

Integración de redes de sensores en las nuevas generaciones de sistemas de comunicaciones móviles 4G y 5G

Trabajo Fin de Grado

Curso 2014/2015



Alumno: Gonzalo Quirós Sánchez
Tutor: Raquel Pérez Leal

El concepto actual de Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) y la tendencia hacia la utilización masiva de redes basadas en sensores plantea la duda de cómo va a ser posible transportar la información proveniente de dichas redes de una forma factible y eficiente. Una opción prometedora es la utilización de la red móvil celular existente (LTE/LTE-A). La realidad es que esta última no puede soportar una inclusión masiva de nodos sin afectar a los usuarios. Actualmente hay una gran actividad de investigación y estandarización tanto para adaptar las próximas versiones de las tecnologías actuales, como en la definición de la próxima generación de sistemas móviles, 5G, en la que resolver esta problemática resulta un punto clave. En las redes móviles actuales, la limitación viene más por un problema de saturación de los canales de señalización que de capacidad de la red. En el presente trabajo investigamos los aspectos de señalización del estándar de comunicaciones Long Term Evolution (LTE) para su posible uso conjunto con la red de sensores en versiones futuras y en la próxima generación.

Creemos que una red de sensores con un gran número de nodos, que requiera poco uso de datos, puede interferir con los usuarios. Esto es debido a que pueden colapsar los canales de control y, por lo tanto, provocar un retraso general para todos los terminales de la red. Encontramos que efectivamente se produce este problema en el canal PUCCH, que es el principal canal de control del enlace ascendente. En este canal se asigna un recurso a cada terminal para peticiones de transmisión, por lo que al aumentar el número de terminales, el retraso aumenta proporcionalmente.

Después de analizar diferentes investigaciones realizadas sobre la integración de sensores en LTE y comunicaciones tipo máquina, proponemos un modelo basado en una de ellas. Se trata de un modelo del canal de acceso aleatorio (RACH), donde los sensores realicen sus peticiones de transmisión en ese canal en vez de en el PUCCH. Sobre dicho modelo proponemos diversas modificaciones para mejorar el rendimiento y conseguir que no afecte a los usuarios que usen ese canal, como por ejemplo, la separación de los recursos del canal de acceso aleatorio (RACH) entre usuarios y sensores.

Finalmente comprobamos que el modelo cumple con los objetivos mediante una simulación de tiempo discreto. Explicamos la estructura de la simulación detalladamente y verificamos los resultados mediante gráficas.

Abstract

The actual concept of Internet of Things (IoT) and the trend towards the massive use of sensor based networks bring up the question of how it will be possible to transport the information from these networks in a feasible and efficient way. A promising choice is using the current mobile cellular network (LTE/LTE-A). But the reality is that it can't support a massive inclusion of nodes without affecting the users. There is currently a very active research and standardization for both adapting the next versions of the current technologies and defining the next generation of mobile systems, 5G, in which solve this problem is a key factor. In the existing mobile networks, the limitation is more a saturation problem of the signalling channels than network's capacity. In this project we investigate the signalling aspects of 3GPP Long Term Evolution (LTE) for its possible use with the sensor network in future versions and next generation.

We believe that a sensor network with a large number of nodes with low data traffic can interfere with the users due to saturation of the control channels, and, therefore, causing a general delay in all the terminals of the network. We found that, indeed, this problem occurred in the PUCCH channel, which is the main uplink control channel. In this channel it is assigned a resource to each terminal for transmission requests, hence when the number of terminals is increased, the delay increases on a proportional way.

Afterwards, we make an overview about the different investigations realized concerning the sensors integration on LTE and machine type communications. Then, we propose a model based on one of them. It is random access channel (RACH) model, where the sensors use that channel to perform transmission requests instead of the PUCCH. We propose some modifications to improve the performance and to attain that it does not affect the users using that channel, like, for example, a division of the random access channel (RACH) resources between users and sensors.

Finally, we prove, with a discrete time simulation, that the model fulfil the objectives. We explain the simulation structure in detail and we verify the results using graphics.

Índice

1.	Introducción	5
1.1	Definición del problema	5
1.1.1	Red de sensores	5
1.1.2	Long Term Evolution	5
1.2	Entorno socio-económico	6
1.3	Marco regulatorio	6
1.4	Estructura de la memoria	7
1.5	Planificación del proyecto	8
2.	LTE/LTE-Advanced: Gestión de recursos radio y capa física	11
2.1	Terminología	11
2.2	Arquitectura de red	11
2.3	Pila de protocolos	13
2.4	Control de los Recursos Radio	14
2.4.1	Estados de conexión RRC	16
2.4.2	Operaciones en modo reposo	16
2.4.2.1	Difusión de la información del sistema	16
2.4.2.2	Selección de red pública móvil terrestre	18
2.4.2.3	Selección de célula	19
2.4.2.4	Reseleccion de célula	21
2.4.2.5	Paginación	24
2.4.3	Operaciones en modo conectado	24
2.4.3.1	Portadores radio de señalización y datos	24
2.4.3.2	Control de la conexión RRC	26
2.4.3.3	Procesos de registro a la red	29
2.4.3.4	Movilidad en estado conectado	32
2.5	Capa física	32
2.5.1	Acceso múltiple y modulación	32
2.5.2	Estructura de tramas	33
2.5.3	Rejilla de recursos	34
2.5.4	Agregación de portadoras	35
2.5.5	Canales	37

2.5.5.1	Canales lógicos	39
2.5.5.2	Canales de transporte	40
2.5.5.3	Canales físicos	41
2.5.6	Señalización en el enlace ascendente	42
2.5.6.1	PRACH.....	42
2.5.6.2	PUCCH	43
2.5.6.3	PUSCH.....	46
2.5.6.4	Proceso de sincronización	46
2.6	Sumario	48
3.	Integración de sensores en LTE: Estado del Arte	49
3.1	Procedentes de organismos de estandarización.....	49
3.2	Trabajos de investigación.....	59
3.3	Discusión sobre las distintas soluciones.....	65
3.3.1	Procedentes de organismos de estandarización.....	65
3.3.2	Trabajos de investigación.....	70
4.	Modelo y simulación	72
4.1	Reflexión sobre el problema de saturación	72
4.2	Modelo	72
4.2.1	Modelo del RACH	75
4.2.2	Modificaciones del modelo base.....	76
4.2.2.1	División en grupos y oportunidades RACH.....	76
4.2.2.2	Clase de Acceso por Restricción.....	76
4.2.2.3	Transmisión de nodos MTC en el intervalo de usuarios	77
4.3	Simulación	77
4.3.1	Estructura de la simulación	77
4.3.1.1	Simulación basada en el modelo base del RACH	78
4.3.1.2	Modificaciones realizadas en la simulación respecto al modelo base del RACH	80
5.	Resultados	82
5.1	Validación de la simulación del modelo del RACH.....	82
5.2	Escenario	83
5.3	Resultados basados en el modelo modificado del RACH.....	84
5.3.1	Rendimiento.....	84
5.3.2	Latencia	87
5.4	Conclusión	92

6.	Conclusión y trabajos futuros.....	93
6.1	Conclusión	93
6.2	Trabajos futuros	94

Abreviaciones

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ACB	<i>Access Class Barring</i>
AF	<i>Amplify and Forward</i>
AP	<i>Announcement Period</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
ATL S-MACA	<i>Adaptive Traffic Load S-MACA</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BCH	<i>Broadcast Channel</i>
BS	<i>Base Station</i>
CC	<i>Component Carrier</i>
CCCH	<i>Common Control Channel</i>
CDMA2000	<i>Code Division Multiple Access 2000</i>
CNAF	<i>Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias</i>
CMAS	<i>Commercial Mobile Alert Service</i>
CN	<i>Core Network</i>
COP	<i>Contention Only Period</i>
CP	<i>Control Plane</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CS	<i>Circuit Switched</i>
CSG	<i>Closed Subscriber Group</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
CSMA-pP	<i>Carrier Sense Multiple Access p-Persistent</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>
DL-SCH	<i>Downlink Shared Channel</i>
DRB	<i>Data Radio Bearer</i>
DRX	<i>Discontinuous Reception</i>
DS	<i>Data Sending</i>
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
DwPTS	<i>Downlink Pilot Time Slot</i>
EAB	<i>Extended Access Barring</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPLMN	<i>Equivalent PLMN</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ESM	<i>EPS Session Management</i>

ETWS	<i>Earthquake and Tsunami Warning System</i>
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FASA	<i>Fast Adaptive S-ALOHA</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GERAN	<i>GSM/EDGE Radio Access Network</i>
GP	<i>Guard Period</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HPLMN	<i>Home PLMN</i>
HRPD	<i>CDMA2000 High Rate Packet Data</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MABR	<i>Modify Access Bearer Request</i>
MBMS	<i>Multimedia Broadcast Multicast Service</i>
MBR	<i>Modify Bearer Request</i>
MBS	<i>Multiple Beam Selection</i>
MC-CDMA	<i>Multi-Carrier Code Division Multiple Access</i>
MCCH	<i>Multicast Control Channel</i>
MCH	<i>Multicast Channel</i>
MIB	<i>Master Information Block</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MT	<i>Mobile Terminated</i>
MTC	<i>Machine Type Communications</i>
MTCH	<i>Multicast Traffic Channel</i>
NAS	<i>Non Access Stratum</i>
NDI	<i>New Data Indicator</i>
NP	<i>Notification Period</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PB-ALOHA	<i>Pseudo Bayesian ALOHA</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>

PCCH	<i>Paging Control Channel</i>
PCell	<i>Primary Cell</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCH	<i>Paging Channel</i>
PCI	<i>Physical Cell Identifier</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDCP	<i>Packet Data Control Protocol</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PHICH	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>
PMCH	<i>Physical Multicast Channel</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PS	<i>Packet Switched</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Signal</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RB	<i>Resource Blocks</i>
RNTI	<i>Radio Network Temporary Identifier</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RLF	<i>Radio Link Failure</i>
RPLMN	<i>Registered PLMN</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
S-ALOHA	<i>Slotted Aloha</i>
SCell	<i>Secondary Cell</i>
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCH	<i>Synchronization Channel</i>
SFN	<i>System Frame Number</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIB	<i>System Information Block</i>
SI-RNTI	<i>System Information RNTI</i>
S-MACA	<i>Slotted Multiple Access Collision Avoidance</i>

SMC	<i>Security Mode Command</i>
SRB	<i>Signalling Radio Bearer</i>
SRS	<i>Sounding Reference Signal</i>
SS	<i>System Selection</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
S-TMSI	<i>SAE Temporary Mobile Station Identifier</i>
TA	<i>Tracking Area</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TOP	<i>Transmission Only Period</i>
UCI	<i>Uplink Control Information</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UL-SCH	<i>Uplink Shared Channel</i>
UpPTS	<i>Uplink Pilot Time Slot</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
UTC	<i>Universal Coordinated Time</i>
UTRA	<i>UMTS Terrestrial Radio Access</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VPLMN	<i>Visited PLMN</i>

1. Introducción

1.1 Definición del problema

Con las nuevas tecnologías basadas en sensores que mejoran la vida del usuario y el concepto del Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) que se está asentando como una de las tecnologías más importantes de los años venideros, surge la duda de cómo se van a lograr una adaptación de estas nuevas tecnologías con la red móvil celular existente (LTE/LTE-A). El motivo es que esta última no puede soportar una inclusión masiva de nodos sin afectar a los usuarios.

En este trabajo vamos a ver el impacto que tendría esta unión y una posible manera de mitigarlo. Veremos las diferentes investigaciones que se han llevado a cabo sobre este tema, ya sea por el organismo de estandarización oficial: el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), o distintos investigadores. Con esto tendremos una idea más clara de que soluciones son más viables para nuestro escenario antes de decidir hacia qué aspectos enfocar los cambios que propondremos en este trabajo.

1.1.1 Red de sensores

Es una red de comunicación tipo máquina (*Machine Type Communications*, MTC) compuesta por dispositivos que se comunican entre sí con una arquitectura de tipo malla. Generalmente contiene un número grande de nodos con bajo consumo de datos a la hora de transmitir.

1.1.2 Long Term Evolution

3GPP Long Term Evolution (LTE) es un estándar de comunicaciones móviles de cuarta generación (4G). La gran diferencia frente a los estándares anteriores es que tiene una arquitectura exclusivamente basada en conmutación de paquetes, es decir, no usa conmutación de circuitos. Sus comunicaciones se basan en una arquitectura centralizada con una estación base, donde cada nodo se comunica directamente solo con ella. LTE-Advanced es la evolución de LTE, donde se le añaden mejoras para conseguir una velocidad de transmisión teórica máxima de 1 Gbps en el enlace de bajada, frente a los 326 Mbps de LTE.

En el capítulo 2 se encuentran descritas las partes más relevantes de LTE para este trabajo.

1.2 Entorno socio-económico

En los últimos años ha aumentado considerablemente el número de sensores a nuestro alrededor, ya sea en versiones de dispositivos *Wearable*, sistemas domóticos o inteligencia ambiental entre otros. Este aumento, nos acerca cada vez más hacia el Internet de las Cosas, donde la mayoría de aparatos electrónicos estarán conectados. El IoT representa el siguiente paso en la digitalización de nuestra sociedad y economía, y por ello se ha convertido en una fuerza poderosa para la transformación de negocios, ya que muchas industrias se verán afectadas, destacando las industrias de energía, transporte, sanidad y manufacturación.

Según estudios realizados por Gartner, el negocio del IoT mueve alrededor de 69,5 miles de millones de dólares a día de hoy. Y según sus estimaciones, crecerá hasta los 263 miles de millones de dólares en 2020. Habiendo ahora aproximadamente 4,9 miles de millones de dispositivos conectados, que llegará a los 25 miles de millones en 2020 [1].

El IoT junto al Big Data y el Cloud Computing han supuesto una reacción a nivel global, como lo demuestran estudios de la Agenda Digital Europea [2] e Intel en la conferencia de *IoT Insights* [3]. Y se prevé que genere muchos nuevos puestos de trabajo, porque muchas empresas han visto la oportunidad que estas nuevas tecnologías traen y están innovando en esa dirección, como por ejemplo, IBM con su IBM Internet of Things Foundation, que permite a un desarrollador ampliar el alcance de cualquier dispositivo e integrarlo en la nube, o Huawei con su sistema operativo para IoT, el LiteOS, que ocupa solo 10 Kbytes.

1.3 Marco regulatorio

No hay regulación específica aplicable al objetivo del proyecto. La regulación genérica que aplicaría por centrarse el proyecto en aspectos de comunicaciones móviles y radioeléctricas es:

- La directivas 2002/21/CE aprobada el 7 de marzo del 2002. Es el marco regulador común de las redes y servicios de comunicaciones electrónicas.
- La directiva 2002/676/CE aprobada el 7 de marzo del 2002. Es el marco regulatorio de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea.

- En España, la regulación general está contenida en la Ley General de Telecomunicaciones (Ley 9/2014, de 9 de mayo).
- CNAF 2013 (B.O.E. de 9 de mayo 2013, actualizado B.O.E. de 16 de abril 2015). Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

En lo referente la normativa técnica aplicable al proyecto, se hace referencia detallada a él a lo largo de todo el documento.

1.4 Estructura de la memoria

El trabajo se ha dividido en los siguientes capítulos:

En el capítulo 2 se trata el tema de señalización en LTE/LTE-A, explicando con detalle los diferentes aspectos de las capas física y control de recursos radio. Al final explicamos un punto que se puede saturar al conectar la red MTC.

En el capítulo 3 vemos las investigaciones realizadas sobre comunicaciones MTC e integración de sensores en LTE. Después realizamos una comparación de las distintas soluciones, viendo sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo 4 proponemos un modelo con una posible solución. Este modelo se basa en una de las investigaciones vistas anteriormente en el capítulo 3, al que le realizamos cambios. Para verificar las prestaciones de la nueva solución, se ha desarrollado un simulador en MATLAB. Explicamos el modelo utilizado paso a paso en este capítulo.

En el capítulo 5 presentamos los resultados de la simulación y analizamos las gráficas tomadas para llegar a una conclusión sobre la viabilidad del modelo propuesto.

En el capítulo 6 se expone las conclusiones del trabajo y sugerencias sobre mejoras u otros trabajos que se pueden realizar sobre este tema.

1.5 Planificación del proyecto

1.5.1 Cronograma

Actividades	Personal encargado	Dedicación (días)	Duración (días)
Capítulo 2			
Búsqueda y lectura de información	Gonzalo Quirós Sánchez	10	60
Síntesis y documentación	Gonzalo Quirós Sánchez	10	60
Revisión	Raquel Pérez Leal	1	1
Reunión	Raquel Pérez Leal Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Capítulo 3			
Búsqueda de investigaciones similares	Gonzalo Quirós Sánchez	10	40
documentación y análisis de las soluciones	Gonzalo Quirós Sánchez	5	15
Revisión	Raquel Pérez Leal	1	1
Capítulo 4			
Reunión y realización del modelo	Raquel Pérez Leal Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Programación de la simulación	Gonzalo Quirós Sánchez	10	25
Documentación	Gonzalo Quirós Sánchez	3	10
Revisión	Raquel Pérez Leal	1	1
Capítulo 5			
Realización de la simulación	Gonzalo Quirós Sánchez	4	10
Documentación	Gonzalo Quirós Sánchez	5	10
Revisión	Raquel Pérez Leal	1	1
Reunión	Raquel Pérez Leal Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Capítulo 6			
Documentación	Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Capítulo 1			
Búsqueda de información	Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Documentación	Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Otros apartados			
Documentación del resumen	Gonzalo Quirós Sánchez	1	1
Revisión	Raquel Pérez Leal	1	1
Formato final, inclusión de índices y referencias	Gonzalo Quirós Sánchez	1	1

Tabla 1.1: Planificación de actividades.

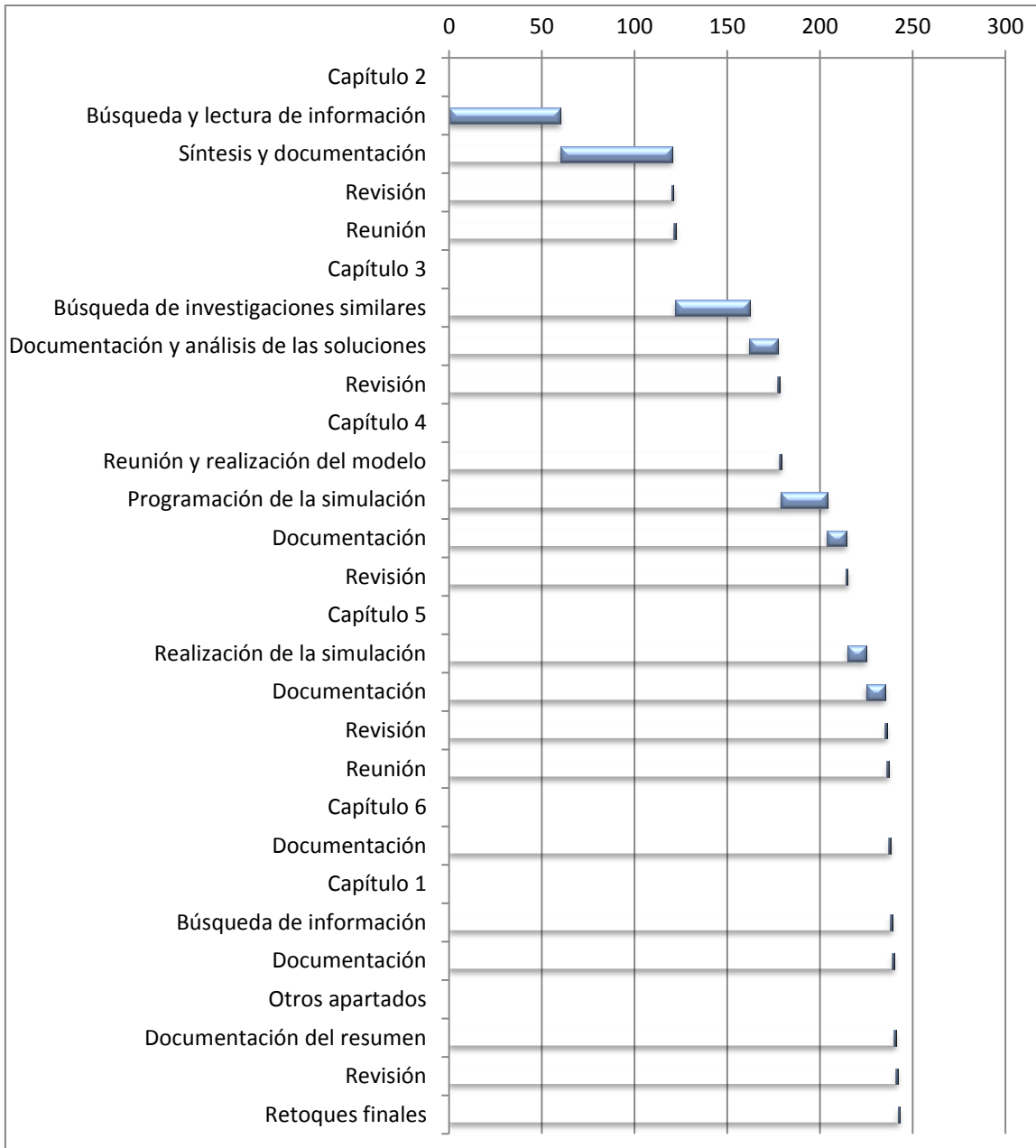


Figura 1.1: Cronograma de actividades

1.5.2 Presupuesto

- Duración del proyecto: 8 meses.
- Presupuesto total: 11.028,98€

Tasa de costes indirectos = 20%.

- Personal

Personal			
Apellidos y nombre	Categoría	Costes/mes	Esfuerzo (personas x día)
Pérez Leal, Raquel	Ingeniero Sénior	4.289,54€	8
Quirós Sánchez, Gonzalo	Ingeniero Junior	2.694,39€	61
	Total	1128,82€	

Tabla 1.2: Costes de personal.

El cálculo del total se ha calculado teniendo en cuenta que 1 mes = 22 días laborables.

- Equipos y licencias

Equipos					
Descripción	Coste	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Ordenador portátil	600€	100	8	60	80€
Licencia MATLAB	500€	100	8	60	66,67€
Licencia Microsoft Office	125€	100	8	60	16,67€
				Total	163,33€

Tabla 1.3: Costes de equipos.

- Otros costes directos

Otros costes directos	
Descripción	Coste imputable
Papel	5€
Tinta impresora	21,90€
Material de escritura	2€
Total	28.90€

Tabla 1.4: Otros costes directos.

2. LTE/LTE-Advanced: Gestión de recursos radio y capa física

En este capítulo vamos a presentar los procedimientos de señalización y control que se llevan a cabo en los sistemas de tecnología LTE/LTE-Advanced. Se entrará en detalle en los aspectos que más intervienen en estos procesos, como son la capa de control de recursos radio y la capa física, para poder entender las posibles soluciones al problema de la integración de sensores, expuestos en el capítulo 3, en el que se analiza en detalle el estado del arte.

2.1 Terminología

La red de LTE se divide en estaciones base (*eNodeB*) que controlan un área de cobertura del terreno, llamadas células. En cada célula hay Terminales de Usuario (*User Equipment, UE*) que son los dispositivos mediante los que una persona se conecta a la red, como por ejemplo, teléfonos móviles, ordenadores, tabletas o sensores inalámbricos. A los UE se les denomina como nodos de la red.

2.2 Arquitectura de red

A la arquitectura de red en LTE se la llama Sistema de Paquetes Evolucionado (*Evolved Packet System, EPS*), y comprende el Núcleo de Paquetes Evolucionado (*Evolved Packet Core, EPC*) y el Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN*). En la figura 2.1 se muestra la arquitectura de red con los nodos que componen cada parte y las interfaces que conectan los nodos.

Las funciones de los nodos son [12]:

- En el E-UTRAN:
 - **Nodo B Evolucionado (*Evolved Node B, eNB*):** Es la estación base, encargada de la gestión de Recursos Radio, sincronización y control de interferencias, compresión de cabeceras IP, cifrado y protección de la integridad de datos de usuario, selección de MME y encaminamiento desde/hacia el S-GW.

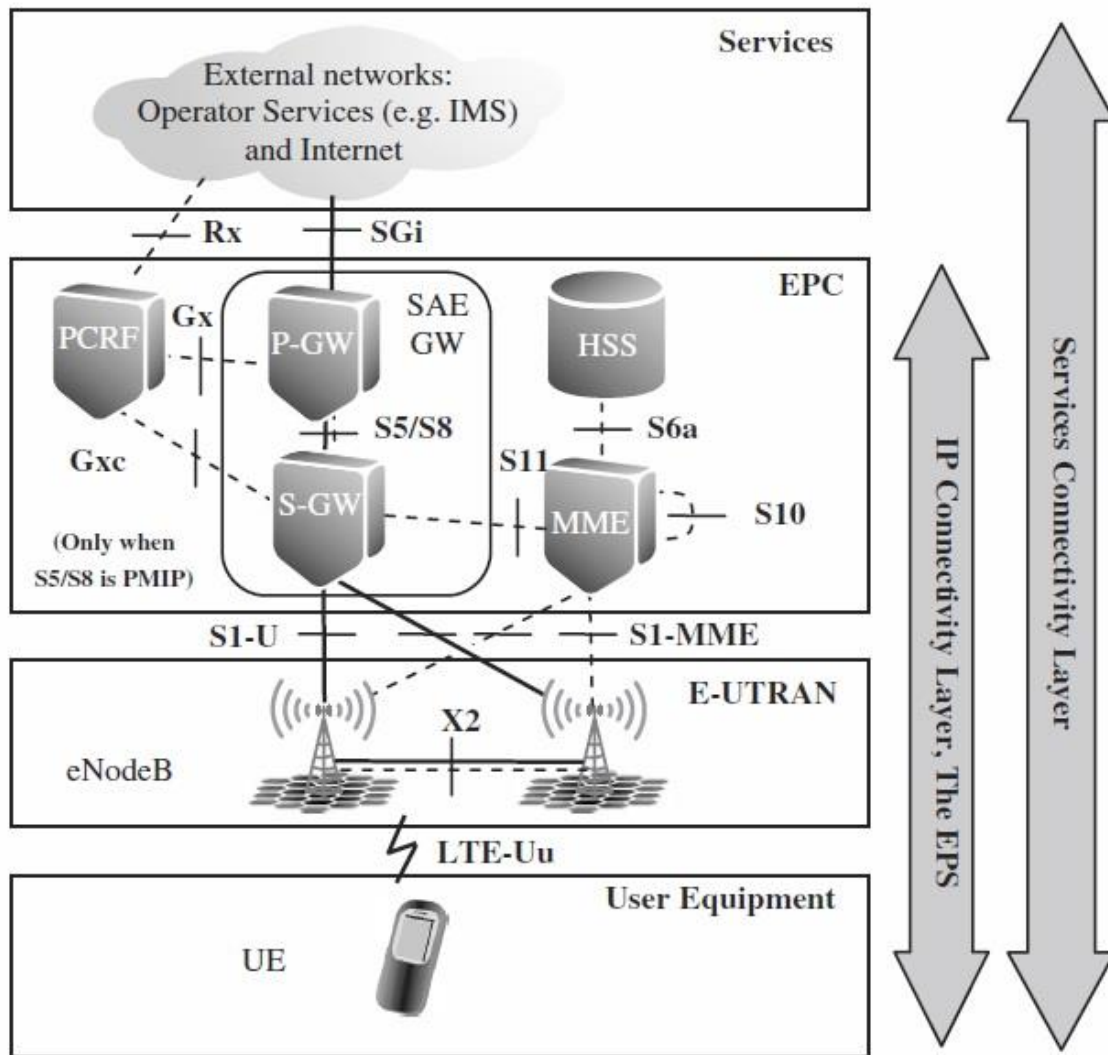


Figura 2.1: Arquitectura de red en LTE [12].

- En el EPC:

- Entidad de Gestión de la Movilidad (*Mobility Management Entity, MME*): Se encarga de la gestión de la señalización del plano de control del EPS, es decir, del control de seguridad en *Access Stratum (AS)*, señalización y seguridad en *Non Access Stratum*, gestión del área de rastreo y paginación, selección de entidades S-GW y P-GW, itinerancia y autenticación y gestión de flujos EPS (portadores EPS).
- Pasarela Servidora (*Serving Gateway, S-GW*): Se encarga del tráfico de usuario.
- Pasarela a la Red de Datos por Paquetes (*Packet Data Network Gateway, P-GW*): Se encarga de la conexión a redes IP externas.
- Función de Política y Reglas de Cargas (*Policy and Charging Rules Function, PCRF*): Se encarga del control de facturación por flujo y de decisión de políticas para control de tráfico.

- Servidor Local de Abonado (*Home Subscriber Server, HSS*): Almacena datos de usuario e información para gestión de movilidad.

2.3 Pila de protocolos

Los protocolos que vamos a ver a continuación son los de la parte del acceso radio de LTE, que son usados para establecer, reconfigurar y liberar los portadores radio, que son enlaces de comunicaciones entre dos puntos que cumplen ciertas características de calidad. Hay más protocolos en el núcleo de red, los denominados NAS (*Non-Access Stratum*) pero son transparentes para las capas de la interfaz radio.

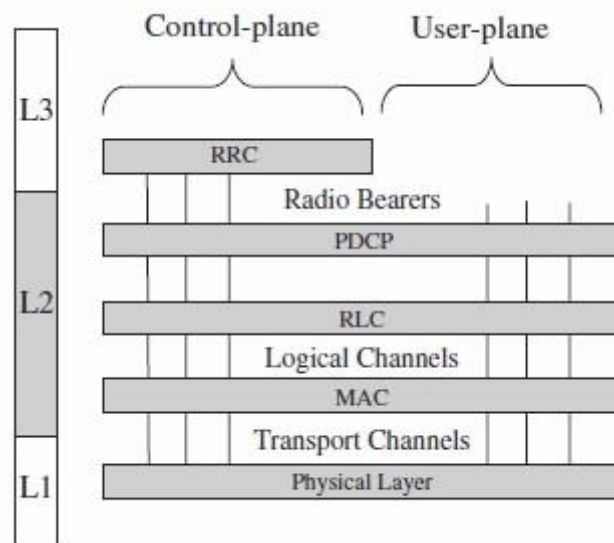


Figura 2.2: Pila de protocolos [12].

En la figura 2.2 se muestra la pila de protocolos en conjunto. Donde cada protocolo se encarga de lo siguiente [12]:

- Física.
 - Transmisión de los canales de transporte provenientes de la capa MAC.
 - Modulación.
 - Cálculo del *checksum*.
- MAC: Control de Acceso al Medio.
 - Transposición de canales lógicos a/de canales de transporte.
 - Asignación de recursos (Planificación).
 - Procedimientos de acceso aleatorio.
 - Mantenimiento de la temporización del enlace ascendente.

- Retransmisiones mediante HARQ (peticiones de repetición automáticas híbridas).
- RLC: Control del Enlace Radio.
 - Corrección de errores en modo de operación asegurado.
 - Entrega secuenciada de Unidades de Carga Útil de Datos (PDUs).
 - Detección y recuperación frente a errores de estados, como, por ejemplo, errores de señalización.
- PDCP: Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.
 - Seguridad.
 - Compresión de cabeceras.
- RRC: Control de los Recursos Radio.
 - Difunde la información del sistema.
 - Paginación.
 - Configuración y control del UE.
 - Configuración e informes de medidas.
 - Movilidad Radio.

2.4 Control de los Recursos Radio

La capa RRC provee a las capas superiores (NAS) de los siguientes servicios:

- Difusión de información común de control.
- Notificación de terminales de usuario en modo reposo.
- Transferir información dedicada de control.

Y recibe de las capas inferiores:

- Protección de la integridad y cifrado de la capa PDCP.
- Transmisiones confiables y en secuencia, sin introducir duplicados y soporte para segmentación y concatenación de la capa RLC.

Como ya se ha mencionado en el apartado de la arquitectura de protocolos, la capa RRC realiza las siguientes funciones [4, 13]:

- Difunde la información de sistema incluyendo la información común del NAS y la información pertinente del UE en estado RRC de reposo, como los parámetros de selección/reselección de célula y la información de células vecinas, y la información relativa a los UE en estado RRC de conectado como la información de configuración de canal común.
- Control de la conexión RRC que incluye las siguientes tareas:
 - Paginación de los terminales de usuario en modo reposo.

- Establecimiento, modificación o liberación de la conexión RRC, que incluye la asignación y/o modificación de la identidad del UE; establecimiento, modificación o liberación de los portadores radio de señalización (*Signalling Radio Bearer, SRB*); y clase de acceso por restricción.
- Activación de la seguridad inicial, que incluye la configuración inicial de la seguridad y cifrado del *Access Stratum*.
- Mantenimiento de la conexión RRC mientras el UE se está moviendo, que incluye manejo de la seguridad asociada a los traspasos intra-frecuencia/inter-frecuencia, es decir, cambio de clave/algoritmo o especificación de la información RRC transmitida entre nodos de red.
- Establecimiento, modificación o liberación de los portadores radio de datos (*Data Radio Bearer, DRB*).
- Configuración y control radio en las capas inferiores incluyendo las peticiones de repetición automáticas (*automatic repeat request, ARQ*), las peticiones de repetición automáticas híbridas (*hybrid automatic repeat request, HARQ*) y la configuración de recepción discontinua (*DRX*).
- Administración de la célula incluyendo cambio de célula primaria; adición, modificación o liberación de células secundarias; y adición, modificación o liberación de grupos avanzados de sincronización secundaria cuando agregación de portadoras está habilitado.
- Control de calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*) incluyendo asignación y modificación de la configuración de la planificación semi-persistente del DL/UL; asignación y modificación de parámetros para el control de la tasa de subida en el UE, es decir, asignación de una prioridad y una tasa de bit priorizada para cada portador radio.
- Recuperación desde fallo del radio enlace (*radio link failure, RLF*).
- Movilidad entre tecnologías de acceso radio (*inter-radio access technology, inter-RAT*) incluyendo activación de seguridad y transferencia de la información del contexto RRC.
- Configuración e informe de mediciones, que incluye establecimiento, modificación o liberación de mediciones intra-frecuencia/inter-frecuencia/inter-RAT; configuración y liberación de brechas de medición; e informes de medición.
- Soporte para configuraciones propias y optimizaciones propias, así como soporte para registro e informe de mediciones para optimizaciones del rendimiento de la red.

2.4.1 Estados de conexión RRC

Hay dos posibles estados RRC: RRC_CONNECTED y RRC_IDLE. Un terminal de usuario está en el estado RRC conectado cuando se ha establecido una conexión RRC con el plano de control, y en estado RRC de reposo si no se ha establecido la conexión [12].

- RRC Modo Reposo (RRC No Conectado): RRC_IDLE.
 - El UE monitoriza el canal de notificación (PCCH) para:
 - Detectar llamadas entrantes.
 - Adquirir información del sistema.
 - Realizar medidas en las células vecinas y selección/reselección de célula.
 - La movilidad entre células es controlada por el UE y la recepción discontinua (DRX) específica del UE es configurada por capas superiores.
- RRC Conectado: RRC_CONNECTED.
 - El UE transmite/recibe datos a/desde la red, para ello:
 - Monitoriza los canales de control asociados al canal compartido de datos para determinar si hay datos programados para él.
 - Proporciona datos de calidad de canal y realimenta información al eNB.
 - Adquiere información de sistema del canal BCCH.
 - La movilidad entre células es controlada por la red y la DRX configurada por capas inferiores del UE.

2.4.2 Operaciones en modo reposo

2.4.2.1 Difusión de la información del sistema

La información del sistema contiene información relacionada con el *Non-Access Stratum* (NAS) y el *Access Stratum* (AS). La información se agrupa en el bloque de información maestra (*Master Information Block*, MIB) y un número de bloques de información de sistema (*System Information Blocks*, SIBs) [13] (ver tabla 2.1).

Mensaje	Información que contiene
MIB	Adquisición de sistema y ancho de banda de sistema: número de trama del sistema (<i>System Frame Number, SFN</i>), ancho de banda del sistema del enlace de bajada y configuración PHICH.
SIB tipo 1 (SIB1)	Información relacionada con el acceso a la célula (lista de identidades de PLMN, identidad del PLMN, código TA (<i>Tracking Area</i>), identidad de célula, estado de célula), información de selección de célula e información de planificación (periodicidad y tipo de mensaje de la información de sistema, mapeo de los SIB, longitud de ventana de la información de sistema).
SIB tipo 2 (SIB2)	Información de los canales comunes y compartidos como información del acceso restringido (<i>access barring</i>), configuración de canales e información de la frecuencia del enlace de subida.
SIB tipo 3 (SIB3)	Contiene información de parámetros de selección de célula intra-frecuencia, inter-frecuencia y/o inter-RAT no relacionada con células vecinas.
SIB tipo 4 (SIB4)	Información sobre las la frecuencia servidora e intra-frecuencia de las células vecinas para la reelección de célula.
SIB tipo 5 (SIB5)	Información sobre otras células vecinas de frecuencias E-UTRA o inter-frecuencia para la reelección de célula.
SIB tipo 6 (SIB6)	Parámetros para reelección de célula Inter-RAT (UTRA).
SIB tipo 7 (SIB7)	Parámetros para reelección de célula Inter-RAT (GERAN).
SIB tipo 8 (SIB8)	Parámetros para reelección de célula Inter-RAT (CDMA2000).
SIB tipo 9 (SIB9)	Identificador del eNB natal.
SIB tipo 10 (SIB10)	Notificaciones primarias ETWS (<i>Earthquake and Tsunami Warning System</i>).
SIB tipo 11 (SIB11)	Notificaciones secundarias ETWS.
SIB tipo 12 (SIB12)	Notificaciones de alerta CMAS (<i>Commercial Mobile Alert Service</i>).
SIB tipo 13 (SIB13)	Información relacionada con el MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service).
SIB tipo 14 (SIB14)	Información sobre Acceso de Restricción Extendido (<i>Extended Access Barring</i>).
SIB tipo 15 (SIB15)	Información relacionada con los procesos de movilidad para la recepción MBMS.
SIB tipo 16 (SIB16)	Información relacionada con el tiempo del sistema de posicionamiento global (GPS) y del tiempo coordinado universal (UTC).

Tabla 2.1: Mensajes de difusión de información [13].

Tanto el MIB como los SIBs se mapea en el BCCH, pero se transportan en diferentes canales de transporte: el MIB en el BCH y los SIBs dinámicamente en el DL-SCH, donde pueden ser identificados gracias a la información de sistema RNTI (SI-RNTI). Mientras que el MIB y el SIB1 usan una planificación fija con una periodicidad de 40 y 80 ms respectivamente, los demás SIBs están contenidos en mensajes de

información de sistema que son planificados de manera flexible y señalizada en el SIB1 [12]. El periodo de la transmisión de estos mensajes depende de la rapidez en la que tenga que adquirirlos el UE al acceder a una célula, por lo que los SIBs con menor orden, que son más críticos en tiempo, son transmitidos más a menudo que los de mayor orden.

La información de sistema, excepto del ETWS, solo se puede modificar en unas tramas radio específicas. Al realizar los cambios, se informa a los UEs, en estado RRC reposo y conectado, mediante un mensaje de paginación, en el periodo de modificación actual, para que puedan adquirir la nueva información de sistema inmediatamente en el inicio del próximo periodo de modificación, como se muestra en la figura 2.3.

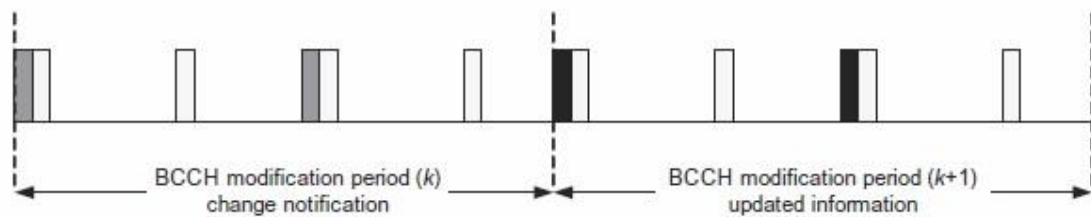


Figura 2.3: Sincronización del cambio de la información del sistema [13].

2.4.2.2 Selección de red pública móvil terrestre

Para seleccionar una Red Pública Móvil Terrestre (*Public Land Mobile Network, PLMN*) y acampar en una célula, el UE usa la información almacenada en el Módulo de Identificación del Abonado (*Universal Subscriber Identity Module, USIM*) y en el terminal móvil. Con la Identidad Internacional del Abonado a un Móvil (*International Mobile Subscriber Identity, IMSI*), en el USIM, se calcula el código de PLMN Natal (*Home PLMN, HPLMN*) y además intervendrá en la selección de la PLMN. Los USIM pueden tener una lista de HPLMN equivalentes con prioridades, que puede determinar la selección del PLMN. El USIM también conoce las tecnologías de acceso radio (RAT) permitidas en cada PLMN.

La PLMN se elige mediante la Selección de Sistema (*System Selection, SS*), en la que se tiene en cuenta la banda de frecuencia y el RAT. A esta PLMN seleccionada se le conoce como PLMN Registrada (*Registered PLMN, RPLMN*) y se almacena en el USIM para futuras selecciones de sistema.

Si una PLMN es seleccionada pero el UE no puede registrarse porque es rechazado (“PLMN no autorizada”), se añade la PLMN a la lista de PLMN prohibidas, que se conserva al apagar el UE. Las “PLMN prohibidas por servicio GPRS” son borradas

cuando el UE se apaga y lo mismo ocurre con las listas de Área de Rastreo prohibidas (*Tracking Area, TA*), que se obtiene al registrarse.

El UE usa para la selección de PLMN, selección/reselección de célula y trasposos, la PLMN Registrada o una lista de PLMNs Equivalentes (*Equivalent PLMN, EPLMN*), que obtuvo al registrarse y donde todas las PLMNs son consideradas con la misma prioridad.

Cuando el UE no se consigue registrar en una PLMN, el UE indica “sin servicio” al usuario, y espera hasta que detecta una nueva PLMN o hasta que encuentra un Área de Rastreo de una PLMN autorizada que no está en la lista de Áreas de Rastreo prohibidas.

El UE normalmente opera en su HPLMN o HPLMN Equivalente. Solo selecciona una PLMN Visitada (*Visited PLMN, VPLMN*) cuando pierde la cobertura, a menos que el usuario decida seleccionarla en modo manual.

2.4.2.3 Selección de célula

Después de seleccionar una PLMN, se lleva a cabo el proceso de selección de célula. Mediante este proceso el UE encuentra una célula adecuada para acampar y acceder a los servicios disponibles. Hay dos posibles procedimientos dependiendo de si el UE tiene almacenada información de la frecuencia de los portadores [13]:

- Selección de Célula Inicial: Procedimiento que se da cuando no se tiene información de que canales de radiofrecuencia son portadores E-UTRAN. El UE debe escanear todos los canales de radiofrecuencia en las bandas de E-UTRA, de acuerdo a sus capacidades, para encontrar una célula adecuada.
- Selección de Célula con Información Almacenada: Este procedimiento requiere que se tenga almacenado información sobre las frecuencias de portador y, opcionalmente, información sobre los parámetros de la célula de recepciones anteriores de elementos de información de control de medición o de células detectadas previamente. Si no se encuentra una célula adecuada, se inicia el procedimiento de Selección de Célula Inicial.

Para que un UE pueda acampar en una célula, ésta tiene que cumplir un número de requisitos [14]:

- Parte de PLMN Seleccionada, Registrada o Equivalente.
- No prohibida.
- Parte de un Área de Rastreo que no esté prohibida.
- El Identificador de Grupo de Abonados Cerrado (*Closed Subscriber Group, CSG*) debe estar en la Lista CSG.

- Debe satisfacer el Criterio S, que el UE calcula, con datos conocidos por el UE y datos obtenidos del SIB1, para saber si la célula es adecuada en términos de fuerza y calidad de la señal.

Dependiendo de la suscripción o clase de acceso, la célula puede ser adecuada para un UE y no adecuada para otro (ver tabla 2.2).

Categorías de células	
Célula servidora	La célula donde está acampado el UE.
Célula adecuada	Célula que cumple los criterios de selección y donde el UE puede acampar para obtener servicio normal.
Célula aceptable	Célula que cumple los criterios de selección y no está prohibida. El UE puede acampar para obtener servicio limitado.
Célula prohibida	Célula donde no le está permitido acampar al UE.
Célula restringida	Célula donde acampar está permitido, pero los intentos de acceso no están permitidos para los UEs cuyas clases de acceso están indicadas como prohibidas.
Célula reservada	Célula donde acampar no está permitido, excepto para algunos UEs indicados en la información de sistema.
Célula CSG	Célula a la que solo los miembros del CSG pueden acceder.

Tabla 2.2: Categorías de células [14].

Si el UE consigue encontrar una célula, en la PLMN seleccionada, que satisfaga el Criterio S y no esté prohibida, el terminal de usuario podrá acampar para obtener “servicio limitado” (ver tabla 2.3).

Tipos de servicio	
Normal	El UE puede recibir paginación y hacer la transición hacia el estado RRC Conectado.
Operador	Para operadores en células reservadas.
Limitado	Llamadas de emergencia y ETWS.

Tabla 2.3: Tipos de servicio de células [14].

Una vez que el UE está acampado para conseguir servicio normal, el UE realiza un proceso de Adhesión y un proceso de Conectividad a la Red de Datos por Paquetes (*Packet Data Network*, PDN) para registrar su localización en la PLMN seleccionada y obtener información del Área de Rastreo [13]. Esto habilita a la PLMN a alcanzar al UE. Además, el UE debe medir el nivel de la Potencia Recibida de la Señal de Referencia (*Reference Signal Received Power*, RSRP) y evaluar el Criterio S de la célula servidora al menos cada ciclo de recepción discontinua (DRX). El UE debe ser capaz de identificar

nuevas células intra-frecuencia y realizar medidas RSRP de dichas células sin una lista explícita de las células vecinas intra-frecuencia con sus identidades de célula de la capa Física.

El NAS es informado si, debido a la selección y reelección de célula, hay cambios relevantes para el NAS en la información de sistema recibida.

2.4.2.4 Reelección de célula

Hay tres tipos de reelección de célula dependiendo de la frecuencia y la tecnología de acceso radio de la nueva célula seleccionada: Intra-frecuencia e Inter-frecuencia (Intra-LTE o Inter-RAT). Las dos últimas están basadas en los mismos principios de comparación que se explican en el caso de Intra-frecuencia, pero con parámetros adicionales.

Reelección de célula Intra-frecuencia

Los bloques de información de sistema SIB1, SIB3 y SIB4 proveen al UE de parámetros que son considerados durante la reelección de célula. El SIB3 contiene parámetros de reglas de medición. La E-UTRAN requiere que el UE detecte y mida las células vecinas cuando su valor del nivel de recepción esté por debajo de un umbral específico, obtenido del SIB3. Después de realizar las medidas, el UE aplica el criterio de clasificación y selecciona la célula más alta. En la figura 2.4 se muestra el proceso. La nueva célula tiene que ser adecuada para acampar.

Durante el ciclo DRX, si el UE determina que la célula servidora no cumple el Criterio S de selección de célula, empezará a medir todas las células vecinas independientemente de las reglas de medición que limitan las actividades de medición del UE.

Si el UE en estado RRC reposo busca durante 10 segundos sin encontrar una nueva célula adecuada basándose en búsquedas y mediciones usando la información de intra-frecuencia, inter-frecuencia e inter-RAT indicada en la información de sistema, al UE se le considerará *fuera de servicio*.

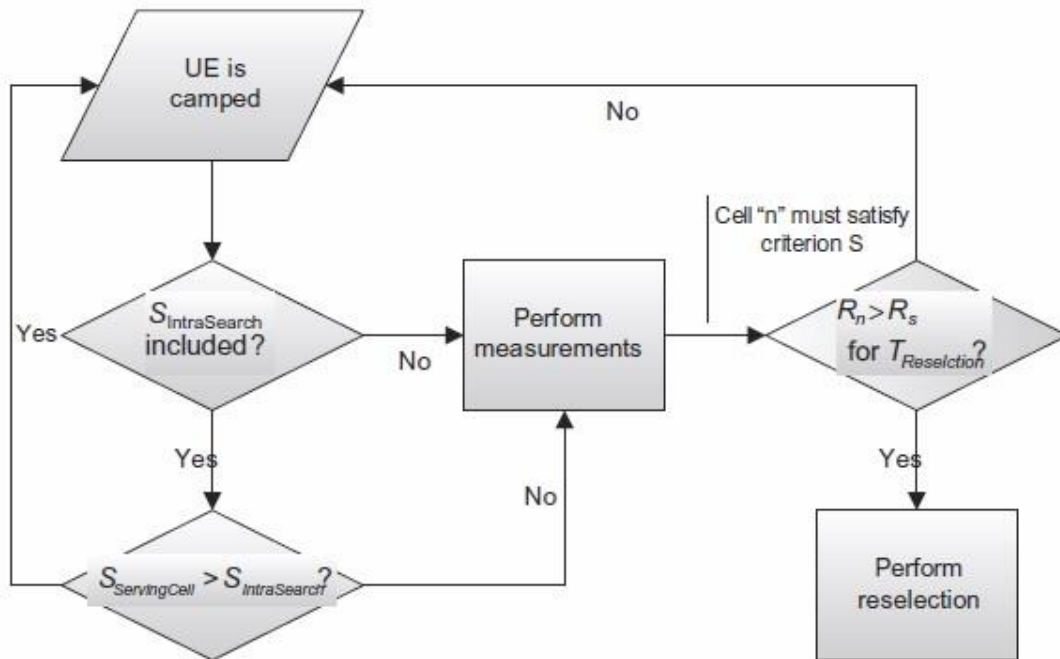


Figura 2.4: Ilustración de la reelección de célula Intra-frecuencia [13].

Reselección de célula Inter-frecuencia (Intra-LTE/Inter-RAT)

La reelección inter-frecuencia está basada en prioridades absolutas: el UE trata de acampar en la frecuencia con mayor prioridad disponible. Estas prioridades son proporcionadas por en el SIB5 y son válidas para todos los UEs en la célula servidora. Además, prioridades específicas para cada UE pueden ser señalizadas como parte del mensaje de Liberación de la Conexión RRC. Las prioridades de las señalizaciones dedicadas son borradas cuando el UE entra en el estado RRC conectado, el temporizador T320 expira (E-UTRAN), o cuando se selecciona una PLMN [13]. Solo las frecuencias listadas en el SIB5 son consideradas para reelecciones inter-frecuencia. La lista puede contener un máximo de 8 inter-frecuencias que al UE le están permitidas monitorizar en E-UTRAN. Los parámetros proporcionados por el SIB3 también son considerados para evaluaciones de clasificación.

Cuando una célula es seleccionada o reeleccionada, el UE no puede reeleccionar una nueva célula durante al menos 1 segundo. Esta restricción asegura que las decisiones de reelección no son tomadas como respuesta a variaciones de la señal de radiofrecuencia. Para células vecinas inter-frecuencia, es posible indicar un *offset* específico para la célula que se considere durante la reelección. Estos parámetros son comunes para todas las células en diferentes frecuencias. Para prevenir que el UE reeleccione una célula en ciertas intra-frecuencias e inter-frecuencias, se le puede proveer con una lista negra. Además, la reelección de célula también puede ser dependiente de la movilidad, basándose en la velocidad del UE.

En la figura 2.5 se puede ver el proceso que se sigue a la hora de la reelección de célula Inter-frecuencia, ya sea Intra-LTE o Inter-RAT.

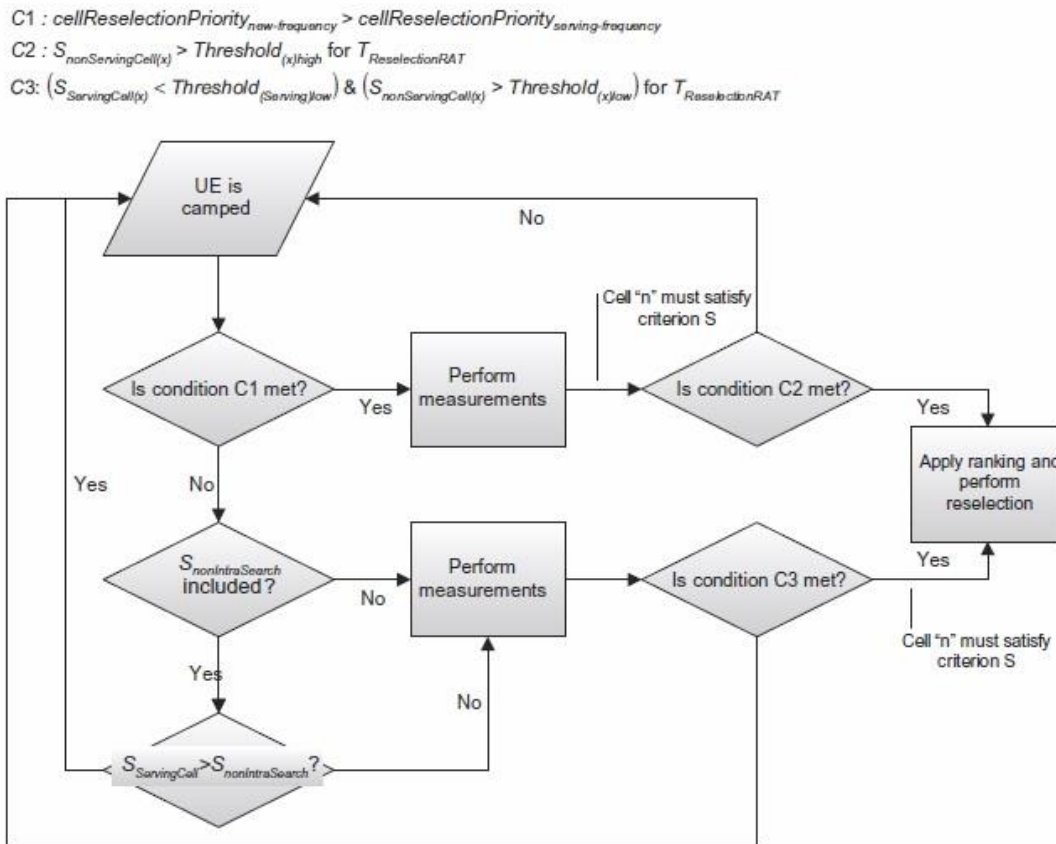


Figura 2.5: Ilustración del proceso de reelección Inter-frecuencia [13].

Reselección de célula Inter-RAT

Los bloques de información del sistema SIB6, SIB7 y SIB8 son los encargados de proporcionar la información relacionada para las tecnologías de acceso radio UTRAN/GERAN/CDMA2000, respectivamente.

- *UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access (3G)*: Si se toman medidas de células UTRA FDD, el UE debe medir el CPICH E_c/I_0 y el CPICH RSCP de las células UTRA FDD en la lista de células vecinas.
- *GERAN - GSM/EDGE Radio Access Network (2G/2,5G)*: Se mide el nivel de la señal del portador GSM BCCH de cada célula vecina GSM indicada en el control de medidas en la información de sistema de la célula servidora.
- *CDMA2000 - Code Division Multiple Access 2000 (3G)*: El UE realiza mediciones de la fuerza del Piloto CDMA2000 HRPD de las células HRPD en la lista de células vecinas. Además, se le puede pedir al UE que se pre-registre en la red HRPD. El pre-registro reduce el tiempo requerido para la reelección de célula y

el traspaso habilitando el establecimiento de las sesiones HRPD y Protocolo Punto a Punto por adelantado. El nodo E-UTRA actúa como un agente repetidor que transfiere los mensajes de configuración inicial de la sesión.

2.4.2.5 Paginación

El propósito de este procedimiento es [4]:

- Transmitir la información de paginación al UE en estado RRC de reposo.
- Informar a los UEs en estado RRC de reposo y RRC conectado sobre:
 - Cambios en la información del sistema.
 - Notificaciones primarias ETWS.
 - Notificaciones secundarias ETWS.
 - Informar sobre notificaciones CMAS.

La información de paginación se proporciona a las capas superiores, que en respuesta pueden iniciar el establecimiento de una conexión RRC, por ejemplo, para recibir una llamada entrante.

Los UE pueden usar recepción discontinua en modo reposo para reducir el consumo. Debido a esto, para poder recibir la información de paginación, tienen que calcular cuando despertarse y comprobar la subtrama correcta del PCCH. Para ello, el UE guarda el ciclo por defecto de la paginación y el número del grupo de paginación cuando recibe la información necesaria del SIB2 y aplica los cálculos descritos en la sección 7 del TS 36.304 [12].

Los terminales de usuario son paginados basándose en el IMSI o S-TMSI (ID temporal del UE asignado por el MME) con indicador de dominio del CN: dominio de circuitos (CS) o dominio de paquetes (PS). Si la red utiliza el IMSI para la paginación, el UE se desagrega localmente e inicia un proceso de Adhesión.

2.4.3 Operaciones en modo conectado

2.4.3.1 Portadores radio de señalización y datos

Un portador radio de señalización (SRB) se define como un portador radio que solo se usa para transmisiones de mensajes RRC y NAS. Se definen tres tipos de SRB en E-UTRA [4] (ver tabla 2.4).

SRB	Tipo de mensaje	Canal lógico asociado
SRB0	- Mensajes RRC (usado cuando se establece una conexión RRC)	CCCH
SRB1	- Mensajes RRC - mensajes RRC con mensajes NAS piggybacked - mensajes NAS anteriores al establecimiento del SRB2	DCCH
SRB2	- Mensajes NAS - mensajes RRC con mensajes NAS piggybacked (prioridad menor que SRB1)	DCCH

Tabla 2.4: E-UTRA SRBs y su uso [13].

Mientras que los portadores radio de señalización transportan datos del plano de control, los portadores radio de datos (DRB) se encargan de transportar datos del plano de usuario. Son establecidos por el eNB en el estado RRC conectado basándose en la información relevante del MME (*Mobility Management Entity*). Pueden ser modificados y liberados basándose en la información de señalización recibida por el MME. Puede haber hasta un máximo de 8 DRBs establecidas por cada UE [14], que están ligados a los identificadores de los portadores EPS (*Evolved Packet System*) en el ESM (*EPS Session Management*) (NAS). Incluyen información de calidad de servicio para el portador radio, que habilita al eNB a configurar apropiadamente los parámetros PDCP, RLC y MAC.

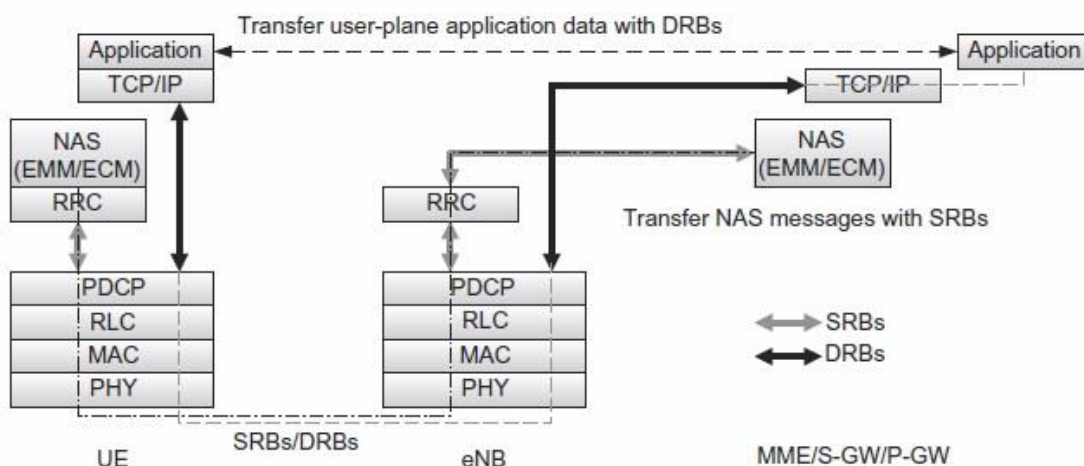


Figura 2.5: Distintos portadores radio en el estado RRC conectado [13].

Los UE en estado RRC de reposo no tienen asignado ningún SRB o DRB. El UE requiere SRBs y DRBs dedicados para intercambiar datos/mensajes con la red.

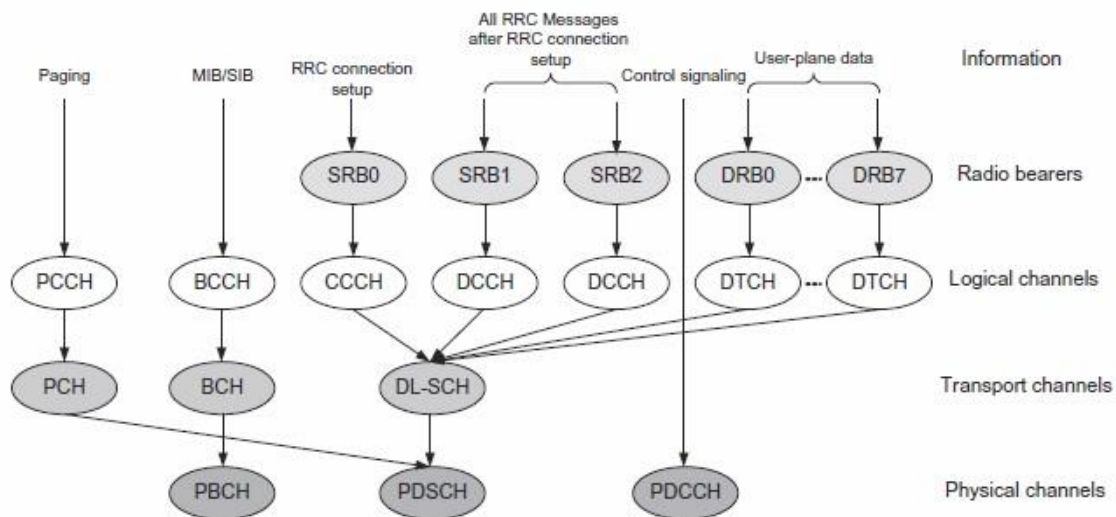


Figura 2.6: Mapeo de la información de DL a portadores radio, así como canales lógicos, canales de transporte y canales físicos [13].

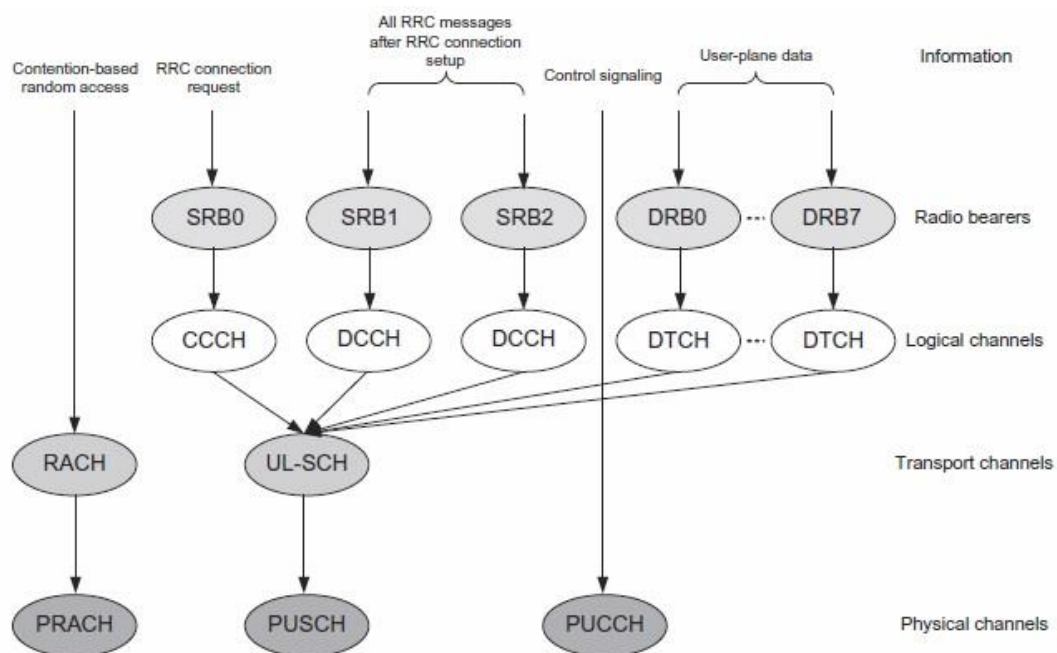


Figura 2.7: Mapeo de la información de UL a portadores radio, así como canales lógicos, canales de transporte y canales físicos [13].

2.4.3.2 Control de la conexión RRC

El *Non Access Stratum* es el encargado de iniciar el establecimiento de la conexión RRC, que implica el establecimiento del SRB1, y que se completa antes del establecimiento de la conexión S1 (conecta al eNB con el Núcleo de Paquetes

Evolucionado, *Evolved Packet Core*, EPC). Esto significa que la conectividad en el estado RRC conectado está limitada inicialmente al intercambio de información de control entre el UE y E-UTRAN. Además de que la seguridad del *Access Stratum* no esté activada durante la fase inicial de la conexión RRC. Al no tener la seguridad activada, el UE no acepta mensajes de traspaso a pesar de que el UE puede estar configurado para realizar informes de mediciones. El UE usa el procedimiento de acceso aleatorio (descrito en el apartado 2.5.6.1 de este trabajo) para enviar el mensaje *RRCConnectionRequest* [4]

El E-UTRAN activa la seguridad (que se compone de cifrado y protección de integridad), mediante el procedimiento de activación de seguridad inicial, tras recibir el contexto del UE del EPC. Los mensajes RRC que activan la seguridad (orden y respuesta) están protegidos en integridad, pero no cifrados. E-UTRAN aplica tanto cifrado como protección de integridad a los mensajes siguientes (*RRCConnectionReconfiguration*) que se usan para establecer SRB2 y DRBs. Si la iniciación de la seguridad inicial o el establecimiento del portador radio falla, el E-UTRAN libera la conexión RRC. El proceso *RRCConnectionReconfiguration* también se usa para la modificación y liberación de portadores radio, traspasos, configurar o modificar mediciones, y añadir, modificar o liberar células secundarias.

Después de la activación de la seguridad inicial, el E-UTRAN puede configurar a un UE que tenga habilitado la agregación de portadoras, con una o más células secundarias (SCell) además de la célula primaria (PCell) que ha sido configurada inicialmente durante el establecimiento de la conexión RRC (la agregación de portadoras se explica en el apartado 2.5.4). La Pcell provee de las entradas seguridad y la información de sistema de las capas superiores. Las SCells proveen de recursos radio adicionales en el enlace de bajada y subida.

El proceso de liberación de la conexión RRC lo inicia el E-UTRAN. Mediante este proceso, el E-UTRAN puede redirigir al UE hacia otra frecuencia E-UTRA o una frecuencia de portadora inter-RAT. El mensaje *RRCConnectionRelease* es el encargado de la liberación de la conexión RRC, que incluye todos los portadores radio y recursos radio. La red empieza el proceso de liberación cuando se dan dos posibles situaciones: cuando el UE entra en inactividad y cuando la red necesita balancear la carga, es decir, cuando el MME debe descargar al usuario hacia a otro MME. Además, el mensaje *RRCConnectionRelease* puede contener prioridades específicas para la reelección de célula. Estas prioridades permiten a la red distribuir a los usuarios en múltiples frecuencias de ubicación conjunta en una célula particular [13].

El UE no puede iniciar la liberación de la conexión RRC. Aunque, solo en casos excepcionales, el UE puede anular la conexión RRC, es decir, cambiar al estado RRC reposo sin notificárselo al E-UTRAN.

En la figura 2.8 se ilustran los pasos del establecimiento de la conexión RRC, la señalización NAS y los mensajes de control RRC.

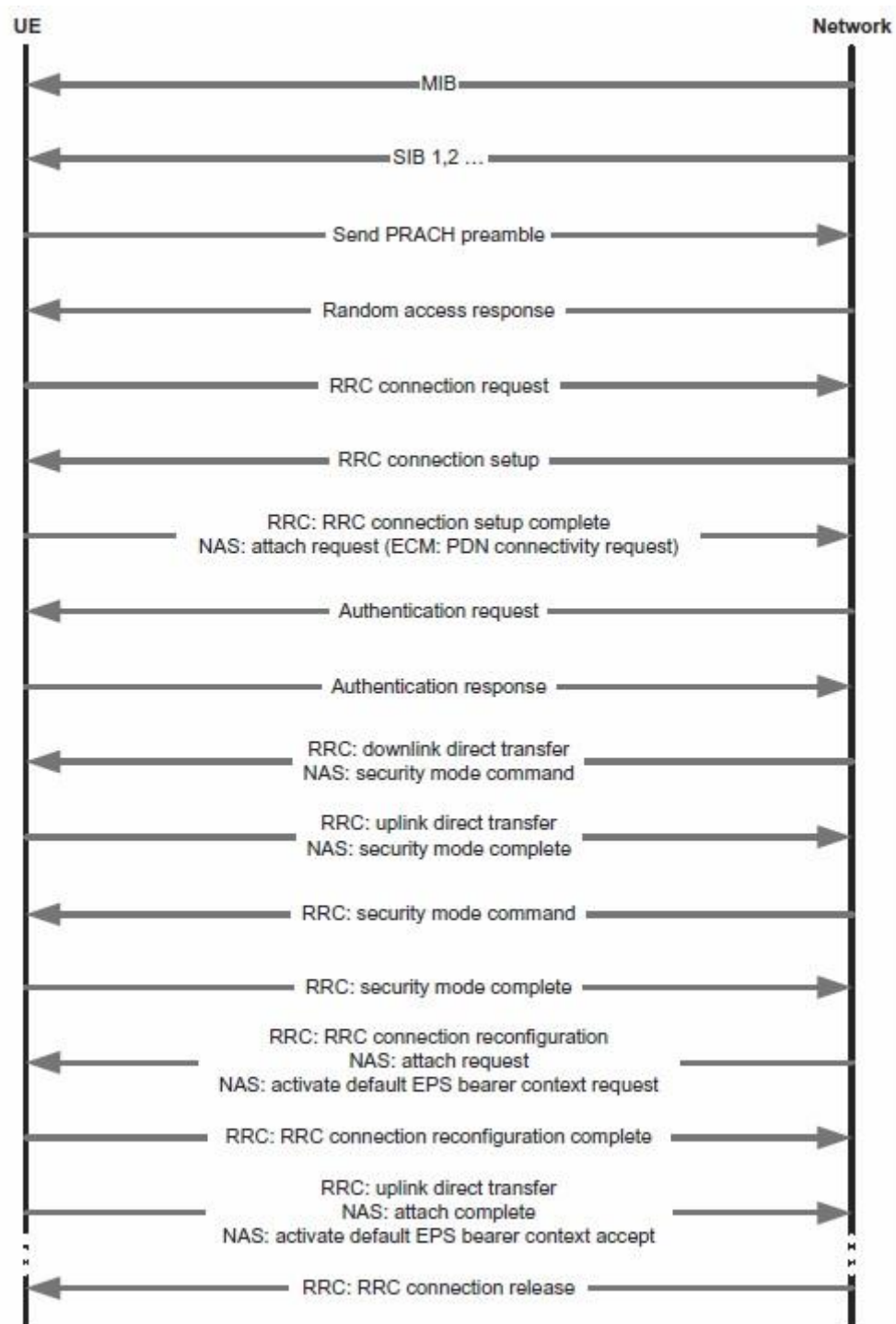


Figura 2.8: Pasos de la señalización para el establecimiento, reconfiguración y liberación de la conexión RRC [13].

Además de los procesos ya mencionados, está el proceso de restablecimiento de la conexión RRC. Este proceso se activa para continuar la conexión RRC cuando se produce un fallo en el radioenlace, traspaso, movilidad, comprobación de la integridad o reconfiguración de la conexión RRC. Consiste en la reanudación del SRB1, la reactivación de la seguridad y la configuración de solamente la célula primaria. El restablecimiento de la conexión tiene éxito si la célula tiene un contexto válido del UE. Si la seguridad AS no ha sido activada, el UE no inicia este proceso y se mueve al estado RRC reposo [14].

2.4.3.3 Procesos de registro a la red

Tras establecer una conexión RRC, el UE manda un mensaje de Petición de Registro (*Attach Request*) a la MME para registrarse en la red EPS. A la vez que la petición de adhesión, el UE realiza una petición de conectividad PDN (Red de Datos por Paquetes). Después de que las conexiones de señalización necesarias están establecidas, el EPC puede iniciar las funciones de seguridad. Cuando el UE se conecta a la red de acceso radio de LTE, se establece automáticamente un camino a la PDN (proveyéndole de conectividad IP). Este estado conectado se mantiene continuamente, al contrario que la conexión del enlace radio que se libera tras cierto tiempo sin actividad. Debido a esto, solo el enlace radio debe ser reconfigurado cuando el terminal reanuda la comunicación de datos. Además, la dirección IP obtenida cuando el terminal se adhiere se usa hasta que éste se separe de la red.

El proceso desde que un UE se adhiere inicialmente al núcleo de red hasta que consigue establecer la conexión PDN se muestra en la figura 2.9, y se explica a continuación [13].

- 1- El UE establece la conexión RRC con el eNB.
- 2- El UE manda el mensaje de Petición de Adhesión junto al mensaje de Petición de Conectividad PDN. El eNB establece la conexión lógica S1 con el MME para el UE. Un eNB puede estar asociado a múltiples MMEs en una misma o múltiples PLMNs. Por lo que, el eNB selecciona un MME en la PLMN seleccionada basándose en el estado de carga de las MMEs.
- 3- El MME actualiza el servidor local de abonado (*Home Subscriber Server, HSS*) con la localización del UE usando el mensaje de Petición de Actualización de Localización (*Update Location Request*). También usa este mensaje para pedir el perfil del abonado al HSS. EL HSS actualiza su base de datos con la localización actual del UE y envía la información del perfil del abonado al MME con el mensaje Actualización de la Localización Reconocida (*Update Location Acknowledgement*).

- 4- Pueden haber múltiples Pasarelas PDN (*PDN Gateway*, P-GW) y Pasarelas Servidoras (*Serving Gateway*, S-GW) para un nombre del punto de acceso (*Access Point Name*, APN) dado. Solo un S-GW y P-GW pueden servir a un UE en un APN. EL MME inicia la configuración del portador EPS con el P-GW. Esto lo consigue seleccionando un P-GW en la APN suscrita por defecto y luego selecciona un S-GW.
- 5- EL MME envía un mensaje de Petición de Creación de Sesión (*Create Session Request*) al S-GW para establecer un camino de transmisión hacia el PDN por defecto.
- 6- Al recibir el S-GW la petición, pide al P-GW una Actualización de la Unión al Proxy (*Proxy Binding Update*). El P-GW le asigna una dirección IP al terminal y se lo notifica al S-GW con un mensaje de Unión al Proxy Reconocida (*Proxy Binding Acknowledgement*). Con este proceso se ha establecido una vía comunicación del núcleo de red continua entre el P-GW y el S-GW para la dirección IP asignada.
- 7- Se establece un portador de acceso radio del S-GW al eNB, donde se envía al MME un mensaje de Respuesta de Creación de Sesión (*Create Session Response*). Este mensaje contiene la información necesaria para configurar el portador de acceso radio del eNB al S-GW.
- 8- El MME envía el mensaje de Respuesta de Creación de Sesión al eNB en un mensaje de Petición de Configuración de Contexto Inicial (*Initial Context Setup Request*). Este procedimiento contiene el mensaje de Aceptación del Registro (*Attach Accept*), que al recibirlo el terminal, envía una respuesta de Registro Completo (*Attach Complete*) al MME.
- 9- El eNB establece el enlace radio de datos y envía el mensaje de Aceptación de la Adhesión al terminal. También configura el portador de acceso radio del eNB al S-GW y envía un mensaje de Respuesta de Configuración de Contexto Inicial (*Initial Context Setup Response*) al MME. Este mensaje contiene información emitidos por el eNB para establecer un portador de acceso radio desde el S-GW al eNB.
- 10- El MME envía el mensaje de Respuesta de Configuración de Contexto Inicial al S-GW en un mensaje de Petición de Modificación de Portador (*Modify Bearer Request*). El S-GW completa la configuración del portador radio preparado previamente del S-GW al eNB y envía un mensaje de Respuesta de Modificación de Portador (*Modify Bearer Response*) al MME.

Quando el UE no requiere más servicios de la red, como por ejemplo cuando se apaga el dispositivo, se da de baja iniciando el Proceso de Desregistro (*Detach Procedure*). Este proceso se inicia cuando el UE envía el mensaje de Petición de Desregistro (*Detach Request*). EL eNB y el UE desactivan el contexto del portador EPS sin señalización adicional entre el UE y el MME. El MME envía el mensaje de Aceptación del Desregistro (*Detach Accept*) al UE, a no ser que la separación sea

debida a un apagado del dispositivo. Mientras se procesa el mensaje de separación del UE, el MME inicia la liberación de los portadores EPS en la red y elimina el contexto del UE retenido en el eNB.

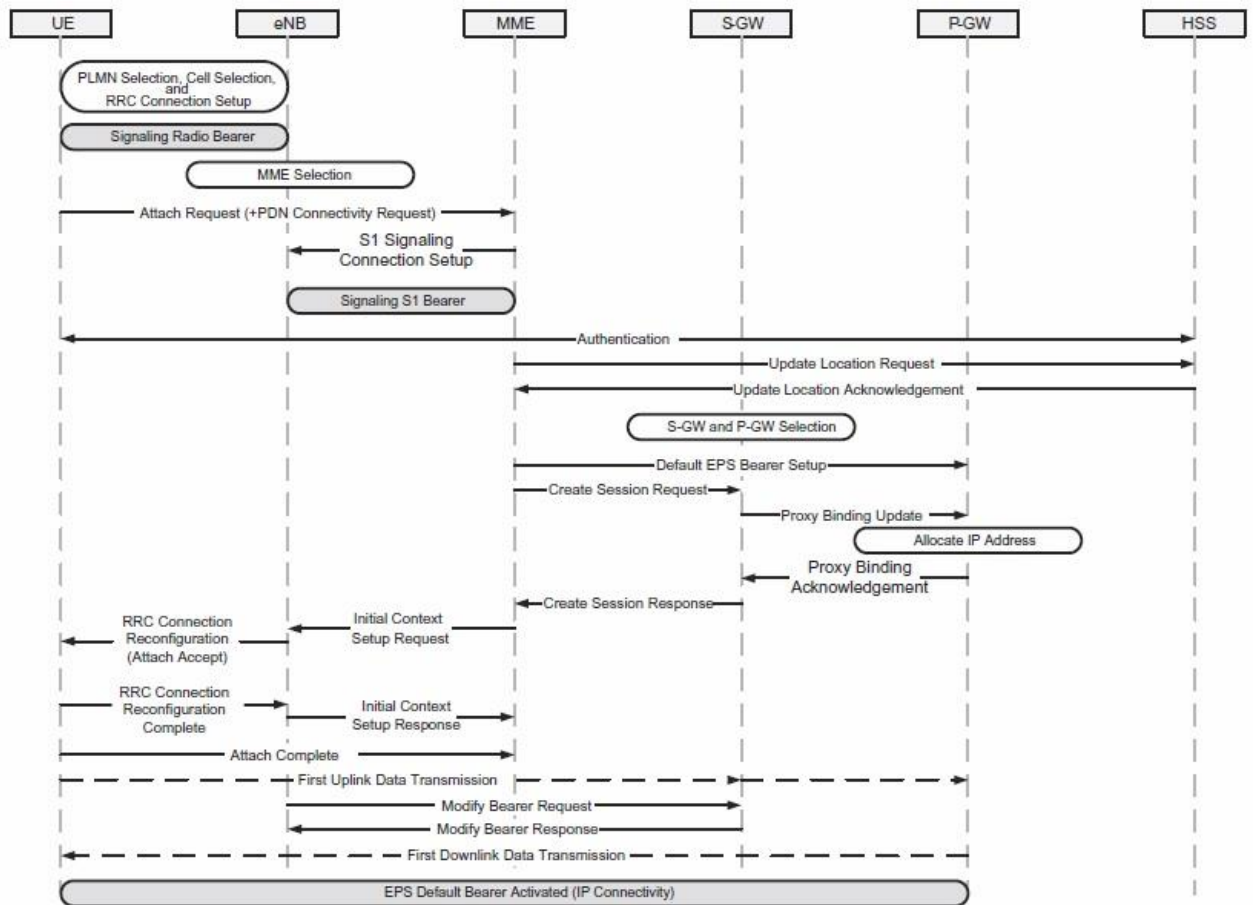


Figura 2.9: Proceso de Registro [13].

2.4.3.4 Movilidad en estado conectado

Las decisiones de movilidad son tomadas por el E-UTRAN para garantizar la conectividad del UE. La red comienza el proceso de traspaso (*handover procedure*) basándose en las condiciones radio y carga. Para ello, el UE realiza informes de medidas. La red puede iniciar un traspaso ciego, es decir, sin haber recibido las medidas desde el UE. Se pueden iniciar traspasos tanto de las células primarias como de las Secundarias [4].

Antes de enviar el mensaje de traspaso al UE, el eNB prepara las células objetivo (a las que se va a mover el UE). Selecciona la célula primaria, donde su eNB decide que células secundarias se configuran para usarse tras el traspaso.

Al recibir el mensaje de traspaso, el UE intenta acceder a la célula primaria objetivo en la primera ocasión del RACH. El proceso de acceso aleatorio puede ser con contienda o libre de contienda, dependiendo de los recursos enviados por el eNB objetivo. Tras completar el traspaso, el UE envía un mensaje de confirmación del traspaso.

Si el traspaso falla, el UE inicia el proceso de Establecimiento de la Conexión RRC, siempre que la seguridad esté activa. Si la seguridad no está activa, el UE se mueve al estado RRC reposo.

2.5 Capa física

2.5.1 Acceso múltiple y modulación

La capa física de LTE tiene dos esquemas de acceso múltiple: OFDM y SC-FDMA. En el UL está basado en Acceso Múltiple por División en Frecuencia de una Portadora (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA*) y en DL en Acceso Múltiple por División en Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*), con prefijo cíclico en ambos casos. Para apoyar la transmisión tanto en espectro pareado como no pareado LTE tiene dos posibles modos de duplexación: Duplexación por División en Frecuencia (*Frequency Division Duplex, FDD*), tanto en *full duplex* como *half duplex*, y Duplexación por División en Tiempo (*Time Division Duplex, TDD*) [5].

La modulación usada por LTE varía dependiendo del tipo de canal físico y el estado del medio. En el UL se usa QPSK, 16QAM y 64QAM para datos y control, excepto el canal PRACH, que usa modulación en fase con secuencias *Zadoff-Chu*. Para el DL se utiliza QPSK, 16QAM y 64QAM para datos y BPSK y QPSK para control [5].

2.5.2 Estructura de tramas

Cada trama dura 10 ms y se divide en diez subtramas de 1 ms. Cada subtrama tiene dos slots de 0.5 ms. Existen dos tipos de estructuras de tramas de radio: una para FDD y otra para TDD [6].

- FDD: hay disponibles una trama para subida y otra para bajada separadas en frecuencia (figura 2.10).

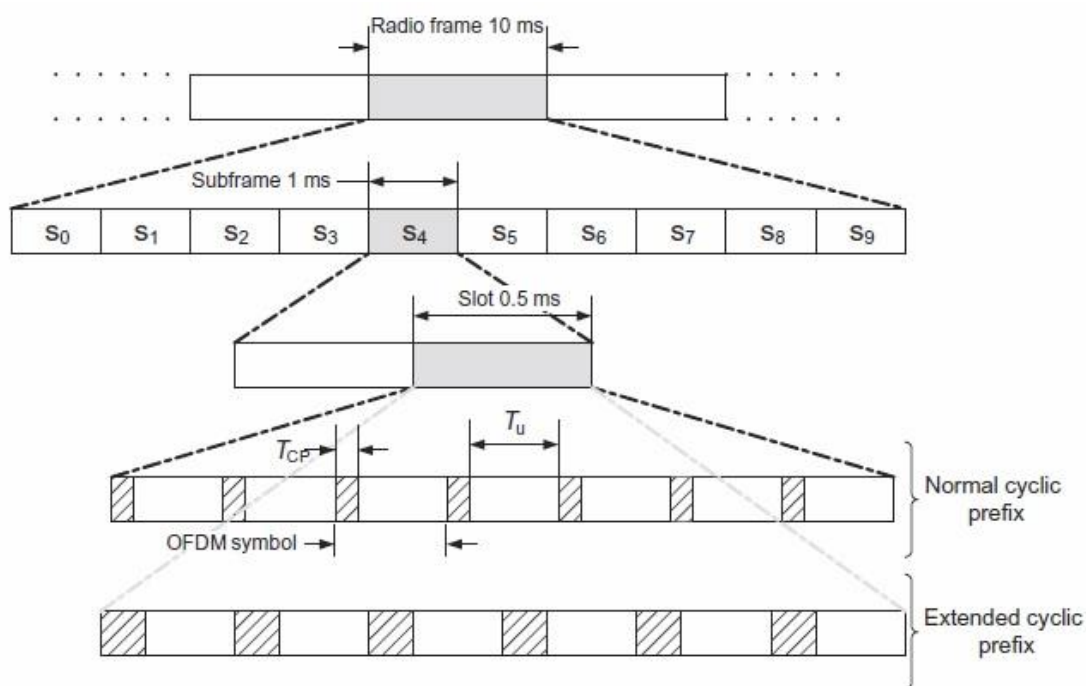


Figura 2.10: Estructura de tramas para FDD [13].

- TDD: se alterna entre subida y bajada en las mismas frecuencias. Existen distintas posibles configuraciones dependiendo del canal, que están listadas en la siguiente tabla, donde "D" se refiere a una subtrama reservada para bajada, "U" a una subtrama para subida y "S" indica una subtrama especial con tres campos: *Downlink Pilot Time Slot* (DwPTS), *Guard Period* (GP) y *Uplink Pilot Time Slot* (UpPTS) (figura 2.11 y tabla 2.5).

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 2.5: Configuraciones de tramas para TDD [6].

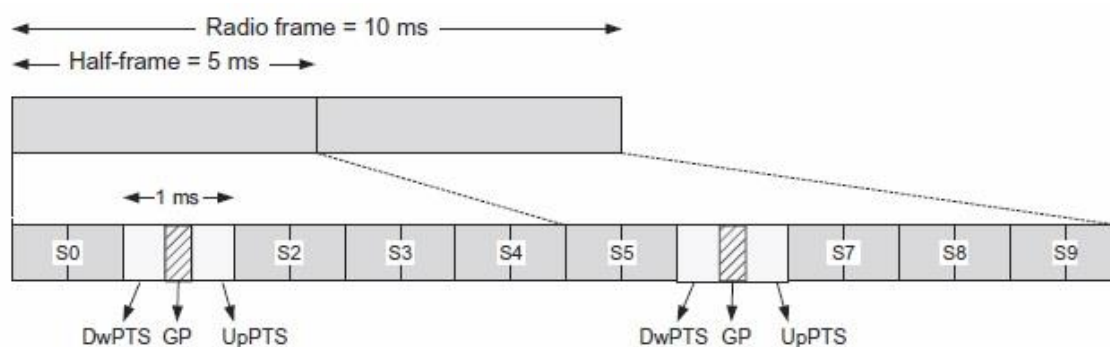


Figura 2.11: Estructura de tramas para TDD [13].

Este trabajo se centra en el caso FDD.

2.5.3 Rejilla de recursos

La asignación de recursos de frecuencia y tiempo se representa por medio de una rejilla. Su unidad mínima es el elemento de recurso (*Resource Element*), que equivale a un símbolo y una subportadora. Estos se agrupan en bloques de recursos (*Resource Blocks, RB*), que se definen como N_{symb} símbolos consecutivos en el dominio del tiempo y N_{sc}^{RB} subportadoras consecutivas en el dominio de la frecuencia. Cada bloque corresponde a un slot y ocupa 180 kHz. Los valores que pueden tomar N_{symb} y N_{sc}^{RB} son:

Configuración para UL		N_{sc}^{RB}	N_{symb}^{UL}
Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15$ kHz	12	7
Prefijo cíclico extendido	$\Delta f = 15$ kHz	12	6

Tabla 2.6: Caso de enlace de subida [6].

Configuración para DL		N_{sc}^{RB}	N_{symb}^{DL}
Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15$ kHz	12	7
Prefijo cíclico extendido	$\Delta f = 15$ kHz	12	6
	$\Delta f = 7,5$ kHz	24	3

Tabla 2.7: Caso de enlace de bajada [6].

La rejilla de recursos nos muestra el total de bloques de recursos disponibles (figura 2.12), que puede variar desde un mínimo de 6 hasta un máximo de 110. Y el mínimo de recursos asignados por el Planificador son dos bloques de recursos, que equivalen a una subtrama de 1 ms.

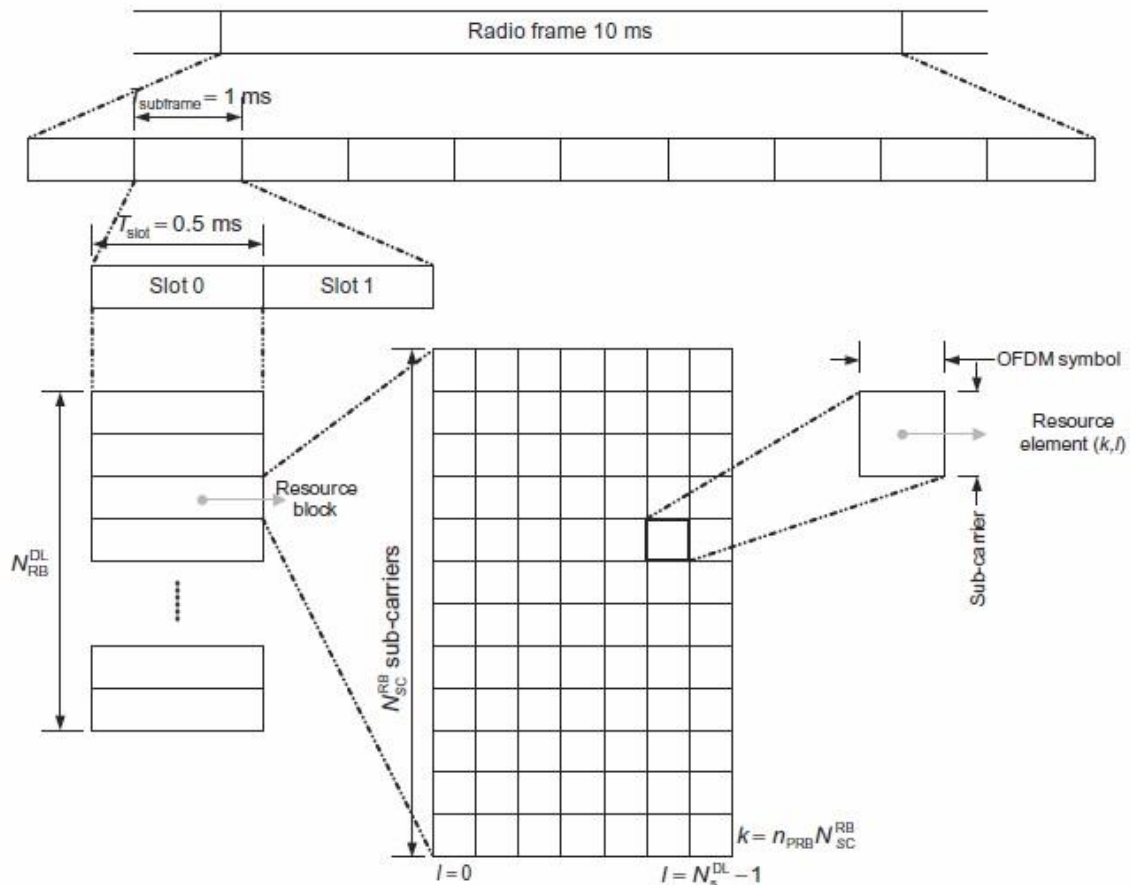


Figura 2.12: Rejilla de recursos [13].

2.5.4 Agregación de portadoras

La agregación de portadoras es un concepto que consiste en unir dos o más portadoras componente (*Component Carrier, CC*) con anchos de banda arbitrarios, pertenecientes a la misma o diferentes bandas de frecuencia, para que un terminal pueda transmitir simultáneamente en múltiples de las portadoras disponibles. Se pueden agregar hasta cinco portadoras componente, que pueden tener diferentes anchos de banda, permitiendo anchos de banda totales de hasta 100Mhz [13]. Esto supone un aumento considerable en la velocidad de transmisión de datos, la capacidad de sistema y el rendimiento de usuario, y además mitiga la interferencia entre celdas en redes heterogéneas.

La agregación de portadoras se diseñó de manera que fuera compatible con la tecnología de una sola portadora anterior, y así garantizar que ambas tecnologías pudieran funcionar a la vez. Por lo que todas las portadoras componente transmiten el todas las señales y canales físicos del enlace de bajada de LTE.

Aunque la agregación de portadoras es compatible tanto con sistemas FDD como TDD, nos centraremos en FDD.

Principios de la agregación de portadoras

En la terminología de la agregación de portadoras de LTE-Advanced, una portadora componente es denominada como una célula de servicio. Se le asigna su propio identificador de célula y es gestionada como si se tratara de una célula por las capas superiores. Cada portador de radiofrecuencia individual es conocido como una portadora componente, y pueden ser solo de bajada o de subida y bajada.

Cada terminal de usuario tiene una célula de servicio que le provee de la información de control y funcionalidades que necesita. A esta célula se le denomina Célula Primaria (PCell). Al resto de células auxiliares se les denomina Celdas Secundarias (SCells).

Existen los siguientes escenarios de agregación de portadoras, como se muestra en la figura 2.13:

- Agregación de portadoras contiguas intra-banda: Usa una sola banda de frecuencia. Las portadoras están contiguas y el espaciamiento en frecuencia entre el centro de frecuencia de ambas portadoras es múltiplo de 300 KHz para asegurar compatibilidades y preservar la ortogonalidad de las subportadoras con un espaciamiento de 15kHz.
- Agregación de portadoras no contiguas intra-banda: Las portadoras agregadas no son adjacentes y la señal multi-portadora no puede ser tratada como una sola señal, por lo que puede requerir dos transceptores.
- Agregación de portadoras no contiguas inter-bandas: Usa diferentes bandas de frecuencia, que puede ser beneficioso para las operadoras de red debido a que se pueden usar bandas de frecuencia fragmentadas. El UE podría requerir usar múltiples transceptores. Este tipo de agregación de portadoras puede mejorar la movilidad, explotando las características de propagación radio de las diferentes bandas.

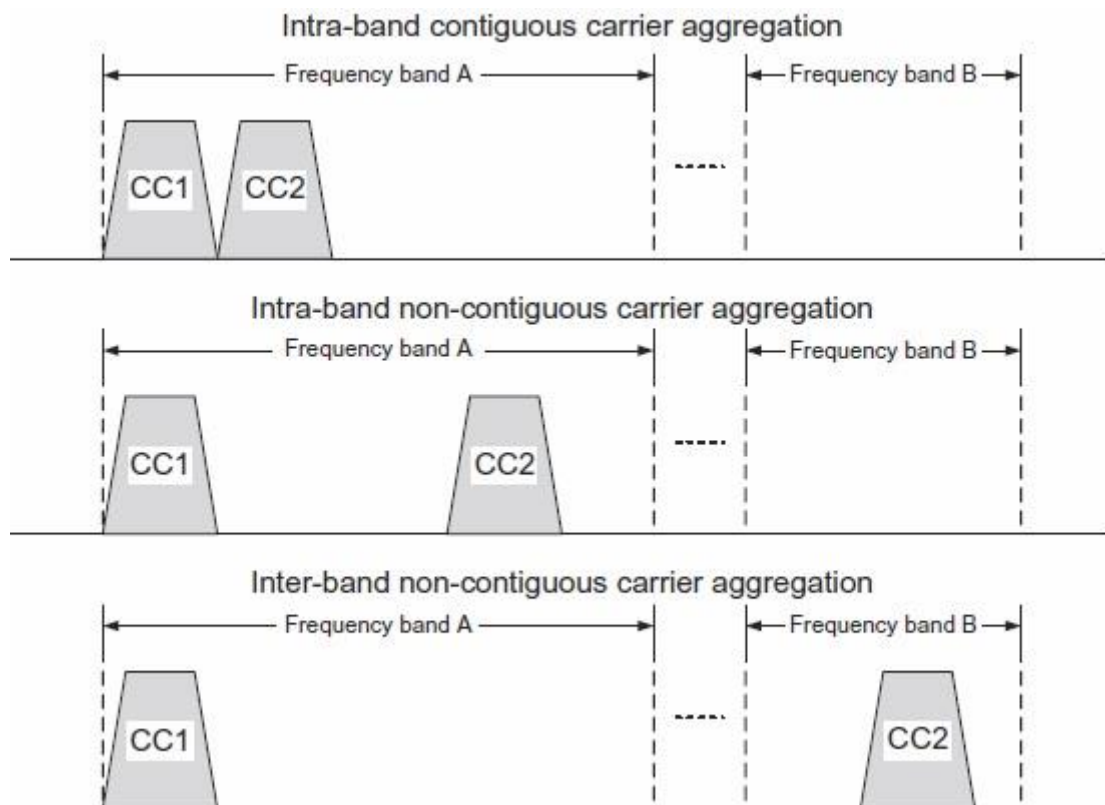


Figura 2.13: Escenarios de agregación de portadoras. [13]

2.5.5 Canales

LTE usa diversos canales tanto para señalización como para transporte de datos. En la siguiente imagen se puede ver las agrupaciones de los tres tipos de canales (lógicos, transporte y físicos) para el enlace de bajada (figura 2.14):

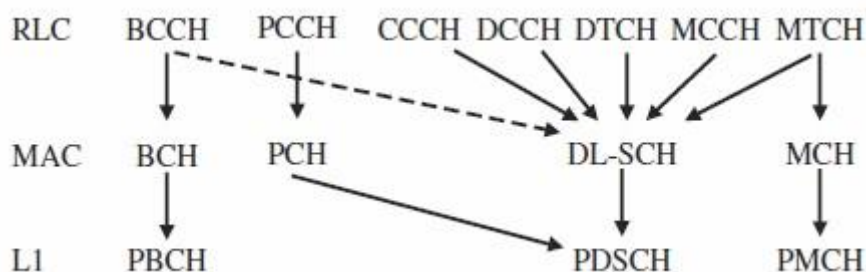


Figura 2.14: Canales del enlace descendente [12].

Y para el caso del enlace de subida (figura 2.15):

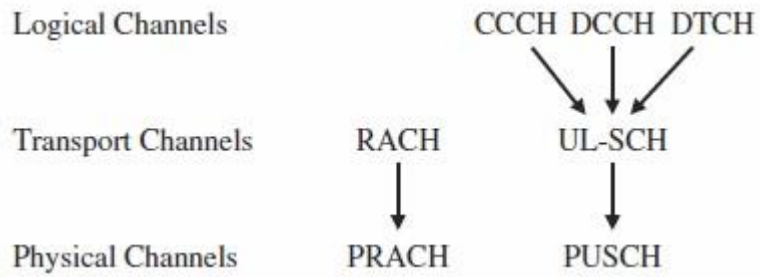


Figura 2.15: Canales del enlace ascendente [12].

A parte de los canales mostrados, LTE utiliza señales, tanto en el enlace de subida como en el de bajada, para enviar mediciones, información sobre la calidad del canal, información de sistema o información de decodificación. Para el caso de estudio de este trabajo veremos las señales de sincronización, tanto primaria como secundaria, en el apartado 2.5.6.4 sobre el proceso de sincronización.

2.5.5.1 Canales lógicos

Enlace descendente			Enlace ascendente		
Canal		Función	Canal		Función
BCCCH	Broadcast Control Channel	Difunde los parámetros de sistema. Usa el BCH para transporte de los MIB y el DL-SCH para los SIBs.			
PCCH	Paging Control Channel	Lleva la información de Paginación.			
CCCH ¹	Common Control Channel	Transporta información de control entre la red y el UE. Usado cuando el UE no tiene una conexión RRC establecida.	CCCH ¹	Common Control Channel	Misma función que en el caso del enlace descendente.
DCCH ¹	Dedicated Control Channel	Canal punto a punto con información de control dedicada a la conexión entre un UE y la red.	DCCH ¹	Dedicated Control Channel	Misma función que en el caso del enlace descendente.
MCCH	Multicast Control Channel	Transporta datos multicast.			
DTCH ¹	Dedicated Traffic Channel	Canal punto a punto. Transporta datos del usuario.	DTCH ¹	Dedicated Traffic Channel	Misma función que en el caso del enlace descendente.
MTCH	Multicast Traffic Channel	Transporta datos multicast.			

¹ Canales bidireccionales

Tabla 2.8: Canales lógicos en LTE [12].

2.5.5.2 Canales de transporte

Enlace descendente			Enlace ascendente		
Canal		Función	Canal		Función
BCH	Broadcast Channel	Transporta la información necesaria para que los dispositivos puedan acceder al sistema.	UL-SCH	Uplink Shared Channel	Transporta los datos del usuario e información de control del dispositivo. Requiere que el UE esté en el estado RRC conectado.
DL-SCH	Downlink Shared Channel	Transporta los datos del usuario e información de control de capas superiores para conexiones punto a punto. El UE requiere estar en el estado RRC conectado.			
PCH	Paging Channel	Transporta la información que necesita el UE para pasar del estado RRC reposo al estado RRC conectado.	RACH	Random Access Channel	Usado para responder al mensaje de paginación o para iniciar el cambio al estado RRC conectado.
MCH	Multicast Channel	Usado para servicio multicast.			

Tabla 2.9: Canales de transporte en LTE [12].

2.5.5.3 Canales físicos

Enlace descendente			Enlace ascendente		
Canal		Función	Canal		Función
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel	Usado para transmisiones de datos punto a punto. También para mensajes de <i>paging</i> .	PUSCH	Physical Uplink Shared Channel	Transporta los datos del usuario en el UL. Cuando a un UE se le otorga una concesión de transmisión puede seguir haciendo peticiones directamente por este canal mientras envía los datos.
PBCH	Physical Broadcast Channel	Usado para transmitir el BCH.			
PMCH	Physical Multicast Channel	Transporta los datos del MCH.	PUCCH	Physical Uplink Control Channel	Canal de control usado por los UE para informar al eNodeB sobre la calidad del canal (CQI), respuestas ACK/NACK y peticiones de scheduling para transmisiones.
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel	Transmite información necesaria para que el UE pueda leer el PDCCH.			
PDCCH	Physical Downlink Control Channel	Usado para transmitir información de control.	PRACH	Physical Random Access Channel	Transporta el RACH.
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	Usado para transmitir ACKs y NACKs.			

Tabla 2.10: Canales físicos en LTE [12].

2.5.6 Señalización en el enlace ascendente

Hay dos formas de señalización UL entre la capa física y la capa MAC [12]:

- Cuando hay ausencia de datos de UL, la señalización se realizará en el PUCCH.
- Cuando hay presencia de datos en el UL, la señalización se realizará en el PUSCH.

La transmisión simultánea por un mismo terminal en estos dos canales no se permite por limitaciones de una sola portadora. Sin embargo en aquellas celdas donde la agregación de portadoras está implementada, la señalización cuando hay presencia de datos en el UL se puede realizar simultáneamente en el PUCCH y el PUSCH en la PCell, si el terminal de usuario tiene suficiente potencia para soportarlo [12].

2.5.6.1 PRACH

Canal de contienda usado para la adquisición de la sincronización en UL durante el acceso inicial al sistema, trasposos y antes de recibir una transmisión de datos en DL. Es usado por aquellos dispositivos que todavía no tienen reservado un slot en el planificador de petición de transmisión del PUCCH de la célula.

Aquellos terminales que inicien una transmisión en el PRACH, lo harán mediante el proceso de acceso aleatorio. Durante el proceso, eligen una secuencia de preámbulo para transmitir de un grupo de secuencias asignadas por el eNB. Los preámbulos son secuencias Zadoff-Chu de longitud 839 para FDD [13]. Hay 64 diferentes desplazamientos cíclicos, lo que se traduce en 64 posibles preámbulos ortogonales entre sí. El PRACH usa seis bloques de recursos consecutivos y su localización es señalada por las capas superiores mediante un parámetro de desplazamiento, pero siempre está intercalado con el PUSCH. En cada subtrama hay una región PRACH en FDD. Pero el PRACH no siempre está presente en cada subtrama y cada trama. Los parámetros de configuración PRACH indican en que número de trama y número de subtrama están disponibles los recursos PRACH. El PRACH es cíclico a intervalos de tiempo regulares con posible periodo desde 1 a 20 ms.

Los 64 preámbulos se dividen en dos grupos, de donde el terminal elige uno aleatorio de uno de los grupos dependiendo del tamaño del mensaje que quiere enviar.

Proceso de acceso aleatorio

El proceso de acceso aleatorio se compone de cuatro pasos [7]:

1. El UE elige un preámbulo de acceso aleatorio y lo envía por el PRACH en un slot de tiempo de Acceso Aleatorio predefinido.
2. El eNB responde enviando una identidad temporal, la corrección temporal y una concesión en el planificador.
3. El UE responde en el UL-SCH con su identificador.
4. El eNB envía un mensaje final de resolución de contienda.

Tras estos pasos el UE dispondrá de una concesión en el planificador y tendrá un recurso reservado en el PUCCH, por donde pedirá peticiones de planificación en el futuro.

Proceso de acceso aleatorio libre de contienda

Esta variante se usa durante los traspasos, donde el UE necesita sincronizarse con la célula elegida con un retraso aceptable. En este caso, la capa RRC asigna un preámbulo específico al UE y le indica que recurso PRACH utilizar. Este preámbulo no pertenecerá a ninguno de los dos grupos en ese momento, por lo que se evita una posible colisión.

2.5.6.2 PUCCH

Es el canal que transporta señalización de control del enlace de subida de dos tipos [13]:

- Asociada con datos de usuario necesarios para su procesamiento, como indicaciones del formato de transporte, indicadores de nuevos datos (*new data indicators*, NDI) o parámetros MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Es siempre transmitida junto a los datos del enlace de subida.
- No asociada a datos, como el HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) ACK/NACK para paquetes del enlace de bajada, información de calidad del canal (*Channel Quality Indicator*, CQI) para la adaptación del enlace, indicadores de rango para MIMO, indicadores de matrices precodificadas para las transmisiones de bajada y peticiones de planificación (*Scheduling Request*, SR) para transmisiones de subida.

Un terminal de usuario solo puede transmitir en el PUCCH si no tiene recursos asignados en el PUSCH en esa subtrama, a no ser que tenga asignado recursos en

varias portadoras componente (agregación de portadoras), en cuyo caso puede transmitir en el PUCCH y en el PUSCH a la vez en la PCell.

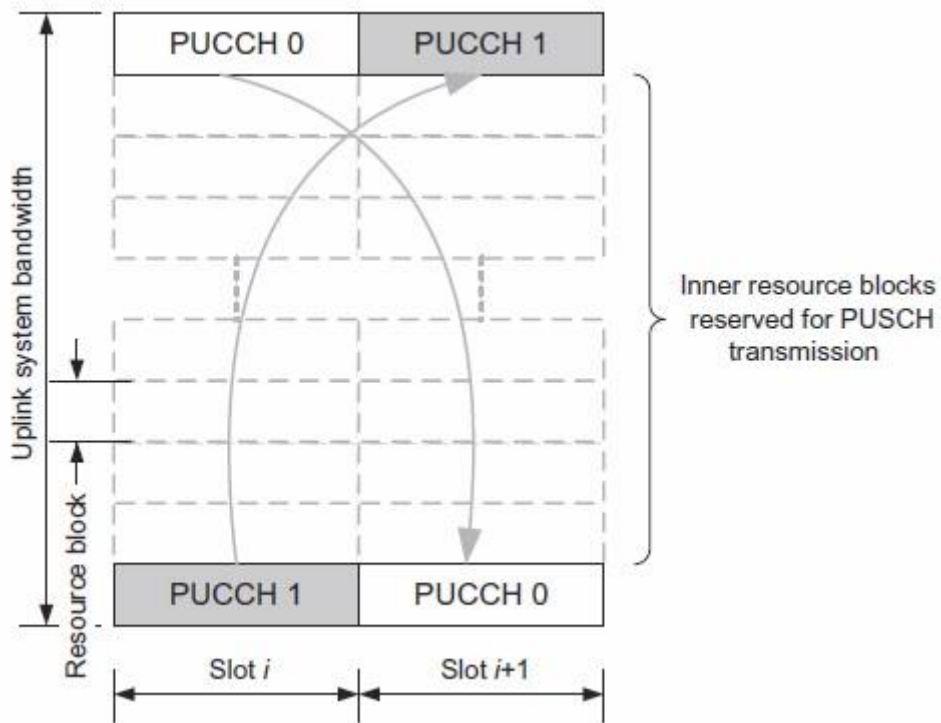


Figura 2.15: Asignación de recursos PUCCH [13].

El PUCCH se encuentra localizado en los extremos de la banda de frecuencia del enlace de subida. Usa diversidad en frecuencia para minimizar los recursos necesarios para la transmisión de la señalización de control, por lo que un PUCCH se compone de un bloque de recurso en un slot de un extremo del ancho de banda y otro bloque en el otro slot de la subtrama pero en el otro extremo de la banda como se muestra en la figura 2.15.

La información de control transportada en el PUCCH es definida por los formatos de información de control del enlace de subida (*Uplink Control Information, UCI*) como muestra la tabla 2.11.

Múltiples terminales pueden transmitir a la vez en cada par de bloques de recursos gracias a una multiplexación en código basada en secuencias de desplazamientos cíclicos de *Zadoff-Chu* de longitud 12. Además para los formatos 1/1a/1b se usan códigos ortogonales de longitud 3 (caso de prefijo cíclico extendido) o longitud 4 (caso de prefijo cíclico normal) para conseguir más canales. El formato 3 no usa desplazamiento cíclico, solo códigos ortogonales que permiten que hasta 5 terminales usen los mismos recursos.

Formato PUCCH	Información que contiene	Esquema de modulación	Número de bits por subtrama	Capacidad de multiplexación ^a (UE/RB)
1	Petición de planificación	On-Off Keying	N/A	36, 18 ^b , 12
1a	1 bit ACK/NACK	BPSK	1	36, 18 ^b , 12
1b	2 bit ACK/NACK	QPSK	2	36, 18 ^b , 12
2	CQI (20 bits)	QPSK	20	12, 6 ^b , 4
2a	CQI (20 bits) + 1 bit ACK/NACK	QPSK+BPSK	21	12, 6 ^b , 4
2b	CQI (20 bits) +2 bit ACK/NACK	QPSK+QPSK	22	12, 6 ^b , 4
3	Múltiples bits ACK/NACK para agregación de portadoras (hasta 10 bits ACK/NACK en FDD o hasta 20 bits ACK/NACK en TDD + 1 bit de petición de planificación en TDD)	QPSK	48	5

^a Determinado por la combinación, en el dominio del tiempo, de los desplazamientos cíclicos y los códigos ortogonales.

^b Valores típicos.

Tabla 2.11: Formatos PUCCH [13].

El número de bloques de recursos reservados para cada formato en cada trama es asignado por las capas superiores, estando los formatos 2/2a/2b en los extremos de la banda y los formatos 1/1a/1b en las frecuencias reservadas más internas. Además puede haber un bloque de recursos compartido entre los formatos 1/1a/1b y 2/2a/2b en cada slot.

Para agregación de portadoras, cuando hay múltiples asignaciones en el enlace de bajada para un mismo terminal, es necesario transmitir múltiples bits de realimentación en el enlace de subida. Para ello se pueden usar los formatos 1b (hasta 2 portadoras componente) y 3 (hasta 5 portadoras componente). El formato 1b se usa cuando solo se necesita transmitir 2 o 4 bits. Los 4 bits se pueden transmitir mediante la selección de recursos, que permite indicar desde un recurso PUCCH, con 2 bits, en que otro recurso se transmitirá los otros 2 bits. Debido a que la selección de recursos pierde efectividad para transmisiones mayores de 4 bits, para cifras mayores se usa el formato 3.

Se usa una versión reducida del PUCCH, en los formatos 1/1a/1b y 3, cuando el último símbolo de una subtrama PUCCH se descarta para transportar la señal de sondeo de referencia (*Sounding Reference Signal, SRS*), que es usada por el eNB para conocer la calidad del canal en cada sección del espectro de frecuencias.

La petición de planificación en el PUCCH se realiza mediante el formato 1, donde cada terminal conectado a la red tiene reservado un recurso PUCCH. Estos

recursos asignados son cíclicos, y si el eNB detecta energía en ese recurso, lo considera como una petición de planificación de ese terminal. En el formato 3 también pueden realizar peticiones de planificación aquellos terminales que ya tengan asignaciones en el enlace de bajada en sistemas TDD.

2.5.6.3 PUSCH

Otro tipo de planificación se permite en el PUSCH, la Planificación Semi-persistente. Se usa cuando se están enviando datos en el enlace de subida y se aprovecha esos mensajes para enviar una petición de transmisión. Esto permite que se envíe un gran bloque de datos sin usar el resto de canales de control del enlace de subida.

La planificación semi-persistente está implementada mediante un bit en la cabecera MAC de las transmisiones de datos del enlace de subida [13].

2.5.6.4 Proceso de sincronización

E-UTRA soporta anchos de banda variables desde 1,4 a 20 MHz. Por lo que el terminal tiene que adquirir la sincronización sin conocer el ancho de banda de transmisión de la célula, en un corto periodo de tiempo y con baja complejidad.

La sincronización se obtiene mediante el proceso de Búsqueda de Célula (*Cell search*), por el cual el UE adquiere la frecuencia de portadora, la longitud del prefijo cíclico, la sincronización de trama y subtrama y el identificador de la célula (Cell-ID). Una vez completado, el UE obtiene el Bloque de Información Maestra (*Master Information Block*, MIB) del PBCH y los Bloques de Información de Sistema (*System Information Blocks*, SIBs) del PDSCH, que contienen información de la configuración del sistema.

Búsqueda de célula

En el proceso el UE sigue los siguientes pasos [8]:

1. Monitoriza la parte central del espectro para buscar una buena celda.
2. Cuando encuentra una buena portadora candidata (con 72 subportadoras), que puede contener las señales de sincronización y el PBCH, efectúa una aproximación de sincronización.

3. Busca la señal PSS (*Primary Synchronization Signal*) en el SCH (*Synchronization Channel*). Con lo que consigue:
 - a. La frecuencia exacta de la portadora.
 - b. El índice del Cell-ID (1 de 3).
 - c. La sincronización de subtrama.
 - d. La longitud del prefijo cíclico (por método de prueba y error).
4. Detecta la señal SSS (*Secondary Synchronization Signal*) mediante pruebas, intentando acertar entre 1 de 168 posibles SSS, que sería el grupo del Cell-ID. Descubre:
 - a. La sincronización de trama.
 - b. Grupo del Cell-ID, que junto al índice del Cell-ID da el identificador de la capa física de la celda (1 de 504).
5. Ya está sincronizado y puede leer el canal PBCH para conseguir el MIB.
6. Ya tiene la mayoría de la información esencial del sistema y puede leer el PDSCH, conseguir los SIBs y registrarse en el sistema.

Señal de sincronización

El SCH porta ambas señales de sincronización: el PSS y el SSS, que son transmitidos en la parte central de la banda de frecuencia con un ancho de banda de 1,08 MHz, junto al PBCH, localizadas al final del primer y onceavo slot (slots 0 y 10) de cada trama de 10 ms, que serían las subtramas 0 y 5. El SCH está compuesto de 6 RBs independientemente del ancho de banda de la célula.

Hay 504 posibles Identificadores de Celda Física (PCIs). Los PCIs forman 168 grupos, cada uno teniendo 3 PCIs. El PSS contiene el índice dentro del grupo (0 a 2) y el SSS contiene el número de grupo (0 de 167) [12].

MIB y SIBs

- MIB: Se repite cada 4 tramas. Solo hay un tipo de MIB y contiene: el ancho de banda de transmisión, la configuración del PHICH y el Número de Trama del Sistema (*System Frame Number, SFN*). Esta información es necesaria para leer otros canales de la célula. Lo transporta el PBCH.
- SIB: Se repiten cada 8 tramas. Hay 16 diferentes y contienen configuraciones de los recursos radio y movilidad comunes para todos los UEs.

2.6 Sumario

Como hemos visto en este capítulo, la señalización se produce en los canales PRACH, PUCCH y PUSCH. En este último una vez que se ha empezado a transmitir datos. Cuando un terminal se enciende, empieza una búsqueda de célula, sincronización e iniciará una conexión RRC. Para esto último tendrá que pasar la contienda del PRACH. Una vez que ha conseguido transmitir por primera vez, y por lo tanto está en estado RRC conectado, se le asignará un recurso del PUCCH para futuras peticiones de planificación, aunque no use los recursos. En el PUCCH el terminal enviará la señalización, mientras no esté enviando datos, y solo usará el PRACH, ya sea con contienda o sin ella, para cambios de célula y antes de recibir una transmisión de datos.

3. Integración de sensores en LTE: Estado del Arte

En este capítulo se muestran las diversas investigaciones realizadas sobre comunicaciones MTC e integración de sensores en la red celular móvil. Mientras que las investigaciones procedentes de organismos de estandarización se centran en mejorar aspectos actuales de LTE, las de otros investigadores tratan sobre el acceso a la red radio y comunicaciones entre dispositivos.

3.1 Procedentes de organismos de estandarización

Las investigaciones procedentes de los organismos de estandarización se centran en diversos aspectos: reducir la potencia transmitida, soporte reducido para los modos de transmisión en el enlace de bajada, aumento de la vida útil de las baterías mediante técnicas de reducción de consumo, y operaciones en cobertura extendida. De estas, nos centraremos en aquellas que mejoran la señalización y el acceso a la red radio, ya que son los aspectos en los que se centra este trabajo.

3GPP TR 37.869: Study on Enhancements to Machine-Type Communications (MTC) and other Mobile Data Applications [10]

En este reporte técnico se muestran las investigaciones del 3GPP con relación a las comunicaciones tipo máquina (*Machine Type Communications*, MTC), tanto las que se han abandonado como las que siguen en curso. Se dividen en dos grupos de acuerdo a que aspecto quieren mejorar: reducir el exceso de señalización o reducir el consumo de batería del UE.

Se ha realizado una evaluación técnica de las diferentes soluciones. En unos casos, el estudio ha sido a nivel cualitativo exclusivamente y, en aquellas soluciones más prometedoras, se ha pasado a un análisis cuantitativo.

A continuación se muestran las mejoras en señalización:

- 1. Administración optimizada de la conexión del RRC:
(*Optimized RRC connection management*)**

**a. Reducción de señalización mediante combinación de mensajes RRC
(*Signalling reduction by RRC message combining*)**

Esta solución se basa en reducir el número de mensajes RRC requeridos en el proceso de Petición de Servicio, combinando la información que se intercambian el UE y el MME.

Con esto se conseguiría la posibilidad de añadir nuevos procedimientos para *paging*, acceso aleatorio, *RRC Connection Setup*, *Security Mode Command* (SMC) o configuración de portadores radio de datos (*Data Radio Bearer*, DRB).

Esta investigación ha sido abandonada tras ser analizada desde un punto de vista cualitativo.

**b. Procedimiento ligero de petición de servicio
(*Lean Service Request Procedure*)**

Se propone reusar el contexto de seguridad del *Access Stratum* (AS) y activarlo junto a la reconfiguración del RRC para que la configuración del portador de acceso radio (*Radio Access Bearer*, RAB) requiera menos señalización.

Esto causa que no haya un procedimiento SMC y por lo tanto habría mejoras en la latencia.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

**2. Soluciones del plano de control
(*Control Plane solutions*)**

**a. Conexión RRC sin establecimiento de los portadores radio en el plano de usuario
(*RRC connection without U-plane radio bearer establishment*)**

Propone una optimización del procedimiento de transmisión de un solo mensaje de las capas altas desde el estado de conexión RRC reposo. Consiste en hacer *piggybacking* con los paquetes IP en mensajes de control, sin establecer los portadores radio del plano de usuario.

Con esta solución se reducirían el número de mensajes RRC, gracias a la omisión del *Access Stratum Security Mode Command*, de la configuración

de los portadores radio de datos y de la configuración de medidas. Pero aumentarían los requerimientos de procesamiento del eNB debido a que habría que manipular un mensaje RRC por cada paquete pequeño. A parte de que imposibilitaría la realización del proceso de traspaso, debido a que necesita seguridad del *Access Stratum*, a no ser que se cambie el procedimiento.

La conclusión que se sacó de esta solución es que mejoraría notablemente el rendimiento en las interfaces radio y S1-MME para unos casos muy específicos. Y si se decide implementar, habría que reducir su uso solo a esos casos, ya que para otros patrones de tráfico resultaría en un detrimento de la capacidad y rendimiento. Por lo que el UE debería ser capaz de distinguirlos sin equivocación. Las características de ese tráfico son las siguientes:

- Tráfico de paquetes de datos en ráfagas aisladas. Cuanto menor sea el tiempo entre ráfagas peor capacidad habrá en comparación con otras soluciones como mantener el UE en modo conectado.
- Que la ráfaga contenga un máximo de dos paquetes, contando el conjunto el UL y DL. Si hubiera más se conseguiría peor capacidad que otras soluciones en las interfaces radio y S1-MME.
- Los paquetes tienen que ser pequeños en tamaño, de una magnitud de cientos de bytes. Si fueran mayores, la ganancia sobre la interfaz radio se perdería.

El impacto que tendría controlar el tráfico del plano de usuario en el plano de control del eNB no ha sido estudiado en profundidad. Ni tampoco el de manejar el cifrado y *buffering* en el MME.

b. Transferencia de datos pequeños usando mensajes RRC (Downlink small data transfer using RRC message)

Solución similar al caso anterior pero centrándose en el caso *Mobile Terminated* (MT, desde el MME al UE): los paquetes del DL y posibles paquetes del UL de contestaciones son transportados respectivamente en los mensajes de *RRC Connection Setup* y *RRC Connection Setup Complete*.

Al ser una solución similar, las ventajas e inconvenientes son prácticamente iguales a las del caso de conexión del RRC sin establecimiento de los portadores radio en el plano de usuario (2.a).

Esta investigación ha sido abandonada tras ser analizada desde un punto de vista cualitativo.

3. Enfoques de S1-MME sin conexión (S1-MME connectionless approaches)

Se intenta reducir la cantidad de señalización necesaria para los cambios de estados entre reposo y conectado mediante pequeños paquetes de datos que se transfieren mientras el UE no tiene conexión de señalización *Non Access Stratum* (NAS), así se le provee de la información sobre la conexión del punto terminal del *Packet Data Network* (PDN) o sus portadoras en el *Serving Gateway* (SGW).

a. Camino rápido para datos pequeños (Small Data Fast Path)

Cuando el UE vaya a enviar un pequeño paquete de datos, se establece una conexión RRC y se envía la información en un portador radio de datos. En esta solución la seguridad es realizada entre el UE y el SGW, lo que la diferencia de las dos siguientes soluciones (3.b y 3.c).

Las ventajas son una disminución en el número de mensajes RRC y una eliminación de la señalización de S1, que hace que la configuración del plano de control (CP) sea más rápida.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

b. Transmisión de datos sin conexión (Connectionless Data Transmission)

Cuando el UE entre en una celda establecerá la conexión con los métodos actuales, usando señalización S1-MME, y el eNB le otorgará una muestra para futuras conexiones en la misma celda, en las que el UE usará el procedimiento de transmisión de datos sin conexión, estableciendo una conexión RRC para mandar la conexión ID+muestra+firma y usando los portadores radio de datos para transmitir datos. De la seguridad se encargará el eNB mediante el modelo actual de encriptación.

Esta solución ofrece ventajas muy similares a la anterior: camino rápido para datos pequeños (3.a).

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

**c. Transmisión de datos pequeños basada en RACH
(RACH-based Small Data Transmission)**

Similar a la solución anterior pero los paquetes de datos pequeños en el UL son transmitidos en el estado RRC reposo usando el procedimiento del *Random Access Channel* (RACH). El UE incluye en el mensaje 3 del proceso una petición de transmisión sin conexión y en el mensaje 4 recibe la concesión de transmisión de pequeños paquetes de datos junto al mensaje de resolución de contención. Los datos serán transmitidos en un portador radio de datos (DRB) que se activa en el eNB con el mensaje 3 y en el UE con el mensaje 4. Este DRB seguirá activo mientras haya pequeños paquetes de datos posteriores para transmitir. La seguridad es realizada entre el UE y el eNB y manejada por la capa PDCP. Se usa un contexto de seguridad sin conexión e independiente por el UE y el eNB cuando el modo de transmisión sin conexión está habilitado.

Con esto se eliminaría el uso de mensajes RRC intercambiados entre el UE y el eNB, pero se manejaría todo por el procedimiento del RACH. Y al igual que la solución de transmisión de datos sin conexión (3.b), solo habrá señalización S1 en la primera conexión, por lo que la configuración del plano de control será más rápida.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

**4. Optimizaciones solo de S1/Iu
(S1/Iu-only optimizations)**

**a. Pasarela sin estados para una transmisión eficiente en coste de datos pequeños frecuentes o infrecuentes
(Stateless Gateway for cost efficient transmission of infrequent or frequent small data)**

Esta solución intenta reducir la señalización entre los nodos del Núcleo de Red mediante una pasarela (*gateway*) sin estados.

Con esto se evitaría el proceso de *Modify Bearer* entre los nodos del Núcleo de Red. Pero restringe los UE a tener una única conexión *Packet Data Network* (PDN) y un único portador radio.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

b. Procedimiento de petición de servicio optimizado para UEs con un solo portador
(Optimized Service Request procedure for UEs with a single bearer)

Esta solución se aplica a dispositivos que solo tienen una única conexión PDN y un único portador radio. Reduce la señalización de la red bajo ciertas condiciones debido a que no usa el *Modify Bearer Request* (MBR) o el *Modify Access Bearer Request* (MABR) en la interfaz S11.

Mismas ventajas que la solución anterior.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

5. Mantener el UE en modo conectado
(Keep the UE in connected mode)

a. Parámetros del eNB asistidos por el núcleo de red ajustados para transferencia de pequeños datos
(Core Network assisted eNB parameters tuning for small data transfer)

Se propone mantener el UE en modo conectado para minimizar transiciones entre estados. La configuración de los parámetros clave como el temporizador de inactividad RRC y el temporizador de recepción discontinua (DRX) puede ser controlada por el Núcleo de Red (CN). La información de asistencia del Núcleo de Red puede habilitar la red de acceso radio (RAN) para ajustar los parámetros de la RAN aplicados al UE y así reducir la frecuencia de transición entre los estados reposo y conectado, minimizar la señalización de la red y reducir el consumo de batería del UE.

A parte de las ventajas ya mencionadas debidas a que se evita el proceso de preparar la conexión, hay que considerar reducir el exceso de señalización de *handover* para los UE no estacionarios.

Sobre las conclusiones que se han sacado de esta solución, se cree que la siguiente información de asistencia puede ser útil para el eNB:

- El comportamiento de movilidad del UE. El UE proveerá de información sobre las transiciones de reposo a conectado. Se observó que el núcleo de red no sabría la movilidad del UE mientras éste estuviera en modo reposo.
- Una descripción del tipo y patrón de tráfico. Sin embargo no se sabe si esta información se podría obtener de forma fiable. Además un patrón de tráfico experimentado del pasado no tiene por qué decir nada del futuro, por lo que solo sería útil para algunos dispositivos.

**b. Modo conectado con movilidad del UE controlada
(*Connected mode with UE controlled mobility*)**

Se intenta evitar la mayoría de la señalización relacionada con la movilidad de los UE no estacionarios usando movilidad controlada. En esta solución, se usa la movilidad controlada en el modo conectado para UEs con aplicaciones que generen pequeñas e infrecuentes transmisiones de datos. Gracias a esto el UE puede mantenerse en modo conectado con un mínimo de exceso de señalización. Para que el UE restablezca la conexión en una célula diferente se proponen dos opciones: "*forward preparation*" o "*backwards fetch*".

Para el primer caso la célula tendría que estar preparada antes de que ocurriera la nueva conexión. Este proceso ya existe en la preparación para *handover*, sin embargo no se desencadena si no hay uno ocurriendo.

El segundo caso se basa en que los eNB compartan el contexto del UE. Para ello se propone reusar el *Radio Link Failure (RLF) indication message*, pero este proceso no está soportado en las especificaciones existentes.

En el caso de transmisiones de datos muy infrecuentes, el UE puede efectuar más selecciones de celda que transmisiones de datos. Por lo que convendría que el UE solo efectuara el proceso de restablecimiento cuando tenga datos que transmitir y estar el resto del tiempo en modo conectado escuchando los canales del DL.

Esta investigación ha sido abandonada tras haber sido analizada de un modo cuantitativo.

3GPP TR 37.868: Study on RAN Improvements for Machine-Type Communications [11]

En este reporte técnico se muestran las investigaciones del 3GPP sobre el control de la sobrecarga en la red de acceso radio por las MTC.

1- Esquemas de clases de acceso por restricción (Access Class Barring schemes)

La Clase de Acceso por Restricción (*Access Class Barring*, ACB) es un esquema de estabilización del acceso aleatorio coordinado por la red. Permite controlar que el número esperado de accesos simultáneos a un recurso común del RACH sea uno, mediante una probabilidad de transmisión que se envía a los UE. Por lo que maximiza el rendimiento y mejora el retraso de las peticiones de acceso.

a. Escalamiento de la clase de acceso por restricción del UE (UE individual Access Class Barring Scaling)

Con este método se pueden tener diferentes parámetros de control de acceso por cada UE. La red usa la señalización de control para indicar a los UEs individuales o grupos de UEs como escalar los parámetros de control de acceso cuando la red los difunda.

b. Acceso por Restricción Extendido (Extended Access Barring)

Con el acceso por restricción extendido (EAB) se propone que la red pueda controlar los intentos de acceso de los UEs configurados para EAB, que se consideran más tolerantes a las restricciones de acceso que otros UEs. Con esto se quiere prevenir la sobrecarga de la red de acceso y el núcleo de red, sin introducir nuevas clases de acceso.

2- Recursos RACH separados para MTC (Separate RACH resources for MTC)

a. Asignación dinámica de recursos RACH (Dynamic allocation of RACH resources)

En escenarios específicos, la red puede predecir cuándo habrá un exceso de carga debido a los dispositivos MTC. Para hacer frente a esta carga, la red puede asignar dinámicamente recursos RACH adicionales para uso de los dispositivos MTC.

b. MTC Specific Backoff scheme
(Esquema de retroceso específico para MTC)

Se puede usar un esquema de retroceso para los dispositivos MTC para retrasar sus (re-)intentos de acceso aleatorio.

c. Acceso ranurado
(Slotted access)

En este método, los ciclos/ranuras de acceso están definidos para los dispositivos MTC, y cada dispositivo puede solo acceder a su ranura dedicada. Las ranuras de acceso están sincronizadas con las tramas de sistema correspondientes. Los dispositivos MTC está asociados con una ranura de acceso dependiendo de su ID.

d. Esquema basado en atracción
(Pull based scheme)

Si el servidor MTC (servidor que controla los dispositivos MTC a través del *Packet Data Network*) sabe cuándo los dispositivos MTC tienen datos que enviar o cuando el servidor MTC necesita información de los dispositivos, el servidor necesita informar al dispositivo MTC. Correspondientemente el núcleo de red puede paginar el dispositivo MTC, que al recibir el mensaje realizará el establecimiento de la conexión RRC. El eNB puede controlar el *paging* teniendo en cuenta las condiciones de carga de la red.

De todas las posibles soluciones que se han investigado en este reporte técnico, la Clase de Acceso por Restricción Extendida (EAB) es la que ha obtenido mejores resultados y se adoptará para control de la sobrecarga en la red de acceso radio.

3.2 Trabajos de investigación

An LTE Random Access Channel Model for Wireless Sensor Network Applications [15]

Para evitar el problema de saturación del *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH), esta investigación aborda una posible solución: configurar los sensores para que usen el *Physical Random Access Channel* (PRACH) en vez del PUCCH para las peticiones de transmisión y así evitar que los demás dispositivos aumenten su tiempo de espera para empezar a transmitir. Esto lo consigue mediante un modelo del RACH similar a un ALOHA ranurado (*Slotted Aloha*, S-ALOHA) multicanal, donde modifica el RACH de LTE añadiendo un servidor por cada preámbulo que permite recuperar una de las transmisiones que han colisionado en ese preámbulo. El S-ALOHA es un protocolo de transmisión donde los terminales solo pueden enviar datos en unos instantes de tiempo determinados (ranuras) sin comprobar antes si el canal está ocupado. Si varios terminales transmiten a la vez se produce una colisión y esperan un tiempo aleatorio antes de volver a transmitir. La solución planteada por esta investigación no implementa una solución para recuperar la señal correctamente después de la colisión. Se comprueba su viabilidad para un número óptimo de nodos mediante simulaciones del modelo.

Sensor Integration to LTE/LTE-A Network through MC-CDMA and Relaying [16]

Se propone la integración de una red de sensores que reutilice el espectro de la celda. El terminal móvil funcionará como un retransmisor de las señales de los sensores con el protocolo de retransmisión AF (Amplificar y reenviar). Los sensores utilizarán un método de acceso múltiple por división en código con múltiples portadores (*Multi-Carrier Code Division Multiple Access*, MC-CDMA), donde los datos de cada sensor se difundirán a todo el espectro celular para crear una baja tasa de transmisión de datos. El MC-CDMA extiende cada símbolo de datos en el dominio de la frecuencia, es decir, cada símbolo se transporta entre varios subportadores desplazado en fase conforme a un código que difiere por cada subportador y por cada usuario. Como el eNB conoce exactamente los componentes del tráfico de la red celular en el espectro utilizado, puede cancelarlos en las señales superpuestas, y así detectar, debido a que los códigos son ortogonales, la información de los diferentes sensores con una técnica avanzada de detección multi-usuario. En este estudio solo se tiene en cuenta los sistemas síncronos y transmisiones en una sola celda, es decir, no tiene en cuenta sistemas asíncronos ni interferencias entre celdas.

Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions [17]

Actualmente en la red celular móvil, los dispositivos no pueden comunicarse directamente entre ellos, es decir, toda las comunicaciones pasan por la estación base. Este tipo de comunicaciones no habían sido consideradas antes en las redes celulares, aunque sí que existen tecnologías que proveen algunas de sus funcionalidades, como WiFi o Bluetooth. El problema de estas tecnologías es que trabajan en bandas de frecuencia sin licencia y no se puede controlar la interferencia, además de que no pueden proveer ni la seguridad ni la calidad de servicio que ofrecen las redes celulares. Para efectuar las comunicaciones entre dispositivos se propone una estructura de dos niveles: nivel de macro-celda (comunicaciones desde estación base a dispositivos) y nivel de dispositivo (comunicaciones entre dispositivos), en donde los dispositivos pueden funcionar de retransmisor, lo que permite crear una red en malla “ad hoc” entre ellos. Las comunicaciones se dividirían en cuatro tipos dependiendo de si la comunicación es entre dispositivos o si el dispositivo funciona como retransmisor, aparte de si es la estación base o los propios dispositivos los que establecen la comunicación y la controlan. Los mayores retos de esta tecnología son la seguridad, la gestión de las interferencias y la adjudicación de los recursos.

Dynamic Access Class Barring for M2M Communications in LTE Networks [18]

Para reducir la congestión de la red en condiciones de sobrecarga, 3GPP propuso la clase de acceso por restricción (*Access Class Barring*, ACB). En este esquema la estación base difunde una probabilidad p llamada factor de ACB y cada dispositivo de comunicación tipo máquina puede acceder a la red con una probabilidad p o aplazar su acceso en caso contrario durante un slot de tiempo, por lo que la parte clave de este sistema es el cálculo del factor de ACB. En esta investigación se propone una modificación del ACB actual de LTE-A, llamado *Dynamic Access Class Barring*, donde se calcula el factor de ACB mediante un algoritmo heurístico. Gracias a este algoritmo, se logra un rendimiento cercano al óptimo y se demuestra comparándolo con el caso ideal, donde la estación tendría conocimiento del número exacto de dispositivos atrasados. Además se comprueba que el tiempo que tardarían todos los dispositivos en superar la contienda está muy por debajo del caso del ACB ordinario. En este modelo se ha asumido que los dispositivos de comunicación tipo máquina y los usuarios de la red de comunicación móvil tendrán recursos separados, por lo que las simulaciones solo muestran la contienda y retraso de la red M2M.

Cooperative Access Class Barring for Machine-to-Machine Communications [19]

La parte más crítica de las comunicaciones M2M (*Machine to Machine*) es encontrar un esquema de acceso al medio efectivo para prevenir congestiones en el *Random Access Channel* (RACH). El problema de la clase de acceso por restricción (ACB) es que si hay una congestión severa en una celda, el eNB impondrá un control muy severo que conllevará a un retraso inaceptable para los dispositivos de comunicación tipo máquina (MTC). Por lo que en estos casos de alta congestión, ACB no ofrece una mejora en el retraso. Como LTE-A está compuesto de una red con una arquitectura multi-tier, un dispositivo MTC puede estar conectado a varios eNB entre macrocelda y picoceldas. Para aprovechar esto se propone el ACB coordinado, que consiste en que si un eNB está sufriendo congestión y el dispositivo tiene acceso a otro eNB menos congestionado, pueda conectarse a este otro. Para ello el control del acceso por ACB debe ser controlado entre todos los eNB y no individualmente. Esto permitiría optimizar los accesos de manera conjunta. Mediante simulaciones se demuestra que el ACB cooperativo ofrece una mejora en el retraso del 30% frente al ACB ordinario. El rendimiento medio es similar en ambos esquemas y se sitúa sobre el 36%.

Fast Adaptive S-ALOHA Scheme for Event-driven Machine-to-Machine Communications [20]

En las comunicaciones M2M basadas en eventos, para evitar la congestión de radio y el retraso de las comunicaciones debido a la gran cantidad de dispositivos activados en un corto periodo de tiempo se propone Fast Adaptive S-ALOHA (FASA) para sistemas de comunicación M2M con tráfico a ráfagas. En FASA, se recolectan los resultados de las ranuras de acceso pasadas, en particular, de las ranuras libres consecutivas o de las colisiones consecutivas, y se aplican para conocer el estado de la red. Y usando un análisis de derivada se diseñan los parámetros de un esquema donde la probabilidad de transmisión converge rápidamente al valor óptimo. Conociendo esto y simulándolo numéricamente se comprueba que el esquema FASA consigue un rendimiento cerca del óptimo reduciendo el retraso de acceso y un rendimiento robusto frente a todas las cargas de tráfico menores que el máximo rendimiento de un sistema S-ALOHA. Las simulaciones son comparadas con otros esquemas como Pseudo Bayesian ALOHA (PB-ALOHA), que es un esquema aditivo tradicional, y Q^+ -Algorithm, esquema multiplicativo. El retraso en FASA está muy por debajo del de PB-ALOHA, ya que este último requiere un periodo largo de tiempo para monitorizar el número de dispositivos atrasados y pocos consiguen acceder durante ese tiempo. El Q^+ -Algorithm consigue monitorizarlos en poco tiempo, pero los dispositivos tardan más en acceder

al canal que con FASA debido a largas fluctuaciones en la estimación, por lo que FASA tiene mejor estabilidad con mucha carga que Q^+ -Algorithm.

A Scalable Hybrid MAC Protocol for Massive M2M Networks [21]

Se propone un esquema híbrido para el protocolo MAC para redes M2M, que combinará los beneficios de los protocolos basados en contienda y los basados en reserva. Cada trama se compone de cuatro partes: un periodo de notificación (*Notification Period, NP*), un periodo de solo contención (*Contention Only Period, COP*), un periodo de anuncio (*Announcement Period, AP*) y un periodo de solo transmisión (*Transmission Only Period, TOP*).

El periodo de notificación sucede al principio de cada trama y consiste en que la estación base difunde a todos los dispositivos un mensaje de aviso y estima el número de ellos que quiere transmitir. A continuación difunde la duración del periodo de contención y la probabilidad de contienda.

Después del periodo de notificación empieza el de contienda (COP), que está basado en un método de acceso múltiple con detección de portadora p -Persistente (*Carrier Sense Multiple Access p -Persistent, CSMA- pP*) y es usado para que los dispositivos consigan un slot en el TOP. En CSMA p -Persistente, el terminal escucha el medio para ver si otro terminal está transmitiendo, y si el canal está libre transmite con una probabilidad p o espera una unidad de tiempo con probabilidad $1-p$. Si el canal está ocupado, el terminal espera hasta que esté libre y repite el proceso anterior.

El periodo de contienda es el tiempo donde los dispositivos envían mensajes de petición de transmisión al BS. El COP termina cuando se termina el tiempo que se había asignado al COP o cuando un número M de dispositivos ha conseguido transmitir un mensaje de petición de transmisión, siendo M el número óptimo de dispositivos y está basado en la cantidad esperada de peticiones en esa trama.

La trama continúa con el periodo de anuncio, donde se difunde la identificación (ID) de los dispositivos que han conseguido una concesión de transmisión y la planificación de la transmisión.

Al final, en el periodo de transmisión, los dispositivos que hayan superado la contienda podrán transmitir mediante acceso múltiple por división en tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*). En la trama, se puede reducir la duración de uno de los periodos, contienda o transmisión, para aumentar la del otro, así se puede conseguir el punto óptimo según el número de dispositivos intentando transmitir.

Mediante simulaciones se compara este modelo híbrido con ALOHA ranurado y con TDMA y se puede observar que ofrece un rendimiento mucho mayor, para cargas altas

de trabajo, que los otros modelos, alcanzando un rendimiento máximo de algo menos de 80% para el número óptimo de dispositivos en contienda y disminuyendo al superar el óptimo. Para cargas bajas de trabajo, ALOHA ranurado ofrece un mejor rendimiento.

An Adaptive Medium Access Control Mechanism for Cellular Based Machine to Machine (M2M) Communication [22]

Debido al aumento de dispositivos MTC, es necesario estudiar nuevos protocolos de acceso al medio en condiciones de altas tasas de llegada con el modelo de Poisson. Se propone un mecanismo de acceso al medio llamado *Adaptive Traffic Load Slotted MACA* (ATL S-MACA), que amplía el *Slotted Multiple Access Collision Avoidance* (S-MACA) usando un método adaptativo, lo que le permite que se pueda aplicar a redes inalámbricas M2M. S-MACA se compone de cuatro pasos: Petición de Envío (*Request To Send*, RTS), Despejado para Envío (*Clear To Send*, CTS), Enviando Datos (*Data Sending*, DS) y trama de reconocimiento o “*acknowledge*” (ACK). Al ser ranurado, solo se puede transmitir al principio de cada slot y todas las transmisiones de datos tienen que ser de tamaño múltiplo de la duración del slot. Además se pueden producir colisiones en la Petición de Envío, por lo que su rendimiento máximo se dará con una carga de tráfico óptima. Superada esa carga óptima, el rendimiento decrece drásticamente y se vuelve inestable. En ATL S-MACA, la estación base estima la carga de tráfico y con ella calcula la probabilidad de transmisión en la Petición de Envío. Esta probabilidad se calcula dividiendo a la carga óptima la carga estimada. Luego se difunde a todos los usuarios y es su probabilidad de poder transmitir la Petición de Envío. De este modo la carga de tráfico se mantiene constante en el punto óptimo, consiguiendo un rendimiento constante de 70,4%.

Multiple Beam Selection for Combining M2M Communication Networks and Cellular Networks with Limited Feedback [23]

Se propone un esquema donde se tengan dos redes diferenciadas: la red de comunicación M2M y la red celular móvil. Los dispositivos de comunicaciones tipo máquina (MTC) se comunicarán con la estación base (BS) mediante un dispositivo que hará de puerta. Este dispositivo se considerará secundario en la red móvil y necesitará comunicarse con la BS con una alta capacidad. El acceso de banda ancha inalámbrica a las puertas de MTC se provee mediante un modo de superposición de un sistema celular basado en OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) con un *beamforming* ortogonal.

El *beamforming* es una técnica de procesamiento de señal usada para controlar la direccionalidad de la transmisión y recepción de las señales radio. Esto se consigue mediante la combinación de los elementos de un array de antenas en fase de tal forma que señales en ciertos ángulos experimenten interferencias constructivas mientras que otras señales con diferentes ángulos experimenten interferencias destructivas.

Para evitar las interferencias entre ambas redes, los vectores de *beamforming* de la red MTC tienen que ser ortogonales a los vectores de los canales de la red móvil, que será la principal restricción de las puertas de la red MTC. Y como debido a que, con una información del estado del canal (*Channel State Information, CSI*) limitada en el BS, puede que no se logre esta restricción, se propone una selección de haz múltiple (*Multiple Beam Selection, MBS*) que trabaje con una CSI limitada para las puertas de la red MTC, que tenga en cuenta las restricciones de ortogonalidad. Además, como los usuarios móviles tendrán una mayor prioridad que las puertas de MTC, los vectores de *beamforming* de los usuarios móviles estarán diseñados para maximizar las ganancias de *beamforming*. Usando un límite inferior en el rendimiento para el caso en el que se conoce el CSI perfectamente, se obtuvo una expresión para el caso que se conoce un CSI limitado. Y mediante simulaciones se llegó a la conclusión que cuando la antena está equipada con un array de 6 elementos, el rendimiento del método MBS es un 10% más elevado que en el caso que se usan los métodos convencionales.

3.3 Discusión sobre las distintas soluciones

3.3.1 Procedentes de organismos de estandarización

Study on Enhancements to Machine-Type Communications (MTC) and other Mobile Data Applications [10]

	Pros	Contras
Administración optimizada de la conexión del RRC		
Reducción de señalización mediante combinación de mensajes RRC	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de hacer <i>handover</i> y reelección de célula en modo reposo. - Nuevos procesos para <i>paging</i>, acceso aleatorio, conexión RRC, SMC y configuración de DRB. - Bajada de latencia en el plano de control debido a la reducción de mensajes RRC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto significativo en los procedimientos RRC. - Incrementar el tamaño del Msg3 del proceso de acceso aleatorio puede afectar a la capa MAC. - AS SMC puede quedar comprometido. - Necesidad de más transmisiones HARQ debido a mensajes RRC más largos en coberturas de red malas. - Puede requerir introducir nuevos preámbulos al RACH. - Impacto en pérdida de algunos niveles de seguridad AS.
Lean Service Request Procedure	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de hacer <i>handover</i> y reelección de célula en modo reposo. - Bajada de latencia en el plano de control debido a la falta de procedimiento SMC. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de soporte para el proceso de "<i>Lean Service Request</i>". - Necesidad de soporte de funcionalidad RRC para reinstanciar el contexto de seguridad AS almacenado. - Impacto en pérdida de algunos niveles de seguridad AS.
Soluciones del plano de control		
Conexión del RRC sin establecimiento de los portadores radio en el plano de usuario	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora notable del rendimiento de las interfaces radio y S1-MME para casos muy específicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Imposibilidad de hacer <i>handover</i>, aunque como el dispositivo acabará en estado reposo después del ciclo propuesto, no se espera movilidad en modo conectado. - Posibilidad de efectuar

		<p>reselección de celda en modo reposo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Impacto en pérdida de algunos niveles de seguridad AS. - Necesidad de redimensionar la interfaz S1-C debido a mayor tráfico de datos. - Mayor complejidad en el eNB y MME debido a la mezcla en el mismo mensaje de los datos del plano de usuario, NAS PDUs y señalización.
<p>Transferencia de datos pequeños usando mensajes RRC</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora notable del rendimiento de las interfaces radio y S1-MME para casos muy específicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Imposibilidad de hacer handover, aunque como el dispositivo acabará en estado reposo después del ciclo propuesto, no se espera movilidad en modo conectado. - Posibilidad de efectuar reelección de celda en modo reposo. - Impacto en pérdida de algunos niveles de seguridad AS. - Necesidad de redimensionar la interfaz S1-C debido a mayor tráfico de datos. - Mayor complejidad en el eNB y MME debido a la mezcla en el mismo mensaje de los datos del plano de usuario, NAS PDUs y señalización.
<p>Enfoques de S1-MME sin conexión</p>		
<p>Camino rápido para datos pequeños</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución del número de mensajes RRC y eliminación de la señalización de S1. - Mejoras en la latencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Imposibilidad de movilidad en modo conectado debido a que la seguridad de la capa AS no estará activada. - Se tendrá que modificar el RRC, quizá con un nuevo estado.

		<ul style="list-style-type: none"> - Cambios en el planificador para para priorizar estas conexiones. - Cambios en el UE en como maneja ciertos mensajes del plano de control y nuevo mecanismo para que este proceso se produzca en tiempos determinados. <p>Impactos grandes en todos los nodos de la red (eNB, MME, SGW).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Impacto en la eficiencia espectral.
Transmisión de datos sin conexión	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución del número de mensajes RRC y eliminación de la señalización de S1, excepto en la primera conexión. - Mejoras en la latencia. - Se podría detectar si los sensores se mueven o no, y en ese caso, eliminar toda la señalización "redundante". 	<ul style="list-style-type: none"> - Movilidad en modo conectado no requerida si el modo sin conexión dura periodos cortos. - Se tendrá que modificar el RRC, quizá con un nuevo estado. - Aplicabilidad limitada de la solución debido a problemas para transmitir en el DL. - Cambios en el UE en como maneja ciertos mensajes del plano de control. - Similar complejidad del UE también prevista para el eNB. <p>Impactos grandes en todos los nodos de la red (eNB, MME, SGW).</p>
Transmisión de datos pequeños basados en RACH	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminación de mensajes RRC y eliminación de la señalización de S1, excepto en la primera conexión. - Mejoras en la latencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento del tráfico en el PRACH. - Impactos grandes en todos los nodos de la red (eNB, MME, SGW).
Optimizaciones solo de S1/Iu		
Pasarela sin estados para una transmisión eficiente en coste de datos pequeños frecuentes o infrecuentes	<ul style="list-style-type: none"> - Se evita el proceso <i>Modify Bearer</i> en los nodos del núcleo de red. 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo aplicable a UEs que tengan una sola conexión PDN y un solo portador.

Procedimiento de petición de servicio optimizado para UEs con un solo portador	- Señalización reducida bajo ciertas circunstancias debido a que no usa <i>Modify Bearer Request</i> o el <i>Modify Access Bearer Request</i> en la interfaz S11.	- Solo aplicable a UEs que tengan una sola conexión PDN y un solo portador
Mantener el UE en modo conectado		
Parámetros del eNB asistidos por el núcleo de red ajustados para transferencia de pequeños datos	- Reducción de la señalización debido a pocos cambios de estado. - Reducción de consumo de batería.	- El MME necesita guardar la información de un gran número de UEs en su cobertura.
Modo conectado con movilidad del UE controlada	- Se podría detectar si los sensores se mueven o no, y en ese caso, eliminar toda la señalización "redundante". - Reducción de la señalización debido a pocos cambios de estado. - Se evita el envío de <i>Security Mode Command</i> al cambiar de célula.	- Necesitarían realizarse muchos cambios en el proceso de restablecimiento y que esos cambios sean soportados por el eNB y el UE.

Study on RAN Improvements for Machine-Type Communications [11]

	Pros	Contras
Esquemas de clases de acceso por restricción		
Escalamiento de la clase de acceso por restricción del UE	- Aumento del rendimiento del canal. - Se puede dar prioridad a unos terminales frente a otros.	- Aumento del retraso sufrido por los terminales a los que afecta el ACB.
Acceso por Restricción Extendido	- Aumento del rendimiento del canal. - Se puede conseguir dar prioridad a los terminales que soportan peor el retraso.	- Aumento del retraso sufrido por los terminales a los que afecta el ACB.
Recursos RACH separados para MTC		
Asignación dinámica de recursos RACH	- Los terminales de usuarios no sufren retraso adicional debido a la inclusión de los terminales MTC en la red. - Puede prevenir la	- Si el número de dispositivos MTC es elevado, los retrasos que sufren seguirán siendo elevados.

	sobrecarga por comunicaciones tipo evento si tiene ese evento almacenado en la memoria.	
MTC Specific Backoff scheme	<ul style="list-style-type: none"> - Los terminales de usuarios no sufren retraso adicional debido a la inclusión de los terminales MTC en la red. - Libera la sobrecarga redistribuyendo aleatoriamente los nodos en los siguientes periodos RACH. 	- Si el número de dispositivos MTC es elevado, los retrasos que sufren seguirán siendo elevados.
Acceso ranurado	<ul style="list-style-type: none"> - Los terminales de usuarios no sufren retraso adicional debido a la inclusión de los terminales MTC en la red. - En zonas con poca densidad de dispositivos MTC los retrasos serían bajos. 	- Si el número de terminales MTC es elevado puede tardar en intentar transmitir, dependiendo de cómo estén configuradas las asignaciones.
Esquema basado en atracción	<ul style="list-style-type: none"> - Los terminales de usuarios no sufren retraso adicional debido a la inclusión de los terminales MTC en la red. - El terminal MTC solo transmitiría cuando un servidor se lo indique. 	- Puede haber sobrecarga en el canal si los servidores están configurados para enviar la petición de datos a la misma hora.

3.3.2 Trabajos de investigación

	Pros	Contras
An LTE Random Access Channel Model for Wireless Sensor Network Applications	<ul style="list-style-type: none"> - Evitaría la congestión del PUCCH, por lo que los usuarios móviles ya conectados a la red no sufrirían retrasos. 	<ul style="list-style-type: none"> - El PRACH se saturaría con facilidad, sobre todo con comunicaciones tipo máquina de tipo evento, lo que afectaría a los usuarios móviles que quieran acceder a la red. A parte de que sufrirían retrasos muy elevados ambos tipos de dispositivos.
Sensor Integration to LTE/LTE-A Network through MC-CDMA and Relaying	<ul style="list-style-type: none"> - Reutilización del espectro. - No habría problemas de congestión en el PRACH y PUCCH. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo de batería extra por los terminales móviles que retransmiten.
Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions	<ul style="list-style-type: none"> - Se evitaría cierto grado de congestión en la estación base. - Mejoras en fiabilidad del enlace, eficiencia espectral, capacidad de sistema y rango de transmisión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo de batería extra por los dispositivos que retransmiten.
Cooperative Access Class Barring for Machine-to-Machine Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Consigue mantener un rendimiento constante independientemente de la congestión en el PRACH con retardos no demasiado elevados. 	<ul style="list-style-type: none"> - No aborda la saturación del PUCCH que ocurriría cuando los dispositivos ya estén conectados a la red. - Los usuarios móviles se verían muy afectados tanto en el PRACH como en el PUCCH.
Dynamic Access Class Barring for M2M Communications in LTE Networks	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimiento constante independientemente de la carga. - Recursos separados para comunicaciones móviles y comunicaciones MTC. -Bajo retraso de espera de los dispositivos. 	<ul style="list-style-type: none"> - No aborda la congestión en el PUCCH.
Fast Adaptive S-ALOHA Scheme for Event-driven Machine-to-Machine Communications	<ul style="list-style-type: none"> - Poco retraso bajo mucha carga, ya sea con llegadas siguiendo un modelo Poisson o a ráfagas. 	<ul style="list-style-type: none"> - No aborda el problema de congestión del PUCCH. -Los usuarios móviles se verían muy afectados en el PUCCH.

		- Solo considera un modelo de un único canal de comunicaciones.
A Scalable Hybrid MAC Protocol for Massive M2M Networks	- Alto rendimiento.	- Poca viabilidad para una red conjunta de telefonía móvil y comunicaciones M2M debido a que es un esquema de petición+envío de datos en el mismo canal. - Solo considera un modelo de un único canal de comunicaciones.
An Adaptive Medium Access Control Mechanism for Cellular Based Machine to Machine (M2M) Communication	- Mantiene un alto rendimiento independientemente de la congestión. - Bajo retraso de espera de los dispositivos.	- Pensado más para una red de comunicaciones tipo máquina y no una conjunta con red móvil. - Solo considera un modelo de un único canal de comunicaciones.
Multiple Beam Selection for Combining M2M Communication Networks and Cellular Networks with Limited Feedback	- No hay interferencias entre la red de comunicación M2M y la red celular móvil. - Evita la congestión del PRACH y PUCCH al solo estar conectados a la red celular las puertas de MTC.	- Complejidad elevada.

4. Modelo y simulación

4.1 Reflexión sobre el problema de saturación

Si las redes de sensores se conectan a la red móvil celular, habrá un problema de saturación en el PUCCH, debido a que según se vayan conectando terminales a la red se les irá asignado un recurso PUCCH para las peticiones de transmisión. Cuantos más terminales se conecten, mayor será el retraso que sufrirá cada uno de ellos a la hora de realizar la petición de transmisión. El principal problema es que los nodos de la red de sensores generalmente no transmitirán a menudo, pero seguirán ocupando los recursos del PUCCH. Debido a esto se tiene que buscar una solución que permita a los sensores estar en la red LTE sin afectar significativamente al resto de los usuarios.

4.2 Modelo

La solución propuesta en este trabajo se basa en el modelo matemático del RACH de Michael Burakov y Albin Eldstål-Damlin descrito en *"An LTE Random Access Channel Model for Wireless Sensor Network Applications"* [15], donde proponen que se use el PRACH en vez del PUCCH para las peticiones de transmisión de los sensores. La razón para esta elección es que esta solución base aborda el problema de los retrasos que se producen en el PUCCH. Adicionalmente, en el presente trabajo se han introducido una serie de cambios sobre el modelo anterior para que los usuarios móviles no se vean afectados por el acceso de los sensores y para mejorar el rendimiento del PRACH ya que, al incluir un alto número de terminales, se traslada la gestión del PUCCH al PRACH. Con las modificaciones propuestas se podría evitar dicha congestión. Aunque los usuarios móviles que ya estén conectados a la red no tendrán problema de retraso, los que vayan a efectuar un proceso de sincronización inicial se encontrarán con un retraso considerable.

La solución propuesta se centra en el caso de una sola célula, por lo que no hay transmisiones en el PRACH para trasposos y selecciones/reselecciones de célula. El modelo planteado trata todos los preámbulos como iguales, sin separación de grupos en preámbulos y considera la planificación dinámica, no semi-persistente. Como cada ciclo del RACH es una oportunidad para los terminales para realizar una petición de transmisión, a partir de aquí llamaremos al ciclo RACH como una oportunidad RACH.

En la solución se han desarrollado los siguientes conceptos:

- Se ha dividido los nodos de la red en dos grupos, dependiendo de si son terminales de usuario o concentradores de la red de comunicaciones tipo máquina (MTC).
- Las oportunidades RACH se dividen en dos tipos, uno para cada grupo.
- Se ha añadido una Clase de Acceso por Restricción (ACB) para el grupo de nodos de la red MTC.
- Por último, se rellena la oportunidad RACH del grupo de terminales de usuario de manera dinámica con nodos del grupo de la red MTC dependiendo del número de mensajes con éxito enviados por los usuarios móviles.

En la figura 4.1 se puede ver el diagrama de flujo del modelo de la solución de este trabajo. En él, se pueden ver las etapas por las que pasa cada nodo, mismas etapas que se han utilizado para realizar la simulación. Las dos variables que aparecen en el diagrama son el número de intervalo M , que se refiere al número de oportunidad RACH, y la probabilidad de transmisión P_{tx} que es la probabilidad que tiene un nodo de usuario de necesitar transmitir en el PRACH.

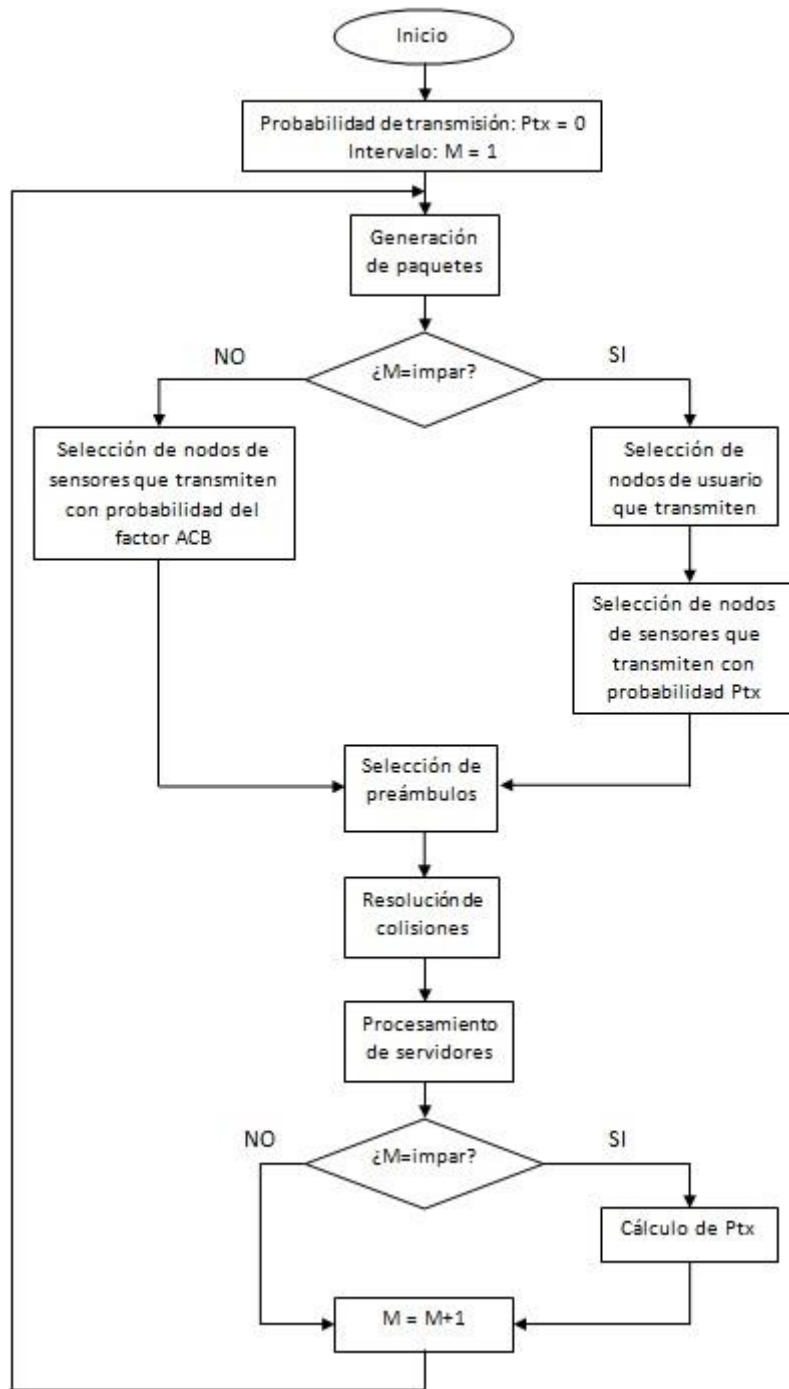


Figura 4.1: Diagrama de flujo del modelo.

En los apartados siguientes se explican tanto el modelo del RACH como los cambios introducidos en este trabajo.

4.2.1 Modelo del RACH

El modelo representa a un número de nodos N (sensores) que participan en la red. Cada nodo puede estar en dos posibles modos: en el *modo-I (Idle)*, donde los nodos transmiten un mensaje nuevo con una probabilidad p_N , o en el *modo-B (Backlogged)*, donde los nodos retransmiten mensajes viejos con una probabilidad p_R .

Los nodos en modo I y B que transmiten realizan la transmisión por contienda del RACH eligiendo un preámbulo de los K disponibles. Los nodos que colisionan vuelven al modo B y los que superan la colisión se les denomina como adquiridos. Se presenta el concepto de *resolución de colisiones*, que se basa en poder recuperar un mensaje de los que han colisionado en la contienda. Si la resolución de colisiones está activada en el eNB, cada vez que haya una colisión en un preámbulo se recuperará una de las transmisiones y el nodo del que provenga se tomará como adquirido.

De los nodos que consiguen superar la contienda, solo un número L puede ser despachados por el eNB en una oportunidad RACH debido a limitaciones de tiempo y hardware. Este concepto se ha implementado mediante servidores sin cola que decodifican los mensajes de los nodos adquiridos. A los nodos que superan esta selección se les considera como exitosos y son planificados para transmitir en el enlace de subida. Estos nodos vuelven al modo I, mientras que los rechazados en los servidores vuelven al modo B.

La figura 4.2 representa visualmente el proceso del modelo y la tabla 4.1 muestra los significados de cada valor.

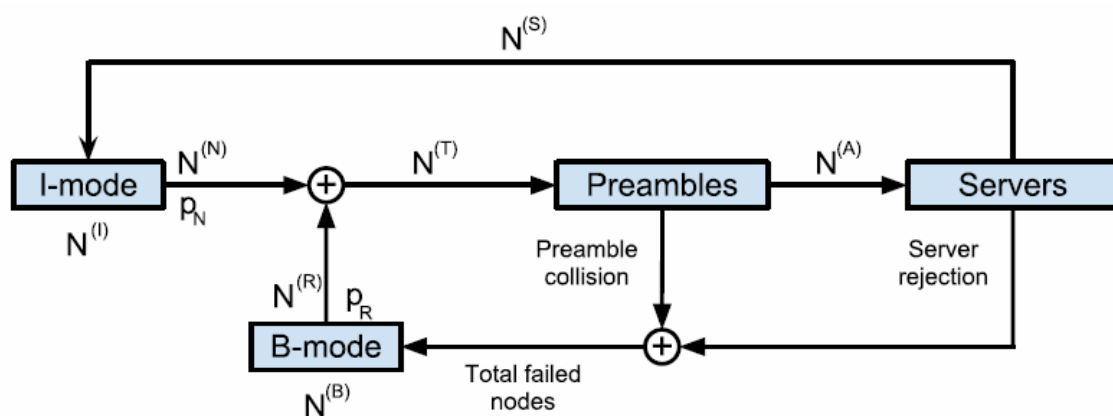


Figura 4.2: Representación visual del modelo del RACH [15].

Nombre	Descripción
N	Número total de nodos en la red
$N^{(I)}$	Número de nodos en el modo-I
$N^{(N)}$	Número de nodos realizando una nueva transmisión
$N^{(B)}$	Número de nodos en el modo-B
$N^{(R)}$	Número de nodos realizando una retransmisión
$N^{(T)}$	Número total de nodos que transmiten
$N^{(A)}$	Número de nodos adquiridos
$N^{(S)}$	Número de nodos que han conseguido realizar la petición de transmisión
p_N	Probabilidad de que un nodo en modo-I transmita
p_R	Probabilidad de que un nodo en modo-B retransmita
K	Número total de preámbulos disponibles
L	Número total de servidores disponibles en el eNB

Tabla 4.1: Descripción de los valores del modelo del RACH [15].

4.2.2 Modificaciones del modelo base

4.2.2.1 División en grupos y oportunidades RACH

Para que los usuarios no se vieran afectados por los grandes retrasos en el PRACH, este trabajo se propone dividir las oportunidades RACH en dos (concepto sugerido por el 3GPP en el 2011 en [11]). Además de la división de los nodos en dos grupos: uno de terminales de usuario y otro de concentradores de la red MTC (que son *hubs* que conectan un grupo de sensores a la red móvil). Cada grupo tiene asignadas unas oportunidades RACH separadas, lo que permite que los nodos de usuario puedan realizar el proceso de acceso inicial a la red evitando el retraso producido por las peticiones de transmisión de los concentradores MTC, a los que nos referiremos a partir de ahora como nodos MTC o nodos de sensores.

4.2.2.2 Clase de Acceso por Restricción

Para mejorar el rendimiento del PRACH, se ha configurado una clase de acceso por restricción (ACB) cuya probabilidad de transmisión calcula el eNB dependiendo del número de concentradores MTC a su alcance. Cuando un concentrador MTC se activa y manda su primer mensaje por el RACH, el eNB apunta su presencia en una lista con todos los demás nodos MTC. Y cuando no recibe un mensaje suyo durante un periodo de tiempo, lo elimina de la lista. Así, el eNB calcula el factor ACB conociendo el número de nodos MTC que le transmiten mensajes, el rendimiento máximo del canal y la cantidad de nodos necesarios para alcanzar ese rendimiento. El eNB envía el factor ACB calculado mediante los SIBs a todos los nodos de la red. El ACB solo se aplicaría a

los nodos del grupo MTC, por lo que cada nodo sabrá si tiene que usar un factor ACB o no después de comprobar el SIB.

4.2.2.3 Transmisión de nodos MTC en el intervalo de usuarios

Debido a que pocos terminales móviles requieren acceder inicialmente a la red en cada ciclo del PRACH, las oportunidades RACH del grupo de usuarios estarían bastante desperdiciadas. Para evitarlo, se decidió completar las oportunidades RACH del grupo de usuarios con nodos del grupo MTC. Esto se ha implementado mediante una probabilidad de transmisión que se calcula dinámicamente en cada intervalo del grupo de usuarios y que se envía a los concentradores MTC. Por lo tanto, los nodos MTC tendrán dos probabilidades de transmisión diferentes dependiendo del tipo de oportunidad RACH. La probabilidad de transmisión es calculada al terminar la oportunidad RACH y depende del número de mensajes de terminales de usuario exitosos y un porcentaje del número total de preámbulos que se reserva para las fluctuaciones del número de terminales de usuarios accediendo a la red. Los nodos de usuario no tendrán ninguna restricción a la hora de transmitir, es decir, transmitirán el mensaje en el PRACH cuando lo necesiten.

4.3 Simulación

Para poder verificar que los cambios realizados en el modelo del RACH [15] mejoran el rendimiento de las oportunidades RACH y el retraso de ambos tipos de nodos, se ha recreado primero la simulación del modelo del RACH y después se le han introducido los cambios descritos en el apartado anterior.

4.3.1 Estructura de la simulación

La estructura es similar a la explicada en [15], pero con una etapa adicional al final del ciclo, y se compone del siguiente orden de ejecución, que se repite cíclicamente:

1. Generación de paquetes en los nodos.
2. Selección de nodos que transmiten.
3. Selección de preámbulo por cada nodo.
4. Detección de colisiones de preámbulos.
5. Resolución de colisiones de preámbulos.
6. Procesamiento de los nodos adquiridos por los servidores.

7. Cálculo de la probabilidad de transmisión.

En los apartados siguientes explicaremos cada etapa, empezando primero por las que afectan al RACH y luego los cambios realizados.

4.3.1.1 Simulación basada en el modelo base del RACH

Matriz de estados

El estado de la simulación se guarda en una matriz Nx11, donde cada fila representa un nodo y cada columna representa los diferentes valores de la simulación (ver tablas 4.2 y 4.3):

Nº nodo	p_N	p_R	Modo	Lleg.	Tx	Preámbulo	Adq.	Exitoso	Contador Tx	Buffer Paquetes
1	0.02	0.10	1	0	1	8	1	1	0	0
2	0.01	0.10	0	1	1	8	0	0	1	1
3	0.02	0.20	1	0	1	12	1	0	23	3
4	0.01	0.10	0	0	0	0	0	0	1	1

Tabla 4.2: Ejemplo de matriz de estados con cuatro nodos. [15]

Nombre	Descripción
Nº nodo	Identificador del nodo
p_N	Probabilidad de transmisión
p_R	Probabilidad de retransmisión
Modo	'1' para modo-B, '0' para modo-I
Lleg.	Llegada. '1' si un paquete ha llegado este intervalo
Tx	Transmisión. 0 si el nodo espera, 1 si intenta transmitir
Preámbulo	Selección de preámbulo. '1...K' o '0' si no escoge preámbulo
Adq.	Adquirido. '1' si el nodo ha sido seleccionado después de la colisión
Exitoso	'1' si el nodo ha sido procesado por el servidor
Contador Tx	Número actual de intentos de transmisión
Buffer Paquetes	Número actual de paquetes en el buffer.

Tabla 4.3: Columnas de la matriz de estados [15].

Mediciones

Parámetros tomados para procesamiento y dibujo de gráficas (ver tabla 4.4).

Nombre	Descripción
T	El tiempo, en segundos, de cada intervalo de tiempo
N_B	El número de nodos en modo-B al inicio del intervalo
N_I	El número de nodos en modo-I al inicio del intervalo
N_N	El número de nuevas transmisiones
N_R	El número de retransmisiones
N_P	El número de preámbulos fallados
N_A	El número de nodos adquiridos
N_F	El número de rechazos en servidores
N_S	El número de transmisiones exitosas
D	Retraso y contador de transmisión de cada mensaje exitoso
Drops	Paquetes descartados por estar el buffer lleno

Tabla 4.4: Salidas del simulador RACH [15].

Ejecución

Etapa 1: Generación de paquetes

Los paquetes se generan en los nodos con una probabilidad p_N con una distribución uniforme aleatoria. El intervalo de tiempo en el que ha llegado el paquete se guarda en el buffer de ese nodo. Si el buffer está lleno, el paquete se descarta.

Etapa 2: Selección de nodos que transmiten

Los nodos en modo-I que han visto llegar un paquete intentan transmitir. Los nodos en modo-B transmiten con una probabilidad p_R con una distribución uniforme aleatoria. Los nodos que transmiten aumentan en uno su contador de retransmisión. Si un nodo en modo-I tiene un paquete en el buffer, intenta una transmisión.

Etapa 3: Selección de preámbulos

Cada nodo que transmite elige un preámbulo entre los valores 1 y K con una distribución uniforme aleatoria.

Etapa 4: Detección de colisiones de preámbulos

Los nodos se ordenan basándose en sus preámbulos. Los nodos con el mismo preámbulo se reordenan basándose en sus contadores de transmisión. Se cuentan el número de preámbulos del mismo tipo, y si la suma no es 1, se ha producido una colisión en ese preámbulo.

Etapa 5: Resolución de colisiones de preámbulos

Si la resolución de colisiones no está activada, los nodos que han colisionado cambian/vuelven al modo-B. Los nodos cuyo preámbulo sea único son marcados como adquiridos.

Si la resolución de colisiones está activada, se escoge al primer nodo de la lista para cada preámbulo, ya que están ordenados secundariamente por su contador de transmisión. Éste nodo se marca como adquirido junto a los nodos cuyo preámbulo sea único. El resto de nodos cambian/vuelven al modo-B.

Etapa 6:

Solo un número L de nodos pueden ser exitosos. Por lo que se escoge a los que su número de retransmisiones sea mayor. Los nodos exitosos cambian/vuelven al modo-I y los rechazados al modo-B. Los nodos exitosos remueven ese paquete de su buffer.

4.3.1.2 Modificaciones realizadas en la simulación respecto al modelo base del RACH

Para poder saber a qué grupo pertenece un nodo, se introdujo una nueva columna al final de la matriz de estados, donde un 1 significa que pertenece al grupo de nodos MTC y un 0 al grupo de terminales de usuario. Y todos los nodos estarían en la misma matriz, situándose primero los nodos de usuario y después los nodos MTC. En cuanto a los tipos de oportunidades RACH, para la simulación se decidió que fueran alternas. Así, si el número de intervalo es impar, esa oportunidad RACH es del grupo de terminales de usuario, y si el número de intervalo es par, pertenece al grupo de nodos MTC.

Cabe destacar que en la simulación un nodo de usuario no representa un solo terminal móvil, si no el intento de conexión de un terminal móvil desde el momento en que intenta la primera transmisión hasta que consigue un mensaje exitoso. Esto es debido a que cada terminal solo realizará el proceso de acceso aleatorio una vez antes de conseguir una asignación en el PUCCH.

El factor ACB se ha incluido cambiando el valor de p_R cada vez que se aumenta el número total de nodos MTC. La fórmula usada se basa en dividir el número de nodos con el que se obtiene el máximo rendimiento respecto al número de nodos actual. Y solo se calcularía si el número actual de nodos es superior al número óptimo.

El completado de la oportunidad RACH del grupo de nodos de usuario con el del grupo de nodos MTC se ha calculado mediante una fórmula que sustrae al número máximo de preámbulos el número de mensajes exitosos de nodos de usuario en el ciclo actual y un porcentaje del número máximo de preámbulos (25% si la resolución de colisiones está activada y 50% si no lo está). Este resultado se ha dividido entre el número de nodos MTC cercanos al eNB y será la probabilidad de transmitir que tendrán todos los nodos MTC con paquetes en buffer en la siguiente oportunidad

RACH del grupo de nodos de usuario, que llamaremos P_{tx} . Mediante esta fórmula se intenta conseguir mantener el número óptimo de nodos transmitiendo para el que el rendimiento del canal sea máximo. El porcentaje de preámbulos que se restan cumple una doble función: reservar una cantidad de preámbulos por las posibles fluctuaciones en el número de nodos de usuario que transmiten en el canal y no colapsar el canal con transmisiones. Para el caso sin resolución de colisiones ese porcentaje es elevado debido a que el número óptimo de nodos es bajo. Para el caso con resolución de colisiones el porcentaje es bajo debido a que se puede recuperar una transmisión aunque colisione con otras, pero a la vez no puede ser más bajo porque demasiados nodos de sensores transmitirían, lo que produciría un retraso en los nodos de usuario, ya que tienen que competir en la contienda con más nodos.

En ejecución se realizan los siguientes cambios en cada etapa:

- Etapa 1: Se generan paquetes en los nodos MTC en todos los intervalos de oportunidad RACH con una probabilidad p_N y se almacena en el buffer siempre que no esté lleno. Los nodos de usuario carecen de buffer, ya que solo realizan una transmisión en el PRACH. Por lo que solo pueden recibir llegadas de paquetes cuando se encuentran en el modo-I.
- Etapa 2: Los nodos de usuario transmiten siempre si tienen un mensaje que enviar y están en ciclo RACH impar. Los nodos MTC transmiten, en los ciclos RACH pares, con probabilidad p_R (factor ACB), que al inicio de la simulación es 1. En los ciclos RACH impares, transmiten con una probabilidad P_{tx} , que al inicio de la simulación es 0.
- Etapa 3, 4, 5 y 6: Sin cambios.

Y se incluye una etapa nueva:

- Etapa 7: Cálculo de la probabilidad de transmisión P_{tx} .

Por último, respecto a las mediciones se han duplicado el número de salidas del modelo del RACH para representar los cambios de división de nodos en grupos y división de oportunidades RACH. Además se ha incluido una salida adicional para el número de nodos MTC exitosos en los ciclos RACH del grupo de nodos de usuario.

5. Resultados

5.1 Validación de la simulación del modelo del RACH

El primer paso de la simulación es su validación, para ello se ha recreado la simulación realizada en el modelo base del RACH [15]. Introduciendo para todos los parámetros los mismos valores podemos verificar que obtenemos los mismos resultados (ver figuras 5.1 y 5.2).

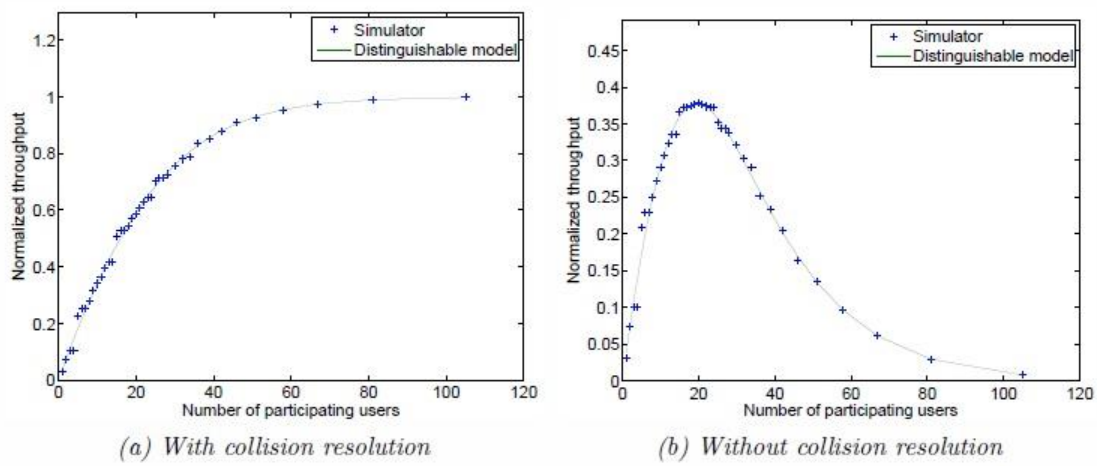


Figura 5.1: Rendimiento normalizado del modelo RACH [15].

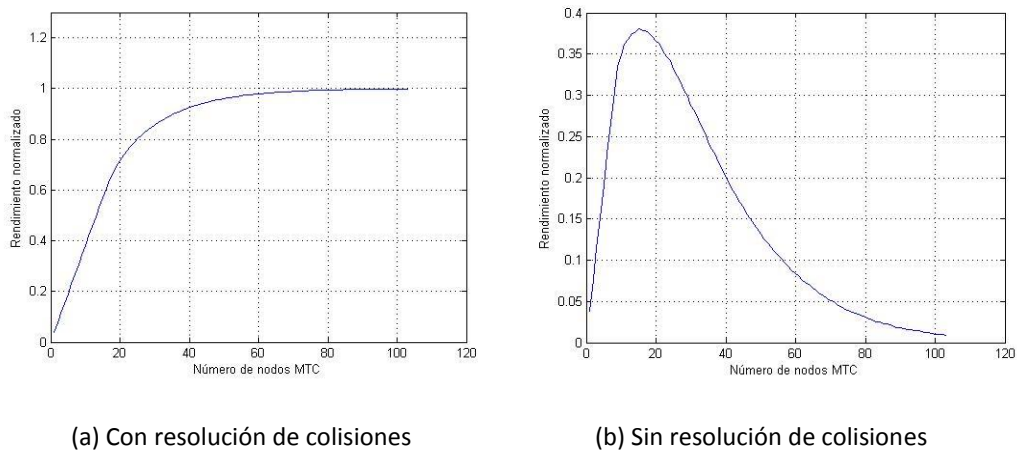


Figura 5.2: Rendimiento normalizado de la simulación recreada.

Las gráficas 5.1 representan la tasa normalizada en función de los usuarios y la 5.2 representan el rendimiento en función de ese mismo número, en este caso denotado como número de nodos MTC. Los valores de los parámetros usados son $K = 16$, $L = 16$, $\rho_N = 0,61$ y $\rho_R = 1$.

5.2 Escenario

El escenario de la simulación es un eNB con M concentradores de la red de comunicaciones tipo máquina (MTC) en su radio de alcance. Cada concentrador puede dar servicio desde decenas hasta cientos de sensores dependiendo de la distribución de probabilidad de llegada de los mensajes al concentrador y de su protocolo de acceso. Como esto queda fuera del alcance del objetivo de este trabajo, se ha decidido usar una probabilidad de llegada del 60% para los cálculos de la simulación, ya que se ha considerado que puede ser un valor razonable en una primera aproximación.

El número máximo de concentradores MTC se ha establecido en 100, ya que para 16 preámbulos son suficientes para reflejar los rendimientos y retrasos en las gráficas. Aunque la cantidad de preámbulos K posibles son 64, se ha decidido limitarlo a 16 ya que si se aumentasen los preámbulos, habría que aumentar acordeamente el número de concentradores para poder apreciar correctamente los resultados en las gráficas, y cada vez que aumenta en uno el número total de concentradores, el tiempo de simulación aumenta considerablemente. Además de que como cada concentrador puede dar servicio hasta cientos de sensores, si consideramos que de media hay 100 sensores por concentrador, estaríamos hablando de 10.000 sensores en la célula. Por otra parte, así tenemos en cuenta, en cierta medida, los accesos aleatorios debidos a trasposos y reselecciones de célula de los usuarios móviles.

El periodo entre dos oportunidades RACH es configurable de 1 a 20 ms, como ya se ha comentado en el capítulo 2. Se ha elegido ciclos de 5 ms y el resto de parámetros son acordes a ese valor.

El número de ciclos RACH se ha establecido en $6 \cdot 10^4$, lo que equivale a 5 minutos de tiempo real.

El número de servidores L se ha establecido en 16 (mismo número de servidores que de preámbulos) para obtener los mejores resultados.

El número de nodos de usuario (Nu) se ha establecido en 20, ya que como los ciclos RACH escogidos son de 5 ms, no puede ser elevado si se quiere representar a los usuarios que necesitan usar el RACH en cada ciclo. Y su probabilidad de llegada de mensajes varía entre tres valores para realizar comparaciones.

En la tabla 5.1 se indica un resumen de todos los parámetros usados en la simulación:

Nombre	Descripción	Valor
N	Número de nodos MTC	1 - 100
N_u	Número de nodos de usuario	20
K	Número de preámbulos	16
L	Número de servidores	16
$p_{N,U}$	Probabilidad de llegada de mensaje a nodo de usuario	25%, 50%, 75%
p_R	Probabilidad de retransmisión de nodos de usuario	100%
p_N	Probabilidad de llegada de mensajes a nodo MTC	60%
B	Tamaño del buffer	50
M	Número de ciclos RACH	$1 - 6 \cdot 10^4$

Tabla 5.1: Resumen de los parámetros usados en la simulación.

5.3 Resultados basados en el modelo modificado del RACH

Para comprobar la viabilidad de las nuevas soluciones propuestas en el presente TFG se han representado diversas gráficas con rendimientos de ambos grupos de oportunidades RACH, el reservado para usuarios móviles y el reservado para nodos MTC, y retrasos de los dos tipos de sensores.

5.3.1 Rendimiento

El rendimiento normalizado es el número de mensajes exitosos en una oportunidad RACH frente al número máximo teórico, que el caso de esta simulación es $\min(K,L)$ (el mínimo entre el número de preámbulos y de servidores).

En la figura 5.3 se muestra el rendimiento de las oportunidades RACH del grupo de nodos de sensores en función del número de nodos MTC en la red cuando la resolución de colisiones no está activada. Comparándola con la figura 5.2b se puede apreciar que gracias al algoritmo de cálculo del factor de la clase de acceso por restricción (ACB) se consigue mantener un rendimiento cercano al 37% sin importar la cantidad de nodos MTC transmitiendo mensajes.

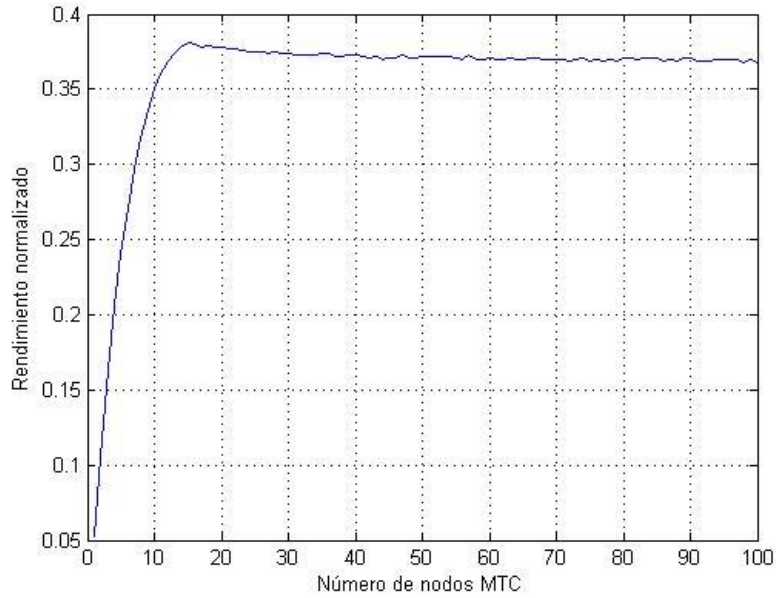


Figura 5.3: Rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de sensores, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones.

Sin embargo, si la resolución de colisiones está activada, el rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de sensores es igual que el del modelo base del RACH (ver figura 5.4), ya que el ACB no es necesario debido a que se puede recuperar de la colisión al menos una señal. El rendimiento se acerca eventualmente al 100% al aumentar el número de nodos.

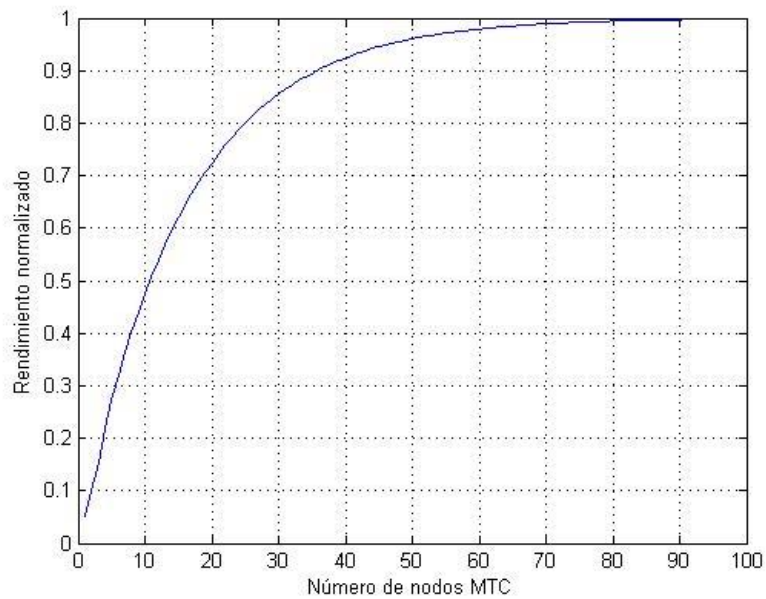


Figura 5.4: Rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de sensores, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones.

La figura 5.5 corresponde al rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de usuario en función del número de nodos MTC en la red. Esta gráfica representa como afecta que nodos MTC transmitan durante los ciclos RACH de usuarios. Tanto en esta gráfica como en su equivalente con la resolución de colisiones activada (figura 5.6), el valor del parámetro de la probabilidad de que un terminal de usuario tenga que transmitir un mensaje (p_{N_U}) es del 25% para estas dos figuras. Se muestran el rendimiento de cada tipo de nodo y el rendimiento total. Con el algoritmo que calcula la probabilidad de transmisión de los nodos MTC en este ciclo RACH, se consiguen un rendimiento total de 36%, cercano al del ciclo RACH del grupo de sensores (figura 5.3).

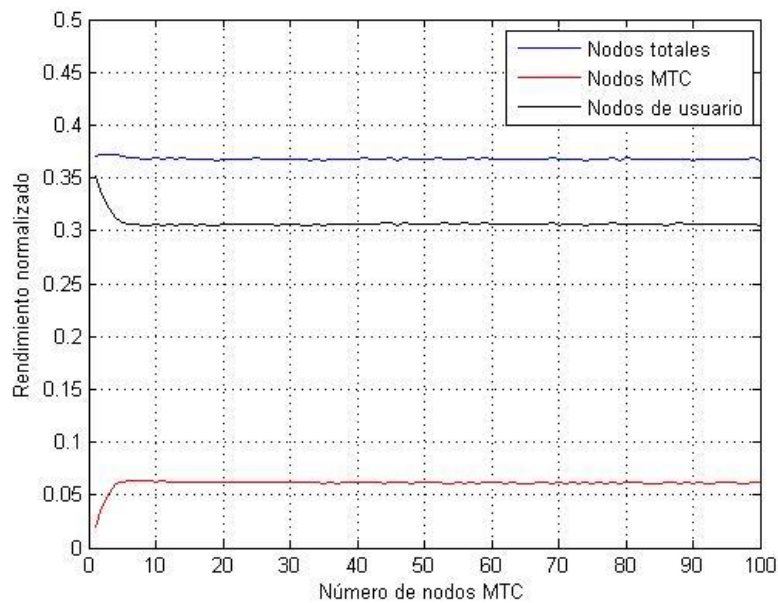


Figura 5.5: Rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de usuario, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones, ($p_{N_U}= 25\%$).

En cambio, para el caso con la resolución de colisiones activada (figura 5.6), el rendimiento no alcanza su máximo teórico de 100% debido a que el algoritmo reserva un porcentaje de los preámbulos totales por las posibles fluctuaciones del número de terminales de usuario a transmitir en el PRACH.

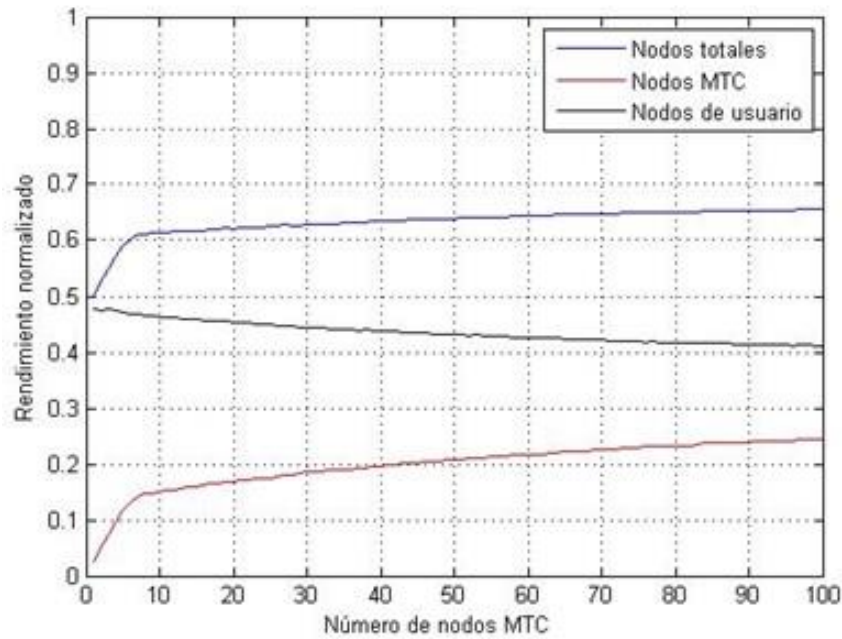


Figura 5.6: Rendimiento normalizado de las oportunidades RACH del grupo de nodos de usuario, en función del número de nodos MTC en la red, con resolución de colisiones, ($p_{N,U}=25\%$).

5.3.2 Latencia

En este apartado veremos dos tipos de latencia. El primer tipo está asociado al número de retransmisiones de media de los mensajes en el canal, que solo tiene en cuenta el número de veces que ese nodo consigue superar el factor ACB y por lo tanto intentar una transmisión. El segundo es el tiempo de media que tarda un mensaje desde que llega al buffer del nodo hasta que consigue transmitirse exitosamente, que es al que nos referiremos cuando hablemos de latencia en este apartado.

En la figura 5.7 se puede ver el número de retransmisiones que necesita un mensaje del grupo de sensores en transmitirse exitosamente, frente al número de nodos MTC en la red, para probabilidades de transmisión de los nodos de usuario ($p_{N,U}$) de 25%, 50% y 75%, y sin la resolución de colisiones activada. En la gráfica se pueden apreciar tres partes. La primera, de 1 a 7 nodos MTC, que es la zona donde todavía tienen una probabilidad de transmisión en el ciclo RACH de usuarios cercana a 100%. La segunda aumenta proporcionalmente al número de nodos MTC hasta que se activa el ACB en los ciclos RACH del grupo de sensores. En ese momento empieza la zona tres, donde el número de retransmisiones es constante.

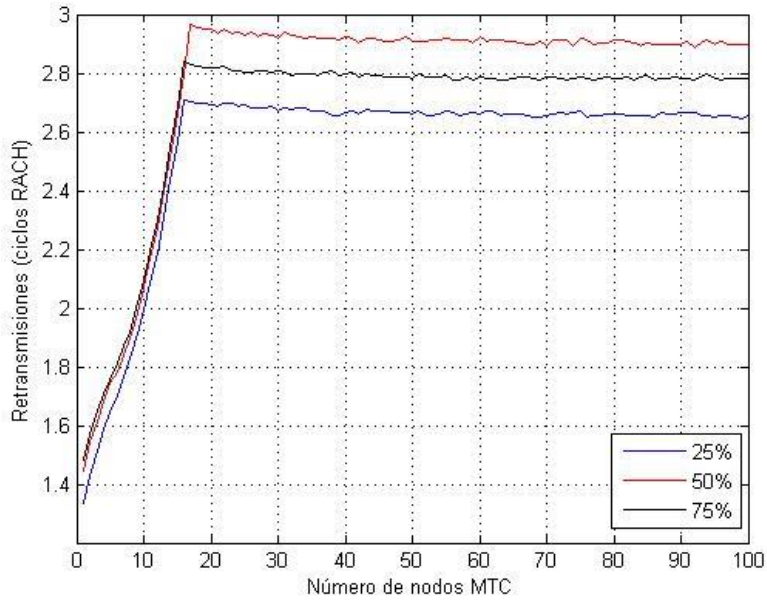


Figura 5.7: Número de retransmisiones de mensajes de los nodos MTC, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones para diferentes valores de $p_{N,U}$.

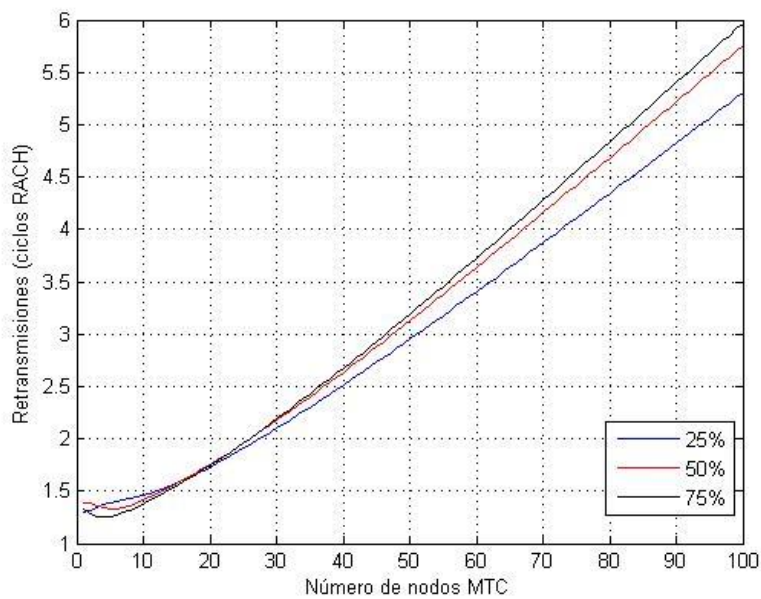


Figura 5.8: Número de retransmisiones de mensajes de los nodos MTC, en función del número de nodos MTC en la red, con resolución de colisiones para diferentes valores de $p_{N,U}$.

En el caso de que esté activada la resolución de colisiones (figura 5.8), se ve la misma situación para un número reducido de nodos y, como no implementa ACB, el número de retransmisiones aumenta proporcionalmente al número de nodos. Hay que

recordar que la probabilidad de transmisión de cada nodo con la resolución de colisiones activada es del 100%, por lo que el número de ciclos RACH de media que tarda en enviarse el mensaje es menor en este caso. En la zona baja de la gráfica se observan algunos comportamientos aparentemente no justificados que serán objeto de trabajos futuros su estudio detallado.

Las figuras 5.9 y 5.10 muestran la latencia medio que sufre un mensaje, en función del número de nodos MTC en la red, para probabilidades de transmisión de los nodos de usuario (p_{N_U}) de 25%, 50% y 75%. En el caso sin resolución de colisiones (figura 5.9), el retraso alcanza valores considerables, entre 1400 y 1500 intervalos RACH para 100 nodos MTC. Estos ciclos RACH son el total de ciclos entre las oportunidades RACH del grupo de usuarios y las del grupo MTC. Para el escenario en el que se ha basado la simulación, 1500 ciclos equivaldrían a 7,5 segundos, este valor aumentaría si el buffer fuera más grande. El tamaño del buffer también afectaría a la zona inicial, donde el retraso aumenta con una pendiente superior a la del resto de la gráfica. Este cambio de pendiente sucede cuando hay el suficiente número de nodos MTC intentando transmitir que los mensajes llegan a un ritmo superior al que pueden ser enviados, por lo que se llena el buffer.

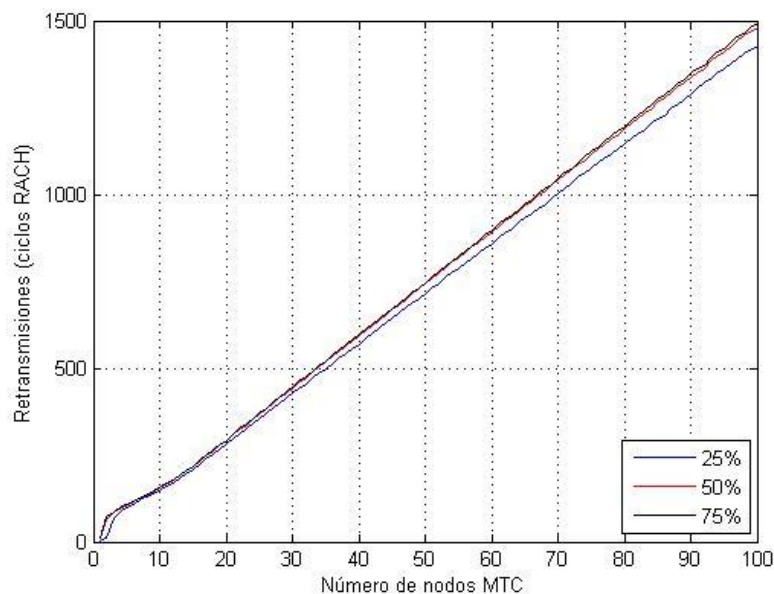


Figura 5.9: Retraso de los mensajes de los nodos MTC, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones para diferentes valores de p_{N_U} .

Cuando la resolución de colisiones está activada (figura 5.10), el retraso baja considerablemente como era de esperar, situándose en los 550 ciclos (2,75 segundos) para 100 nodos MTC.

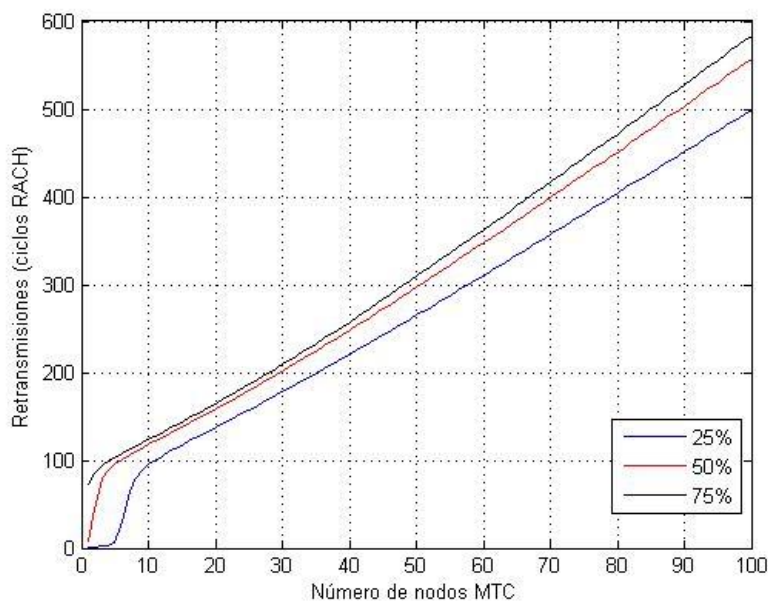


Figura 5.10: Retraso de los mensajes de los nodos MTC, en función del número de nodos MTC en la red, con resolución de colisiones para diferentes valores de p_{N_U} .

Para finalizar, en las figuras 5.11 y 5.12 se muestra el número medio de retransmisiones de los mensajes procedentes de los nodos de usuario, frente al número de nodos MTC de la red, para probabilidades de transmisión de los nodos de usuario (p_{N_U}) de 25%, 50% y 75%. Este número de retransmisiones corresponde al número de oportunidades RACH continuas del grupo de usuarios, ya que los nodos de usuario transmiten en todos sus ciclos RACH, siempre y cuando tengan un mensaje a enviar. Se aprecia que el retraso es aceptable, ya que para el peor caso, cuando p_{N_U} es 75%, es de entre 40 y 45 ms. El gran aumento en las retransmisiones iniciales de las gráficas es debido al aumento de nodos de sensores transmitiendo en el ciclo RACH de usuarios, hasta que la probabilidad de transmisión P_{tx} empieza a recalcularse para mantener el rendimiento constante.

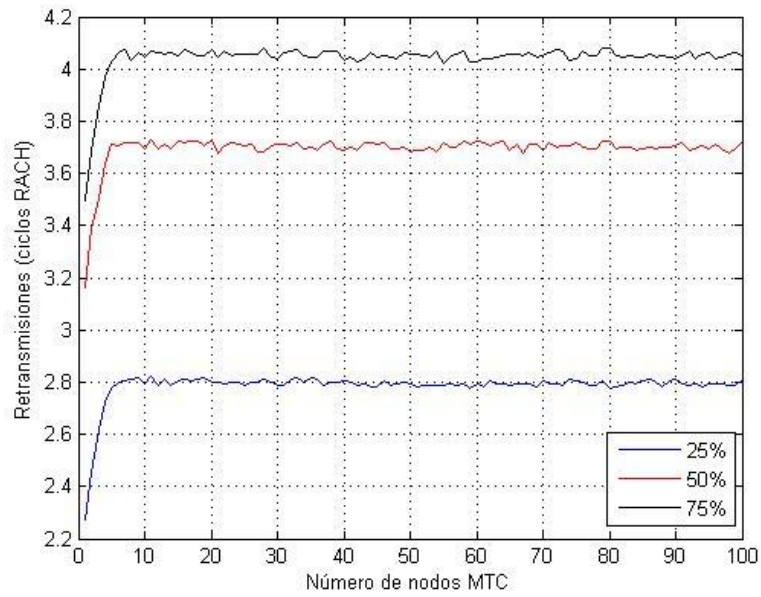


Figura 5.11: Número de retransmisiones de mensajes de los nodos de usuario, en función del número de nodos MTC en la red, sin resolución de colisiones para diferentes valores de p_{N_U} .

En el caso con resolución de colisiones (figura 5.12) el retraso es aún menor, no superando los 25 ms para el caso con probabilidad p_{N_U} de 75%.

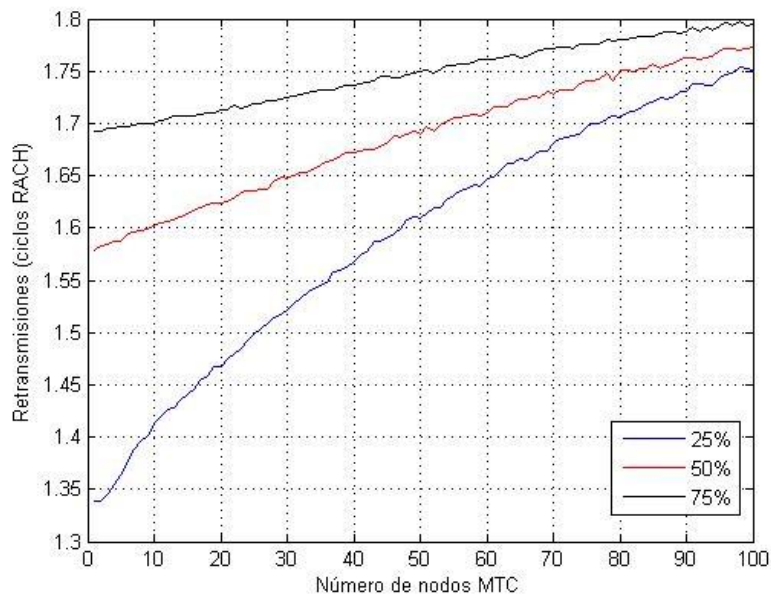


Figura 5.12: Número de retransmisiones de mensajes de los nodos de usuario, en función del número de nodos MTC en la red, con resolución de colisiones para diferentes valores de p_{N_U} .

5.4 Conclusión

Se ha validado la simulación basada en el modelo base del RACH en un escenario similar al propuesto en [15] con resultados coincidentes.

En este modelo base del RACH, que tiene una curva de rendimiento similar a un ALOHA ranurado, el rendimiento decrece considerablemente tras superar el número óptimo de usuarios. Esto produce que el canal sea poco viable cuando hay cientos de sensores transmitiendo a la vez. Al incluir la clase de acceso por restricción (*Access Class Barring, ACB*) se consigue mantener un rendimiento constante sin importar el número de terminales en la red. Esto se refleja en una reducción de la latencia que sufren dichos terminales.

Se ha propuesto un algoritmo que completa los ciclos RACH reservados para usuarios con la transmisión procedente de nodos de sensores, cuando hay capacidad excedente. Se comprueba que dicha solución proporciona unos resultados excelentes para el caso que la resolución de colisiones está desactivada, ya que consigue mantener el rendimiento de ese ciclo RACH cercano a su máximo teórico. Sin embargo, para el caso sin resolución de colisiones solo consigue aprovechar el canal un 65%.

Y la última propuesta de este trabajo, la separación de usuarios y sensores, se pueden corroborar los buenos resultados al observar las gráficas de retransmisiones de los mensajes de usuarios, ya que, al contrario que los sensores, solo tienen un retraso de pocos ciclos.

Con esto se demuestra que se han conseguido los objetivos del modelo: los usuarios móviles no se ven afectados por la inclusión de sensores en la red celular móvil y se ha aumentado el rendimiento en situación de sobrecarga del canal RACH.

6. Conclusión y trabajos futuros

6.1 Conclusión

En este trabajo se ha presentado un escenario conjunto de la red de sensores y la red móvil celular, donde los sensores se conectan a un concentrador que funciona como nexo entre la estación base de la red móvil y la red de sensores.

Se han estudiado los estándares de la tecnología LTE, así como numerosos trabajos y artículos de investigación, para encontrar posibles problemas que pueden aparecer al integrar la red de sensores en la red móvil. Se encontró que el mayor problema con respecto a los usuarios móviles se produciría en el PUCCH, que es un canal de control del enlace ascendente, donde los terminales de la red realizan peticiones de transmisión. Al registrarse los sensores a la red aumentaría, proporcionalmente al número de sensores, el tiempo que tardarían los usuarios en conseguir recursos para transmitir.

Se ha propuesto una solución basada en una investigación similar: un modelo del RACH, donde los sensores solo pudieran transmitir a través del canal de acceso aleatorio (RACH). Se han realizado propuestas de modificación a dicho modelo para hacerlo más eficiente y minimizar, en la medida de lo posible, minimizar el impacto de los sensores en el acceso a la red de los usuarios móviles que usen el RACH. Primero se separaron los ciclos del canal RACH en dos grupos, uno para cada tipo de nodo en la red (sensores y usuarios). Después se incluyó una clase de acceso por restricción al grupo de nodos de sensores para limitar sus transmisiones y así mejorar el rendimiento; esta clase se ha calculado a partir del número de nodos de sensores. Y para finalizar se ha completado dinámicamente el ciclo RACH del grupo de usuarios con nodos del otro grupo, ya que hay muchos menos usuarios que sensores usando el canal.

Por último, se ha realizado y validado un simulador, y se ha verificado nuestro modelo mediante una simulación de tiempo discreto, pudiendo observar que los usuarios móviles no se ven prácticamente afectados por los sensores. Además de conseguir un rendimiento constate del 36% en el canal de contienda (RACH), independientemente del número de sensores conectados a la red.

6.2 Trabajos futuros

Entre los trabajos futuros se han identificado los siguientes:

Simulación

Realización de una campaña de simulación exhaustiva variando el rango de los valores de los parámetros más significativos del modelo como el número de preámbulos y servidores, las probabilidades de llegada de mensajes y los números de nodos MTC y de usuario. Con esto se podría ver posibles anomalías en el modelo para ciertos rangos de parámetros.

Comparación

Realización de comparativas con los métodos actuales de LTE (RACH para primera petición de planificación, PUCCH para las siguientes) para corroborar la viabilidad de este modelo con el caso real.

Resolución de colisiones

La resolución de colisiones usada en nuestro modelo es ideal. Eso quiere decir que siempre recupera una transmisión. En la realidad, esto es raramente posible con las tecnologías actuales. Encontrar una manera de aumentar la probabilidad de recuperación de un mensaje aumentaría el rendimiento de los canales de contienda.

Protocolo de acceso a los concentradores

Nuestro modelo se ha basado en que los mensajes provienen de concentradores de la red de sensores. Se podría hacer un protocolo que ordenase los mensajes por prioridad, según su tipo de sensor y su tolerancia al retraso. Además de que aune aquellos que mensajes dirigidos a un mismo servidor destinatario, y así ahorrarse señalización.

Comunicaciones inter-célula

Incorporar el traspaso de célula de los terminales de usuario. Se podría usar una distribución de probabilidad para calcularlo y así tener un número variante de preámbulos disponibles para su selección. Con esto se podrían obtener resultados en un caso más real.

Conclusion

In this project we presented a scene with the wireless sensor network and the cellular mobile network together, where the sensors are connected to a hub that works as a nexus between the base station of the mobile network and the sensor network.

The standards of LTE technology have been studied, as well as a numerous works and research articles, in order to find possible problems that could appear when the sensor network is integrated into the mobile network. We found that the biggest interference regarding the mobile users could be produced in the PUCCH, which is an uplink control channel, where the terminals in the network make transmission requests. When registering the sensors to the network it would increase, proportionally with the number of sensors, the amount of time used by the users to acquire the resources needed to transmit.

A solution based on a similar investigation has been proposed: a RACH model, where the sensors could only transmit through the random access channel (RACH). Several modification proposals have been performed to the model to make it more efficient, and to get a reduced delay for the mobile users that have to use RACH. First, the RACH channel cycles have been divided into two groups, one for each kind of network node (sensors and users). Then, it has been included an access class barring to the sensor nodes groups to delimitate its transmissions, and improve the performance; this class has been calculated based on the number of sensor nodes. Then, the RACH cycle from the users group has been completed dynamically with nodes from the other group, since there are fewer users than sensors using the channel.

Finally, a simulator has been made and validated, and our model has been verified using a discrete time simulation, being able to observe that the mobile users are almost not affected by the sensors. In addition, it has been achieved a regular 36% throughput in the contention channel (RACH), regardless from the number of sensors connected to the network.

Bibliografía

Generales

[1] Gartner Inc. “Gartner Says 4.9 Billion Connected “Things” Will Be in Use in 2015”. Presentado a: Gartner Symposium/ITxpo 2014, Barcelona (España), Noviembre 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2905717> [consulta: septiembre 2015]

[2] IDC Italia S.r.L and TXT e-solutions S.P.A., *Definition of a Research and Innovation Policy Leveraging Cloud Computing and IoT Combination*. 2014. Disponible en: <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/definition-research-and-innovation-policy-leveraging-cloud-computing-and-iot-combination> [consulta: septiembre 2015]

[3] Intel. “Intel IoT Platform”. Presentado a: *IoT Insights 2014*, San Francisco (California, Estados Unidos), Diciembre 2014 [en línea]. Disponible en: http://www.nist.gov/el/msid/upload/Background-Intel_IoT_Insights_2014_Web-2.pdf [consulta: septiembre 2015]

Especificaciones 3GPP

[4] 3GPP TS 36.331 v12.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 12), septiembre 2014.

[5] 3GPP TS 36.201 v12.0.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description (Release 12), septiembre 2014.

[6] 3GPP TS 36.211 v12.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 12), septiembre 2014.

[7] 3GPP TS 36.321 v12.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 12), septiembre 2014.

[8] 3GPP TS 36.213 v12.5.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 12), marzo 2015.

[9] 3GPP TS 36.304 v12.5.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode (Release 12), junio 2015.

[10] 3GPP TR 37.868 v.11.0.0 Study on RAN Improvements for Machine-type Communications (Release 11) septiembre 2011. [11][15] 3GPP TR 37.869 v12.0.0 Study on Enhancements to Machine-type Communications (MTC) and other Mobile Data Applications; Radio Access Network (RAN) aspects (Release 12), Septiembre 2013.

Libros

[12] H. Holma y A. Toskala, *LTE for UMTS Evolution to LTE Advanced*. Segunda edición. West Sussex (Reino Unido) : John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

[13] S. Ahmadi, *LTE-Advanced A Practical System Approach to Understanding the 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies*. Kidlington, Oxford (Reino Unido) : Elsevier Inc, 2014.

[14] Qualcomm Incorporated, *Long Term Evolution (LTE) Air Interface*. San Diego, California (Estados Unidos), 2009.

Artículos de investigación

[15] M. Burakov, A. Eldstal-Damlin. *LTE Random Access Channel Model for Wireless Sensor Network Applications*, Master Thesis. Luleå (Sweden), Luleå University of Technology. April 6, 2012 [en línea]. Disponible en: <http://pure.ltu.se/portal/en/studentthesis/an-lte-random-access-channel-model-for-wireless-sensor-network-applications%28c9d39bf9-8e23-47fc-a590-bc1a936ba25d%29.html> [consulta: enero 2015].

[16] Feng Hu, Nandana Rajatheva, Matti Latva-aho, Xiaohu You. "Sensor Integration to LTE/LTE-A Network through MC-CDMA and Relaying". Presentado a: *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*, Yokohama (Japón), Mayo 2012 [en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6240010&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6238551%2F6239848%2F06240010.pdf%3Farnumber%3D6240010> [consulta: enero 2015].

[17] M. N. Tehrani, M. Uysal, H. Yanikomeroğlu, "Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions", *Communications Magazine, IEEE*, v. 52, no. 5, pp. 86-92, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6815897>. [consulta: enero 2015]

[18] Shao-Yu Lien; Tzu-Huan Liao; Ching-Yueh Kao; Kwang-Cheng Chen, "Cooperative Access Class Barring for Machine-to-Machine Communications." *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.11, no.1, pp.27-32, 2012. [en línea]. Disponible en: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6093905&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6093905](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6093905&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6093905&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6093905)

Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6093905. [consulta: Enero 2015]

[19] Suyang Duan; Shah-Mansouri, V.; Wong, V.W.S., "Dynamic access class barring for M2M communications in LTE networks." *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pp. 4747-4752, Diciembre 2013. [en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6855701>. [consulta: enero 2015]

[20] Huasen Wu, Chenxi Zhu, Richard J. La, Xin Liu, and Youguang Zhang, "Fast Adaptive S-ALOHA Scheme for Event-driven Machine-to-Machine Communications". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 6, pp. 1904-1917, Febrero 2013. Disponible en: <http://web.cs.ucdavis.edu/~liu/paper/ToN2013FASA-huasen.pdf> [consulta: enero 2015]

[21] Yi Liu, Chau Yuen, Jiming Chen, Xianghui Cao, "A Scalable Hybrid MAC Protocol for Massive M2M Networks", *Internet of Things Journal, IEEE*, vol. 1, no. 1, pp. 99-111, Marzo 2014 [en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6762845>. [consulta: enero 2015]

[22] Guo Wang, Xiaofeng Zhong, Shunliang Mei, Jing Wang, "An adaptive medium access control mechanism for cellular based Machine to Machine (M2M) communication". Presentado a: *Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), 2010 IEEE International Conference on*, pp.1,4, Agosto 2010-Septiembre 2010 [en línea]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5611820&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fexpls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5611820. [consulta: enero 2015]

[23] Xiaoning Zhang, Lin Bai, Wenyang Guan, "Multiple Beam Selection for Combining M2M Communication Networks and Cellular Networks with Limited Feedback", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, Octubre 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2013/540849/>. [consulta: enero 2015]