUSIONS

subcanals.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Zhang, C. Jiang, N. C. Beaulieu, X. Chu, X. Wen, and M. Tao, "Resource allocation in spectrum-sharing OFDMA femtocells with heterogeneous services," *IEEE Transactions on commun.*, vol. 62, juliol 2014. [1](#), [3.1](#), [3.3.1](#)
- [2] M. Nohrborg. LTE, [online] Disponible: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [2.1.2](#), [2.1.3](#), [2.1.3](#), [2.1.3](#)
- [3] P. by ABI Research, Picochip, Airvana, I. access, Gartner, T. España, and 2nd International. Conference on home access points and femtocells, [online] Disponible: http://www.avrevents.com/dallasfemto2007/purchase_presentations.htm. [2.2.1](#)
- [4] Analisys. "Picocells and femtocells: Will indoor Base-Stations transform the telecoms industry?" <http://research.analisys.com>. [2.2.2](#)
- [5] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Femtocell networks: A survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, p. 59–67, setembre 2008. [2.2.4](#), [3.1](#)
- [6] J. Zhang, Z. Zhang, K. Wu, and A. Huang, "Optimal distributed subchannel, rate and power allocation algorithm in OFDM-based two-tier femtocell networks," *Proc. Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, maig 2010. [3.1](#)
- [7] X. Kang, R. Zhang, and M. Motani, "Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: A stackelberg game approach." *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, p. 538–549, abril 2012. [3.1](#)
- [8] H.-S. Jo, C. Mun, J. Moon, and J.-G. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, p. 4906–4910, octubre 2009. [3.1](#)
- [9] G. T. 36.814, "3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for e-utra physical layer aspects (release 9)," pp. 66–67, març 2010. [4.2](#), [4.2](#)
- [10] D. López-Pérez, A. Valcarce, G. de la Roche, and J. Zhang, "OFDMA femtocells: A roadmap on interference avoidance," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, p. 41–48, setembre 2009.
- [11] J.-H. Yun and K. G. Shin, "Adaptive interference management of OFDMA femtocells for co-channel deployment," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, pp. 1225–1241, juny 2011.

- [12] K. Son, S. Lee, Y. Yi, and S. Chong, "Refim: A practical interference management in heterogeneous wireless access networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, pp. 1260–1272, juny 2011.
- [13] M. Yavuz, "Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, pp. 102–109, setembre 2009.
- [14] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, pp. 4316–4328, agost 2009.
- [15] I. Guvenc, M.-R. Jeong, F. Watanabe, and H. Inamura, "A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, pp. 880–882, decembre 2008.
- [16] Todo sobre el 4G LTE, [Online] Disponible: <http://www.omicrono.com>.
- [17] Femtocell: La solución para las redes 3G en lugares cerrados Disponible: <http://www.wayerless.com>.
- [18] J. Kim and D.-H. Cho, "A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in indoor dense mobile communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, pp. 4340–4353, novembre 2010.
- [19] L. Giupponi and C. Ibars, "Distributed interference control in OFDMA-based femtocells," *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 1201–1206, setembre 2010.
- [20] K. L. adn H. Lee and D.-H. Cho, "Collaborative resource allocation for self-healing in self-organizing networks," *Int. Conf. Commun.*, pp. 1–5, juny 2011.
- [21] J. W. Huang and V. Krishnamurthy, "Cognitive base stations in lte/3gpp femto-cells: A correlated equilibrium game-theoretic approach," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 59, pp. 3485–3493, decembre 2011.
- [22] D.-C. Oh, H.-C. Lee, and Y.-H. Lee, "Power control and beamforming for femtocells in the presence of channel uncertainty," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, pp. 2545–2554, juny 2008.
- [23] M. Tao, Y.-C. Liang, and F. Zhang, "Resource allocation for delay differentiated traffic in multiuser OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, pp. 2190–2201, juny 2008.
- [24] Y. Zhang and C. Leung, "Cross-layer resource allocation for mixed services in multiuser OFDM-based cognitive radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, pp. 4605–4619, octubre 2009.
- [25] C. Jiang, Y. Chen, Y. Gao, and R. K. J. Liu, "Joint spectrum sensing and access evolutionary game in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, pp. 2470–2483, maig 2013.

-
- [26] C. Jiang, Y. Chen, R. K. J. Liu, and Y. Ren, "Renewal-theoretical dynamic spectrum access in cognitive radio networks with unknown primary behavior," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, pp. 406–416, març 2013.
- [27] D. T. Ngo and T. Le-Ngoc, "Distributed resource allocation for cognitive radio networks with spectrum-sharing constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, pp. 3436–3449, setembre 2011.
- [28] R. Xie, F. R. Yu, and H. Ji, "Dynamic resource allocation for heterogeneous services in cognitive radio networks with imperfect channel sensing," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, pp. 770–780, febrer 2012.
- [29] K. W. Choi, E. Hossain, and D. I. Kim, "Downlink subchannel and power allocation in multi-cell ofdma cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 2259–2271, juliol 2011.
- [30] Y. Ma, D. I. Kim, and Z. Wu, "Optimization of OFDMA-based cellular cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, pp. 2265–2276, agost 2010.
- [31] "Way forward proposal for (h)enb to henb mobility 3gpp std. r3-101 849," 2010.
- [32] D. W. K. Ng and R. Schober, "Resource allocation and scheduling in multi-cell OFDMA systems with decode-and-forward relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 2246–2258, juliol 2011.
- [33] C. Y. Wong, R. Cheng, K. Lataief, and R. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier bit power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1747–1758, octubre 1999.
- [34] J. K. Chen, G. de Veciana, and T. S. Rappaport, "Site-specific knowledge and interference measurement for improving frequency allocations in wireless networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, pp. 2366–2377, juny 2009.
- [35] "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects 3GPP std. TR 36.814 v9.0.0," 2010.
- [36] Z. Shen, J. G. Andrews, and B. L. Evans, "Adaptive resource allocation in multiuser ofdm systems with proportional rate constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 2726–2737, novembre 2005.