

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Máster

**Ahorro Energético en Redes de Acceso Radio mediante Programación
Dinámica y CEC**

**Energy Saving in Radio Access Networks using Dynamic Programming
and CEC**



AUTOR: ÁNGEL FERNÁNDEZ GAMBÍN

DIRECTOR: DR. JUAN JOSÉ ALCARAZ ESPÍN

CODIRECTOR: JOSÉ ANTONIO AYALA ROMERO

JUNIO DE 2016

Autor	Ángel Fernández Gambín
E-mail del Autor	af.gambin@gmail.com
Director(es)	Dr. Juan José Alcaraz Espín
E-mail del Director	juan.alcaraz@upct.es
Codirector	José Antonio Ayala Romero
E-mail del Codirector	jose_a_ayala@hotmail.com
Título del TFM	Ahorro Energético en Redes de Acceso Radio mediante Programación Dinámica y CEC
Título en Inglés	Energy Saving in Radio Access Networks using Dynamic Programming and CEC
Descriptores	Ahorro energético, HetNets, green communications, base stations switching, Dynamic Programming, energy saving, redes de alta densidad, redes inalámbricas, redes celulares heterogéneas, traffic offloading, optimal control, sleeping scheme
Resumen	<p>El presente proyecto aborda el problema del creciente consumo energético en las redes celulares heterogéneas (HetNets) para comunicaciones móviles. Este ascendente consumo se debe al despliegue de gran cantidad de estaciones base de menor potencia, denominadas <i>small cells</i>, con el objetivo de satisfacer las necesidades cada vez mayores de los usuarios de la red.</p> <p>Por este motivo, el ahorro energético supone un aspecto clave y de gran interés para el sector de las telecomunicaciones. En el presente trabajo se propone un esquema de apagado temporal de estaciones base, en períodos de baja intensidad de tráfico sin reducir la calidad de servicio de los usuarios en la red. Esta estrategia permite desactivar y activar estaciones base en función de la variabilidad del tráfico a lo largo del día, para conseguir mejorar la eficiencia energética de todo el sistema.</p> <p>El algoritmo propuesto consiste en la aplicación de Programación Dinámica junto con CEC para optimizar el consumo energético de la red de comunicaciones móviles, encontrando una política óptima de control mediante el apagado o encendido de las estaciones base desplegadas. Además, en la última fase de la estrategia se aplica el algoritmo UCB1 para encontrar la configuración óptima del mecanismo de gestión de interferencia de la red, minimizando la interferencia entre estaciones base y por tanto, mejorando la capacidad del canal. Cabe destacar, que es de baja carga computacional y no requiere gran cantidad de información sobre la red, a diferencia de la mayoría de propuestas analizadas en la bibliografía.</p> <p>Los resultados obtenidos tras las simulaciones demuestran la efectividad del nuevo esquema consiguiendo un ahorro energético notorio. Además, ese ahorro se acentúa a medida que el número de estaciones base desplegadas aumenta. De igual manera, se observa cómo es completamente escalable ya que aunque el número de estaciones base desplegadas aumente, el tiempo de computación permanece prácticamente constante y es totalmente factible dentro de la escala temporal a la que debe operar el mecanismo.</p>
Titulación	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Intensificación	Ingeniería Telemática
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación	Junio de 2016

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
Capítulo 1	6
INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	6
1.2 OBJETIVOS	7
1.3 METODOLOGÍA	7
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	8
Capítulo 2	9
REDES CELULARES PARA COMUNICACIONES MÓVILES	9
2.1 INTRODUCCIÓN	9
2.2 ESTÁNDAR LTE/LTE-ADVANCED	11
2.2.1 EVOLUCIÓN DESDE GSM HASTA LTE	11
2.2.2 ESQUEMA DE TRANSMISIÓN	14
2.2.3 ESQUEMA DE PLANIFICACIÓN	15
2.2.4 COORDINACIÓN DE LA INTERFERENCIA ENTRE CELDAS	16
2.3 REDES CELULARES HETEROGÉNEAS EN LTE/LTE-ADVANCED.....	16
2.3.1 <i>CELL RANGE EXPANSION</i>	19
2.3.2 <i>ALMOST BLANK SUBFRAME</i>	20
2.4 AHORRO ENERGÉTICO EN REDES CELULARES HETEROGÉNEAS.....	20
2.4.1 ESTUDIOS PREVIOS	21
Capítulo 3	23
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.2 MODELO DE TRÁFICO	24
3.3 MODELO DE POTENCIA	26
3.4 MODELO DE CANAL	27
3.5 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR	28
Capítulo 4	32
DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA	32
4.1 INTRODUCCIÓN	32
4.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....	32
4.3 <i>CERTAINTY EQUIVALENT CONTROL</i>	36
4.4 REGRESIÓN LINEAL.....	37
4.4.1 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	38
4.4.2 ALGORITMO DEL DESCENSO DEL GRADIENTE	39

4.5	ALGORITMOS <i>MULTI-ARMED BANDITS</i>	39
4.5.1	ESTRATEGIA <i>UPPER CONFIDENCE BOUND</i>	40
4.6	DESARROLLO DE LA PROPUESTA	42
4.6.1	FASE <i>OFFLINE</i>	43
4.6.2	FASE <i>ONLINE</i>	47
Capítulo 5	49
EVALUACIÓN Y RESULTADOS.....		49
5.1	INTRODUCCIÓN	49
5.2	ALGORITMO DE REFERENCIA	49
5.3	PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES	50
5.4	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	51
5.4.1	SIMULACIONES AHORRO ENERGÉTICO.....	51
5.4.2	MEDIDAS DE TIEMPO DE COMPUTACIÓN	59
5.4.3	FRENTE PARETO	67
5.4.4	SIMULACIONES CON DIFERENTE PATRÓN DE TRÁFICO.....	68
Capítulo 6	72
CONCLUSIONES.....		72
Capítulo 7	74
BIBLIOGRAFÍA		74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Soluciones de red desde GSM hasta UMTS	12
Figura 2: Solución de red para LTE.....	13
Figura 3: Red de acceso LTE.....	14
Figura 4: Red celular heterogénea	17
Figura 5: Conectividad de la celda con el núcleo de red	18
Figura 6: Escenario Macro-Pico con región <i>CRE</i>	19
Figura 7: Utilización <i>Almost Blank Subframe</i>	20
Figura 8: Escenario de simulación completo.....	23
Figura 9: Escenario de simulación activo (4estaciones Pico por sector).....	24
Figura 10: Patrón de tráfico utilizado	25
Figura 11: Muestra de patrón de tráfico	26
Figura 12: Parámetros de potencia	26
Figura 19: Consumo energético por sector a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas	52
Figura 20: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas	53
Figura 21: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas	54
Figura 22: Consumo energético por sector a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas. ...	54
Figura 23: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas	55
Figura 24: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas	56
Figura 25: Consumo energético por sector a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas. .	56
Figura 26: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas	57
Figura 27: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas	58
Figura 28: Comparativa ahorro energético	59
Figura 29: Tiempo de computación para 4 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	60
Figura 30: Tiempo de computación para 7 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	61
Figura 31: Tiempo de computación para 10 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	62
Figura 32: Tiempo de computación para 4 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	63
Figura 33: Tiempo de computación para 7 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	64
Figura 34: Tiempo de computación para 10 estaciones desplegadas a lo largo del día.....	65
Figura 35: Resumen tiempos de cómputo	66
Figura 36: Resumen tiempos de cómputo sin optimización <i>ABS+CRE</i>	66
Figura 37: Frente Pareto	67
Figura 38: Frente Pareto en comparativa.....	68
Figura 39: Patrones de tráfico.....	69
Figura 40: Consumo energético a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas	70
Figura 41: Probabilidad de bloqueo en el sector a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas	70
Figura 42: Ahorro energético conseguido a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas	71

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años, la industria móvil ha experimentado un crecimiento masivo debido a la aparición de *smartphones*, tabletas y otros dispositivos móviles nuevos, que combinan la conectividad celular con capacidades de procesamiento cada vez más potentes. Esto ha permitido que el espacio de aplicaciones móviles crezca en áreas como las redes sociales, juegos en línea, música y video *streaming*, almacenamiento de archivos online y otros servicios basados en la nube.

De acuerdo con el informe trimestral *Ericsson Mobility Report* [1] el número de suscripciones móviles supera la población mundial y se prevé que el número de dispositivos móviles en 2018 se encuentre en torno a 1,4 dispositivos por habitante. Además, este incremento de dispositivos viene acompañado por servicios que requieren un mayor ancho de banda, por lo que se espera que el tráfico global de datos móviles aumente también de manera explosiva, alcanzando la cifra de 14 exabytes por mes en el año 2018. Este crecimiento imparable del tráfico de datos móviles supone un importante reto para las operadoras de telefonía móvil.

Debido a la escasez de espectro inalámbrico, la forma más práctica para las operadoras móviles de aumentar la capacidad de la red para atender esta creciente demanda ha sido la reutilización de frecuencias mediante el despliegue de más estaciones base, principalmente de menor potencia que las estaciones principales, creando las denominadas redes celulares heterogéneas. Mediante este despliegue es posible la descongestión o descarga de tráfico desde las estaciones base principales hasta las redes complementarias [2], [3]. De esta manera, el objetivo principal de la descarga de tráfico es soportar servicios que requieren mayor capacidad y al mismo tiempo preservar la calidad de servicio (QoS) de los usuarios de la red. Las denominadas *small cells*, las redes WiFi y las comunicaciones oportunistas han surgido recientemente como las principales tecnologías para llevar a cabo esta tarea [2].

Sin embargo, el rápido crecimiento del número de estaciones base ha contribuido en gran medida al aumento del consumo energético en las redes celulares, así como al crecimiento de la contribución por parte de la industria de las comunicaciones al calentamiento global. Concretamente, se estima que el sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) supone en torno al 2% de las emisiones globales de CO₂ [4], [5]. Además de las preocupaciones ambientales asociadas con el fuerte aumento del consumo energético mundial, el consumo de energía se ha convertido en un componente importante de los gastos operativos (OPEX) para las operadoras de redes móviles. De hecho, el consumo energético supone en torno al 14% de los costes OPEX en mercados consolidados, hasta cerca del 27% en mercados en desarrollo, y además, las estaciones base suponen entre el 65-75% del consumo total [6],[7].

Por todo ello, el ahorro de energía en las redes celulares suscita un gran interés en la comunidad investigadora y supone un objetivo prioritario para el sector de las telecomunicaciones [8].

Una de las estrategias propuestas para lograr ese ahorro es el apagado temporal de estaciones base en períodos de baja intensidad de tráfico. Controlar este mecanismo en una red a gran escala, optimizando el ahorro energético sin reducir la calidad de servicio de los usuarios es un reto de gran complejidad que involucra decisiones de control con efectos a largo plazo, aprendizaje de patrones de tráfico y predicción basada en dichos patrones.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto propuesto es desarrollar y evaluar un nuevo mecanismo de control para el ahorro de energía en redes celulares heterogéneas, que resuelva diversos retos aún abiertos en este ámbito, entre los que destacan:

- ✓ Considerar los distintos niveles de una red heterogénea.
- ✓ Modelar adecuadamente el tráfico y el consumo.
- ✓ Garantizar la escalabilidad del sistema.
- ✓ Facilitar la cooperación entre operadores.
- ✓ Hacer el mecanismo auto-organizable y coordinarlo con otros como la gestión de interferencia, siendo otro elemento clave en las redes heterogéneas.

Para ello, se pretenden explorar diversas técnicas como la Programación Dinámica, optimización estocástica y aprendizaje automático.

1.3 METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos, el desarrollo de este proyecto conlleva la realización de dos fases.

En primer lugar, la creación de un entorno adecuado para la simulación de una red heterogénea de comunicaciones móviles donde operan de manera conjunta estaciones base de distintos niveles de potencia (macro, micro, pico, femto), en una zona urbana densa, para lo que se requiere conocer todas las características asociadas al escenario como son: modelo de canal, rango de cobertura, ancho de banda, distancia entre estaciones base, nodos por celda, niveles de interferencia, etc. Además, es necesario definir un modelo de tráfico que represente la periodicidad y variabilidad del mismo a lo largo del tiempo. También es necesario establecer un modelo de potencia para las distintas estaciones base donde la carga de tráfico pueda ser variable.

En segundo lugar, definido el marco de simulación se pretende desarrollar y evaluar un mecanismo de ahorro energético, proporcionando control y auto-organización a la red. Para ello, se contempla el uso de Programación Dinámica junto con la técnica *Certainty Equivalent Control*. Igualmente, para optimizar el mecanismo de control de interferencia en redes heterogéneas se plantea el uso de algoritmos *Multi-Armed Bandits*.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El contenido del resto del documento se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Redes celulares para comunicaciones móviles. Se presentan los aspectos tecnológicos fundamentales relativos a *Long Term Evolution* y *Long Term Evolution-Advanced* (LTE y LTE-A), se describen las redes celulares heterogéneas y finalmente, se expone el trabajo previo relacionado con el proyecto, así como la contribución que propone el mismo.

Capítulo 3. Descripción del sistema. Se define y modela el escenario necesario para poder realizar el estudio. Además, se describe el simulador implementado para ello.

Capítulo 4. Descripción de la propuesta. Se formula el problema a resolver, se presentan las técnicas empleadas, y su particularización en el proyecto.

Capítulo 5. Evaluación y resultados. Se describe la configuración utilizada para llevar a cabo las diferentes simulaciones, se presenta el algoritmo de referencia contra el que comparar la propuesta, y finalmente, se exponen los resultados obtenidos.

Capítulo 6. Conclusiones. Se desarrollan las conclusiones más relevantes que se pueden extraer del trabajo.

Capítulo 7. Bibliografía. Se exponen las referencias utilizadas para la documentación del proyecto.

Capítulo 2

REDES CELULARES PARA COMUNICACIONES MÓVILES

2.1 INTRODUCCIÓN

Para entender los complejos sistemas de comunicaciones móviles actuales, es importante entender de donde proceden y cómo ha sido su evolución a lo largo de estos años. El desarrollo de estos sistemas ha ido cambiando, desde un carácter regional o nacional, hasta llegar a ser una tarea cada vez más compleja y que involucra a organizaciones globales de estandarización y desarrollo como la *Third Generation Partnership Project* (3GPP).

Las distintas tecnologías o estándares sobre comunicaciones móviles se han dividido en distintas generaciones, empezando por la primera generación (1G) que constituía sistemas móviles radio-analógicos y que apareció en las década de los 80, 2G que fue la primera generación de sistemas móviles digitales, posteriormente llegó el 3G que supone una evolución importante introduciendo la gestión de datos con mayor ancho de banda. El estándar *Long Term Evolution* (LTE) se denomina usualmente como la cuarta generación, pero muchos otros consideran que la versión LTE *release* 10, también denominada como LTE-Advanced, es la verdadera 4G, siendo la primera versión LTE *release* 8 catalogada como la versión 3.9G.

Se trata simplemente de una cuestión de etiquetas, ya que realmente LTE y LTE-Advanced son la misma tecnología. Además, ambos estándares son desarrollados por el 3GPP, que también fue el encargado de desarrollar la anterior generación (WCDMA/HSPA o 3G) [9].

La evolución de los sistemas 3G hacia 4G se ha llevado a cabo gracias a la creación y desarrollo de nuevos servicios para dispositivos móviles, y es habilitada por el avance tecnológico disponible para estos sistemas. Además, se ha producido una evolución del entorno en el cual los sistemas móviles están desplegados y operados en cualquier parte, existe competitividad entre operadoras móviles, retos de otras tecnologías móviles, y una regulación del espectro y del mercado en el sector.

El explosivo incremento del uso de Internet para proporcionar todo tipo de servicios desde la década de los 90 empezó al mismo tiempo que el uso extendido de los sistemas móviles de las generaciones 2G y 3G. El siguiente paso natural era que esos servicios basados en Internet también estuvieran disponibles en los sistemas móviles, creando lo que se conoce hoy día como “ancho de banda móvil”, siendo éste uno de los principales objetivos o retos a cumplir para la evolución hacia LTE.

Un aspecto interesante de esa migración de servicios hacia dispositivos móviles es la aparición de un potente rango de servicios adicionales que pueden explotar precisamente la movilidad, la posición del usuario, así como la capacidad de *roaming*.

AHORRO ENERGÉTICO EN REDES DE ACCESO RADIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CEC

La telefonía fija así como las primeras generaciones de tecnología móvil se sustentaban en servicios basados en conmutación de circuitos, inicialmente para voz. Los primeros servicios de datos sobre GSM también estaban basados en conmutación de circuitos, lo que posteriormente evolucionó hacia servicios basados en conmutación de paquetes con la tecnología GPRS. Esto dio lugar a que el primer desarrollo 3G tuviera servicios basados en ambos tipos de conmutación, siendo la conmutación de paquetes un añadido secundario. No fue hasta la evolución de 3G en HSPA, y después con LTE/LTE-A cuando los servicios basados en conmutación de paquetes e IP se consideraron como objetivo primario en el desarrollo. No obstante, los servicios basados en conmutación de circuitos siguen vigentes, pero son proporcionados sobre IP en el caso LTE, como por ejemplo la voz sobre IP (VoIP).

IP es válido para cualquier servicio y por tanto, permite desplegar una gran multitud de ellos con requisitos muy diferentes. Los principales parámetros de diseño necesarios para desarrollar una interfaz radio que soporte gran variedad de servicios son los siguientes [9]:

- Velocidad de datos: muchos servicios con baja tasa de datos como los servicios de voz son importantes y todavía constituyen una gran parte de la capacidad de las redes de comunicaciones móviles, pero obviamente son los servicios que requieren alta tasa de transferencia de datos los que imponen las condiciones de diseño. La creciente demanda de velocidad de datos para la navegación web, *streaming* y la transferencia de ficheros fuerza las tasas pico para los sistemas móviles desde los kbit/s para 2G, Mbit/s para 3G, hasta llegar en torno a los Gbit/s para 4G or LTE/LTE-A.
- Retardo: los servicios interactivos como los videojuegos online o los citados en el punto anterior tienen requisitos muy exigentes en cuanto al retardo y la latencia, siendo el objetivo prioritario reducirlos al máximo. Sin embargo, hay otras aplicaciones como el correo electrónico donde estos requisitos se relajan.
- Capacidad: desde el punto de vista de las operadoras, no solo es importante la tasa de datos pico proporcionada al usuario final, sino también la tasa total de datos que el sistema puede proporcionar en media desde cada estación base y en función del ancho de banda disponible, es decir, lo que se denomina eficiencia espectral. En el caso de disponer de una capacidad baja, la calidad de servicio de los usuarios finales se verá mermada.

La demanda de nuevos servicios, incremento de tasas de datos y capacidad del sistema no se consigue solamente con la evolución de la tecnología hacia 4G. Existe además, una demanda de espectro para expandir sistemas que provoca más competitividad entre las operadoras móviles y entre las tecnologías alternativas para proporcionar servicios móviles de gran ancho de banda.

Con mayor espectro para el uso de ancho de banda móvil, se crea una necesidad de operar los sistemas móviles en diferentes bandas de frecuencia, de diferente tamaño e incluso fragmentadas en espectro. Esto requiere una gran flexibilidad espectral que permita la posibilidad de variar el ancho de banda del canal, lo que constituye otro parámetro de diseño de LTE.

La demanda de nuevos servicios móviles y la evolución de la interfaz radio hacia LTE ha servido para evolucionar el núcleo de la red. El que fue desarrollado para GSM en la década de los 80 fue extendido para soportar GPRS, EDGE, y WCDMA en la década de los 90, pero todavía muy enfocado en conmutación de circuitos. Posteriormente, fue iniciada la denominada Evolución de la Arquitectura del Sistema (*System Architecture Evolution, SAE*) al mismo tiempo que el desarrollo de LTE comenzó, y ha resultado en el *Evolved Packet Core (EPC)*, desarrollado para soportar HSPA y LTE/LTE-A, enfocado en el dominio basado en conmutación de paquetes.

2.2 ESTÁNDAR LTE/LTE-ADVANCED

El estándar LTE propuesto por el consorcio 3GPP en torno a 2008 cuando apareció la primera versión, fue el gran paso para el avance de los servicios móviles celulares desde la 3G hacia una cuarta generación. Este estándar formalmente se denomina como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA)* y *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*. Aunque el 3GPP ya creó otros estándares para comunicaciones móviles como GSM/UMTS, LTE fue un estándar completamente novedoso con algunas excepciones lógicas.

Los principales objetivos de LTE fueron los siguientes [10] [11]:

- Incremento de las tasas pico de transferencia de datos, tanto para el enlace de subida como para el de bajada.
- Mejora de la calidad de servicio.
- Sistema de conmutación de paquetes optimizado.
- Ancho de banda escalable.
- Eficiencia espectral mejorada.
- Red completamente basada en tecnología IP.
- Una interfaz capaz de soportar una gran diversidad de tipos de usuarios y por tanto, de servicios diferentes.
- Necesidad de asegurar la continuidad de la competitividad del sistema 3G en el futuro.
- Baja complejidad.
- Evitar la fragmentación innecesaria de tecnologías.
- Demanda continua para reducción de costes.
- Flexibilidad en asignación de frecuencia y ancho de banda.
- Reducción de la latencia.

Las redes basadas en LTE fueron concebidas para unificar las Redes de Área Local (LAN) con tasas de transferencia de datos muy elevadas y las redes celulares con alta movilidad.

2.2.1 EVOLUCIÓN DESDE GSM HASTA LTE

GSM fue desarrollado para soportar servicios en tiempo real, utilizando conmutación de circuitos, con tasas de transferencia de datos bajas. El primer paso hacia un esquema basado en conmutación de paquetes usando tecnología IP se llevó a cabo evolucionando GSM hacia GPRS, utilizando la misma interfaz y método de acceso: TDMA (*Time Division Multiple Access*).

Para conseguir transferencia de datos a mayor velocidad en UMTS (*Universal Mobile Terrestrial System*) se desarrolló una nueva tecnología de acceso denominada WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). El acceso a la red en UMTS emula una conexión basada en conmutación de circuitos para servicios en tiempo real y una conexión basada en conmutación de paquetes para servicios de datos. En UMTS la dirección IP es asignada a un usuario cuando un servicio de datos se establece, y liberada cuando el servicio se detiene. De esta forma, los servicios de datos siguen dependiendo del núcleo de conmutación de circuitos para la asignación de IPs.

El sistema EPS (*Evolved Packet System*) está basado puramente en IP. Tanto los servicios de datos como los servicios en tiempo real se llevan a cabo usando el protocolo IP. Así, la dirección IP se asigna cuando el dispositivo móvil se activa y se libera cuando éste se apaga.

La nueva solución LTE está basada en OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y en combinación con una modulación de alto orden (hasta 64QAM), gran ancho de banda (hasta 20 MHz) y multiplexación espacial (hasta 4x4) se consiguen altas velocidades de transferencia de datos. La velocidad pico teórica que se puede alcanzar es de en torno 75 Mbps en el enlace de subida, y en el de bajada, utilizando multiplexación espacial, esa velocidad puede llegar a superar los 300 Mbps.

Las siguientes imágenes muestran la evolución comentada de los sistemas celulares [11]:

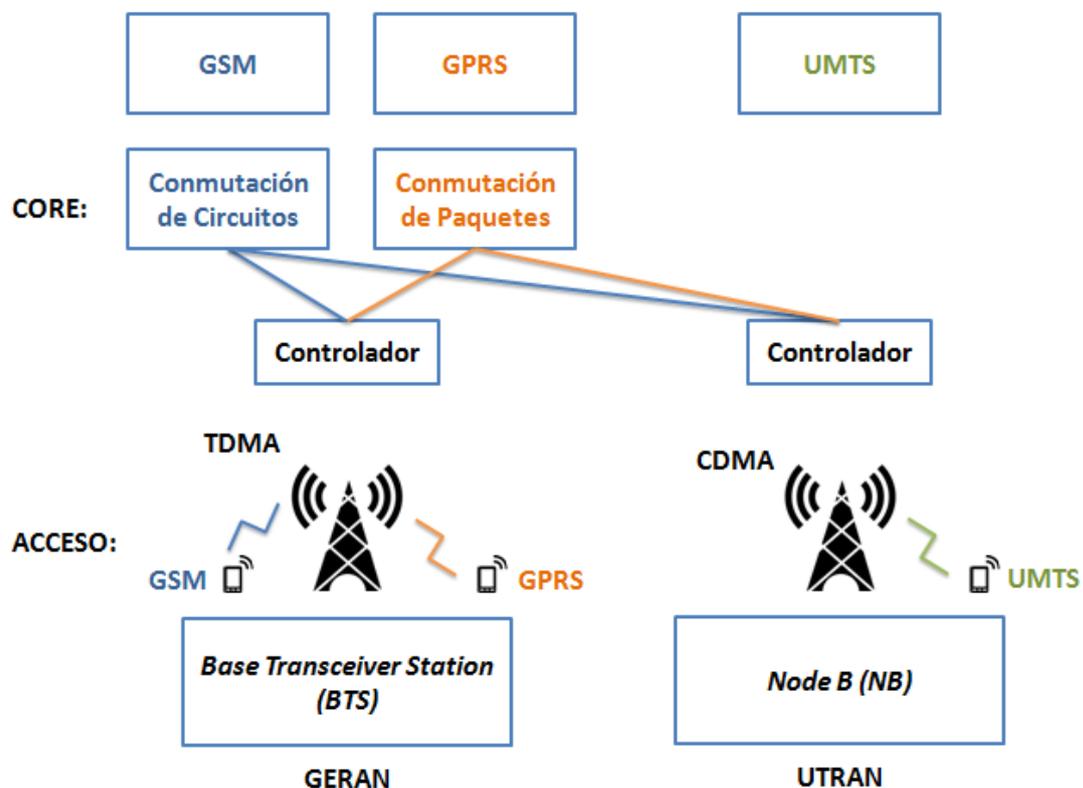


Figura 1: Soluciones de red desde GSM hasta UMTS

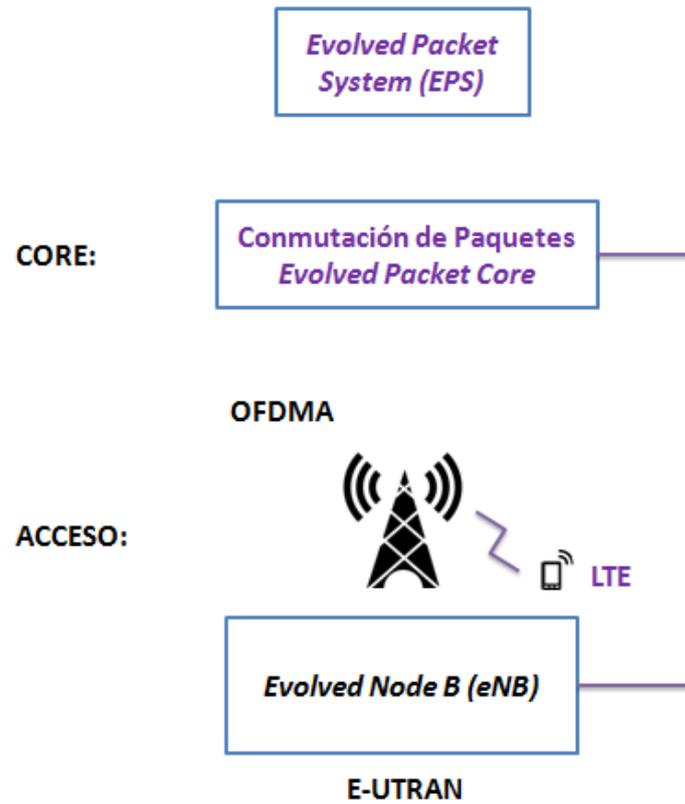


Figura 2: Solución de red para LTE

El acceso a la red en LTE está basado en un conjunto de estaciones base, denominadas eNB (*evolved NodeB*), que conforman una arquitectura como la siguiente:

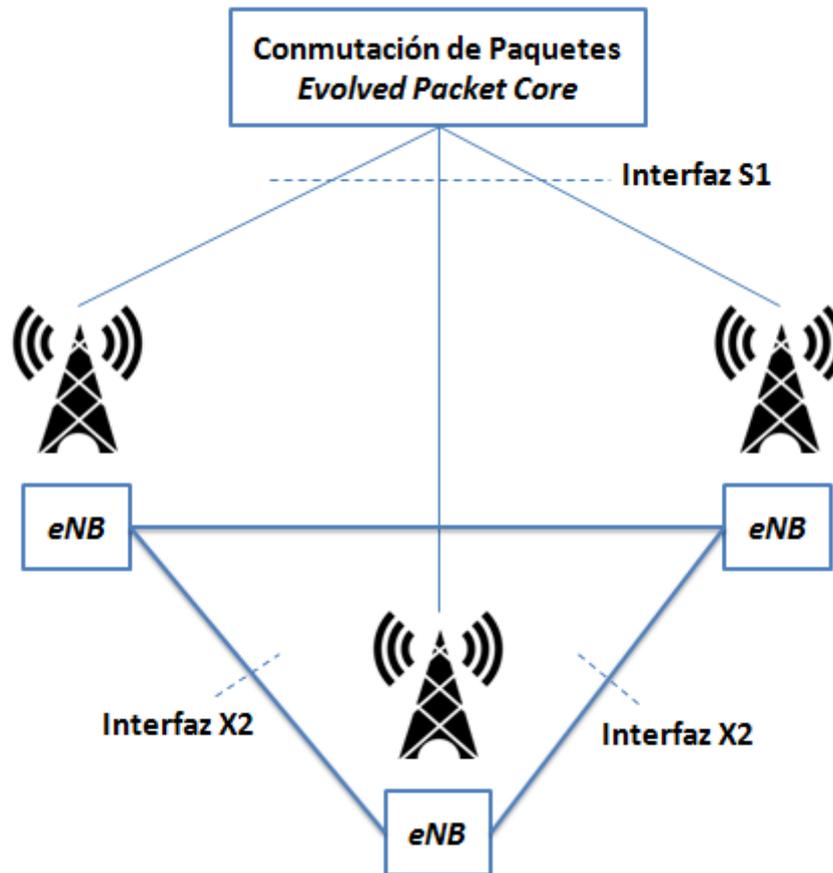


Figura 3: Red de acceso LTE

En esta arquitectura plana no hay un controlador centralizado, y los diferentes eNBs normalmente están interconectados entre sí vía interfaz X2 y hacia el núcleo de red usando la interfaz S1. La razón de distribuir el control a lo largo de las distintas estaciones base es para acelerar el establecimiento de las conexiones y reducir el tiempo requerido para el proceso de *handover* o transferencia de servicios entre nodos. Esta aceleración es vital en muchos casos para una sesión en tiempo real de un usuario, por ejemplo en aplicaciones de tipo *streaming* o videojuegos. Por otro lado, también es esencial para sesiones donde el usuario está realizando una llamada y si el proceso de *handover* no se realiza con la suficiente celeridad, la llamada será cancelada.

2.2.2 ESQUEMA DE TRANSMISIÓN

El esquema de transmisión del enlace de bajada en LTE está basado en OFDM como se comentó en el anterior apartado. OFDM es un esquema de transmisión potente ya que proporciona una gran robustez frente a la selectividad del canal de frecuencia.

El proceso de selección de canal de frecuencia puede producir corrupción de la señal, que normalmente se corrige con ecualización en el receptor. Sin embargo, esta ecualización se hace cada vez más compleja cuando se trata con señales de gran ancho de banda y especialmente compleja cuando se combina con esquemas de transmisión avanzados de tipo multi-antena tales

como la multiplexación espacial que se utiliza en LTE. Por todo esto, OFDM es una opción perfecta para este estándar, ya que se adapta precisamente al problema comentado.

Además, OFDM proporciona otros beneficios a LTE como los siguientes [9]:

- Proporciona acceso al dominio de la frecuencia, permitiendo de este modo un grado adicional de libertad en comparación con el *scheduling* en el dominio del tiempo, utilizado en la mayoría de sistemas 3G.
- Ancho de banda flexible en transmisión para soportar asignaciones de espectro de diferentes tamaños de manera sencilla, al menos en banda-base, variando el número de subportadoras OFDM utilizadas para la transmisión.
- La transmisión *Broadcast/Multicast* para múltiples estaciones base se consigue de manera relativamente sencilla con OFDM.

Por otro lado, el esquema de transmisión del enlace de subida también está basado en OFDM, pero se utilizan una serie de técnicas adicionales para mejorar la eficiencia de potencia en los terminales.

El uso de DFTS-OFDM permite la separación ortogonal de las transmisiones incluso en el dominio de la frecuencia, y esta separación suele ser beneficiosa para reducir o evitar interferencias entre distintos terminales dentro de la celda o sector.

Sin embargo, asignar un gran ancho de banda instantáneamente desde un único terminal no suele ser una estrategia eficiente en aquellas situaciones donde la velocidad en la transferencia de datos está limitada por la potencia del terminal. En estas situaciones, el esquema de subida para LTE permite utilizar TDMA y FDMA.

2.2.3 ESQUEMA DE PLANIFICACIÓN

En el núcleo del esquema de transmisión de LTE se utiliza una transmisión de canal compartido donde los recursos en tiempo y frecuencia son dinámicamente repartidos entre los distintos usuarios. Este tipo de transmisión se ajusta bien a la rápida variación, en cuanto a necesidad de recursos se refiere, que hay en las comunicaciones basadas en conmutación de paquetes.

El planificador o *scheduler* controla a cuales usuarios se les deben asignar recursos en cada momento, así como la velocidad de transferencia de datos para las transmisiones de esos usuarios. Ambos enlaces, tanto el de subida como el de bajada, están sujetos a una planificación estricta y por ello, el *scheduler* es un punto clave del sistema y afecta en gran medida al rendimiento del mismo.

En LTE se utiliza la planificación denominada *Channel-Dependent Scheduling* [9] que permite mejorar las ganancias de los usuarios teniendo en cuenta las condiciones del canal a la hora de

asignar recursos y tasas de transferencia. Dado que se utiliza OFDM en ambos canales, el *scheduler* puede, en cualquier instante de tiempo o región de frecuencias, seleccionar el usuario que mejores condiciones de canal tenga. La posibilidad de utilizar este tipo de planificación en el dominio de la frecuencia es realmente útil cuando el canal varía lentamente en el tiempo.

Las decisiones de planificación en LTE tienen lugar cada 1 ms y la granularidad en el dominio de la frecuencia es de 180 kHz. Esto permite rápidas variaciones en ambos dominios. Para llevar a cabo la planificación en el enlace de bajada, un terminal de usuario debe proporcionar información sobre el canal en ambos dominios. En función de la calidad del canal, el *scheduler* asignará recursos a los diferentes terminales. **En principio, a cada terminal se le puede asignar un determinado número de bloques de 180 kHz, denominados *Resource Blocks*, cada 1 ms que dura el intervalo de planificación.**

En el caso del enlace de subida, las condiciones del canal también se pueden tener en cuenta, pero el proceso de obtener esa información de canal puede no ser factible en muchos casos.

2.2.4 COORDINACIÓN DE LA INTERFERENCIA ENTRE CELDAS

LTE está diseñado para operar con reutilización de frecuencias, de manera que los mismos recursos en ambos dominios, tiempo y frecuencia, puedan ser reutilizados por usuarios ubicados en celdas adyacentes.

Desde el punto de vista de la eficiencia del sistema, esta reutilización es beneficiosa. Sin embargo, también puede dar lugar a problemas como bajas tasas de transferencia de datos y problemas de interferencia en los bordes entre celdas. En LTE se propone un esquema de coordinación entre celdas con el objetivo de evitar transmisiones simultáneas de los usuarios ubicados en los bordes de celdas contiguas donde las interferencias son altas. Para ello, el estándar incluye una serie de mensajes de información enviados entre estaciones base que proporcionan información sobre la situación de la interferencia y el proceso de *scheduling* de la estación.

Una situación aún más compleja se da en las denominadas redes celulares heterogéneas (*HetNets*) donde existen diferentes tipos de estaciones base desplegadas que trabajan con diferentes niveles de potencia. Una de las características más importantes de la evolución de LTE hacia LTE-Advanced es el soporte de este último de redes celulares heterogéneas. **Para tratar los problemas de interferencia en estas redes el estándar recoge una serie de técnicas denominadas *eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination)*.**

2.3 REDES CELULARES HETEROGÉNEAS EN LTE/LTE-ADVANCED

Como se comentó en la introducción, el crecimiento de la industria móvil así como el tráfico de datos a nivel mundial ha sido masivo en los últimos años, y una de las propuestas para hacer frente a estos nuevos requisitos es la creación de las denominadas redes celulares heterogéneas con el despliegue de nodos de menor potencia y capacidad, denominados *small cells*, dentro de las celdas habituales de la estructura de una red de comunicaciones móviles. De esta manera se

permite la descarga de tráfico hacia estos nodos, aliviando la carga de la estación base principal denominada macro estación.

La estructura genérica de una red celular heterogénea de comunicaciones móviles basada en LTE/LTE-Advanced tiene el siguiente aspecto [12]:

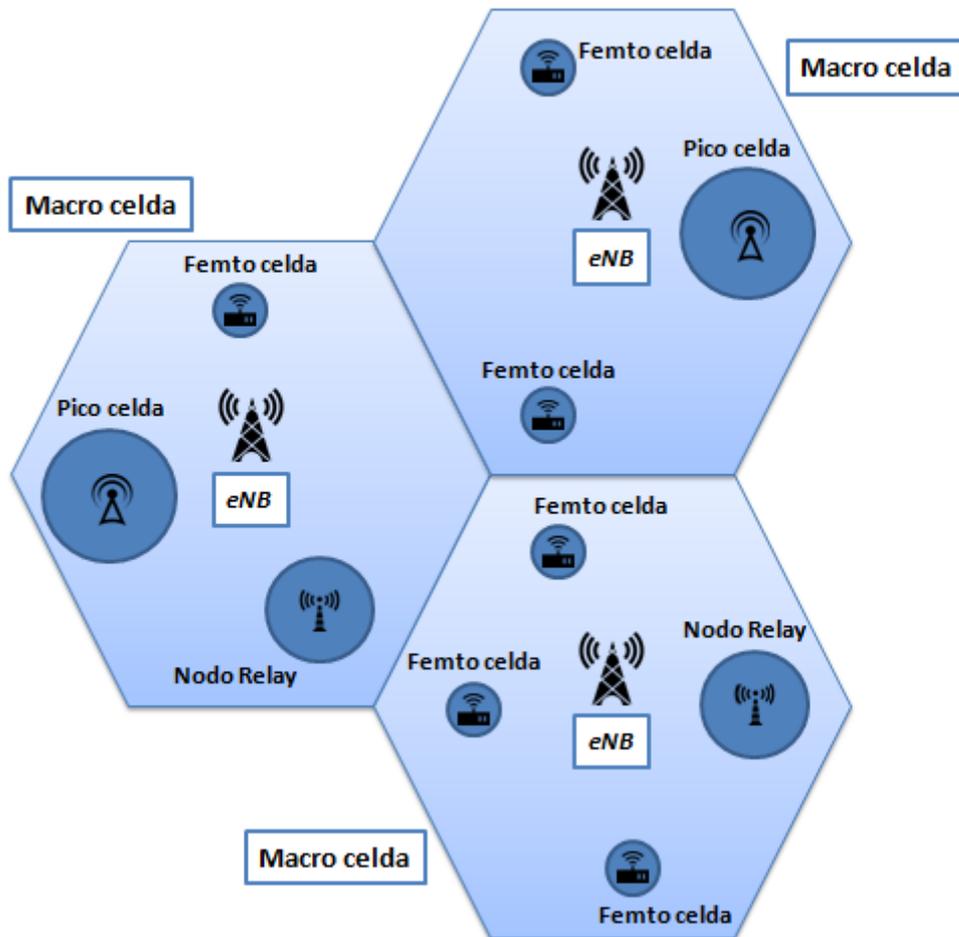


Figura 4: Red celular heterogénea

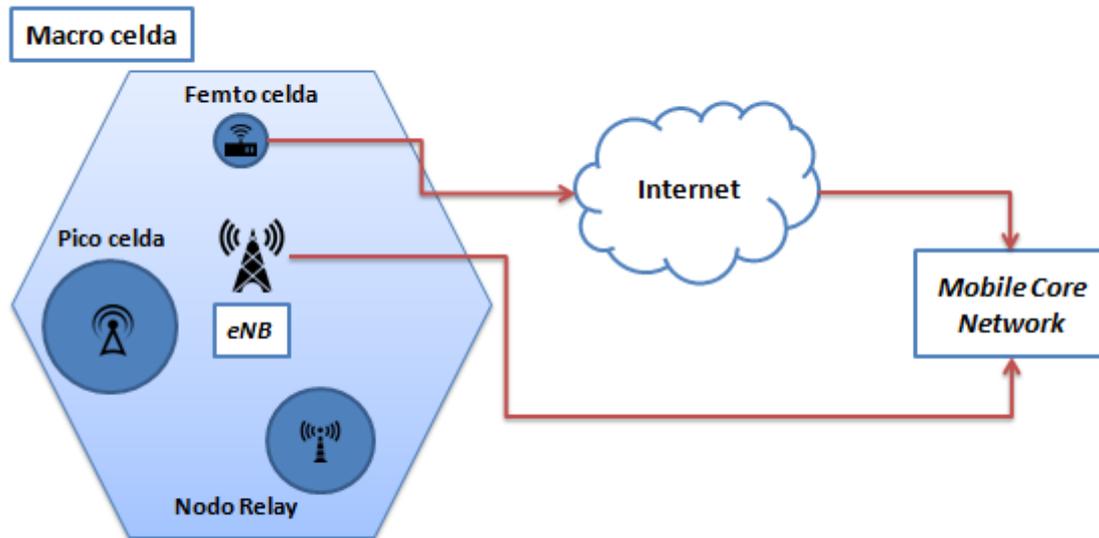


Figura 5: Conectividad de la celda con el núcleo de red

Se pueden observar diferentes tipos de celdas, donde cada celda tiene asociado un nodo o estación base de distinto nivel de potencia. En función de las necesidades del entorno, las operadoras despliegan un tipo de celda u otro:

- **Macro celdas:** cubren gran cantidad de área, el radio de la celda suele ser del orden de 500 metros a 1 km, con antenas de transmisión por encima del *clutter* y potencias de transmisión en torno a 46 dBm (20 W). Proporcionan servicio a todos los usuarios del sector o celda en caso de ser necesario.
- **Femto celdas:** también se denominan *HeNB (Home eNB)* y son nodos de baja potencia instalados en recintos interiores para el usuario final, como pueden ser hogares.
- **Pico celdas:** son nodos de media potencia, normalmente un orden de magnitud menor que las macro estaciones, y se despliegan dentro del sector para uso de la operadora de red. Suelen ser instaladas en áreas de alta concentración de tráfico inalámbrico o móvil, como por ejemplo un centro comercial o una zona urbana de oficinas, y proporcionan acceso a todos los usuarios cercanos dentro de su rango de cobertura.
- **Nodos Relay:** son nodos de menor potencia que las macro estaciones, desplegados por las operadoras para mejorar la cobertura en determinadas áreas con carácter ocasional, como por ejemplo conciertos, exhibiciones o zonas rurales.

2.3.1 CELL RANGE EXPANSION

El escenario considerado en este proyecto es una red heterogénea compuesta por estaciones macro y estaciones pico que se encuentran dentro del área de cobertura de las primeras. Las estaciones pico son desplegadas en la red por el operador de una forma planificada. Por ejemplo, pueden ser colocadas en el borde de una macro-celda o más habitualmente en un área donde la densidad de tráfico es elevada y por tanto se requiere dar servicio a un mayor número de usuarios.

En este escenario, cada usuario mide el parámetro denominado RSRP (*Reference Signal Received Power*) en el enlace de bajada, que está relacionado con la potencia de señal que recibe el usuario, en las distintas estaciones base que entran dentro de su rango de cobertura o que se encuentran adyacentes, y escoge asociarse con aquella que mejores prestaciones le proporcione, es decir, mayor RSRP tenga. Sin embargo, debido a que la potencia de transmisión de las macro estaciones es mayor que la de las pico, un usuario cerca de una pico podría acabar asociándose a una macro debido a que la potencia recibida de la misma es mayor. De esta forma, la red no se beneficia del *offloading*, o descarga de tráfico desde las macro estaciones hacia las pico estaciones, que puede ofrecer el uso de pico estaciones.

Con el objetivo de descargar más tráfico hacia las estaciones pico, se puede añadir un *offset* al RSRP de las estaciones pico antes de realizar la comparación de prestaciones entre todas las estaciones base. Esta manera de favorecer el *offloading* en la red de las estaciones macro hacia las pico se denomina *Cell Range Expansion (CRE)*, y consigue un incremento del área de cobertura de las pico sin modificar la potencia de transmisión de las mismas. El área o rango de cobertura adicional que obtienen las estaciones pico se denomina *región CRE*.

En la siguiente figura se puede observar esta región [13]:

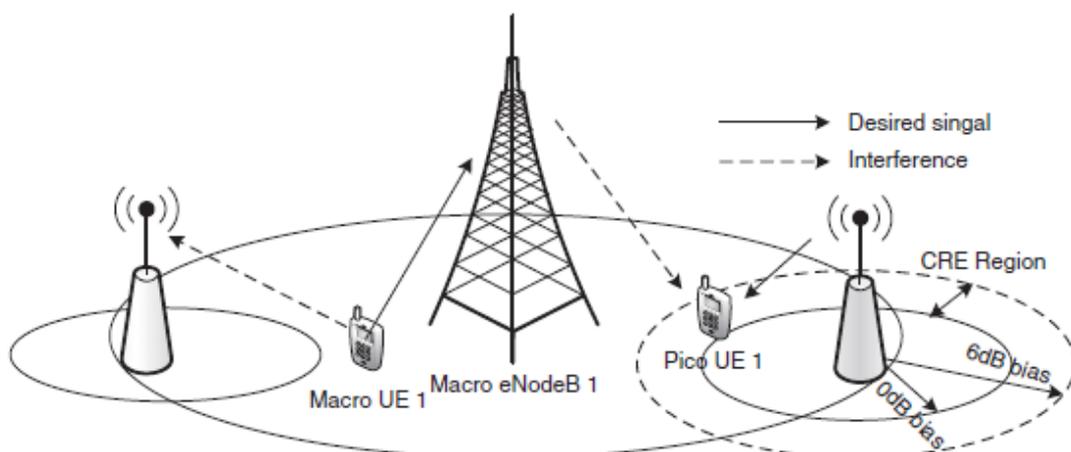


Figura 6: Escenario Macro-Pico con región CRE

En este escenario Macro-Pico donde el CRE se utiliza, la gestión de la interferencia resulta un aspecto clave. Los problemas más graves aparecen en el enlace de bajada para aquellos usuarios ubicados en la región CRE. En este caso, las técnicas *eICIC* citadas en el apartado 2.2.4 pueden ser

utilizadas para gestionar esta interferencia.

2.3.2 ALMOST BLANK SUBFRAME

Entre las técnicas *eICIC*, introducidas en la versión LTE-Advanced, para la mitigación de interferencia entre estaciones base hay algunas en el dominio de la frecuencia y otras en el dominio del tiempo como es *Almost Blank Subframe (ABS)* [13].

En el escenario planteado, los usuarios que se encuentran en la región *CRE* tienen una relación señal a ruido muy baja y por tanto una mala capacidad de canal debido a que la interferencia que reciben de la macro es mayor que la potencia útil que reciben de la pico. Para mejorar la calidad de canal de estos usuarios, la macro apaga algunas de sus subtramas de la trama LTE (*Blank Subframes*) con el fin de que las estaciones pico den recursos a los usuarios que se encuentran en la región en cuestión.

Idealmente, si una estación se encuentra silenciada no radia nada de potencia en esa subtrama, sin embargo, la señalización y mensajes *broadcast* sí son enviados ya que son necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. Un ejemplo de utilización de *ABS* se muestra en la siguiente imagen, donde se puede observar cómo la estación macro apaga las subtramas 1 y 9 de la trama completa para reducir la interferencia permitiendo a la estación pico mejorar la calidad de su canal:

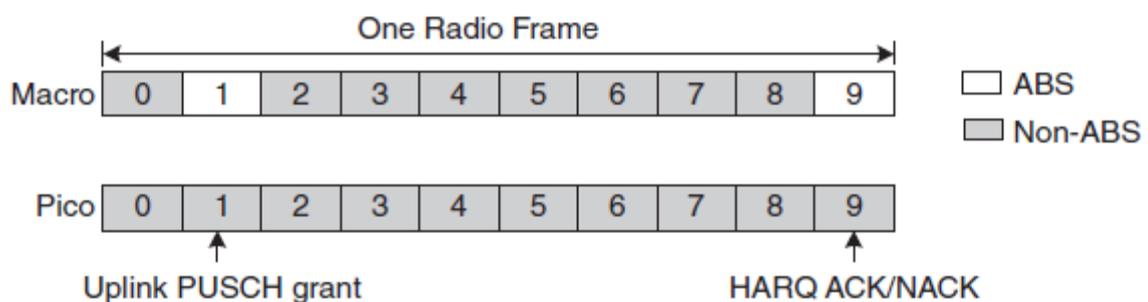


Figura 7: Utilización Almost Blank Subframe

2.4 AHORRO ENERGÉTICO EN REDES CELULARES HETEROGÉNEAS

Uno de los principales problemas que han surgido en las redes heterogéneas ha sido el gran aumento del consumo energético en las mismas debido al rápido crecimiento del número de estaciones base desplegadas. Esto supone unos costes muy elevados para las operadoras de red, y por tanto, el ahorro de energía en las redes celulares supone un objetivo prioritario. Hay diferentes estrategias o técnicas para conseguir ahorro energético pero este proyecto se centra en la técnica de apagado y encendido de estaciones base.

2.4.1 ESTUDIOS PREVIOS

En relación al estudio del ahorro energético en redes celulares heterogéneas utilizando la estrategia de apagado/encendido de estaciones son destacables los siguientes trabajos:

- En [14] se presenta un breve estudio sobre la descarga de tráfico de las estaciones macro en redes inalámbricas. Además, se propone una estrategia de ahorro energético en redes celulares heterogéneas basada en dos algoritmos de aprendizaje reforzado del tipo Q-Learning, uno centralizado y otro distribuido, que consisten en el apagado/encendido de estaciones tipo femto en compromiso con la calidad de servicio, teniendo en cuenta las interferencias para el cálculo de la capacidad de los usuarios.
- En [15] se presentan esquemas de apagado/encendido de estaciones femto en redes celulares heterogéneas, utilizando procesos de decisión de Markov (MDPs) basados en la información de la carga de tráfico y la posición de los usuarios en la celda. Se cuantifica el consumo energético, la QoS y se analiza el compromiso entre ambos parámetros para tres escenarios: información completa, parcial y retrasada.
- En [16] se plantea una política óptima para activar *hotspots* y descargar a la estación macro mejorando la calidad de servicio de los usuarios, o desactivar *hotspots* para ahorro energético. Para ello, se utiliza un sistema modelado como un MDP de tiempo continuo. En función del tráfico, la estación macro modula el nivel de potencia para servir a sus usuarios asociados. En caso de que esté a máxima potencia y no sea capaz de servirlos a todos, se activan *hotspots* adicionales.
- En [17] se estudia la eficiencia energética en redes heterogéneas con femto celdas combinando teoría de juegos y aprendizaje estocástico. Se desarrolla un marco de aprendizaje reforzado para maximizar la utilización de las estaciones. Son propuestos dos algoritmos para gestionar la potencia de transmisión de las estaciones.
- En [18] se presenta un algoritmo genético con complejidad lineal para el apagado/encendido de estaciones con el fin de conseguir ahorro energético en redes celulares de alta densidad. El nivel de interferencia se considera fijo para todos los usuarios en una celda. Además, utilizan una serie de algoritmos comparativos como referencia para la evaluación de resultados.
- En [19] se propone una estrategia de ahorro energético mediante el encendido y apagado de estaciones, combinando estaciones celulares con estaciones WiMax, que se adapta a las fluctuaciones de tráfico en la red. La estrategia se realiza en dos escalas temporales diferentes: a gran escala para determinar el estado de las estaciones y a pequeña escala para determinar el número óptimo de canales activos que debe haber por estación base.
- En [20] se proponen una serie de patrones de encendido/apagado de estaciones, que tienen en cuenta las interferencias, asegurando cobertura total en todo momento. Estos modelos presentados permiten cuantificar, de manera offline, el compromiso entre

ahorro y rendimiento en diferentes escenarios.

- En [21] se introduce el concepto de modificación del tamaño de las celdas en función de las fluctuaciones de tráfico espacio-temporales para conseguir ahorro energético. Se desarrollan dos algoritmos, centralizado y distribuido. Uno de los algoritmos propuestos se utiliza a modo de referencia en [18].
- En [22] se propone un algoritmo de apagado/encendido de estaciones de manera distribuida para el ahorro energético de bajo coste computacional. El apagado tiene lugar de una en una estación de manera que afecte mínimamente a la red utilizando el concepto de “impacto-en-red”, que es un parámetro que tiene en cuenta la carga adicional que supone apagar una estación para sus adyacentes. Utilizan un perfil de tráfico real. También proponen tres heurísticos con el fin de disminuir la señalización en la red.
- En [23] se presentan estrategias de encendido/apagado de estaciones utilizando un modelo geométrico estocástico, que estima la probabilidad de éxito y el ahorro en dos entornos diferentes: homogéneo y heterogéneo.
- En [24] se proponen dos algoritmos centralizados: un heurístico y un algoritmo progresivo. El objetivo es conseguir ahorro energético en función de la variación de tráfico. Para ello, se crea una función de utilidad de las estaciones base formada por diferentes parámetros, que determinará el estado de la estación. El algoritmo progresivo se plantea como mejora al heurístico.

Analizando los trabajos previos, se puede decir que la propuesta de este proyecto, que contempla el uso de Programación Dinámica utilizando la técnica *Certainty Equivalent Control* para el ahorro energético, en combinación con la optimización del mecanismo de gestión de interferencia haciendo uso de *Multi-Armed Bandits*, es una idea original y por tanto constituye una contribución en sí misma.

A diferencia de otras propuestas, esta técnica explota la variabilidad del tráfico en cada estación a lo largo del día, y además es de baja carga computacional. No obstante, la mayor ventaja de esta técnica es su escalabilidad en comparación con otras técnicas de aprendizaje reforzado empleadas en este problema, como puede ser Q-Learning.

Capítulo 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

3.1 INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo la propuesta se considera el estudio de una red heterogénea de comunicaciones móviles donde operan de manera conjunta estaciones base de dos niveles: macro y pico [25]. Dada la complejidad del sistema, inicialmente se pretende analizar el escenario donde sólo hay una estación base macro en funcionamiento, que dispone de tres sectores y cada sector tiene asociado un determinado número de estaciones pico, tal y como se muestra en las siguientes imágenes:

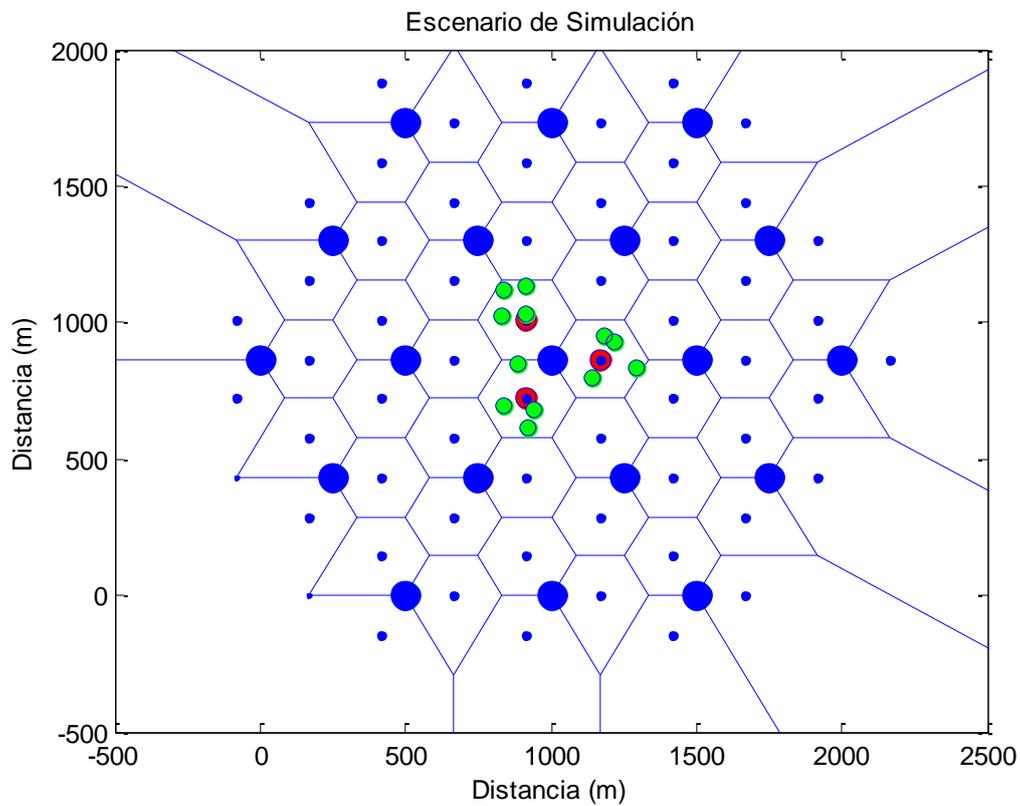


Figura 8: Escenario de simulación completo

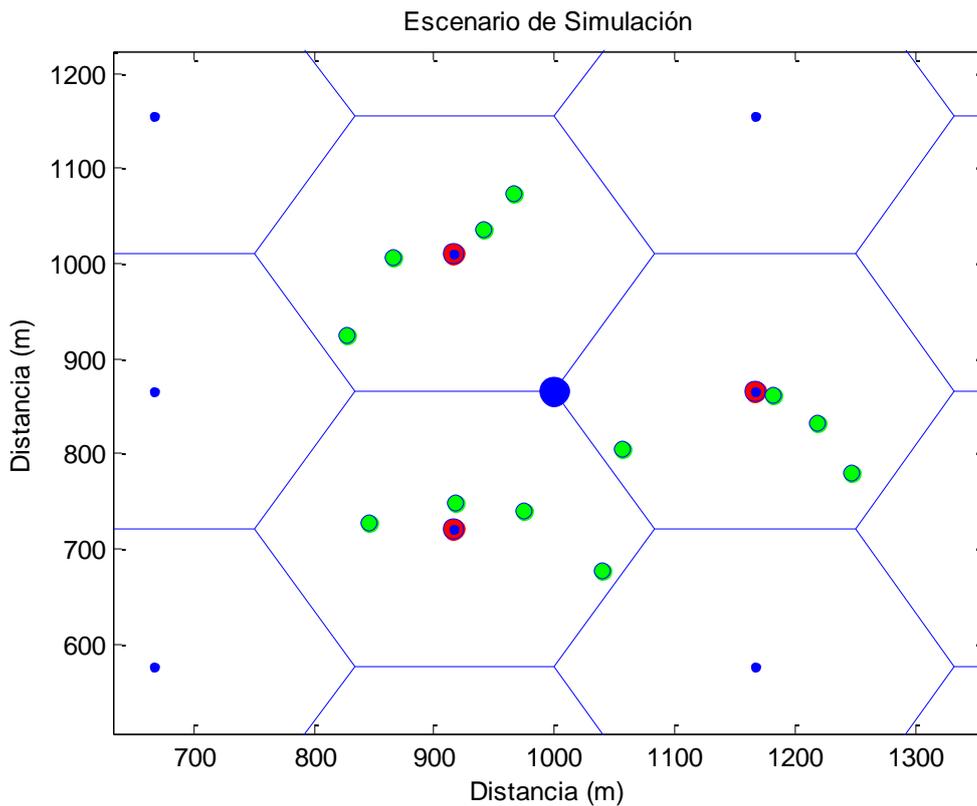


Figura 9: Escenario de simulación activo (4estaciones Pico por sector)

Los círculos verdes hacen referencia a las estaciones pico, los círculos azules grandes a las estaciones macro y los círculos azules pequeños a los centros geométricos de los sectores o celdas. Se puede observar como hay tres de ellos que están activos y que aparecen en color rosado.

Una vez estudiado el escenario planteado, será posible extrapolar los resultados a la red completa con un número mayor de estaciones pico desplegadas.

3.2 MODELO DE TRÁFICO

La zona de despliegue de la red se supone un área con gran demanda de tráfico, lo que corresponde con un perfil de zona urbana densa, con una media de 3000 ciudadanos por km^2 [26]. Para este tipo de zona, la separación definida entre estaciones base (*Inter-Site Distance, ISD*) es de 500 metros según la especificación 3GPP TR 36.814 [27].

El número de suscriptores activos en las horas pico corresponde al 20% de los suscriptores totales. Además, el número de suscriptores totales respecto a la densidad de población es del 10%. Para este escenario, se pueden considerar una media de 300 suscriptores por sector.

Uno de los objetivos del proyecto es analizar la red con tráfico variable que fluctúa según la hora del día, de manera que se ajuste al proceso real que se da en este tipo de comunicaciones. El tráfico servido a lo largo del tiempo en una determinada área sigue un patrón que se repite

diariamente, con ocasionales cambios, y que puede ser caracterizado. Para este proyecto se ha empleado un patrón de referencia similar a los descritos en diversas publicaciones como [28] [29] [30]:

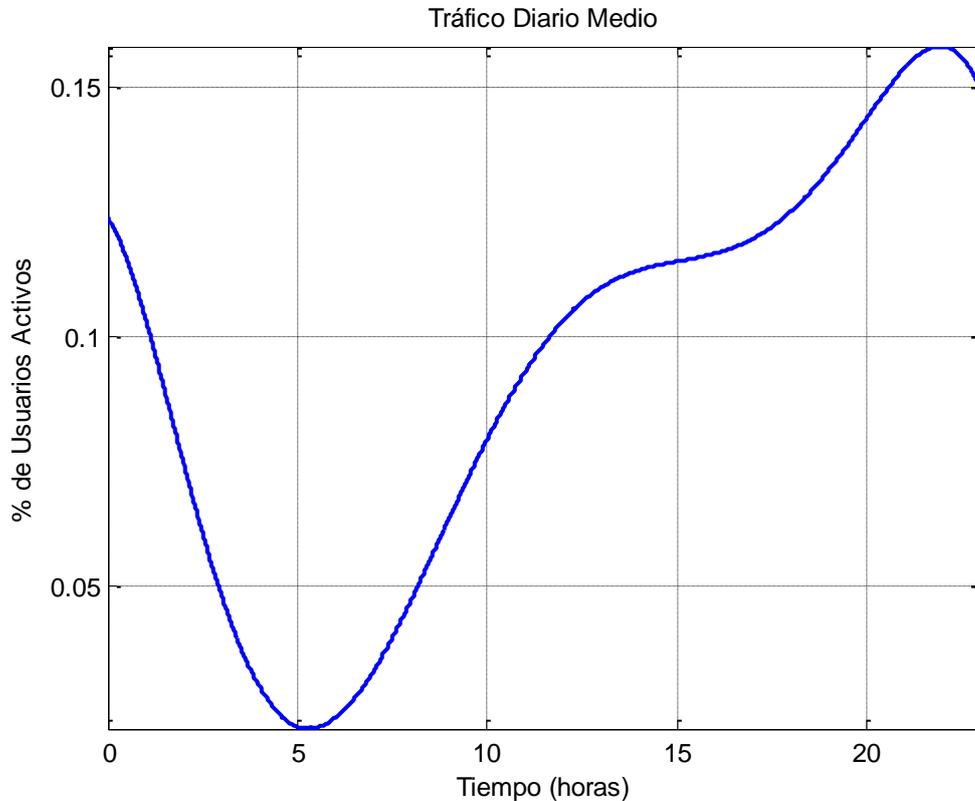


Figura 10: Patrón de tráfico utilizado

El porcentaje de usuarios activos en cada sector simulado variará periódicamente respecto al total previsto de usuarios citado anteriormente.

El modelo de tráfico utilizado se corresponde con el modelo FTP de la especificación 3GPP TR 36.814 [27]:

- La tasa de llegadas λ sigue una distribución de Poisson que dependerá del perfil de tráfico diario (ver figura anterior).
- El tiempo medio entre llegadas será $\frac{1}{\lambda}$ s/usuario.
- El tamaño del fichero por usuario será fijo y tendrá el valor de $S = 0.5$ Mbytes.
- La capacidad objetivo por usuario inicial se fija en 250 kbps.
- El tiempo medio de servicio por usuario será:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{S}{C} = \frac{0.5 \text{ Mbytes}}{250 \text{ kbps}} = \frac{4000 \text{ kbps}}{250 \text{ kbps}} = 16 \text{ s} \quad (3.1)$$

- La intensidad de tráfico viene definida como:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{3.2}$$

El modelo presentado se corresponde con un modelo de colas M/D/K, donde K es el número de usuarios simultáneos que se pueden atender. Si se asume que el sistema no está saturado, se puede utilizar la caracterización de un M/D/∞.

Finalmente, en la siguiente figura se puede observar una muestra del patrón de tráfico utilizado obtenida en simulación:

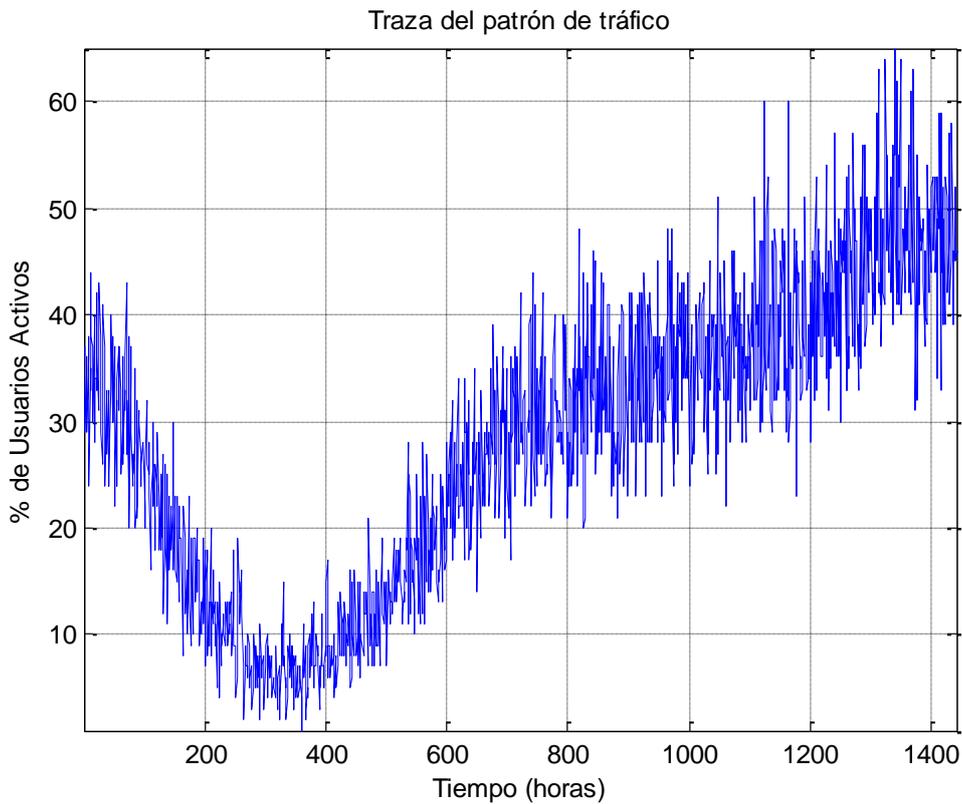


Figura 11: Muestra de patrón de tráfico

3.3 MODELO DE POTENCIA

Los valores considerados para obtener el consumo energético en función de la carga de una estación base son éstos, considerando que las estaciones a desplegar dentro de cada sector son estaciones pico [25] [26]:

Tipo de Estación Base	P_{\max} [W]	P_0 [W]	Δ	P_{sleep} [W]
Macro	20	130	4.7	75
Pico	6.3	56	2.6	39

Figura 12: Parámetros de potencia

Estos valores son los adecuados considerando un sistema LTE a 10 MHz y una configuración 2x2 MIMO.

El modelo de consumo de potencia utilizado se ha obtenido de la especificación 3GPP TR 36.887 [25], añadiendo el coste de activación de encendido de estaciones [31]:

$$\text{Consumo} = x(P_0 + \Delta * k * P_{max}) + (1 - x)(P_{sleep}) + \Delta_p \text{ [W]} \quad (3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_p = \beta * P_0 \text{ si } x == 1 \text{ y } x_{-1} == 0 \\ \text{sino } \Delta_p = 0 \end{array} \right\} \text{ [W]}$$

Siendo Δ_p el coste de activación, x el estado de la estación base (1: activa, 0: apagada) y k el número de canales activos en la estación base (depende del tráfico asociado a la misma). El resto de parámetros hacen referencia a los niveles de potencia fijados en la tabla anterior. El parámetro P_{max} hace referencia a la potencia de transmisión, P_0 hace referencia al consumo base, y P_{sleep} hace referencia al consumo de las estaciones cuando se encuentran desactivadas.

El modelo de consumo de potencia sin tener en cuenta el coste de activación es el más utilizado según la bibliografía revisada ya que está estandarizado por el 3GPP [25] [26] [28], sin embargo **se considera más realista introducir un consumo adicional debido al proceso de encendido de una estación base**, que también es utilizado en algunos trabajos revisados [31].

3.4 MODELO DE CANAL

Según el tipo de estación base utilizada es necesario emplear un modelo de canal que permita obtener la ganancia adecuada. En este caso, para los modelos de canal requeridos se ha utilizado la referencia del 3GPP TR 36.814 [27] donde hay varios modelos definidos para diferentes esquemas de simulación y estaciones base. El modelo adecuado para calcular las pérdidas por propagación entre estación base y usuario para el escenario planteado es el siguiente:

- Estación **Macro** hasta un Usuario asociado (UE):

$$L = 128.1 + 37.6 * \log_{10} R \text{ [dB]} \quad (3.4)$$

- Estación **Pico** hasta un Usuario asociado (UE):

$$L = 140.71 + 37.6 * \log_{10} R \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Siendo R la distancia entre la estación base y el usuario definida en Km. Una vez determinadas las pérdidas por propagación, se multiplican por la ganancia de la antena (en función del tipo de estación base) y se obtiene la ganancia total para cada usuario asociado.

3.5 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

El último elemento necesario para la definición del sistema es la implementación de un simulador que incorpore las características antes descritas. Para ello, se ha hecho uso del software *Matlab* [35]. Los diferentes pasos que se aplican en el simulador son los siguientes:

1. **Inicialización** de todos los parámetros necesarios junto con los valores que éstos deben tomar. Creación de variables para la toma de datos.
2. Creación de la **red de comunicaciones móviles** en función del número de sectores que se deseen activar, número de estaciones base pico que se deseen desplegar y otra serie de características físicas que debe cumplir la red.
3. Creación del **perfil de tráfico**. Este perfil corresponde al patrón de tráfico promedio mostrado en el apartado 3.2. Aún así, este perfil de tráfico es configurable para permitir testear la propuesta en diferentes escenarios.
4. Creación de bucle que permite **simular un determinado número de días** con el objetivo de obtener datos relativos a la red que cumplan un **intervalo de confianza** fijado como parámetro del simulador.
5. Creación del bucle que permite **simular** diferentes intervalos de tiempo distribuidos a lo largo de un día. Cada uno de esos **intervalos** se ha denominado *timeSlot*. La duración del *timeSlot* es configurable pero a lo largo de todo el proyecto esta duración ha sido fijada a un minuto, por lo que cada día consta de 1440 *timeSlots*. El tráfico en cada *timeSlot* irá fluctuando acorde al patrón de tráfico creado.
6. Creación del bucle que permite **simular cada uno de los sectores activos** que haya en la red de comunicaciones. Para disminuir el coste computacional, en las simulaciones realizadas se ha utilizado un único sector activo, extrapolando posteriormente los resultados obtenidos al conjunto de la red.
7. **Generación aleatoria de tráfico en el sector**, que dependerá de la intensidad de tráfico en ese momento del día.
8. **Generación de posiciones aleatorias para cada uno de los usuarios que hay activos**. Las posiciones pueden ser más próximas a las estaciones base pico o a la estación macro del sector en cuestión y deben cumplir ciertas restricciones de distancia reflejadas en la especificación 3GPP TR 36.887 [25].
9. **Cálculo de las ganancias de cada uno de los usuarios respecto de las estaciones base pico** y de las estaciones base macro. Además de para la estación macro del sector en cuestión, se calculan las ganancias de un determinado número de estaciones macro de los sectores adyacentes que más interferencia producen en cada usuario. En el caso de las pico, solo se tienen en cuenta las ganancias de las estaciones pico que se encuentran

dentro del sector donde el usuario ha sido creado.

10. **Asociación** de cada uno de los **usuarios** del sector con la estación base que mejores prestaciones le proporcione. Estas prestaciones hacen referencia a la estación base que **mejor RSRP** proporcione teniendo en cuenta además el **modelo CRE**, detallado en el apartado 2.3.1.
11. Creación de bucle que permite **calcular la utilización** o capacidad ocupada de cada una de las estaciones base del sector. Se aplica el modelo **ABS** descrito en el apartado 2.3.2. Además, se obtiene el número de usuarios que son bloqueados en cada estación base. Se considera que un usuario ha sido bloqueado si no dispone, como mínimo, de la capacidad de canal objetivo fijada, que es un parámetro de diseño del simulador. Conociendo el número de usuarios bloqueados, se puede conocer la probabilidad de bloqueo en el sector que corresponderá al número total de usuarios bloqueados en el sector frente al total de usuarios activos en el mismo.

Para obtener la utilización de cada estación base, en cada subtrama que compone la trama LTE se calculan las capacidades de los usuarios asociados a la estación, utilizando la relación señal a ruido (SINR) y posteriormente la fórmula de Shannon. Finalmente, **la utilización de la estación base se determina en función del número de RBs (*Resource Blocks*) utilizados en cada subtrama LTE respecto del total**. Para ello, se aplica el siguiente algoritmo que reparte el total de RBs disponibles en la subtrama, comenzando por los usuarios que mejor capacidad de canal tienen, y que serán servidos con un número menor de RBs que aquellos que tienen peores condiciones de canal, a los que irán destinados mayores recursos. Un usuario se considera servido cuando se le proporciona cierta capacidad fijada como objetivo, siendo un parámetro de diseño del simulador. El pseudo-código del algoritmo es el siguiente:

while hayan RBs disponibles o usuarios no servidos completamente **do**

- Se escoge al usuario que mejor capacidad por RB tenga.
- Se comprueba si el usuario está servido, es decir, cumple la capacidad objetivo:
 - o Si el usuario está servido -> No necesita más RBs. Capacidad requerida restante = 0. Se escoge el siguiente usuario con mejores condiciones.
 - o Si el usuario no está servido -> Necesita más RBs. Capacidad requerida restante = Capacidad requerida restante – Capacidad servida en este RB.
- Comprobar condición de parada.
 - o Si no se cumple -> Siguiente RB.

end while

El número de usuarios bloqueados = usuarios no servidos completamente (no se ha llegado a la capacidad objetivo).

La utilización de la estación base = número de RBs utilizados / total de RBs disponibles.

**AHORRO ENERGÉTICO EN REDES DE
ACCESO RADIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CEC**

12. **Cálculo del consumo energético** de cada estación base dentro de la celda, y por consiguiente, consumo total del sector según el modelo de potencia. Además, se calcula la **probabilidad del bloqueo en el sector**.
13. Cada 60 *timeSlots*, es decir, cada hora, se ejecuta la **estrategia propuesta de Programación Dinámica junto con CEC**. También, es posible ejecutar algoritmos de comparación para evaluar los resultados de la propuesta o simular sin realizar ningún cambio en el estado del sector.
14. Finalmente, **recolección** de datos y almacenamiento para su posterior análisis.

Para resumir los distintos puntos del simulador se presenta el siguiente diagrama:

Inicialización de parámetros y variables
Creación de la red de comunicaciones móviles
Creación del perfil de tráfico

Para cada día simulado

Para cada TimeSlot

Para cada sector activo

Generación de tráfico en el sector

Para cada usuario

- Generación de posición aleatoria
- Cálculo de la ganancia respecto de las estaciones base
- Asociación del usuario con la estación base que mejores prestaciones le proporcione (mejor RSRP y modelo CRE)

Para cada estación activa

Para cada subtrama

- Cálculo de la utilización
- Se aplica el modelo ABS
- Se utiliza el algoritmo de reparto de RBs

Para cada estación

- Cálculo del consumo energético

Cálculo del consumo energético del sector

Cálculo de la probabilidad de bloqueo del sector

Para cada hora

- Aplicación de la estrategia de ahorro propuesta
- Aplicación algoritmo comparativo

End sector

Recolección de datos

End TimeSlot

Recolección de datos

End día

Recolección de datos

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez definido el modelo del sistema que se pretende simular, el siguiente paso es describir el esquema de ahorro energético que se propone en este proyecto. Para ello, se plantea el uso de Programación Dinámica implementando la técnica *Certainty Equivalent Control*. Además, se pretende optimizar el mecanismo de control de interferencia de la red haciendo uso de *Multi-Armed Bandits*. A continuación se explican teóricamente las citadas técnicas, otras utilizadas como herramienta para llevar a cabo las anteriores, y posteriormente, se detalla su implementación específica en el marco de este trabajo.

4.2 PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Existen numerosos problemas complejos cuyas soluciones pueden obtenerse por la división del problema en subproblemas independientes, más abordables, y que pueden resolverse de manera recursiva para combinar finalmente las soluciones y así resolver el problema original. El inconveniente se presenta cuando los subproblemas obtenidos no son independientes sino que existe solapamiento entre ellos. Entonces, es cuando una solución recursiva no resulta eficiente por la repetición de cálculos que conlleva. Además, el tiempo de ejecución de la solución recursiva normalmente es de orden exponencial, y por tanto impracticable en la mayoría de ocasiones.

En estos casos, se puede encontrar la solución al problema global, mejorando su eficiencia computacional respecto a la recursividad, mediante la utilización de subproblemas superpuestos y subestructuras óptimas que permiten discretizar y secuenciar problemas complejos. Una subestructura óptima significa que se pueden usar soluciones óptimas de subproblemas para encontrar la solución óptima del problema en su conjunto. La técnica matemática que permite realizar esto es la **Programación Dinámica (DP)**.

La eficiencia de esta técnica consiste en resolver los subproblemas una sola vez, guardando sus soluciones en una tabla para su futura utilización, evitando así la repetición de cálculos. La Programación Dinámica no sólo tiene sentido aplicarla por razones de eficiencia, sino porque además presenta un método capaz de resolver problemas cuya solución ha sido abordada por otras técnicas y ha fracasado. Uno de los campos donde tiene mayor aplicación es en la resolución de problemas de optimización.

Por otra parte, existen problemas secuenciales o que rigen un patrón donde se debe escoger una decisión en cada una de las distintas etapas por las que se sucede el problema. En la mayoría de casos, el resultado de tomar una decisión no puede conocerse con exactitud pero sí puede aproximarse antes de tomar la siguiente decisión. El objetivo para conseguir una solución óptima en estos problemas, es minimizar el coste total del problema que dependerá de las decisiones

tomadas en las diferentes etapas. Considerando el coste como una expresión matemática que penaliza tomar decisiones erróneas y recompensa tomar decisiones acertadas. Un aspecto clave es que las decisiones tomadas deben tener en cuenta el coste a corto y largo plazo. La Programación Dinámica tiene en cuenta este compromiso, de manera que en cada etapa escoge la decisión que sumando el coste actual más el coste a largo plazo minimiza el coste total del problema [32].

Por tanto, se puede resumir que la Programación Dinámica es la técnica matemática orientada a la solución de problemas con decisiones secuenciales en etapas sucesivas donde se debe minimizar el coste total de dichas decisiones. En cada etapa se valora no sólo el coste actual de tomar una decisión sino los costes futuros que se originan a partir de ella. Además, el número de estados puede ser finito o infinito. Aunque en este proyecto se utiliza un número de estados finito.

Para abordar un problema con esta técnica se debe definir un modelo de sistema que permita describir y formular el mismo. Todo este proceso se ha tomado de la referencia [32]. Este modelo consta de dos características fundamentales:

1. Sistema dinámico y discreto en tiempo.
2. Utiliza una función de coste que es aditiva con el tiempo.

El sistema viene definido por la siguiente expresión:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (4.1)$$

Donde:

- k : índices de tiempo discreto (etapas).
- u_k : decisión o control tomado en la etapa k . Forma parte del conjunto de estados del sistema C_k .
- x_k : estado del sistema en la etapa k , y que proporciona información del pasado para la futura optimización. Forma parte del conjunto de estados del sistema S_k .
- w_k : parámetro aleatorio denominado "ruido" y que depende del entorno o contexto. Forma parte del conjunto de estados del sistema D_k .
- f_k : función que describe el sistema y define como el estado del mismo se actualiza.
- N : horizonte finito o número de etapas.

Mediante una decisión u_k se va de un estado al comienzo de una etapa x_k a otro estado al comienzo de la siguiente x_{k+1} . En cada etapa se evalúa la decisión óptima para cada uno de sus estados x_k . Cada estado guarda toda la información necesaria para tomar las decisiones futuras sin necesidad de conocer cómo se ha alcanzado dicho estado. Es un proceso que resuelve de manera iterativa, incorporando cada vez una etapa, partes cada vez mayores del problema original. La técnica se puede implementar hacia delante o hacia atrás.

El coste parcial de una etapa k viene definido así:

$$g_k(x_k, u_k, w_k) \quad (4.2)$$

Por lo que el coste total se representa de la siguiente manera:

$$g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k), \quad (4.3)$$

Donde $g_N(x_N)$ es el coste acumulado al final del proceso. Sin embargo, debido a la presencia de un componente aleatorio dependiente del entorno w_k , el coste se considera una variable aleatoria y no puede ser optimizado de manera significativa. Por tanto, **se formula el problema como una optimización del coste esperado:**

$$E \left\{ g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \right\}, \quad (4.4)$$

Donde el coste esperado depende de la distribución conjunta de las variables aleatorias involucradas. **La optimización se lleva a cabo sobre los controles o decisiones tomadas u_k , pero cada control es seleccionado teniendo en cuenta el estado actual del sistema x_k .**

Como se ha comentado, el componente aleatorio w_k es caracterizado por una distribución de probabilidad $P_k(*|x_k, u_k)$ que depende explícitamente de x_k y u_k pero no de valores previos de ruido w_{k-1}, \dots, w_0 .

Se considera un conjunto de políticas que consisten en una secuencia de funciones:

$$\pi = \{\mu_0, \dots, \mu_{N-1}\}, \quad (4.5)$$

Donde μ_k mapea el estado x_k con el control $u_k = \mu_k(x_k)$ de manera que $u_k(x_k) \in U_k(x_k)$ para todo $x_k \in S_k$. Estas políticas se consideran admisibles.

Finalmente, dada una serie de funciones de coste g_k , el coste esperado de π empezando en el estado x_0 será:

$$J_\pi(x_0) = E \left\{ g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, \mu_k(x_k), w_k) \right\} \quad (4.6)$$

Una política óptima π^* es aquella que minimiza el coste, es decir:

$$J_{\pi^*}(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_\pi(x_0), \quad (4.7)$$

Donde Π es el conjunto de políticas admisibles.

Cabe destacar como la política óptima π^* está asociada a un estado inicial fijo x_0 . Sin embargo, un aspecto interesante de la Programación Dinámica es que es posible encontrar una política óptima que lo sea para todos los estados iniciales. Por tanto, se puede considerar que el coste óptimo depende de x_0 y se denota como:

$$J_*(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_\pi(x_0) \quad (4.8)$$

Es útil ver a J_* como una función que asigna a cada estado inicial x_0 el coste óptimo y denominarla *función de coste óptimo* o *función de valor óptimo*.

La Programación Dinámica se basa en el Principio de Optimalidad de Richard Bellman, que resume lo siguiente:

Se considera una política óptima para el sistema planteado anteriormente, $\pi^* = \{\mu_0^*, \mu_1^* \dots, \mu_{N-1}^*\}$, y se asume que cuando se utiliza esa política π^* , un determinado estado x_i ocurre en la etapa i con una cierta probabilidad. Considerando el subproblema de minimizar el “cost-to-go” desde la etapa i hasta la etapa final N , estando en el estado x_i :

$$E \left\{ g_N(x_N) + \sum_{k=i}^{N-1} g_k(x_k, \mu_k(x_k), w_k) \right\} \quad (4.9)$$

Entonces, la política truncada $\pi^* = \{\mu_i^*, \mu_{i+1}^* \dots, \mu_{N-1}^*\}$ es óptima para el subproblema planteado.

En otras palabras, “dada una secuencia óptima de decisiones, toda subsecuencia de ella es, a su vez, óptima”.

El **algoritmo de Programación Dinámica** aplicando este concepto, resuelve sucesivamente subproblemas de longitud cada vez mayor, utilizando las soluciones encontradas previamente de subproblemas más pequeños, hasta encontrar la solución al problema global. La definición matemática del algoritmo es la siguiente:

Para cada posible estado inicial x_0 , el coste óptimo $J_*(x_0)$ de resolver el problema planteado es igual a $J_0(x_0)$, dado por el último paso del algoritmo, que se desarrolla hacia atrás en el tiempo desde la etapa $N-1$ hasta la etapa 0 :

$$J_N(x_N) = g_N(x_N), \quad (4.10)$$

$$J_k(x_k) = \min_{u_k \in U_k(x_k)} E \{ g_k(x_k, u_k, w_k) + J_{k+1}(f_k(x_k, u_k, w_k)) \}, \quad (4.11)$$

$$k = 0, 1, \dots, N - 1,$$

Donde la esperanza se toma con respecto a la distribución de probabilidad de w_k , que depende de x_k y u_k . Además, si $u_k^* = \mu_k^*(x_k)$ minimiza el lado derecho de la ecuación anterior para cada x_k y

k , la política $\pi^* = \{\mu_0^*, \mu_1^* \dots, \mu_{N-1}^*\}$ es óptima.

4.3 CERTAINTY EQUIVALENT CONTROL

Hay casos específicos donde el algoritmo de Programación Dinámica proporciona una política óptima ante un problema planteado de una manera exacta y cerrada. Sin embargo, en la gran mayoría de casos es necesaria una solución numérica aproximada ya que el coste computacional del algoritmo crece de manera exponencial con el tamaño del problema o el espacio de soluciones posibles al problema.

Además, los problemas planteados en el mundo real suelen tener componentes aleatorias y variables que no se conocen de antemano, lo que introduce restricciones de tiempo para el cálculo de decisiones o controles, que se traducen en un coste computacional adicional, agravando aún más la complejidad computacional del algoritmo DP.

Una de las posibles soluciones implementadas en la práctica es utilizar un esquema que proporcione un control subóptimo al problema en compromiso entre una implementación exacta y un desarrollo factible. **Uno de estos esquemas que proporciona una aproximación subóptima del algoritmo DP, reemplazando variables estocásticas por valores esperados en el cálculo de la función “cost-to-go”, es *Certainty Equivalent Control (CEC)* [32].**

Este esquema aplica en cada etapa el control que podría ser óptimo si las variables aleatorias que determinan la función “cost-to-go” fueran fijadas a sus valores medios o “típicos”, es decir, actúa como si un cierto “principio de certeza equivalente” fuera aplicado.

La ventaja de CEC es que permite aproximar el algoritmo DP con una carga computacional mucho menor ya que en cada etapa tiene que encontrar la solución óptima a un problema *determinista*. La principal característica de CEC es su capacidad para lidiar con problemas estocásticos o de información parcial utilizando la efectiva metodología del control óptimo determinista.

La aplicación de la técnica sobre un problema se describe a continuación:

Se dispone de un estimador que utiliza el vector de información I_k para producir un valor “típico” $\bar{x}_k(I_k)$ del estado. Además, se asume que para cada par estado-control (x_k, u_k) se ha determinado un valor de ruido, denotado como $\bar{w}_k(x_k, u_k)$. Por ejemplo, si el espacio de estados y el espacio de ruido son subconjuntos convexos del espacio Euclídeo, entonces los valores esperados serán:

$$\bar{x}_k(I_k) = E\{x_k | I_k\}, \quad \bar{w}_k(x_k, u_k) = E\{w_k | x_k, u_k\}, \quad (4.12)$$

El control de entrada $\bar{\mu}_k(I_k)$ aplicado por CEC en cada etapa k se determina de la siguiente manera:

1. Dado el vector de información I_k , se computa la estimación del estado $\bar{x}_k(I_k)$.

2. Se encuentra una secuencia de control $\{\bar{u}_k, \bar{u}_{k+1}, \dots, \bar{u}_{N-1}\}$ que resuelve el problema determinista obtenido de fijar las variables aleatorias x_k y w_k, \dots, w_{N-1} a sus valores típicos:

$$\text{minimizando } g_N(x_N) + \sum_{i=k}^{N-1} g_i(x_i, u_i, \bar{w}_i(x_i, u_i)) \quad (4.13)$$

Sujeto a la condición inicial $x_k = \bar{x}_k(I_k)$ y las restricciones

$$u_k \in U_k, x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, \bar{w}_k(x_k, u_k)), \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

3. Se utiliza como control el primer elemento de la secuencia de controles encontrada:

$$\bar{\mu}_k(I_k) = \bar{u}_k. \quad (4.14)$$

Cabe destacar que el paso (1) es innecesario si se conoce a priori toda la información del estado. En este caso, se utiliza el valor conocido x_k . El problema de optimización determinista en el paso (2) debe ser resuelto en cada etapa k una vez conocido el estado inicial x_k en el paso previo. Por tanto, un conjunto de N problemas deben ser resueltos utilizando el esquema CEC cada vez que se ejecuta el algoritmo. En muchos casos, estos N problemas pueden ser resueltos utilizando métodos numéricos como el gradiente conjugado, el método de Newton o una descomposición Lagrangiana.

4.4 REGRESIÓN LINEAL

A la hora de aplicar Programación Dinámica en el escenario planteado para este proyecto, el espacio de soluciones del problema crece a medida que el número de estaciones base desplegadas aumenta. Esto hace que el coste computacional del algoritmo DP crezca, ralentizando el proceso demasiado ya que para cada posible solución se debe calcular el consumo energético del sistema en función de una serie de parámetros. Además, el cálculo del consumo energético del sistema es lento, ya que requiere la ejecución del simulador fijados unos parámetros. Una vez obtenidos todos los consumos del espacio de soluciones, se puede generar la tabla de valores que permite encontrar la política óptima que minimiza la función "cost-to-go".

Debido a esto, se propone el uso de **Regresión Lineal Múltiple para encontrar las funciones continuas que permitan calcular el consumo de una estación base** macro y pico, obteniendo así el consumo total del sistema, **así como una función que permita obtener la probabilidad de bloqueo en un sector**. De esta forma, el cálculo del consumo energético del sistema para cada solución posible del espacio de soluciones se acelera notablemente.

La Regresión Lineal es un modelo matemático utilizado para aproximar la relación existente entre una variable dependiente y una serie de variables independientes, y se puede utilizar para abordar problemas de **aprendizaje supervisado**, enmarcados en el ámbito del Aprendizaje Máquina (*Machine Learning*).

En aprendizaje supervisado, se dispone de un conjunto de datos válidos, es decir, se conoce la respuesta correcta de salida frente a unos datos de entrada. Además, se pueden destacar problemas de "clasificación" y problemas de "regresión". En este caso, el problema planteado es de regresión ya que se pretende predecir el valor de una función de salida continua.

La aplicación concreta de esta técnica al problema planteado será detallada en el apartado 4.6.

4.4.1 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Como se ha comentado, se pretende encontrar la salida de una función continua dados unos datos de entrada que permita encontrar el consumo energético de un tipo de estación base. El conjunto de estos datos de entrada válidos se denomina "conjunto de entrenamiento". Cada uno de los datos de entrenamiento tiene asociadas una serie de características, es decir, una serie de variables independientes, de ahí que se trate de una regresión múltiple.

En primer lugar, es preciso describir cierta notación que se utilizará más adelante [33]:

- $x_j^{(i)}$ = valor de la característica j en el dato de entrenamiento i -ésimo.
- $x^{(i)}$ = vector columna de todas las características del dato de entrenamiento i -ésimo.
- m = número de datos de entrenamiento.
- n = número de características.

La función de hipótesis para un determinado dato de entrenamiento viene definida de la siguiente manera:

$$h_{\theta}(x) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_n x_n \quad (4.15)$$

Utilizando notación matricial, la función de hipótesis quedaría:

$$h_{\theta}(x) = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_n] \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \theta^T x \quad (4.16)$$

Donde $x_0 = 1$.

Se trata de encontrar los valores del vector $\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_n]$, que ajustados con el vector de características x , proporcionen la salida $h_{\theta}(x)$ de manera que ésta se ajuste en la mayor medida posible a la salida y del dato de entrenamiento utilizado.

Se puede medir la exactitud de la función de hipótesis estimada mediante el uso de una función de coste. Esta función calcula una especie de promedio de todos los resultados obtenidos tras el análisis del conjunto de datos de entrenamiento. Para el vector θ , la función de coste es la siguiente:

$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (4.17)$$

Esta función se denomina “Error cuadrático medio”. Se utiliza la reducción $\frac{1}{2m}$ como una conveniencia para el cálculo del algoritmo del descenso del gradiente, que se explicará a continuación.

Una vez planteado el problema, ahora se pretende medir concretamente la exactitud de la función estimada contra los resultados válidos con el objetivo de poder predecir nuevos resultados que no se conocían previamente.

Si se piensa el problema en dos dimensiones, lo que sería un problema de regresión lineal simple, se trata de encontrar la línea recta que mejor se ajuste a los diferentes puntos de dos dimensiones que conforman los datos de entrenamiento. Esto sucederá minimizando la función de coste planteada. En el mejor de los casos, esa línea estimada pasará por todos los puntos del conjunto de datos de entrenamiento, y por tanto, la función de coste valdrá cero.

4.4.2 ALGORITMO DEL DESCENSO DEL GRADIENTE

Para conseguir minimizar la función de coste de manera automática, variando la función de hipótesis, se utiliza el algoritmo del **Descenso del Gradiente**.

El algoritmo calcula la derivada de la función de coste, es decir, obtiene la recta tangente a la función. La pendiente de la tangente es la derivada en ese punto y determina la dirección (el gradiente) hacia la que avanzar para encontrar el mínimo. Iterativamente, va dando pasos en función de la dirección del gradiente, que serán de mayor o menor longitud en función del parámetro α , denominado tasa de aprendizaje.

El desarrollo matemático del algoritmo es el siguiente [33]:

Repertir hasta la convergencia: {

$$\theta_j := \theta_j - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)}) * x_j^{(i)} \quad \text{para } j := 0, 1, \dots, n \quad (4.18)$$

}

4.5 ALGORITMOS MULTI-ARMED BANDITS

En la estrategia propuesta hay una fase, detallada posteriormente en este capítulo, que consiste en la **optimización del mecanismo de control de interferencia de la red de comunicaciones**. En esta fase, se pretende encontrar los **valores óptimos de ABS y CRE que proporcionen las mejores condiciones posibles de canal a los usuarios**. El proceso de selección de estos valores constituye un problema de decisión con información limitada, es decir, no se puede conocer a priori qué

valores proporcionan unas mejores condiciones de canal. Esto es así debido al carácter aleatorio de la red de comunicaciones, donde el tráfico fluctúa así como la posición de los usuarios dentro de la misma.

Para la resolución de este problema se plantea el uso de un algoritmo tipo **Multi-Armed Bandit**. En Teoría de aprendizaje estocástico, un *Multi-Armed Bandit*, o simplemente un *Bandit*, es un problema de asignación secuencial definido por un conjunto de acciones. En cada etapa, un único recurso es asignado a una acción, obteniendo una cierta recompensa. El objetivo es maximizar la recompensa total obtenida a lo largo de una serie de etapas.

El nombre de *Bandit* hace referencia al término coloquial utilizado en EEUU para referirse a una máquina “tragaperras” (término coloquial en español), es decir una máquina de casino. Cuando un jugador utiliza diferentes máquinas simultáneamente y debe escoger repetidamente a cuál de ellas insertar dinero, se trata de un problema de asignación secuencial de recursos, es decir, un *multi-armed bandit*.

Los *Bandits* son procesos de toma de decisiones con información limitada, y que por tanto, tratan el compromiso intrínseco de estos procesos entre “exploración” y “explotación”. Deben equilibrar la explotación de acciones que proporcionaron grandes recompensas en el pasado con la exploración de acciones que podrían dar mayores recompensas en el futuro [34].

Entre las diferentes aplicaciones o ámbitos donde los *Bandits* pueden ser utilizados destaca el ámbito de las TIC. Dentro de esta área, son utilizados para tareas como optimización web, enrutamiento adaptativo de paquetes en la red o incluso desarrollo de videojuegos.

Los *Bandits* se pueden clasificar en tres categorías dependiendo del proceso de recompensa asumido: estocásticos, adversariales o contradictorios, y Markovianos. **El caso planteado en este proyecto corresponde a un problema de carácter estocástico** ya que como se ha comentado hay involucradas variables aleatorias que impiden conocer la recompensa exacta antes de tomar una decisión. La formulación del problema estocástico se presenta en el siguiente apartado.

Para este tipo de problemas, una de las estrategias empleadas en su resolución se denomina *Upper Confidence Bound (UCB)*.

4.5.1 ESTRATEGIA UPPER CONFIDENCE BOUND

La estrategia *Upper Confidence Bound (UCB)* engloba una familia de algoritmos que permiten resolver *Bandits* estocásticos. A diferencia de otros algoritmos como el *Softmax* o el *ϵ -Greedy*, que simplemente observan cuanta recompensa se ha obtenido de cada acción o *arm*, la estrategia UCB utiliza además el número de veces que cada *arm* se ha escogido así como un estimador de la varianza de las recompensas obtenidas, mejorando la resolución del problema.

El *Bandit* se formula de la siguiente manera:

- Existen K *arms* o acciones.

- El tiempo está discretizado por etapas $t = 0, 1, 2, \dots$
- En cada etapa se selecciona un único $arm\ i \in \{1, 2, \dots, K\}$.
- Seleccionado un arm , se obtiene una recompensa aleatoria $X_i(t)$ en función del entorno.
- Las recompensas son independientes entre los diferentes $arms$.
- Las recompensas son variables aleatorias idénticamente distribuidas e independientes respecto de las etapas, es decir, independientes del pasado.
- $n_i(t)$ = número de veces que se ha seleccionado el $arm\ i$.
- $\bar{x}_i(t)$ = estimador de la media de $X_i(t)$.
- $\bar{\sigma}_i(t)$ = estimador de la varianza de $X_i(t)$.

El algoritmo UCB1, el más simple de la estrategia UCB, tiene las siguientes características:

- En cada etapa t , se calcula un índice por cada arm .
- Los índices tienen en cuenta la recompensa estimada y la confianza en dicha estimación, es decir, el UCB.
- Se selecciona el arm con un mayor índice, sin aleatoriedad en la selección.
- No hay parámetros que ajustar o configurar como en otros algoritmos.

La estructura del algoritmo es ésta:

- Inicialmente, cada arm es escogido una vez.
- Después, en cada etapa t se selecciona el $arm\ j(t)$ tal que:

$$j(t) = \arg \max_{j=1 \dots K} \left(\bar{x}_j(t) + \sqrt{\frac{2 * \ln t}{n_j(t)}} \right) \quad (4.19)$$

Una variante del UCB1 es el UCB1-Tuned que emplea, además de $n_i(t)$, el estimador de la varianza $\bar{\sigma}_i(t)$ para medir la confianza en la estimación de $\bar{x}_i(t)$.

La estructura del algoritmo es la siguiente:

- Inicialmente, cada arm es escogido una vez.
- Después, en cada etapa t se selecciona el $arm\ j(t)$ tal que:

$$j(t) = \arg \max_{j=1 \dots K} \left(\bar{x}_j(t) + \sqrt{\min\left(\frac{1}{4}, V_j(t)\right) \frac{\ln t}{n_j(t)}} \right) \quad (4.20)$$

Donde

$$V_i(t) = \bar{\sigma}_i(t) + \sqrt{\frac{2 * \ln t}{n_i(t)}} \quad (4.21)$$

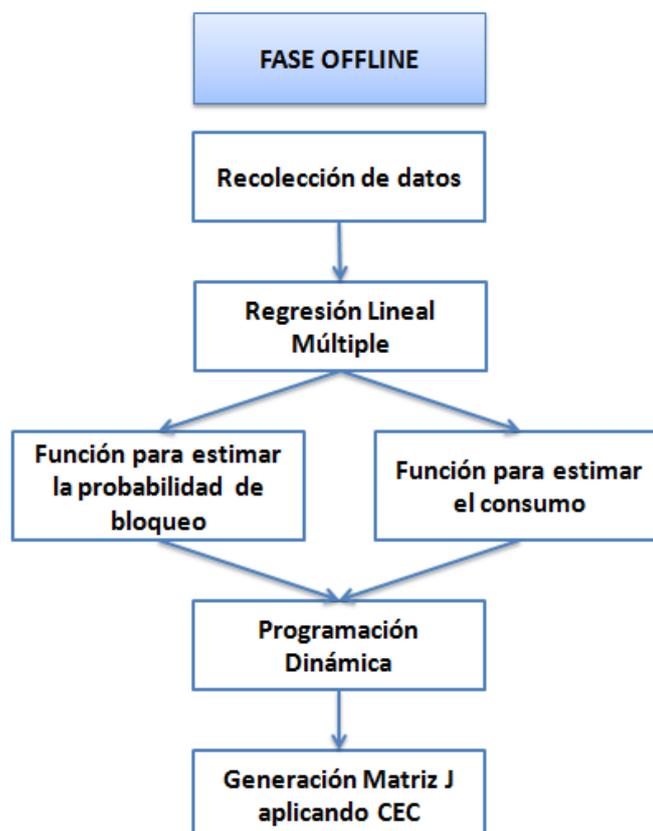
Para la resolución del problema planteado en el apartado anterior se ha utilizado el algoritmo UCB1.

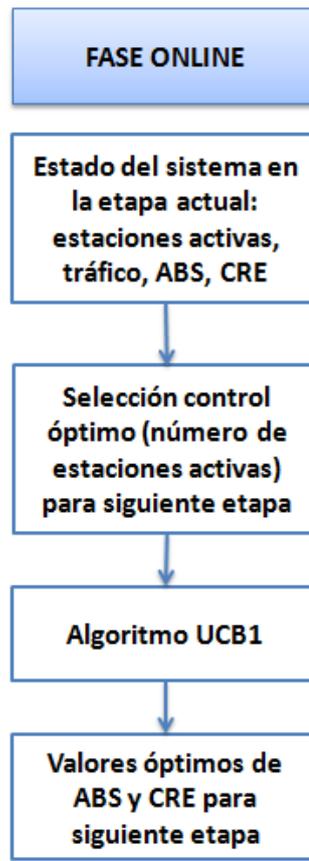
4.6 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Una vez explicadas las diferentes técnicas que se han utilizado, se pretende describir el esquema propuesto donde esas técnicas han sido particularizadas.

Atendiendo al capítulo anterior, donde se detalla la estructura del simulador implementado, se puede observar como cada hora simulada **se aplica el algoritmo propuesto de Programación Dinámica junto con CEC para optimizar el consumo energético de la red de comunicaciones móviles, mediante el apagado o encendido de estaciones. Este algoritmo se aplica de manera distribuida en cada uno de los sectores activos en la red. Además, se aplica el algoritmo UCB1 para encontrar los valores óptimos de CRE y ABS, minimizando la interferencia entre estaciones base, mejorando la capacidad del canal.**

El mecanismo propuesto puede dividirse en dos fases: una *offline* y otra *online*. A continuación se presenta un diagrama donde se describen los principales pasos llevados a cabo en cada fase, para posteriormente detallar cada una en profundidad.





4.6.1 FASE OFFLINE

Esta primera etapa, tal y como su nombre indica, se realiza previamente al funcionamiento del algoritmo en tiempo real. Como primer paso se han llevado a cabo diferentes tareas con el fin de encontrar una función que permita **estimar la probabilidad de bloqueo de un sector** así como una función que permita **estimar el consumo de una estación base**, tanto macro como pico, en función de un conjunto de parámetros que se detallarán a continuación. Como se comentó en el apartado 4.4, esto se hará utilizando regresión lineal múltiple.

En primer lugar, es necesario obtener información que permita definir un conjunto de datos de entrenamiento. Para la recolección de datos, se han ido variando diferentes parámetros que afectan al comportamiento del simulador y más específicamente, al consumo de las estaciones base. Estos parámetros afectan a cada sector simulado y han sido los siguientes:

- Posición de las estaciones pico dentro del sector.
- Número de estaciones pico activas por sector.
- Tráfico medio en el sector.
- Patrón *ABS (Almost Blank Subframes)* utilizado.
- Valor de *CRE (Cell Range Expansión)* utilizado.

El vector columna $x^{(i)}$ de todas las características del dato de entrenamiento i -ésimo, está constituido por los elementos anteriores, salvo la posición de las estaciones pico. Para completar la recolección de datos, se han creado tres subconjuntos de datos: uno con información de probabilidad de bloqueo, otro con información de consumo de estaciones macro y el último con información de consumo de estaciones pico. Por tanto, cada uno de los datos de entrenamiento está constituido por el vector de características más un cierto valor de bloqueo o consumo respectivamente.

El conjunto de entrenamiento está formado por 40000 muestras. La posición de las estaciones se corresponde con unas coordenadas dentro del sector donde la misma se encuentra desplegada. El número de estaciones pico varía entre 0 y 12 estaciones desplegadas. Los niveles de tráfico en el sector, es decir, de usuarios activos fluctúan entre 0 y 70 usuarios. Los valores permitidos para el CRE son 0, 6, 9, 12 y 18 dB. Finalmente, los valores permitidos para el patrón ABS son 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 subtramas en blanco.

Definido el conjunto de datos de entrenamiento, se aplica la regresión lineal múltiple. En la aplicación de esta técnica, el primer paso consiste en la normalización del vector de características y posteriormente la aplicación del algoritmo del Descenso del Gradiente con el objetivo de minimizar la función de coste, para encontrar las funciones requeridas.

El siguiente paso en esta fase *Offline* consiste en aplicar la técnica propuesta de **Programación Dinámica más CEC** con el objetivo de **encontrar la política óptima que permita ahorrar energía** en la red de comunicaciones a lo largo de cada día. Para ello, se plantea la siguiente formulación del problema:

- **k** : índices de tiempo discreto (etapas). En este caso cada etapa k corresponde a cada una hora de las 24 horas del día. Por tanto, $k = 1, 2, \dots, 24$.
- **Estado s_k** : estado al principio de la etapa k . Cada estado viene definido como el número de estaciones base pico que hay activas. La estación macro siempre permanece encendida. El conjunto de posibles estados en cada etapa se denota por \mathcal{S}_K .
- **Acción a_k** : control escogido para aplicar en la etapa k . Un control determina un nuevo estado en el sector, y por tanto, define el número de estaciones activas que se deben encender o apagar en cada etapa. El conjunto de posibles controles en cada etapa se denota por \mathcal{A}_K .
- **Tráfico t_k** : tráfico global en el sector en la etapa k .
- **Patrón ABS_k** : patrón ABS en el sector en la etapa k .
- **Valor CRE_k** : valor CRE en el sector en la etapa k .
- Transición determinista: $s_{k+1} = a_k$.

- **Política μ_k** : conjunto de acciones tomadas a lo largo de las diferentes etapas, $\mu_k: \mathcal{S}_K \rightarrow \mathcal{A}_K$.

$$a_k = \mu_k(s_k) \quad (4.22)$$

- **$C(t_k, a_k, ABS_k, CRE_k)$ es el consumo global del sector** (el consumo de la estación base macro más el consumo de las estaciones base pico), que depende del nivel de tráfico actual en el sector t_k , el estado del mismo tras aplicar el control a_k , es decir, del número de estaciones base pico que haya activas, el patrón ABS y el valor CRE aplicados en la etapa k . Para obtener este consumo global se hace uso de las funciones que se estimaron en el paso anterior.
- **$c(s_k, a_k)$ es el coste de activación** y depende de s_k (estado al principio del intervalo) y de a_k (acción realizada).

Se define el coste instantáneo como:

$$r_k(s_k, a_k) = C(t_k, a_k, ABS_k, CRE_k) + c(s_k, a_k) \quad (4.23)$$

Se define el **cost-to-go** , en la etapa k , como:

$$J_k(s_k) = \min_{\{a_i\}_{i=k, \dots, 24}} \sum_{i=k}^{24} r_i(s_i, a_i) \quad (4.24)$$

Una vez formulado el problema, se debe crear una matriz de consumos o tabla de valores, típica en Programación Dinámica. Para ello, se define **la matriz J** con tantas filas como posibles estados haya: según la especificación 3GPP TR 36.887 [25], el número de estaciones pico desplegadas por sector varía entre 0 y 12 estaciones, por lo que el número de estados posibles es 13. Y tantas columnas como etapas haya, 24 en este caso.

Se estudió la opción de considerar que el estado del sistema viniera determinado por el estado de cada estación pico, con lo que se tendría en cuenta la posición concreta de las estaciones dentro del sector. Esta redefinición implica que el número de posibles estados del sistema crezca de manera exponencial, limitando la escalabilidad del mecanismo.

Se comprobó que la posición de las estaciones pico dentro del sector no era demasiado relevante ya que no implica un impacto perceptible en el consumo, lo que permite que el estado del sistema pueda estar definido únicamente por el número de estaciones pico activas. De esta manera, el número de posibles estados crece linealmente con el número de estaciones pico, garantizando la escalabilidad.

Continuando con el proceso, **una vez definida la matriz J , el siguiente paso es rellenarla de**

manera iterativa desde el final hacia delante de la siguiente forma:

Para cada valor de s_k :

$$J_k(s_k) = \min_{a_k \in A(t^k)} C(t_k, a_k, ABS_k, CRE_k) + c(s_k, a_k) \quad (4.25)$$

Iterativamente, desde k igual a 24 hasta 1, obteniendo el *cost-to-go*.

El proceso de relleno de la matriz J se realiza aplicando la técnica CEC, ya que para cada estado posible se calcula el consumo global del sector con los valores esperados o típicos de tráfico, ABS y CRE en función de la etapa k . Los datos de tráfico típicos provienen del patrón de tráfico descrito en el apartado 3.2, mientras que la configuración ABS-CRE corresponde a las intensidades esperadas de tráfico.

Por ejemplo,

- Para cada valor de s_{24} :

$$J_{24}(s_{24}) = \min_{a_{24} \in A(t^{24})} C(t_{24}, a_{24}, ABS_{24}, CRE_{24}) + c(s_{24}, a_{24})$$

- Iterativamente, para cada valor de s_{23} :

$$J_{23}(s_{23}) = \min_{a_{23} \in A(t^{23})} C(t_{23}, a_{23}, ABS_{23}, CRE_{23}) + c(s_{23}, a_{23}) + J_{24}(a_{23})$$

- Hasta $k = 1$.

Cabe destacar que si la **probabilidad de bloqueo** estimada en el sector, haciendo uso de la función obtenida en regresión lineal múltiple, está **por encima de un cierto umbral** se determina que hay bloqueo y por tanto, el coste instantáneo para ese estado y un determinado tráfico se considera un **estado prohibido. Los estados prohibidos no se contemplan a la hora de rellenar la matriz J .**

Un ejemplo sería el siguiente:

- Se consideran N estaciones Pico desplegadas, y que por tanto, pueden estar activas. Por lo tanto hay $N+1$ posibles estados (es posible que ninguna de ellas esté activa) o filas de la matriz J . N es igual a 3 en este caso.
- Se consideran 5 etapas o columnas de la matriz J .

1. Inicialmente, se genera una matriz rellena de ceros.

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Se va rellenando iterativamente desde el final hacia delante.

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 289 & 316 \\ 0 & 0 & 0 & 305 & 259 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 324 \end{pmatrix}$$

3. Si la probabilidad de bloqueo estimada supera un cierto umbral, se determina un estado prohibido (marcado como -1).

$$J = \begin{pmatrix} 299 & 319 & 322 & 289 & 316 \\ 307 & 258 & -1 & 305 & 259 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & -1 & 316 & 0 & 324 \end{pmatrix}$$

4.6.2 FASE ONLINE

Esta segunda etapa es la que se lleva a cabo cuando el algoritmo se aplica en tiempo real sobre una red de comunicaciones activa. Tal y como se ha citado anteriormente, el algoritmo se aplica cada un cierto tiempo, concretamente cada hora, para conseguir la estrategia óptima que mejor se adapte a la fluctuación de tráfico que se produce a lo largo del día ahorrando consumo energético.

Después de definir la matriz J , una vez en funcionamiento el algoritmo **se escoge la acción o control óptimo para la siguiente hora del día** de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$a_k = \underset{a_k \in A(t_k)}{\operatorname{argmin}} C(t_k, a_k, ABS_k, CRE_k) + c(s_k, a_k) + J_{k+1}(a_k) \quad (4.26)$$

Donde el **estado s_k , el tráfico t_k , y los valores ABS_k y CRE_k se corresponden con los valores reales que se están dando en la red de comunicaciones en el instante de aplicar el algoritmo. En la simulación, estos valores vendrían determinados por la configuración obtenida en la sub-etapa UCB de la etapa k-1.**

Así, una vez determinado un control o acción, se apagarán o encenderán tantas estaciones base pico como indique la diferencia de estaciones activas entre el estado del sistema antes de aplicar el algoritmo y el estado tras su ejecución. El proceso de selección de estaciones base se realiza de manera aleatoria. Se planteó la posibilidad de realizarlo teniendo en cuenta el tráfico por estación, o la distancia de las estaciones pico respecto a la estación macro, sin embargo, se obtuvieron resultados similares y por simplicidad se escogió el modelo aleatorio.

Continuando con el ejemplo anterior, si el estado del sistema en una determinada etapa es $s_k =$

3, se aplica el algoritmo y se obtiene el control $a_k = 2$, el nuevo estado del sistema para la siguiente hora será $s_{k+1} = 2$, donde se habrá apagado una estación pico.

4.6.2.1 SUB-ETAPA UCB

Esta última fase de la estrategia constituye una sub-etapa de la fase *Online*, ya que también se lleva a cabo en tiempo real, y se ejecuta una vez se conoce el nuevo control o estado del sistema para la siguiente hora del día.

Consiste en aplicar el algoritmo UCB1 básico, explicado en el apartado 4.5, con el objetivo de encontrar los valores de ABS y CRE que optimicen la capacidad de los usuarios, minimizando la interferencia entre estaciones base para la siguiente etapa, conocido el nuevo estado del sistema.

Los parámetros que se le pasan como argumento a la función que ejecuta el algoritmo son: el estado del sistema, el tráfico esperado en el sector, la capacidad de canal objetivo de los usuarios en la red y el identificador del sector donde se está aplicando el algoritmo.

Se considera según la especificación del 3GPP TR 36.887 [25] que los valores de *Almost Blank Subframes* pueden variar entre 1 y 7 subtramas. Y que los valores de *Cell Range Expansion* posibles que se pueden determinar varían entre 0 y 18 dB. Tras ejecutar el algoritmo un determinado número de iteraciones, se escogerá una combinación de ABS y CRE que proporcione las mejores condiciones posibles a los usuarios de la red.

La función implementada tiene las siguientes características:

- El patrón ABS toma un valor entre 1 y 7.
- El CRE toma un valor de los siguientes: 0, 6, 9, 12 y 18.
- Un *arm* está constituido por una combinación de ABS y CRE.
- Hay un número de iteraciones o etapas definido.

La formulación y estructura del algoritmo ya se planteó en el apartado 4.5.1. Cabe destacar, que para calcular la recompensa obtenida por un *arm* se ha implementado una función que devuelve un valor de recompensa entre 0 y 1, en función del estado del sistema, el tráfico esperado, la capacidad objetivo y el *arm* seleccionado. La recompensa obtenida será mayor cuanto menor sea la utilización de las estaciones base activas.

Capítulo 5

EVALUACIÓN Y RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan todos los parámetros utilizados en las simulaciones así como los valores tomados para estas variables. Además, con el fin de conocer si la propuesta funciona adecuadamente y analizar las prestaciones que ofrece, es necesario comparar el algoritmo propuesto con alguna otra estrategia de disminución de consumo energético. Para ello, se ha escogido un algoritmo de referencia o *benchmark* que se expondrá en este capítulo. Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos en las simulaciones en diferentes situaciones.

5.2 ALGORITMO DE REFERENCIA

El algoritmo de referencia o *benchmark* que se ha escogido proviene de los estudios previos sobre ahorro energético en redes celulares heterogéneas que se expusieron en el capítulo dos. En [18] hacen uso de un algoritmo heurístico como referencia para su trabajo extraído de [21], y proponen una mejora a este heurístico. Ese heurístico mejorado es el que se ha utilizado como referencia para este proyecto.

La formulación del algoritmo heurístico es la siguiente:

- i = identificador de usuario.
- j = identificador de estación base.
- $x_{ij} = 1$ si el usuario i está conectado a la estación j .
- X = conjunto de todos los usuarios x_{ij} de la red.
- w_{ij} = eficiencia espectral del usuario i conectado a la estación j .
- W = eficiencia espectral de todos los usuarios x_{ij} de la red.
- b_{ij} = ancho de banda mínimo requerido para satisfacer al usuario i conectado a la estación j .
- B = ancho de banda mínimo requerido para satisfacer a cada uno de los usuarios x_{ij} de la red.
- M_j = conjunto de usuarios siendo servidos por la estación j .
- B_j = ancho de banda disponible en la estación j .
- L_j = carga de tráfico de la estación j .

$$L_j = \sum_{i \in M_j} \frac{b_{ij}}{B_j} \quad (5.1)$$

- L = conjunto de las cargas de tráfico de todas las estaciones j de la red.

La estructura del algoritmo es ésta:

Inputs: W, B

Output: X

for cada usuario i **do**

Asignar el usuario i a la estación j con mayor w_{ij} ,

cumpliendo la condición $L_j B_j + b_{ij} \leq B_j$. En otro caso, el usuario i es bloqueado.

Actualizar L y X .

end for

Apagar todas las estaciones j con $M_j = 0$.

A = conjunto de todas las estaciones activas tras el paso anterior.

while $A \neq 0$ **do**

Seleccionar la estación j con menor L_j .

Reasociar, si es posible, todos los usuarios de la estación j seleccionada a otras estaciones cercanas.

if $M_j \neq 0$ **do**

Apagar la estación j .

Actualizar L y X .

end if

$A = A - \{\text{estación } j\}$

end while

5.3 PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES

A continuación se exponen los diferentes parámetros configurables en el simulador, y los valores que se han utilizado. Los valores han sido obtenidos de especificaciones del 3GPP TR 36.814 y TR 36.887 [25] [27]:

Parámetros	Valores
Número de estaciones base pico desplegadas	Entre 4 y 10
Número de subtramas LTE	8
Inter Site Distance (ISD)	500 m
Potencia de transmisión estación macro	20 W
Potencia de transmisión estación pico	6.3 W
Consumo de estación macro en modo <i>Sleep</i>	75 W
Consumo de estación pico en modo <i>Sleep</i>	39 W
Consumo base de estación macro	130 W
Consumo base de estación pico	56 W

Slope de consumo en estación macro	4.7
Slope de consumo en estación pico	2.6
Betta para el coste de activación	0.1
Ganancia de la antena para estación macro	14 dBi
Ganancia de la antena para estación pico	5 dBi
Ancho de banda del canal	10 MHz
Figura de ruido	5 dB
Variación <i>shadowing</i> para el cálculo de ganancias	10 dB
Mínima distancia entre usuario y estación macro	35 m
Mínima distancia entre usuario y estación pico	10 m
Radio rango de cobertura de estación pico	40 m
Capacidad objetivo de los usuarios de la red (<i>Objective</i>)	250 kbps
Capacidad superior objetivo de los usuarios de la red (<i>RupperObjective</i>)	250 kbps
Número de Resource Blocks (<i>RBs</i>)	100

5.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de distintas simulaciones llevadas a cabo. Tal y como se comentó en el capítulo tres, el simulador implementado permite emular varios días de funcionamiento de una red celular heterogénea para la recolección de datos garantizando un intervalo de confianza del 95%.

Para analizar la estrategia de ahorro propuesta se han comparado los resultados obtenidos en tres situaciones distintas: utilizando el algoritmo propuesto, utilizando el algoritmo heurístico de referencia, y sin utilizar ningún algoritmo de ahorro energético, es decir, todas las estaciones base permanecen activas en todo momento.

5.4.1 SIMULACIONES AHORRO ENERGÉTICO

A continuación se muestran un conjunto de gráficas que **representan el consumo energético por sector a lo largo del día**. Se han realizado simulaciones con diferente número de estaciones pico desplegadas, siempre entre 4 y 10. Además, también se muestran gráficas sobre la probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día.

La leyenda que se encuentra en las gráficas hace referencia a lo siguiente:

- “No Switching”: escenario donde no se aplica ningún mecanismo de apagado/encendido de estaciones.
- “Benchmark”: escenario donde se aplica el algoritmo heurístico presentado como referencia comparativa.
- “DP + ABS/CRE”: escenario donde se aplica el algoritmo propuesto de Programación Dinámica con CEC, más la optimización de ABS y CRE.

4 estaciones base pico desplegadas:

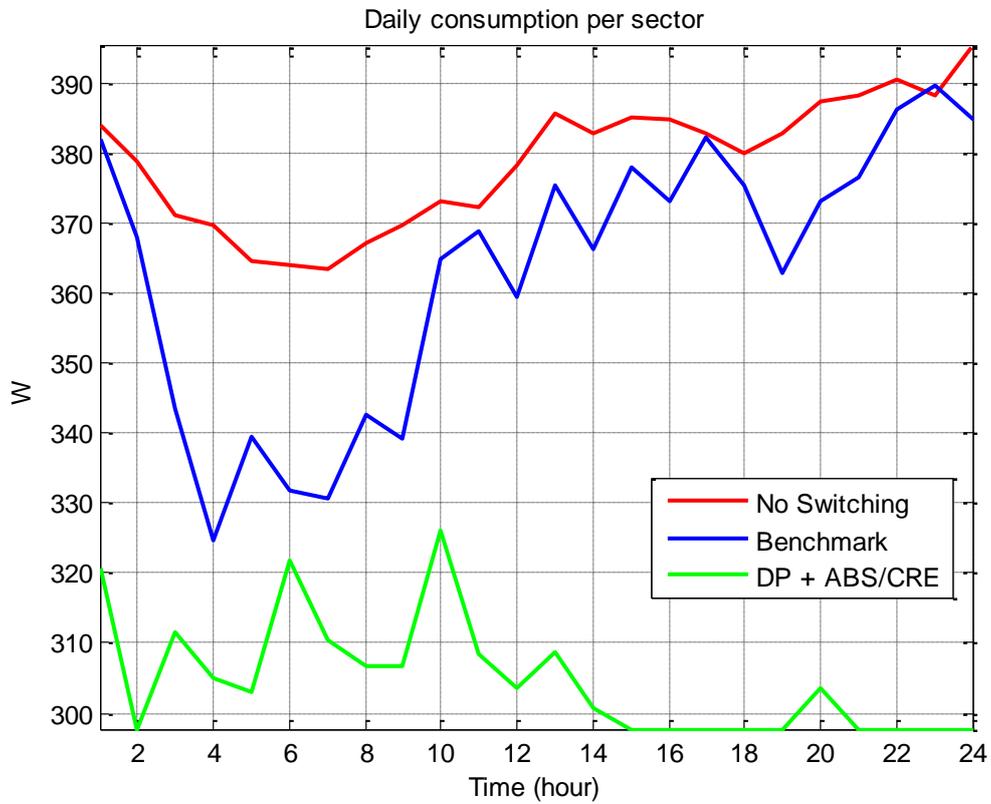


Figura 13: Consumo energético por sector a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas

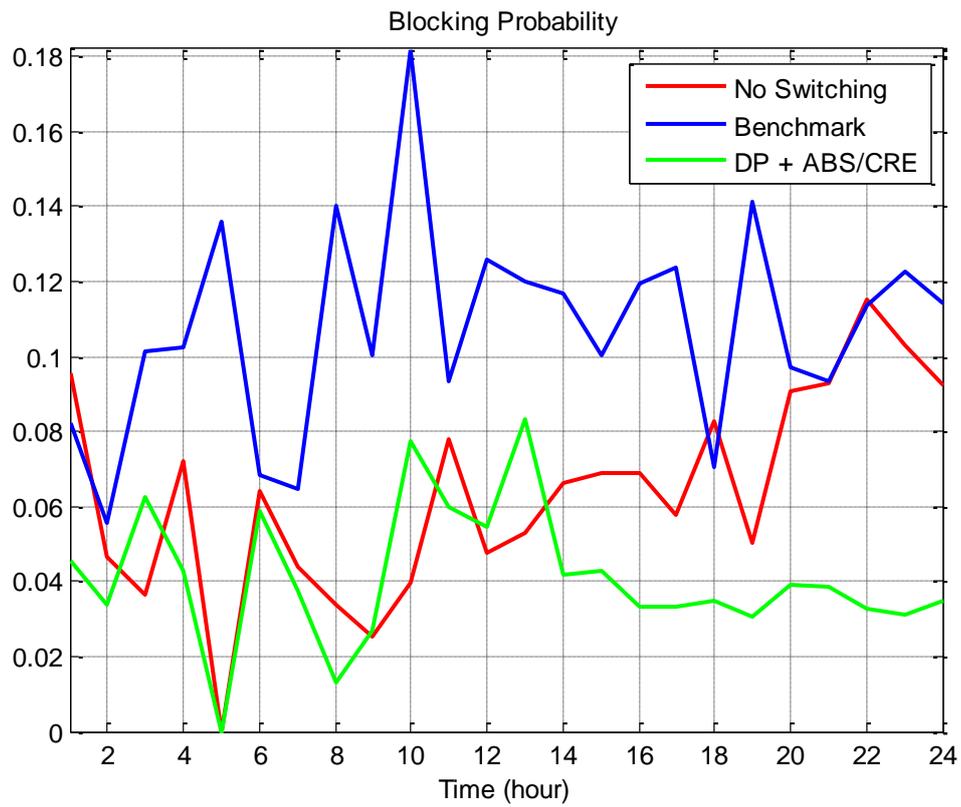


Figura 14: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas

El ahorro energético conseguido en este escenario respecto al caso donde todas las estaciones base están activas se muestra en la siguiente imagen:

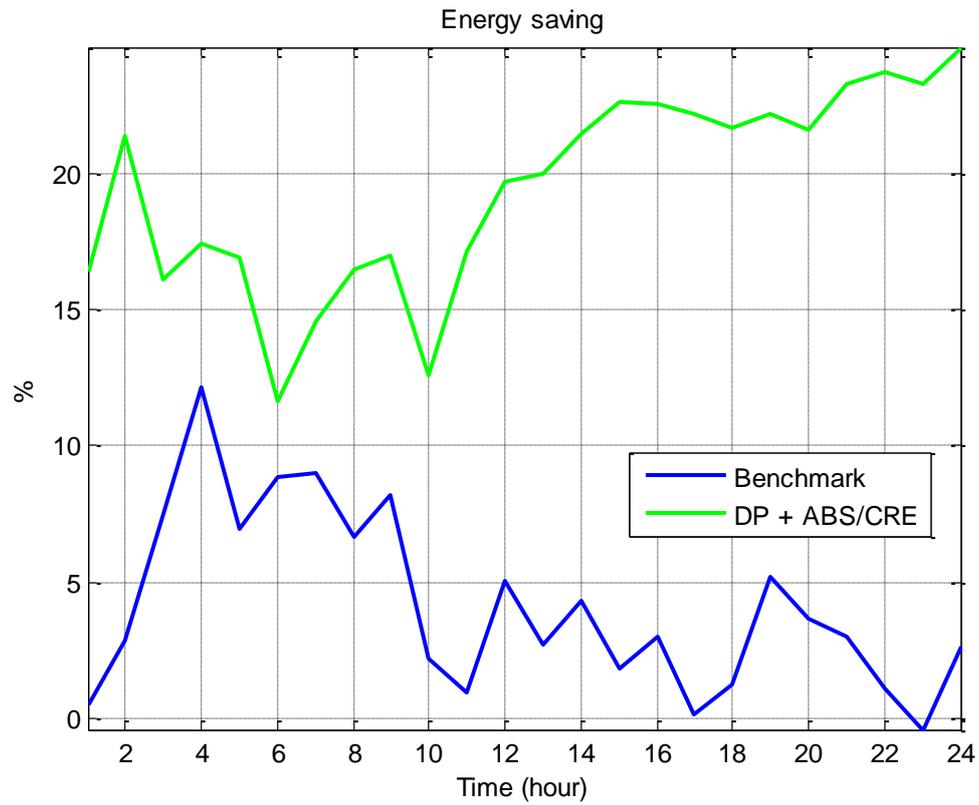


Figura 15: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 4 estaciones desplegadas

7 estaciones base pico desplegadas:

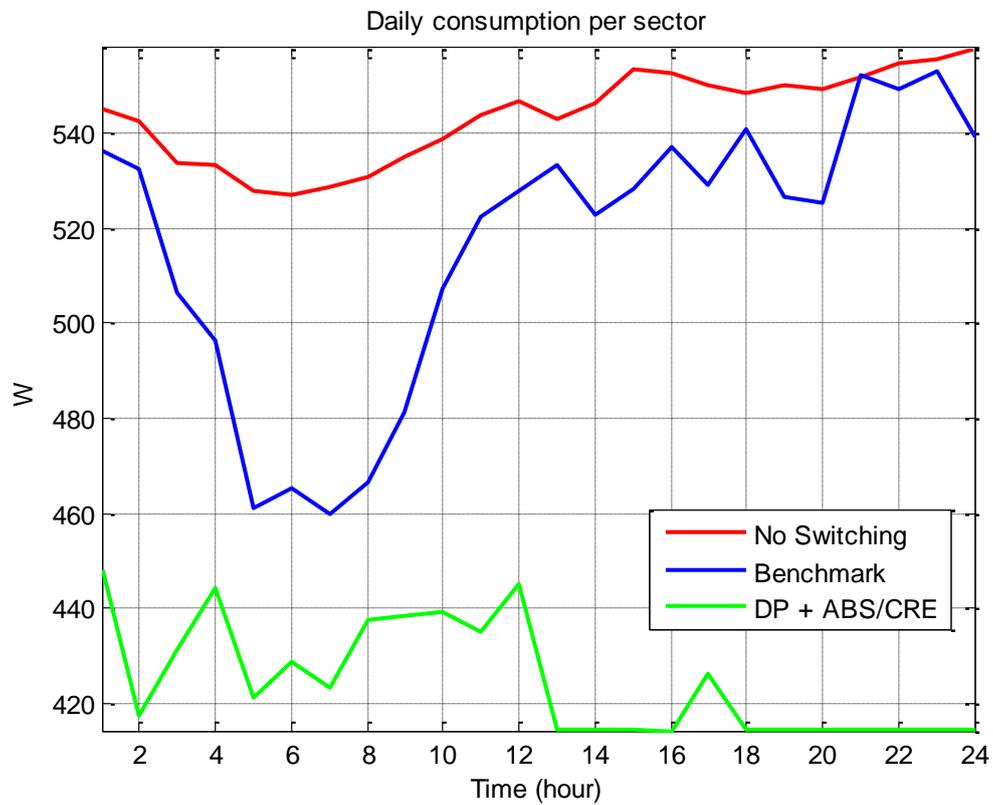


Figura 16: Consumo energético por sector a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas.

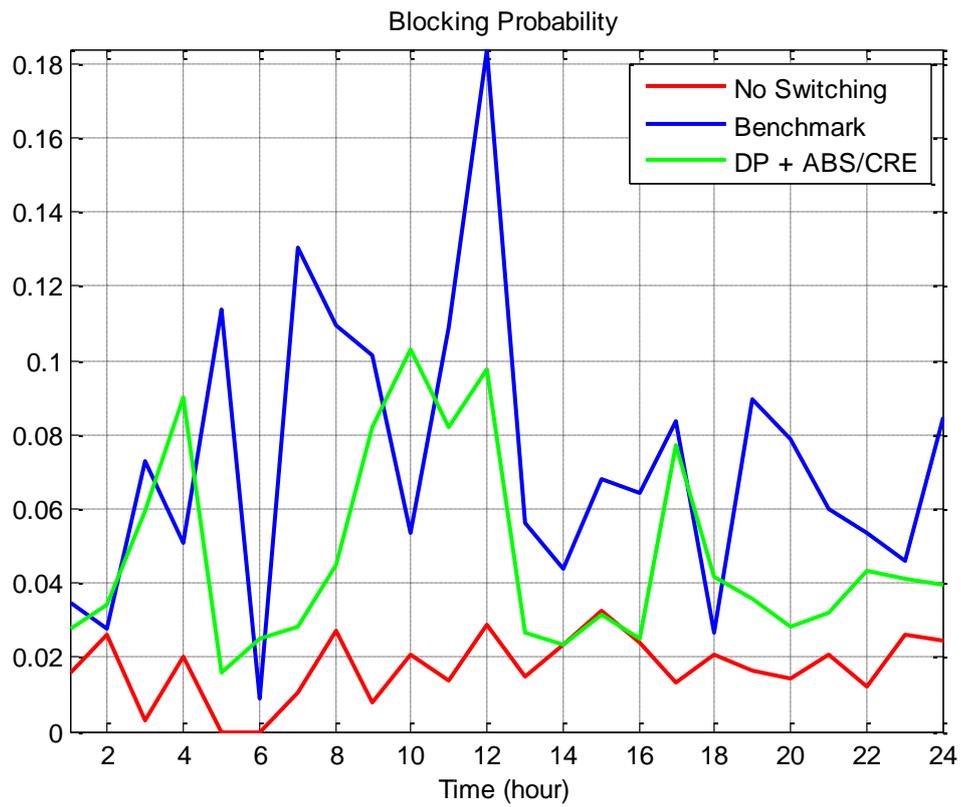


Figura 17: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas

El ahorro energético conseguido en este escenario respecto al caso donde todas las estaciones están encendidas se muestra en la siguiente imagen:

AHORRO ENERGÉTICO EN REDES DE
ACCESO RADIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CEC

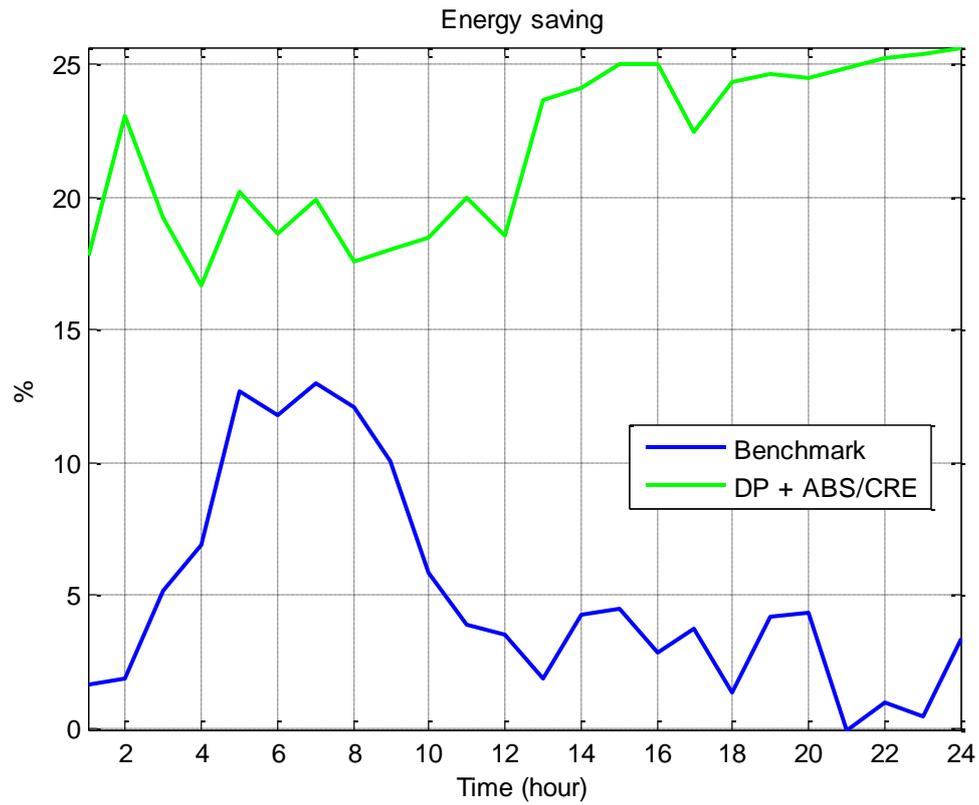


Figura 18: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 7 estaciones desplegadas

10 estaciones base pico desplegadas:

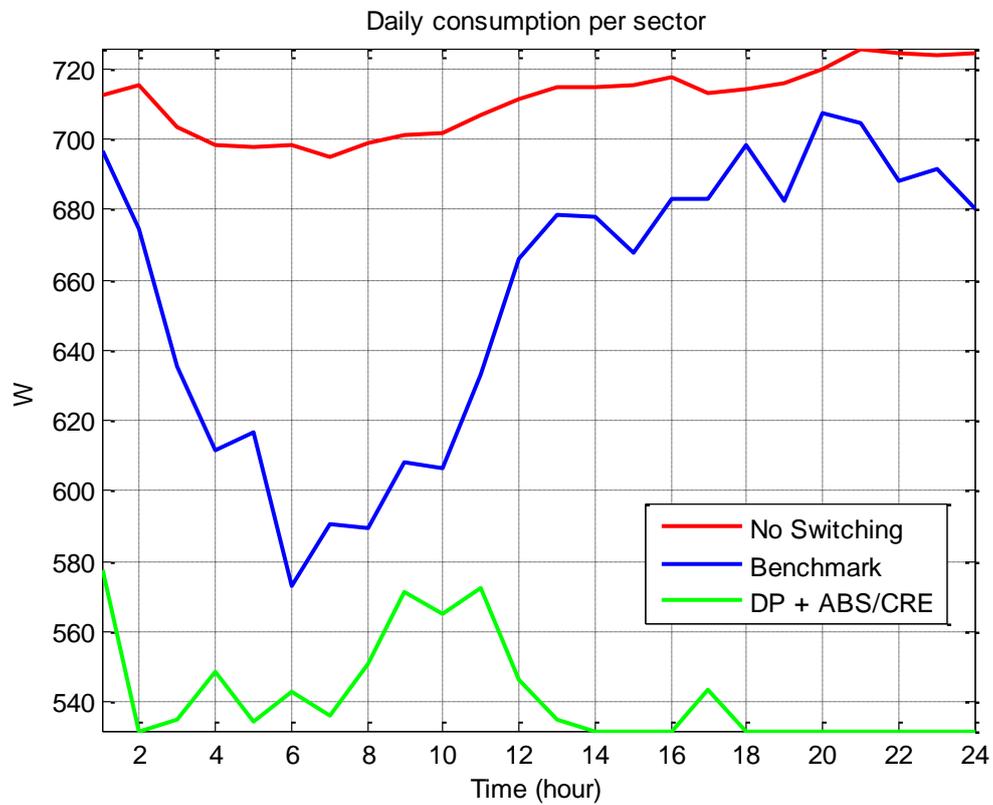


Figura 19: Consumo energético por sector a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas.

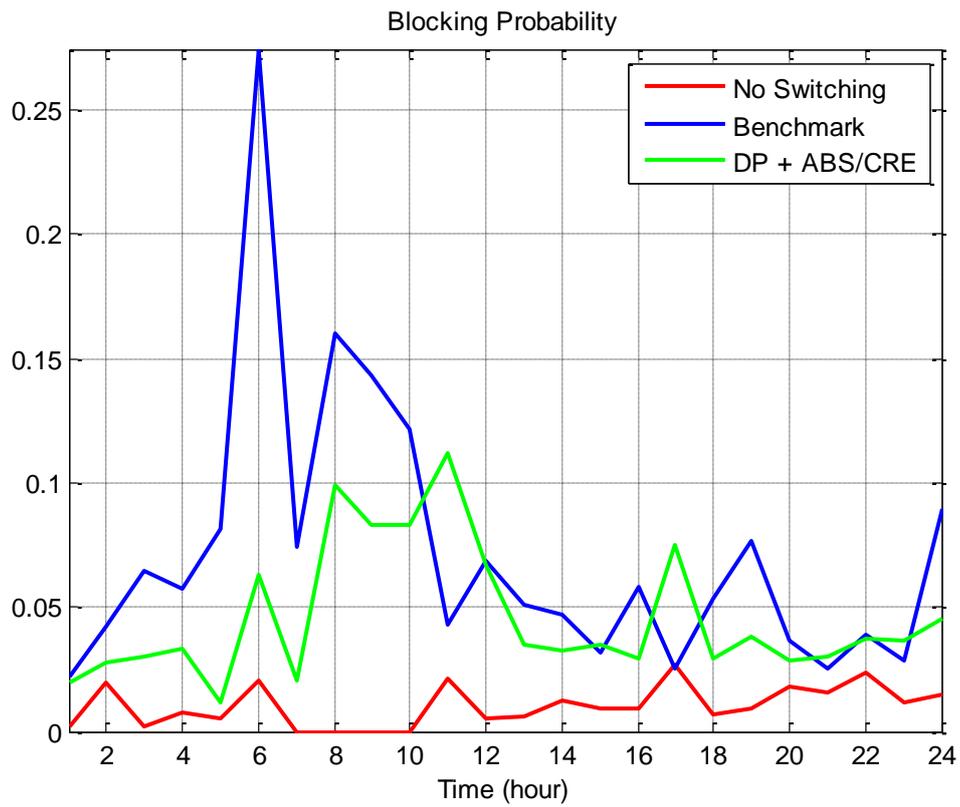


Figura 20: Probabilidad de bloqueo por sector a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas

El ahorro energético conseguido en este escenario respecto al caso donde todas las estaciones están encendidas se muestra en la siguiente imagen:

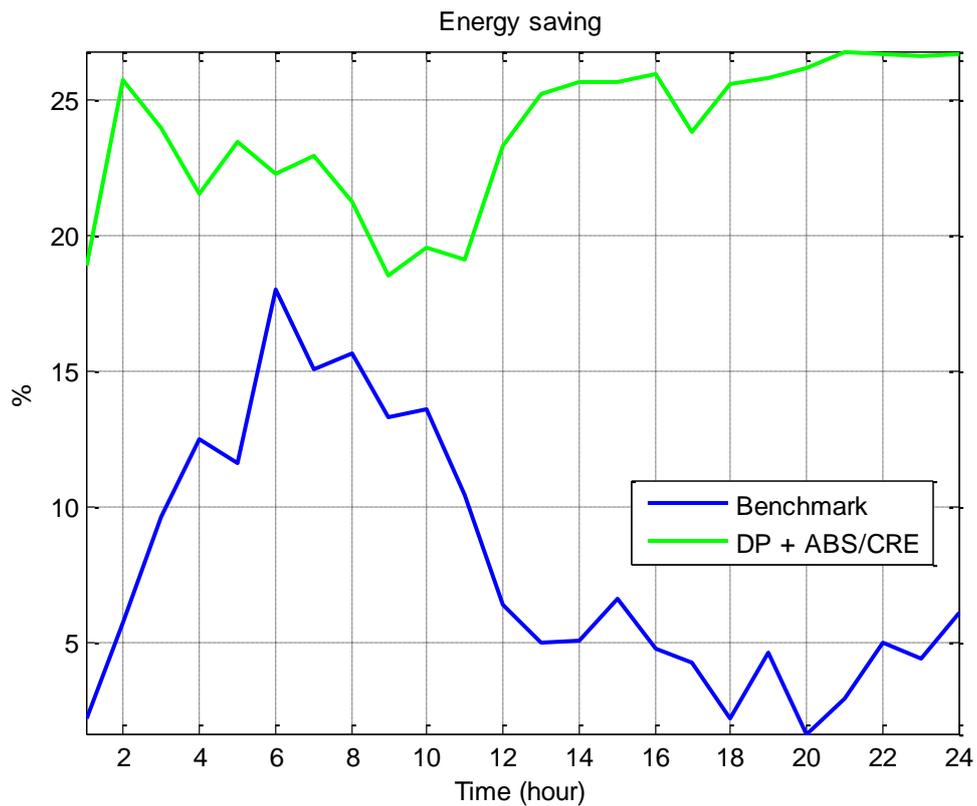


Figura 21: Ahorro energético en % conseguido a lo largo del día. 10 estaciones desplegadas

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar como el ahorro energético aumenta a medida que se incrementa el número de estaciones desplegadas, consiguiendo mejores datos de ahorro energético el algoritmo propuesto, con diferencias más que notables respecto al algoritmo de referencia utilizado. Concretamente, para el escenario donde hay desplegadas 10 estaciones base pico, el mecanismo planteado alcanza valores de ahorro energético cercanos al 25% siendo un excelente resultado. Además, la probabilidad de bloqueo en la red permanece en valores más bajos con el algoritmo propuesto gracias a la optimización realizada de ABS y CRE.

En la siguiente gráfica se puede observar lo comentado:

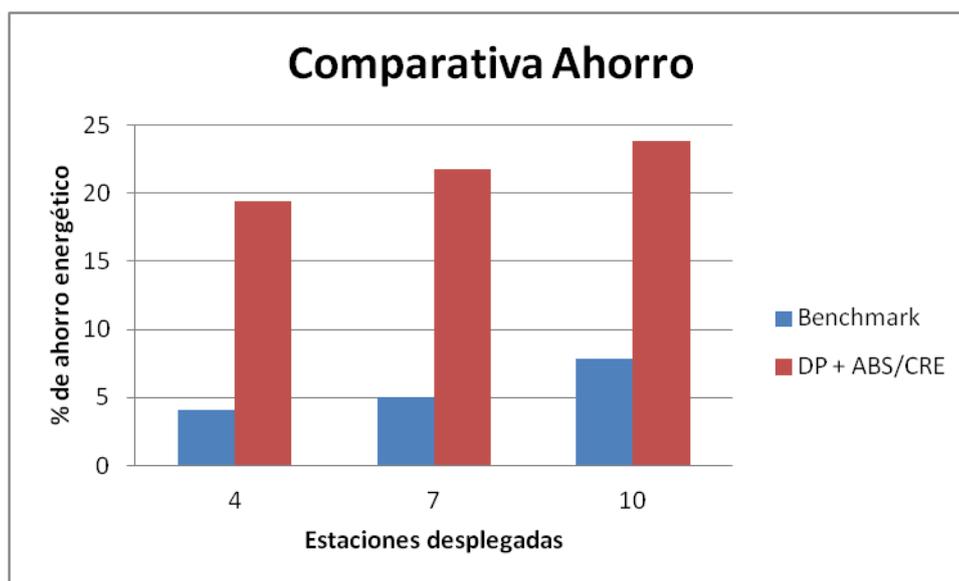


Figura 22: Comparativa ahorro energético

Se realizaron las mismas simulaciones con diferentes valores de capacidad objetivo para los usuarios de la red. Se testeó que ocurría para un *Robjective* de 0 kbps y de 500 kbps y los resultados obtenidos fueron similares a los ya comentados, y por ello no se han introducido las gráficas correspondientes a estas simulaciones.

5.4.2 MEDIDAS DE TIEMPO DE COMPUTACIÓN

A continuación se muestran gráficas con los resultados obtenidos sobre los tiempos de ejecución de los algoritmos, comparando el propuesto frente al *benchmark* de referencia. En primer lugar se presentan datos del tiempo de computación del algoritmo propuesto considerando todas sus fases, es decir, Programación Dinámica con CEC, más la optimización de ABS y CRE haciendo uso del algoritmo UCB1.

En cada gráfica se observa el tiempo de computación de cada uno de los algoritmos en cada hora del día, para analizar cómo se comportan en función del tráfico y el número de estaciones base pico que haya activas en ese momento.

Las simulaciones se han llevado a cabo en un equipo con las siguientes características:

- Modelo: HP G62 Notebook PC.
- Procesador: Intel Core i3 CPU M350 2.27 GHz.
- RAM: 4 GB
- Sistema Operativo: Windows 7 Home Premium 64 bits.

4 estaciones base pico desplegadas

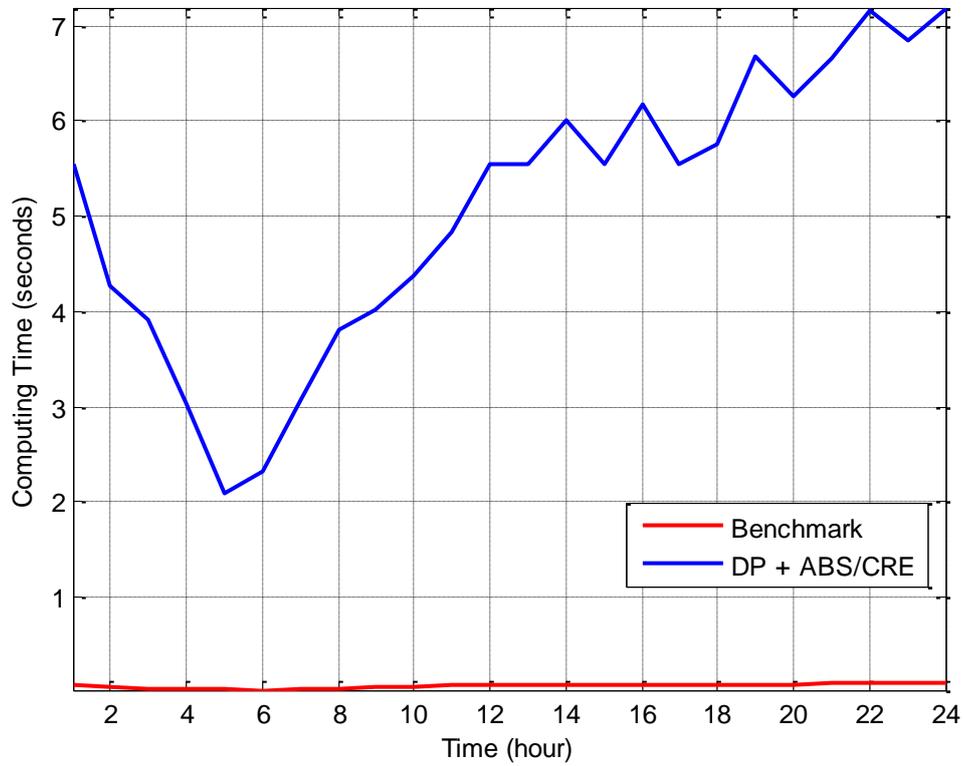


Figura 23: Tiempo de computación para 4 estaciones desplegadas a lo largo del día

7 estaciones base pico desplegadas

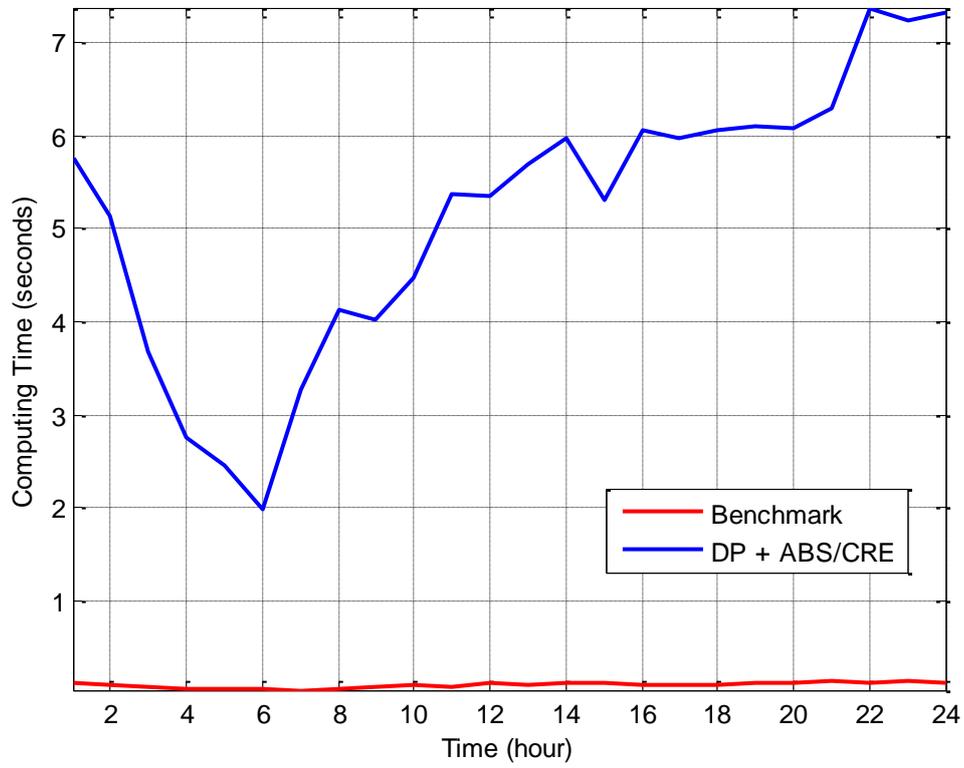


Figura 24: Tiempo de computación para 7 estaciones desplegadas a lo largo del día

10 estaciones base pico desplegadas

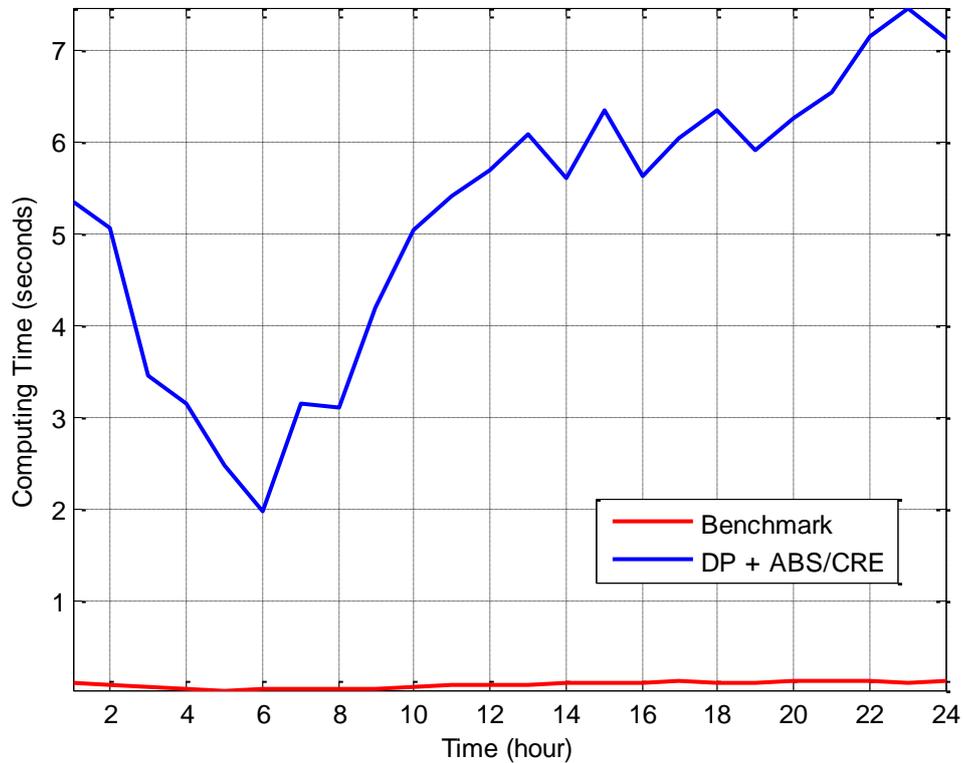


Figura 25: Tiempo de computación para 10 estaciones desplegadas a lo largo del día

Ahora se presentan resultados sobre el tiempo de computación del algoritmo propuesto considerando únicamente la fase de programación dinámica (DP) en comparativa con el **Benchmark**.

4 estaciones base pico desplegadas

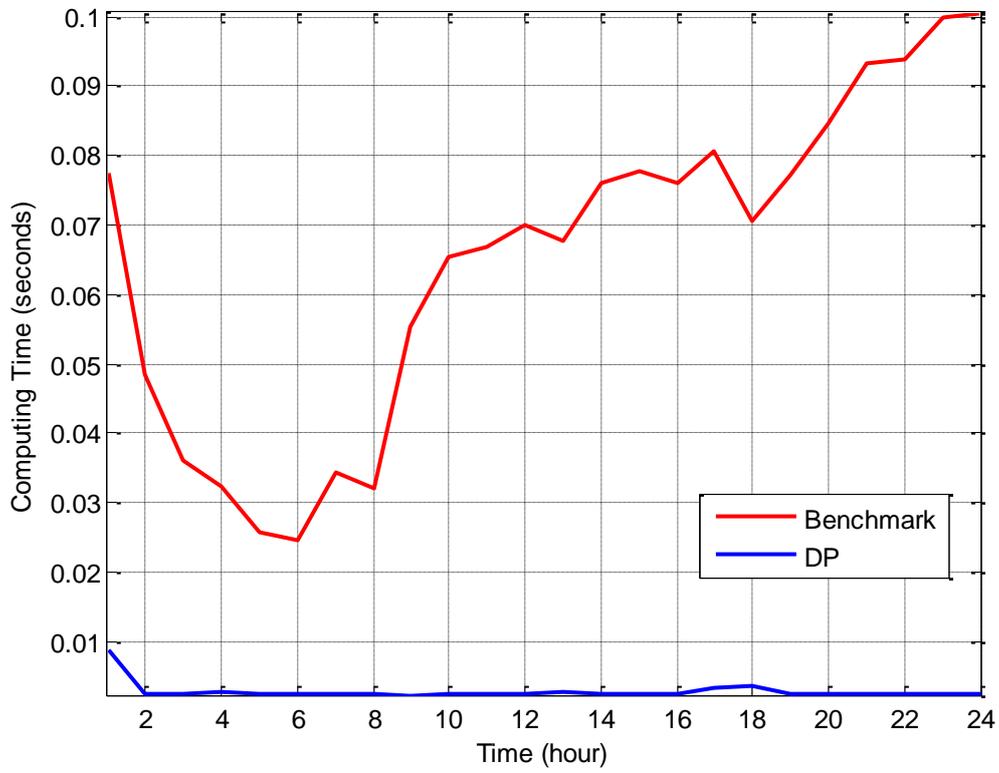


Figura 26: Tiempo de computación para 4 estaciones desplegadas a lo largo del día

7 estaciones base pico desplegadas

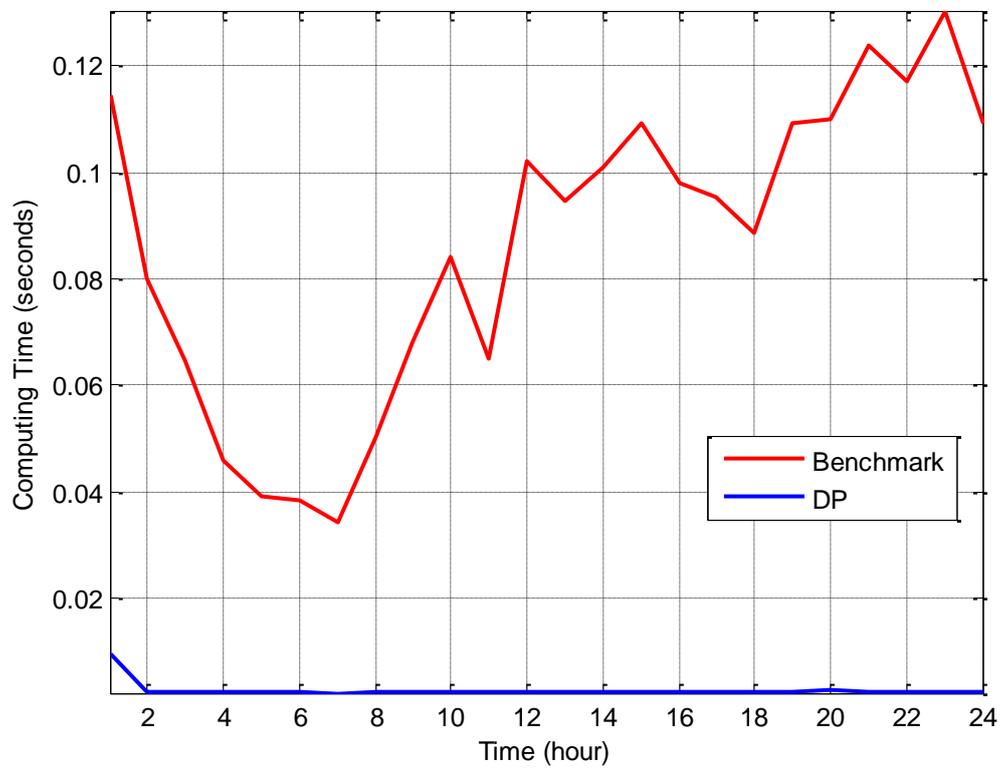


Figura 27: Tiempo de computación para 7 estaciones desplegadas a lo largo del día

10 estaciones base pico desplegadas

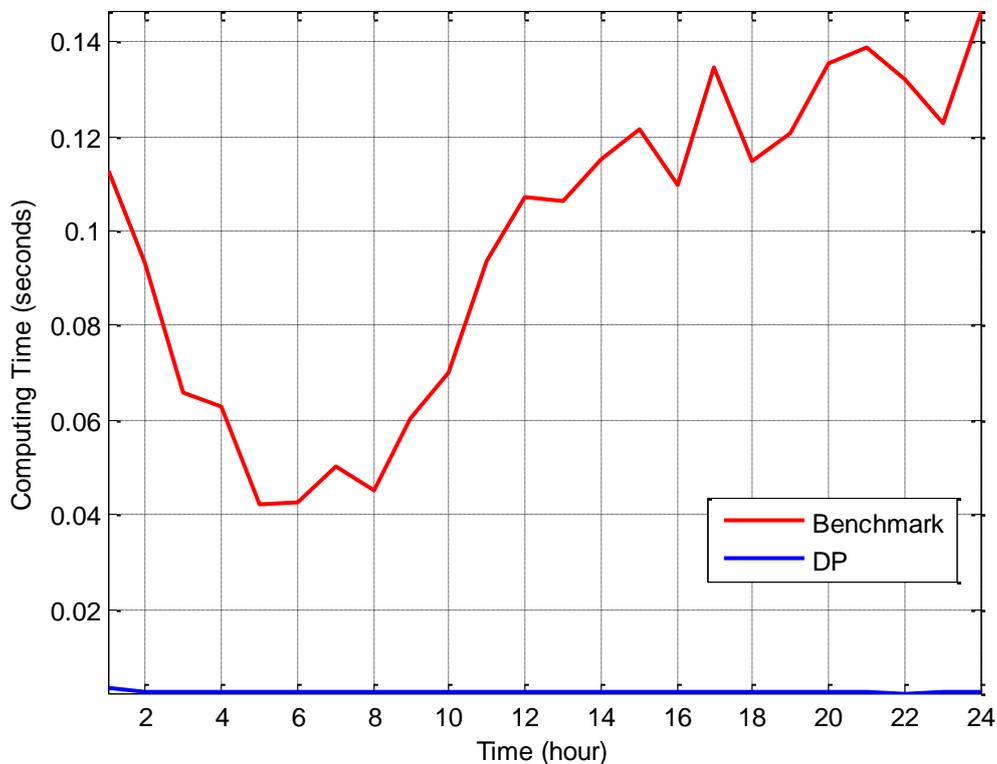


Figura 28: Tiempo de computación para 10 estaciones desplegadas a lo largo del día

En la siguiente gráfica se puede observar como el algoritmo propuesto tarda más tiempo en ejecutarse que el algoritmo de referencia debido al proceso de optimización de ABS+CRE, que ralentiza en gran medida la ejecución total del algoritmo, y que el heurístico de referencia no implementa.

Sin embargo, cabe destacar que la ejecución de la estrategia propuesta no supera los 8 segundos de duración en el peor de los casos según los resultados obtenidos en las simulaciones. **Esto implica que su implantación en un escenario real es totalmente factible dentro de la escala temporal a la que debe operar el mecanismo (las decisiones se toman en períodos de 30 o 60 minutos).**

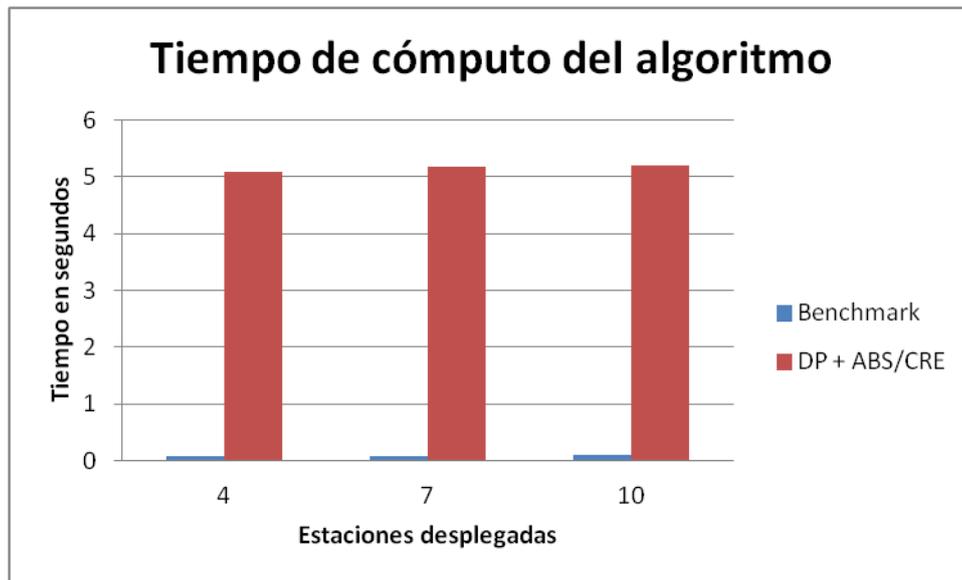


Figura 29: Resumen tiempos de cómputo

Por otro lado, si se comparan los tiempos de cómputo únicamente para la optimización del consumo, se observa como el algoritmo propuesto es mucho más rápido en ejecución que el de referencia. Esta comparativa de tiempos es lógica ya que el *benchmark* no realiza ninguna optimización del mecanismo de control de interferencia de la red. Además, se observa cómo la propuesta es completamente escalable ya que aunque el número de estaciones base desplegadas aumente, el tiempo de computación permanece prácticamente constante.

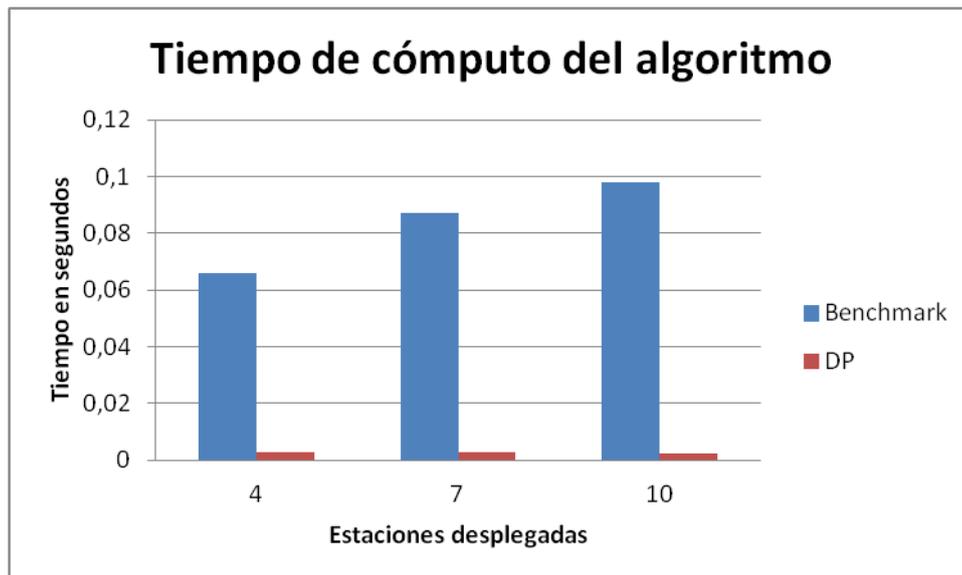


Figura 30: Resumen tiempos de cómputo sin optimización ABS+CRE

5.4.3 FRENTE PARETO

La siguiente figura muestra el frente Pareto. El eje Y representa el umbral escogido de probabilidad de bloqueo en el algoritmo propuesto para determinar estados prohibidos en la matriz J , tal y como se explicó en el capítulo 4.

Sin embargo, algunos de los valores que aparecen no se llegan a dar en el simulador. El límite superior de bloqueo que se da en el simulador cuando se ejecuta el algoritmo propuesto está en torno al 0.045 (4.5%). Cuando se da este valor de bloqueo, se trata del escenario donde todas las estaciones base pico están apagadas, y por tanto, el ahorro energético encuentra su límite, en torno al 25% como se puede observar en la gráfica siguiente, corroborando los resultados presentados en anteriores secciones:

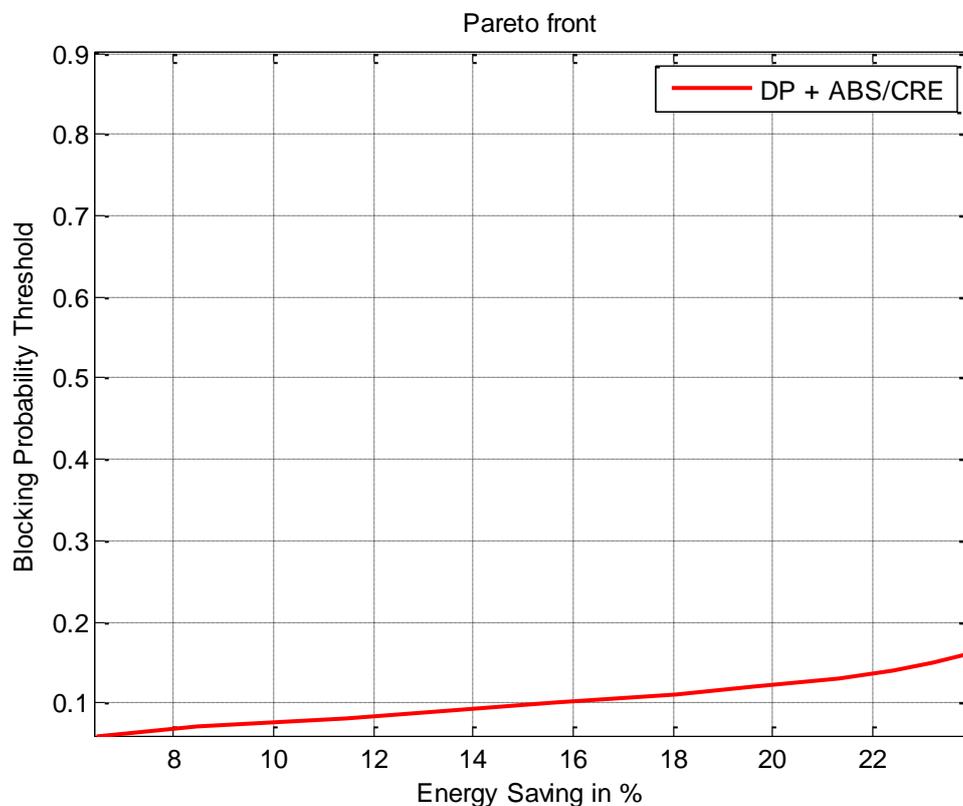


Figura 31: Frente Pareto

El valor escogido para el umbral de bloqueo no garantiza que la probabilidad de bloqueo en el simulador sea exactamente ese valor, ya que la matriz J se ha calculado con unos parámetros de ABS y CRE esperados, mientras que en el simulador estos parámetros varían de manera óptima. En la siguiente gráfica se muestra la probabilidad de bloqueo en simulación frente al ahorro energético, en comparativa con el algoritmo de referencia:

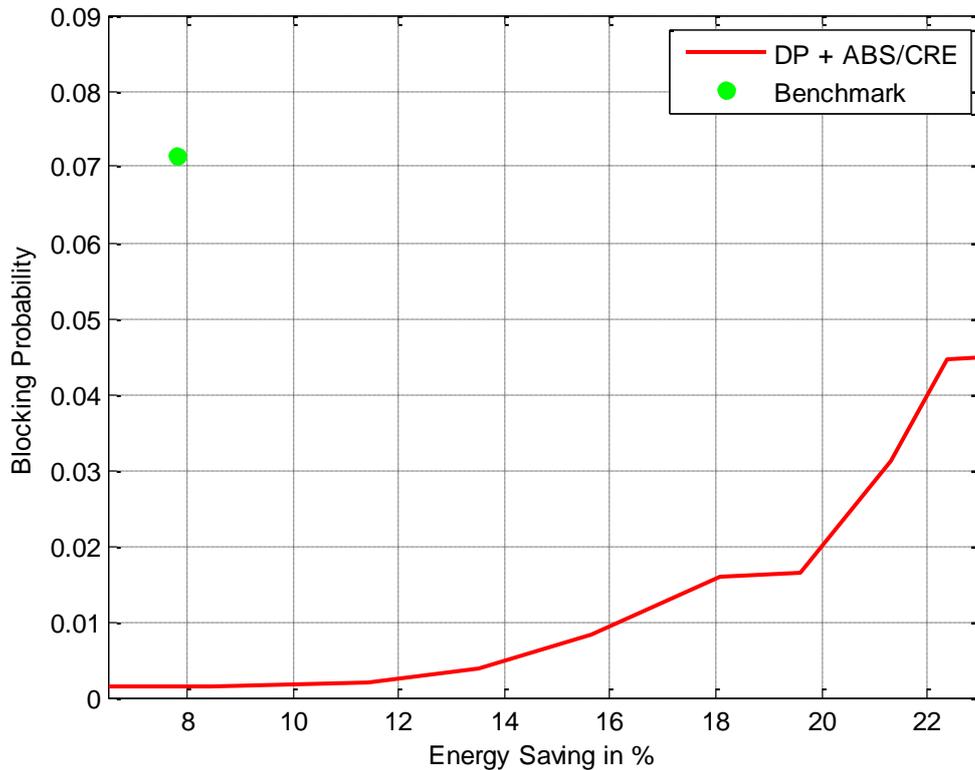


Figura 32: Frente Pareto en comparativa

En esta última gráfica se puede observar como la probabilidad de bloqueo que se da en simulación utilizando el algoritmo propuesto nunca llega a los valores que se dan utilizando el algoritmo de referencia, lo que implica que el algoritmo propuesto proporciona mejores condiciones para los usuarios de la red, disminuyendo la utilización en las estaciones base.

5.4.4 SIMULACIONES CON DIFERENTE PATRÓN DE TRÁFICO

En capítulos anteriores se comentó que la periodicidad y variabilidad del tráfico se tiene en cuenta en las simulaciones y además se ha utilizado un patrón de tráfico típico. Sin embargo, se ha querido comprobar la robustez de la propuesta utilizando en simulación un patrón de tráfico diferente al esperado. En la siguiente figura se pueden observar ambos patrones:

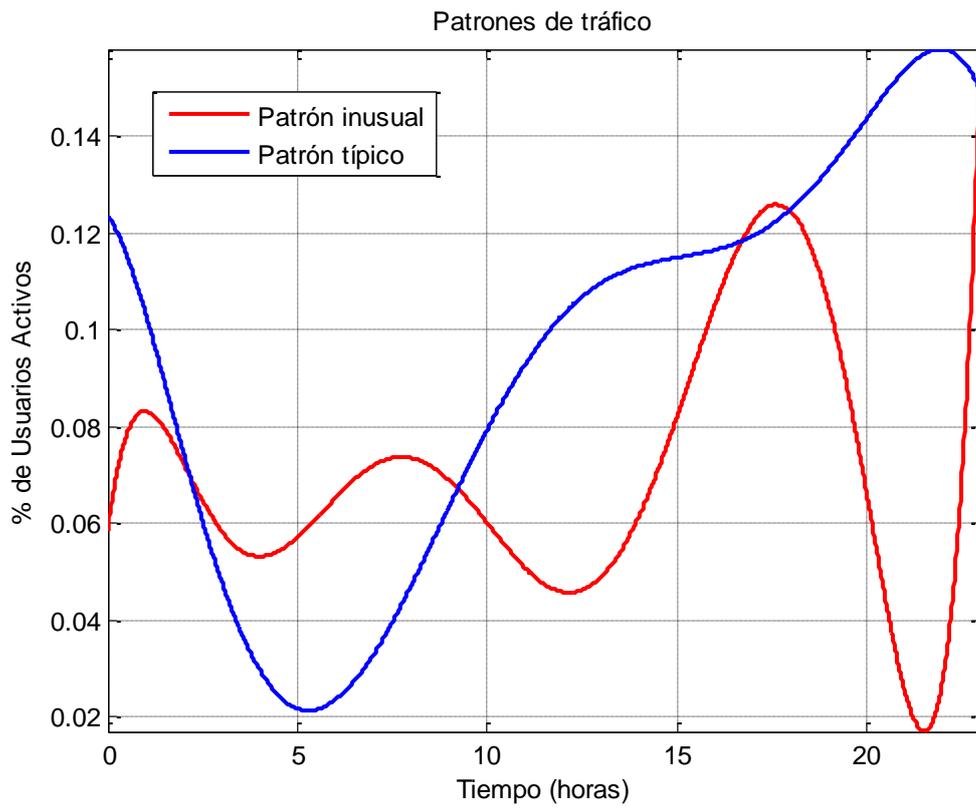


Figura 33: Patrones de tráfico

Los resultados obtenidos para 10 estaciones desplegadas se muestran a continuación:

AHORRO ENERGÉTICO EN REDES DE
ACCESO RADIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CEC

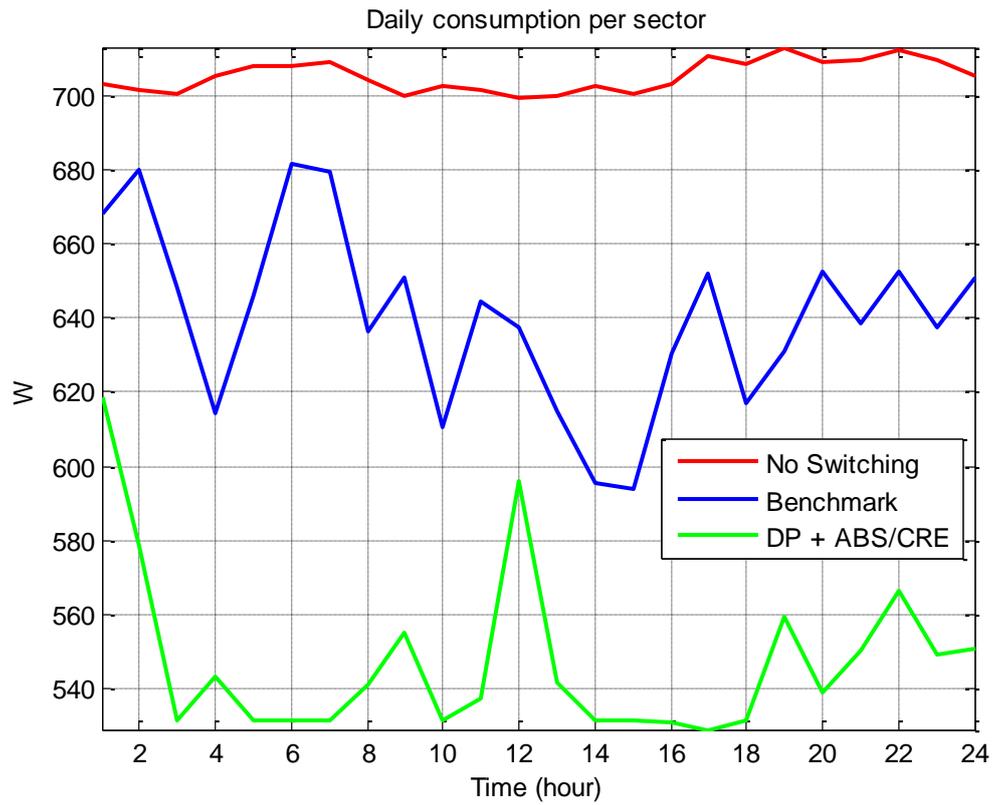


Figura 34: Consumo energético a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas

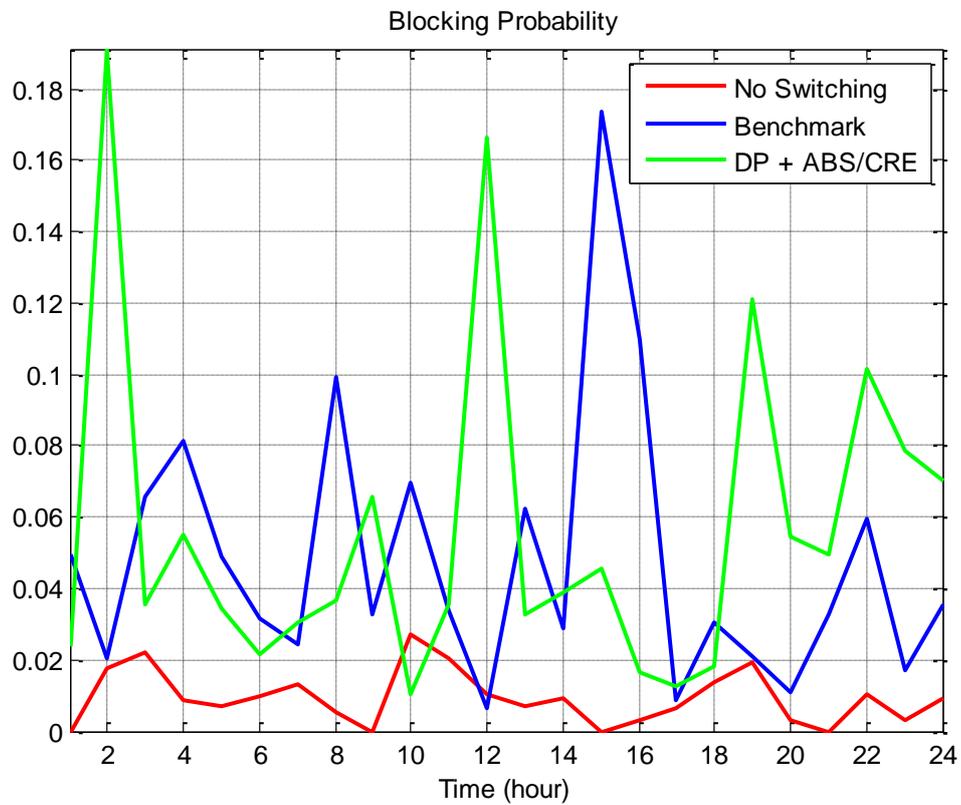


Figura 35: Probabilidad de bloqueo en el sector a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas

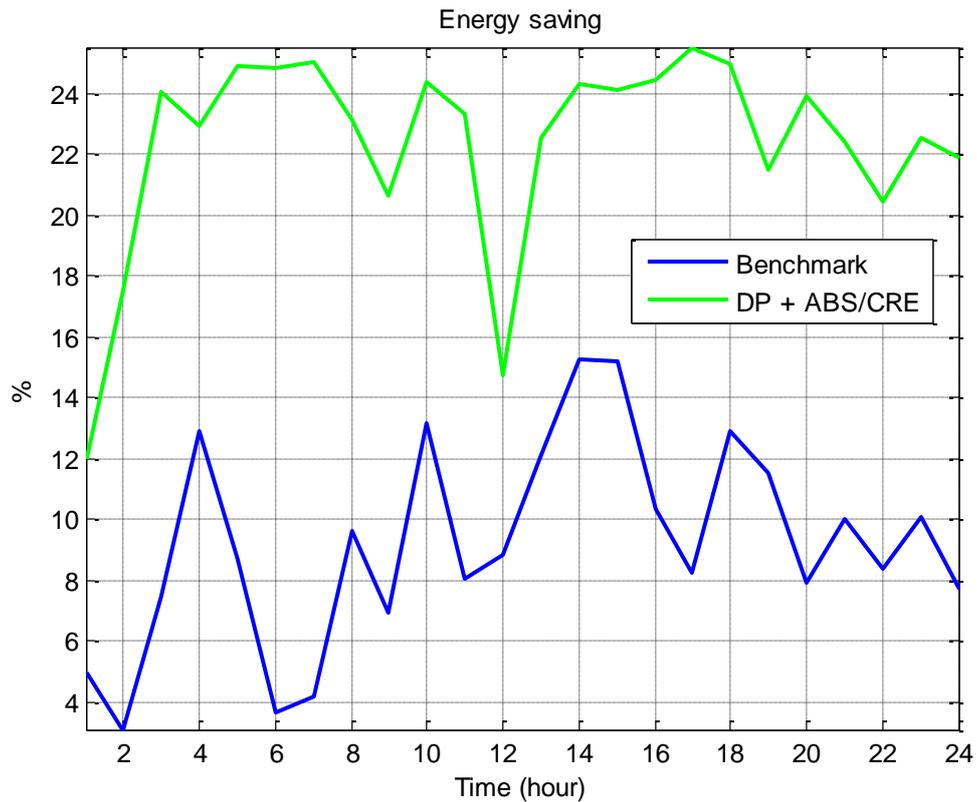


Figura 36: Ahorro energético conseguido a lo largo del día para 10 estaciones desplegadas

Como ocurría en las simulaciones anteriores, de nuevo el algoritmo propuesto supera al de referencia consiguiendo valores de ahorro energético semejantes a los antes presentados. **Por tanto, se puede decir que la nueva estrategia planteada se adapta adecuadamente a cambios que se puedan producir en el perfil de tráfico diario**, como puede ser tráfico durante los fines de semana o ante alguna situación concreta.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Este proyecto aborda el problema del creciente consumo energético en las redes celulares heterogéneas para comunicaciones móviles. Este ascendente consumo se debe al despliegue de gran cantidad de estaciones base de menor potencia, denominadas *small cells*, con el objetivo de satisfacer las necesidades cada vez mayores de los usuarios de la red.

Por este motivo, el ahorro energético supone un aspecto clave y de gran interés para el sector de las telecomunicaciones. En el presente trabajo se propone un esquema de apagado temporal de estaciones base, tipo pico, en períodos de baja intensidad de tráfico sin reducir la calidad de servicio de los usuarios en la red. Esta estrategia permite desactivar y activar estaciones base en función de la variabilidad del tráfico a lo largo del día, para conseguir mejorar la eficiencia energética de todo el sistema.

El algoritmo propuesto consiste en la aplicación de Programación Dinámica junto con CEC para optimizar el consumo energético de la red de comunicaciones móviles, encontrando una política óptima de control mediante el apagado o encendido de las estaciones base desplegadas. Además, en la última fase de la estrategia se aplica el algoritmo UCB1 para encontrar los valores óptimos de CRE y ABS, minimizando la interferencia entre estaciones base y por tanto, mejorando la capacidad del canal.

Analizando los resultados obtenidos, se puede concluir que el nuevo esquema consigue un ahorro energético más que notable, cercano al 25% del consumo que se produce cuando no se apaga ninguna estación, superando con creces al algoritmo de referencia utilizado. Además, ese ahorro se acentúa a medida que el número de estaciones base desplegadas aumenta.

Por otra parte, aún con el apagado de estaciones base, la probabilidad de bloqueo en la red permanece en valores más bajos con el algoritmo propuesto gracias a la optimización realizada de ABS y CRE.

Si se observan los resultados obtenidos en cuanto a tiempo de computación, se puede destacar que el algoritmo presentado es mucho más rápido en ejecución que el de referencia, sin realizar la optimización de ABS más CRE. También cabe destacar que la ejecución de la estrategia propuesta es totalmente factible dentro de la escala temporal a la que debe operar el mecanismo, ya que las decisiones se toman en períodos de 30 o 60 minutos, y la ejecución del algoritmo apenas toma unos segundos. Además, se observa cómo es completamente escalable ya que aunque el número de estaciones base desplegadas aumente, el tiempo de computación permanece prácticamente constante.

De igual manera, los resultados demuestran la robustez del esquema en relación a la probabilidad de bloqueo en la red. Siendo además posible la configuración de ésta en compromiso con el

AHORRO ENERGÉTICO EN REDES DE ACCESO RADIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CEC

ahorro energético que se quiera obtener, como demuestran los datos del frente Pareto. Asimismo, cabe destacar la buena adaptabilidad del algoritmo a cambios en el patrón de tráfico habitual.

Finalmente, destacar que al contrario que gran parte de las estrategias analizadas en trabajos previos, así como el heurístico utilizado en este proyecto como referencia, el esquema presentado no requiere de gran cantidad de información sobre la red en su ejecución en tiempo real, lo que supone una gran ventaja, y que junto con su baja carga computacional, permite que sea tan escalable.

Como conclusión, comentar que se han cumplido los objetivos propuestos inicialmente para este proyecto, con resultados satisfactorios proponiendo una novedosa estrategia para abordar el problema de la eficiencia energética en las redes de comunicaciones móviles.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ericsson. Available: <http://www.ericsson.com/mobility-report>. [Last access: May 2016].
- [2] A. Aijaz, H. Aghvami, and M. Amani, “A survey on mobile data offloading: Technical and business perspectives,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 104–112, Apr. 2013.
- [3] C. Ho, D. Yuan, and S. Sun, “Data offloading in load coupled networks: Utility maximization framework,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 1921–1931, Apr. 2014.
- [4] Gartner, “Green IT: the new industry shock wave,” in 2007 Presentation Symp./ITXPO Conf.
- [5] J. Malmodin, A. Moberg, D. Lunden, G. Finnveden, and N. Lovehagen, “Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors,” *J. Industrial Ecology*, vol. 14, no. 5, pp. 770–790, Oct. 2010.
- [6] “Energy efficiency good practices,” Nokia Siemens Networks, May 2011. [Online]. Available: http://www.nokiasiemensnetworks.com/sites/default/files/document/energy_efficiency_good_practices.pdf
- [7] “Huawei whitepaper on energy efficiency and carbon reduction,” white paper, Huawei, 2011. [Online]. Available: <http://www.huawei.com/en/static/hw-076768.pdf>
- [8] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, “Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 13, no. 4, pp. 524–540, Fourth Quarter 2011.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, “4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”, Ed. Elsevier, 2011.
- [10] LteEncyclopedia. Available: <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home>. [Last access: May 2016].
- [11] 3GPP. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Last access: May 2016].
- [12] L. Lindbom, R. Love, and S. Krishnamurthy, “Enhanced Inter-cell Interference Coordination for Heterogeneous Networks in LTE-Advanced: A Survey”, December 2011.
- [13] J. Acharya, L. Gao and S. Gaur, “Heterogeneous Networks in LTE-Advanced”, Wiley, pp.

103-107, 110-114 , 2014.

[14] X. Chen, J. Wu, S. Member, Y. Cai, and S. Member, “Energy-Efficiency Oriented Traffic Offloading in Wireless Networks : A Brief Survey and a Learning Approach for Heterogeneous Cellular Networks”, *IEEE Journal*, vol. 33, no. 4, pp. 627–640, 2015.

[15] L. Saker, S. E. Elayoubi, R. Combes, and T. Chahed, “Optimal Control of Wake Up Mechanisms of Femtocells in Heterogeneous Networks”, *IEEE Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 664–672, 2012.

[16] Y. Chiang and W. Liao, “Genie : An Optimal Green Policy for Energy Saving and Traffic Offloading in Heterogeneous Cellular Networks”, *IEEE ICC*, pp. 6230–6234, 2013.

[17] X. Chen, H. Zhang, T. Chen, and M. Lasanen, “Improving Energy Efficiency in Green Femtocell Networks : A Hierarchical Reinforcement Learning Framework”, *IEEE ICC*, pp. 2241–2245, 2013.

[18] F. Alaca, A. Bin Sediq, and H. Yanikomeroglu, “A genetic algorithm based cell switch-off scheme for energy saving in dense cell deployments,” *2012 IEEE Globecom Work*, pp. 63–68, 2012.

[19] M. Ismail and W. Zhuang, “Network cooperation for energy saving in green radio communications”, *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 76–81, 2011.

[20] A. Kumar and C. Rosenberg, “Energy and Throughput Trade-Offs in Cellular Networks Using Base Station Switching”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 2, pp. 364–376, 2016.

[21] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, “Cell zooming for cost-efficient green cellular networks”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 11, pp. 74–79, 2010.

[22] E. Oh, K. Son, B. Krishnamachari, and a Motivation, “Dynamic Base Station Switching-on / off Strategies for Green Cellular Networks”, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2126 – 2136, 2013.

[23] Y. S. Soh, T. Q. S. Quek, M. Kountouris, and H. Shin, “Energy efficient heterogeneous cellular networks”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 5, pp. 840–850, 2013.

[24] J. Wu, S. Jin, L. Jiang, and G. Wang, “Dynamic switching off algorithms for pico base stations in heterogeneous cellular networks”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015.

[25] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3gpp tr 36.887,” vol. 0, no. Release 12, 2014.

- [26] G. Auer, O. Blume, and A. Others, “EARTH Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown,” 2011.
- [27] T. Specification, G. Radio, and A. Network, “3gpp tr 36.814,” vol. 0, no. Release 9, 2010.
- [28] G. Auer, V. Giannini, I. Godor, P. Skillermark, M. Olsson, M. A. Imran, D. Sabella, M. J. Gonzalez, C. Desset, and O. Blume, “Cellular Energy Efficiency Evaluation Framework,” 2011 IEEE 73rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), no. June, pp. 1-6, 2011.
- [29] G. Auer, V. Giannini, C. Desset, I. Gódor, P. Skillermark, M. Olsson, M. A. Imran, D. Sabella, M. J. Gonzalez, O. Blume, and A. Fehske, “How much energy is needed to run a wireless network?,” IEEE Wirel. Commun., vol. 18, no. 5, pp. 40-49, 2011.
- [30] ManyCities [Online]. Available: <http://www.manycities.org/> [Last accessed: May 2016]
- [31] M. Ismail and W. Zhuang, “Network cooperation for energy saving in green radio communications,” IEEE Wirel. Commun., vol. 18, no. 5, pp. 76-81, 2011.
- [32] D. Bertsekas, “Dynamic Programming and Optimal Control”, Athena Scientific, Third ed., vol. 1, pp. 2-23, 282-289, 2005.
- [33] Stanford University. Available: <http://online.stanford.edu/course/machine-learning>. [Last access: May 2016].
- [34] S. Bubeck and N. Cesa-Bianchi, “Regret Analysis of Stochastic and Nonstochastic Multi-armed Bandit Problems”, Foundations and Trends, vol. 5, pp. 2-14, 2012.
- [35] Matlab Software. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab>. [Last access: May 2016].