

Modelado y simulación de planificadores de recursos radio para una red LTE

Víctor Manuel Quintero-Flórez

Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia. Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL). Docente, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.
vflorez@unicauba.edu.co

Claudia Milena Hernández-Bonilla

Magister en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Docente, Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL). Docente, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.
claudiah@unicauba.edu.co

Darío Giraldo-Medina

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL), Estudiante pregrado, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.
dariogiraldo@unicauba.edu.co

Diego Fernando Uribe-Ante

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL), Estudiante pregrado, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia.
dfuribe@unicauba.edu.co

RESUMEN

Una de las principales características de LTE es la capacidad para realizar la asignación dinámica de recursos de radio disponibles en el sistema, haciendo uso de diferentes algoritmos de planificación. Este artículo describe el modelado de los tres algoritmos de planificación de recursos de radio básicos en enlace descendente LTE conocidos como *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*, su implementación en el Simulador Básico a Nivel de Sistema, y la simulación de un escenario específico para evaluar el rendimiento de cada algoritmo en capacidad (*throughput*) para una red LTE. Para cumplir con tal propósito se emplea una metodología lineal secuencial, empezando con una breve descripción de la tecnología LTE para contextualizar al lector; seguidamente se detallan las fases de diseño e implementación y finalmente se realizan procesos de simulación y pruebas en dos escenarios LTE específicos, con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de los planificadores de recursos radio implementados y determinar el impacto que tienen estas técnicas en la capacidad (*throughput*) que se puede llegar a alcanzar en una red LTE.

PALABRAS CLAVE

LTE, *throughput*, simulador, planificador, recursos radio

Modeling and simulation of radio resources schedulers for a LTE Network

ABSTRACT

One of the main features of LTE is the ability to perform the dynamic allocation of radio resources available in the system using different scheduling algorithms. This paper describes the modeling of the three basic radio resource scheduling algorithms in LTE downlink known as Round Robin, Proportional Fair and Maximun Rate, its implementation in the Basic System Level Simulator, and simulation on a specific scenario to evaluate the performance of each algorithm in capacity (*throughput*) for a LTE network. To accomplish this purpose a sequential

Recibido: 22/02/2016 Aceptado: 02/05/2016

<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2016v12n2.24229> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Como citar este artículo: QUINTERO-FLÓREZ, Víctor Manuel; HERNÁNDEZ-BONILLA, Claudia Milena; GIRALDO-MEDINA, Darío; URIBE-ANTE, Diego Fernando. Modelado y simulación de planificadores de recursos radio para una red LTE. En: Entramado. Julio - Diciembre, 2016. vol. 12, no. 2, p. 230-245, <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2016v12n2.24229>



linear method is used, beginning with a brief description of the LTE technology to contextualize the reader; then the phases of design and implementation are described and finally simulation and testing processes are performed on two specific scenarios LTE, in order to evaluate the performance of each radio resource scheduling algorithms modeled and to determine the impact of these techniques in the capacity (throughput) that can reach a LTE network.

KEY WORDS

LTE, throughput, simulator, scheduler, radio resources

Modelagem e simulação de planejadores de recursos de rádio para uma rede LTE

R E S U M O

Uma das principais características do LTE é a capacidade de executar a atribuição dinâmica de recursos de rádio disponíveis no sistema, o uso de diferentes algoritmos de escalonamento. Este artigo descreve a modelagem do recurso três algoritmos de planejamento de rádio LTE básico downlink conhecido e *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*; a sua implementação no Simulação Básica em Nível de Sistema e simulando um cenário específico para avaliar o desempenho de cada algoritmo de capacidade (*throughput*) para uma rede LTE. Para cumprir este propósito uma metodologia linear sequencial utilizado, começando com uma breve descrição da tecnologia LTE para contextualizar o leitor; em seguida, as fases de projeto e implementação são detalhados e, finalmente, processos de simulação e testes são realizados em dois cenários específicos LTE, a fim de avaliar o desempenho de cada um dos planejadores de recursos rádio implementadas e determinar o impacto destas técnicas na capacidade (*throughput*) que podem atingir uma rede LTE.

PALAVRAS-CHAVE

LTE, throughput, simulador, planejador, recursos de rádio

Introducción

Una de las principales características de la cuarta generación de telefonía móvil, específicamente en su estándar LTE, es la prestación de altas tasas de transmisión de datos, teniendo como requisito velocidades de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente; para cumplir tal objetivo las estrategias de planificación de recursos radio LTE juegan un papel determinante, ya que con una óptima asignación de recursos radio se puede llegar a límites cercanos a la máxima capacidad del sistema, sin embargo, si la asignación de recursos radio no es adecuada, este se estará subutilizando y por lo tanto su desempeño será pobre.

En este artículo se presentan los resultados del modelado e implementación de las estrategias de planificación de recursos radio en el simulador estático básico¹ a nivel de sistema para LTE desarrollado en el Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL) de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca en el año 2014, realizando un análisis detallado del desempeño del sistema y describiendo el *throughput* que este puede alcanzar a partir de unas características de escenario y de red definidas. El cuerpo del artículo se estructura de la siguiente forma: la sección II describe el marco teórico, en el cual se hace una descripción breve de la tecnología LTE y las estrategias de

planificación de recursos radio que esta emplea, la sección III detalla la metodología utilizada, y muestra el modelado de los algoritmos para cada uno de los planificadores de recursos radio, la sección IV presenta los resultados y análisis, y finalmente en la sección V se encuentran las conclusiones.

I. Marco teórico

En esta sección se describen las generalidades y características principales de la tecnología LTE, las estrategias de planificación de recursos radio y cómo estas administran los recursos disponibles en la red, además se definen los indicadores de desempeño a nivel de sistema utilizados para el análisis del desempeño en términos de capacidad.

I.I. Generalidades de la tecnología LTE

El proceso de evolución de las tecnologías móviles está comprendido en cuatro generaciones bien definidas, el objetivo de cada generación (excepto la primera) siempre ha sido el de optimizar y/o maximizar las prestaciones de la generación predecesora, aumentando su velocidad y eficiencia espectral, aspectos fundamentales que determinan el desempeño en el sistema.

Actualmente la cuarta generación de comunicaciones (4G, *Fourth Generation*) tiene como objetivo mejorar las pres-

taciones de las anteriores generaciones aumentando considerablemente la velocidad y la eficiencia espectral con una latencia mínima, lo que permitirá que el usuario tenga un servicio estable en cualquier parte del mundo con el mismo terminal móvil, satisfaciendo la demanda y exigencias del mercado (López, 2011).

La tecnología LTE (*Long Term Evolution*) de 4G es un estándar desarrollado por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), el cual ha garantizado la continuidad de la competitividad en la cadena de evolución de la telefonía móvil, con el objetivo de lograr la convergencia entre redes alámbricas e inalámbricas mediante el uso de toda clase de dispositivos electrónicos, además de optimizar el uso del espectro, reducir los costos, mejorar la calidad de servicio y brindar una mayor seguridad en la red (Guevara y Vásquez, 2013).

En la Figura 1 se resume el proceso de evolución de la telefonía móvil y en la Figura 2 se presentan las velocidades pico de transmisión de datos de cada tecnología, empezando desde la 2G hasta la actual 4G.

La cuarta generación de telefonía móvil en su estándar LTE debe ser capaz de ofrecer un desempeño superior en comparación con las redes 3GPP existentes basados en HSPA. El *throughput* pico de usuario debe ser como mínimo 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente, es decir, diez veces mayor que en HSPA; la latencia debe ser reducida con el fin de mejorar el desempeño a los usuarios finales, y de igual manera, el consumo de energía del terminal debe ser minimizado para permitir un mayor uso de las aplicaciones multimedia sin necesidad de recargar la batería.

Los principales requerimientos de LTE se enumeran a continuación:

- Eficiencia espectral dos a cuatro veces más que con HSPA.
- Tasas pico superiores a los 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente.
- Tiempo de round trip menor a 10 ms.
- Optimización de conmutación de paquetes.
- Alto nivel de movilidad y seguridad.
- Interoperabilidad con sistemas 3G y sistemas no 3GPP existentes (Sesia *et al.*, 2011).

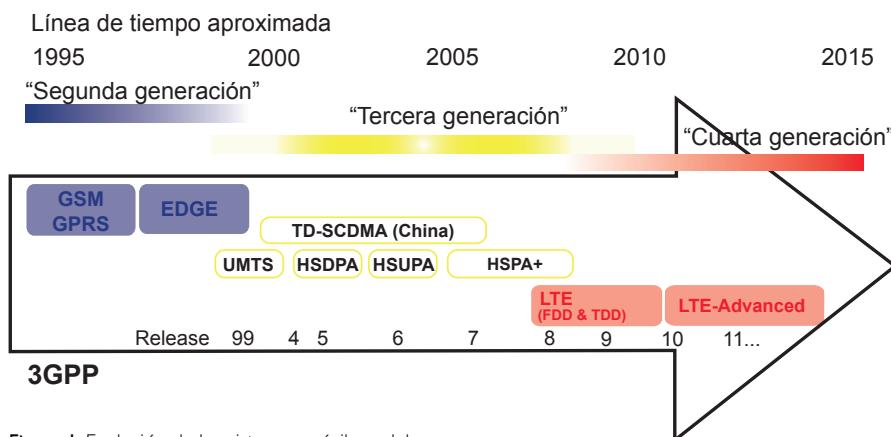


Figura 1. Evolución de los sistemas móviles celulares.
Fuente: Modificada de: Sesia, Toufik, Baker, 2011.

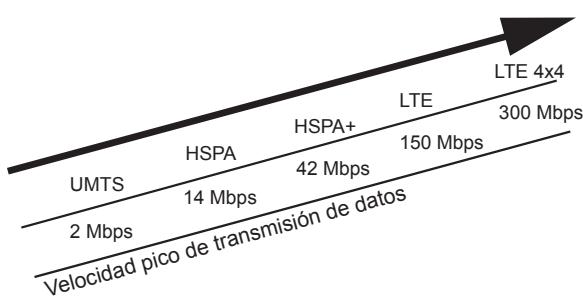


Figura 2. Velocidad pico de transmisión de datos de las diferentes tecnologías.
Fuente: Modificada de: Holma y Antti, 2009.

1.2. Arquitectura de LTE

La arquitectura LTE ha sido diseñada para soportar solamente servicios por Comunicación de Paquetes (PS, *Packet Switching*), en contraste con modelo de Comunicación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*) de los sistemas celulares anteriores. Su objetivo es ofrecer una conectividad transparente del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) entre el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) y la Red de Paquetes de Datos (PDN, *Packet Data Network*), sin interrumpir las aplicaciones de los usuarios finales durante la movilidad.

LTE abarca la evolución del acceso radio de la red móvil, definida formalmente por el 3GPP como Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (*E-UTRAN, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) acompañada de una evolución de aspectos no-radio denominada Evolución de Arquitectura del Sistema (*SAE, System Architecture Evolution*) la cual incluye el Núcleo de Paquetes Evolucionado (*EPC, Evolved Packet Core*) de la red. La integración de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC constituyen la red del sistema LTE llamada Sistema de Paquetes Evolucionado (*EPS, Evolved Packet System*) (Sesia et al., 2011).

La Figura 3 muestra la configuración general de la arquitectura LTE, dividida en cuatro dominios principales: Equipo de usuario, red de acceso E-UTRAN, red troncal EPC y el dominio de servicios.

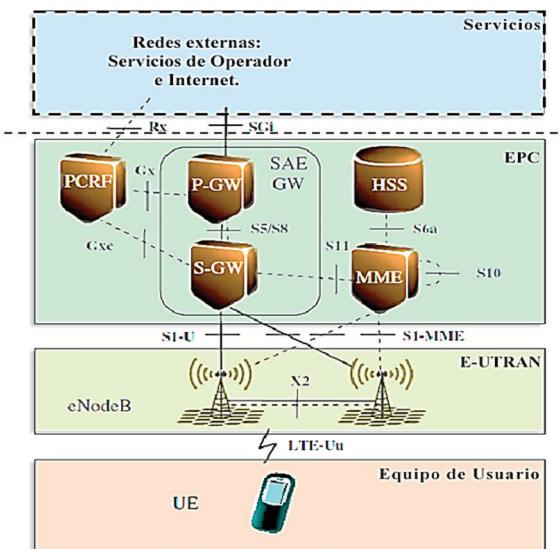


Figura 3. Arquitectura general del sistema LTE.
Fuente: Modificado de: (Holma y Antti, 2009)

Los dominios de esta arquitectura son funcionalmente equivalentes a los de los sistemas 3GPP existentes. El nuevo desarrollo arquitectónico se limita a los dominios E-UTRAN y el EPC. Los dominios UE y Servicios permanecen intactos arquitectónicamente, pero la evolución funcional también ha continuado en esas áreas.

1.3. Características de LTE

Con LTE se introduce una gran variedad de características respecto a los anteriores estándares, pero la principal innovación es que todos los servicios, incluida la voz, están soportados por el protocolo IP. Las velocidades que se pueden conseguir en la interfaz radio con LTE también aumentan respecto a la última generación, llegando a un rango de 100 Mbps y 1 Gbps (Agusti et al., 2010).

A continuación se presentan las características fundamentales de LTE que permiten brindar alta eficiencia espectral, reducción de latencia, mayor velocidad de transmisión de datos, mayor capacidad y cobertura del sistema.

1.3.1. Bloque de Recursos Físicos

Se define como Bloque de Recursos Físicos (*PRB, Physical Resource Block*) a la mínima unidad de recursos que un eNB puede asignar a un terminal móvil. En la Figura 4 se muestran las características de un PRB en tiempo y frecuencia.

Un PRB ocupa en frecuencia 180 KHz divididos en 12 subportadoras equiespaciadas de 15 KHz cada una y en tiempo un slot equivale a 0.5 ms repartidos en 7 símbolos OFDMA, a su vez, un PRB está conformado por 84 elementos de recurso y cada elemento puede transportar 2, 4 o 6 bits dependiendo de si la modulación asignada al usuario es QPSK, 16 QAM o 64 QAM (Agusti et al., 2010).

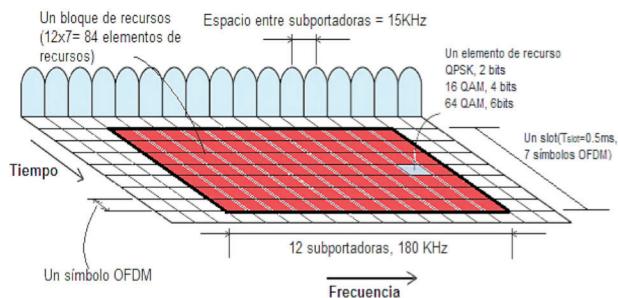


Figura 4. Bloque de recursos físicos.
Fuente: Modificada de Karlsson y Riback, 2008

1.3.2. Ancho de banda variable

La interfaz radio de LTE basada en OFDMA ofrece una gran flexibilidad al desplegar el sistema dentro de una determinada banda, donde idealmente cualquier ancho de banda puede ser usado (en pasos de 180 kHz correspondientes al ancho de banda de un PRB). No obstante, para facilitar la operación, LTE define un subconjunto de anchos de banda posibles, como se muestra en la Tabla I.

Tabla I.

Bloques de recursos vs ancho de banda.

| Ancho de banda del canal (MHz) | Número de PRB |
|--------------------------------|---------------|
| 1.4 | 6 |
| 3 | 15 |
| 5 | 25 |
| 10 | 50 |
| 15 | 75 |
| 20 | 100 |

Fuente: Tomada de: (3GPP, 2011)

1.4. Indicadores de desempeño para LTE

El análisis del desempeño de las redes toma gran importancia, ya que permite conocer, entre otros aspectos, el estado de sus enlaces. Como herramientas de este análisis se encuentran los indicadores de desempeño, los cuales se describirán a continuación.

1.4.1. Relación señal a interferencia más ruido

En teoría de la información y la ingeniería de telecomunicaciones, la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) es un indicador utilizado para dar límites superiores teóricos sobre la capacidad del canal (o la tasa de transferencia de información) en los sistemas de comunicación inalámbrica. La SINR se define como la potencia de una cierta señal de interés, dividido por la suma de la potencia de interferencia y la potencia de ruido presente en el enlace. La ecuación 1 describe la SINR percibida por un equipo de usuario en el sistema LTE.

$$\text{SINR} = \frac{P_{rx}}{P_i + P_N} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,

P_{rx} Valor de la relación señal a interferencia más ruido percibida por un usuario objetivo en un eNB objetivo [dB].

P_i Potencia de la señal recibida por un usuario objetivo de un eNB objetivo [Watts].

P_j Potencia interferente co-canal total recibida por un usuario objetivo de los eNB vecinos [Watts].

P_N Potencia de ruido térmico [Watts].

En LTE se definen los valores de SINR requeridos, que debe percibir un equipo de usuario para alcanzar una BER objetivo.

1.4.2. Probabilidad de degradación

Como parámetro básico para determinar el límite de capacidad del sistema está la posibilidad de que, en un momento dado, no puedan ser atendidos todos los usuarios con la calidad de servicio objetivo. Esta probabilidad de degradación global se define como la posibilidad de que la SINR percibida por los usuarios del sistema sea inferior a una SINR objetivo y sustituye el concepto de grado de servicio o probabilidad de bloqueo de los sistemas clásicos; el sistema alcanza su límite de capacidad cuando la probabilidad de degradación se hace igual a un valor máximo permitido (Mendo, 2001).

1.4.3. Probabilidad de interrupción

La probabilidad de interrupción en un sistema de comunicación móvil celular se describe como una degradación muy intensa de la señal que supone un corte del servicio y se define como la posibilidad de que la SINR percibida por los usuarios sea menor a un valor de SINR mínimo e indica que a estos usuarios no se les presta servicio. Se considera como una interrupción al tiempo en el que se produce un corte parcial o total de la señal, aparece un ruido o una BER excesiva, surge una fuerte discontinuidad en la señal o una distorsión intensa.

1.4.4. Indicador de Calidad del Canal

El Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), revela el estado del canal de comunicación en el enlace descendente. El CQI depende principalmente de la SINR, una tasa alta de datos sólo puede ser recibida exitosamente con un valor alto de SINR. La razón para usar una cantidad de CQI como retroalimentación en lugar de, por ejemplo, la relación señal a ruido, es porque basándose en los informes de retroalimentación sobre CQI se simplifica la comprobación de terminales (Dahlman, Parkvall y Skold, 2011).

1.4.5. Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

El Esquema de Modulación y Codificación es determinado por el eNB, de acuerdo con el CQI proporcionado por el terminal móvil. Con el índice MCS se le informa al UE la tasa de codificación y el orden de modulación con la que debe realizar su transmisión. El eNB puede asignar cualquier MCS cuyo índice sea inferior o igual al indicado en el CQI, con lo cual se garantiza una BLER inferior al 10% (Agusti *et al.*, 2010).

1.4.6. Throughput

El throughput o capacidad del sistema se define como la velocidad de transmisión de datos total, incluidos los datos de usuario e información de señalización y control que es entregada sin errores.

El cálculo de throughput se realiza a partir del índice MCS y del número de PRB de cada usuario, según la ecuación 2:

$$\text{Throughput}_{\text{usuario}} = \frac{TBS * nPRB}{\text{subrama}} * 1000 \frac{\text{subramas}}{\text{segundo}}$$

Donde,

$\text{Throughput}_{\text{usuario}}$ Cantidad de información que puede transportar una subrama [bit].

| | |
|------------------------|--|
| <i>TBS</i> | Tamaño del bloque de transporte [bit]. |
| <i>n_{PRB}</i> | Número de bloques de recursos físicos asignado al usuario. |

1.5. Planificación de paquetes

La planificación de paquetes en LTE consiste en asignar de forma dinámica recursos radio a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones ordenadamente, a través de la interfaz radio LTE. El planificador de paquetes debe considerar varios indicadores como el volumen de tráfico, la calidad del canal, el estado del buffer y los requisitos de calidad de servicio (QoS) para cada terminal móvil, identificados a través de las mediciones realizadas en el eNB y/o reportados por el UE para lograr una óptima asignación de recursos entre todos los usuarios del sistema (Ramis, Carrasco, Femenias y Riera, 2010).

En LTE el planificador reside en el eNB, tanto para el DL como para el UL, este mecanismo centralizado asegura ortogonalidad en las transmisiones, aunque requiere de señalización entre los usuarios y el eNB para reportar, entre otras cosas, el estado del canal y del buffer ya que no tendría sentido asignar recursos en una subtrama a un terminal con un excelente canal pero que no tiene información a transmitir. Es importante destacar que, aunque la función de planificación se ejecuta en cada eNB, el planificador podría considerar determinadas restricciones o preferencias provenientes de otros eNB a la hora de asignar algunos de los recursos de la interfaz radio, con el objetivo de coordinar sus decisiones y mitigar la interferencia intercelula.

1.6. Estrategias de planificación LTE

Existe un gran número de planificadores de recursos para las redes inalámbricas, la mayoría de los cuales se derivan de los algoritmos diseñados para redes cableadas. En la tecnología LTE los planificadores de recursos, entre otros aspectos, deben ser capaces de manejar un modelo del canal adaptativo con múltiples estados posibles debido a la hostilidad y naturaleza cambiante de éste, deben gestionar diferentes tipos de tráfico, garantizando sus requisitos de QoS, de igual manera deben garantizar una repartición justa, adecuada y eficiente de los recursos entre los terminales móviles y finalmente deben programar las transmisiones de manera que se incremente la capacidad del sistema para asegurar que el número de transmisiones simultáneas previstas no provoque un exceso de interferencia (Ramis et al., 2010).

Entre las diferentes estrategias de planificación de recursos radio existentes, las denominadas *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximum Rate* son las que satisfacen de mejor manera las características anteriores y por tal motivo son empleadas generalmente por LTE. A continuación se describen dichas estrategias de planificación.

• Round Robin (RR)

En los sistemas LTE, donde varios usuarios comparten los recursos de red en la celda, el planificador RR distribuye los Bloques de Recursos Radio (PRB, *Physical Resource Block*) de manera equitativa y en un orden racional, normalmente comenzando por el primer UE solicitante hasta llegar al último sin tener en cuenta las condiciones del canal radio, por lo tanto, es una estrategia justa en el sentido de que cada usuario tiene asignado el mismo ancho de banda durante toda la transmisión, sin embargo, aquellos usuarios que presenten las peores condiciones serán incapaces de utilizar los PRBs asignados lo cual se traducirá en un bajo throughput de la celda y por lo tanto del sistema.

• Proporcional y Justo (PF, Proportional Fair)

Es una estrategia de planificación de recursos radio, basada en el mantenimiento de un equilibrio entre dos intereses contrapuestos: maximizar el desempeño total de la red y permitir a todos los UE al menos un nivel mínimo de servicio. Para cumplir tal objetivo, PF otorga a cada usuario del sistema una prioridad de asignación (P) la cual será inversamente proporcional al consumo de recursos previsto.

Esta estrategia de planificación tiene en cuenta el estado del canal radio para realizar la asignación de recursos, priorizando a los usuarios que tengan las mejores condiciones, de igual manera asegura el cumplimiento del criterio de justicia proporcional dado que al seleccionar un usuario incrementa su throughput y reduce su P para seguir asignando recursos a los demás UEs, garantizando que a todos se les asigne al menos un PRB en cada subtrama (Ramis et al., 2010).

• Máxima Velocidad (MR, Maximum Rate)

Esta estrategia de planificación selecciona a los usuarios que experimentan las mejores condiciones del canal radio en cada subtrama para asignarles los PRBs disponibles. MR permite maximizar la capacidad del sistema gracias a la diversidad multiusuario, ya que si el número de usuarios es suficientemente grande, la probabilidad, de encontrar a uno de ellos que pueda transmitir en tasas cercanas a la máxima capacidad será mayor, sin embargo, MR no es justo en algunos escenarios donde un usuario que experimente una calidad del canal superior al resto (por estar muy cerca al eNB) obtendrá casi siempre todos los PRBs, impidiendo las transmisiones de los demás usuarios, lo que es inaceptable desde el punto de vista de la QoS del sistema (Agusti et al., 2010).

2. Metodología

La metodología utilizada en el desarrollo del trabajo se basó en el modelo lineal secuencial, como se muestra en la Figura 5, que en líneas generales se define como participativa, activa, flexible, didáctica y de diálogo. Este modelo sugiere un enfoque sistemático en donde el desarrollo de software sigue unas etapas bien definidas que deben cumplirse de forma lineal y ordenada para alcanzar los objetivos propuestos (Pressman, 2002).

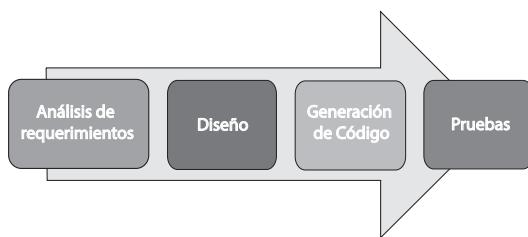


Figura 5. Modelo de desarrollo de software lineal secuencial.

Fuente: Adaptada de Pressman, 2002

- 1. Análisis de requerimientos:** Etapa dirigida al análisis detallado de los requerimientos y definición concreta de los objetivos del trabajo a desarrollar, se tuvo como punto de partida el estudio del simulador estático básico a nivel de sistema para LTE que se desarrolló previamente en la institución.
- 2. Diseño:** Detalla el proceso que se siguió para la integración de los planificadores de recursos radio en el simulador estático básico a nivel de sistema para LTE y el plan de pruebas.
- 3. Implementación:** Comprende la generación de código para los planificadores *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* e integración en el simulador estático básico a nivel de sistema para LTE.
- 4. Pruebas:** Durante esta etapa se comprobó que no se hubieran cometido errores en alguna de las fases anteriores, especialmente en la generación de código.

2.1. Problema de estudio

El desempeño de un sistema LTE está estrechamente relacionado con la estrategia de planificación de recursos radio empleada, ya sea *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate* debido a que en cada caso se manejan diferentes parámetros y condiciones para la asignación de recursos radio en la red. El simulador básico a nivel de sistema para LTE permite realizar un análisis del desempeño y cobertura del sistema, describiendo el *throughput* que este puede alcanzar para unas características de escenario y de red definidas empleando la estrategia de planificación de recursos radio *Round Robin*, sin embargo, esto no es suficiente para un

análisis completo en la red, pues el *throughput* que se puede alcanzar con las estrategias de planificación de recursos radio *Proportional Fair* o *Maximun Rate* es teóricamente más alto y por tanto se podría obtener un desempeño mucho mayor en el sistema.

Dados los anteriores argumentos, es clara la necesidad de modelar e implementar en el simulador básico a nivel de sistema para LTE algoritmos que permitan simular las estrategias de planificación de recursos radio *Proportional Fair* y *Maximun Rate* en el sistema, con lo cual será posible realizar un análisis mucho más completo de su desempeño tanto en capacidad como en cobertura.

2.2. Modelado de Algoritmos para los Planificadores de Recursos Radio LTE

En sistemas LTE cada usuario posee una prioridad de asignación de recursos radio (P) a partir de la cual es posible distribuir a los PRBs disponibles, para el cálculo de dicha prioridad se deben monitorizar dos parámetros: la tasa máxima a la que puede transmitir cada UE en el siguiente intervalo de planificación según la SINR medida (T), y la tasa promedio a la que se ha estado transmitiendo en la celda (R) (Barayan y Kostanic, 2013). Se define la siguiente ecuación para el cálculo de P :

$$P = \frac{T^\alpha}{R^\beta} \quad \text{Ec. 3}$$

Mediante el ajuste de los coeficientes de priorización α y β , se determina la estrategia de planificación a usar, de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2.
Coeficientes de priorización.

| Tipo de planificador | Coeficientes de priorización | |
|----------------------|------------------------------|-------------|
| RR | $\alpha = 0$ | $\beta = 1$ |
| PF | $\alpha = 1$ | $\beta = 1$ |
| MR | $\alpha = 1$ | $\beta = 0$ |

Fuente: La investigación

A continuación se hace una descripción detallada de los algoritmos modelados para los planificadores de recursos radio LTE.

Modelado del algoritmo para el planificador de recursos radio Round Robin

Para este caso los coeficientes de priorización α y β son 0 y 1 respectivamente; reemplazando en la ecuación 3 se tiene:

$$P = \frac{1}{R} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde R es igual para cada UE, de manera que la prioridad de asignación P es independiente de las condiciones de canal radio del usuario y por consiguiente su valor será el mismo para todos.

La Figura 6 muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Round Robin*.

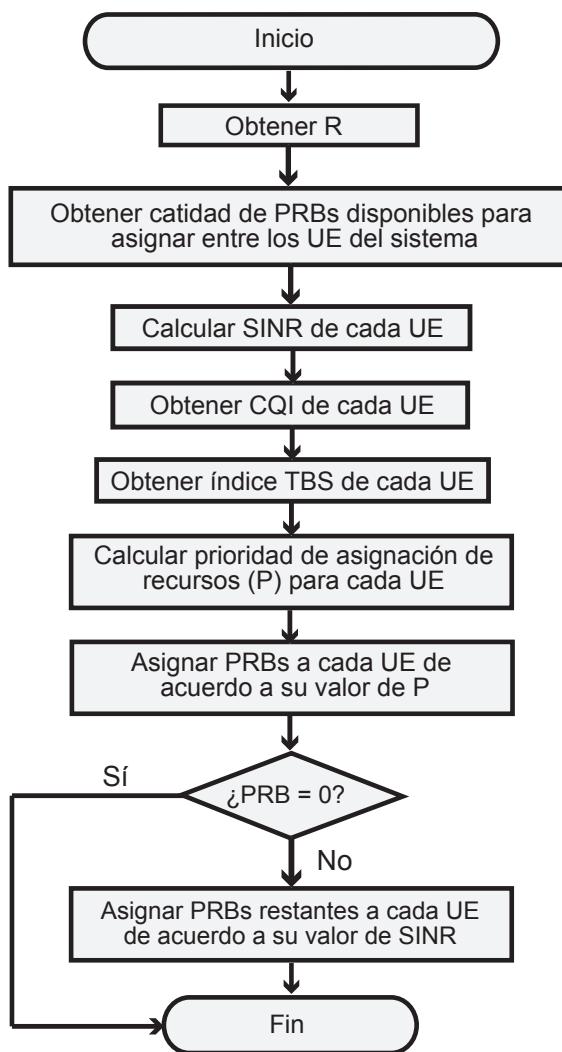


Figura 6. Diagrama de flujo para planificador RR

Modelado del algoritmo para el planificador de recursos radio Proportional Fair

En PF los coeficientes de priorización α y β son 1 y 1 respectivamente, reemplazando en la ecuación 3 se tiene:

$$P = \frac{T}{R} \quad \text{Ec. 5}$$

Las condiciones del canal radio de cada usuario determinan el valor de T , la que a su vez afecta el valor de P de manera directamente proporcional.

La Figura 7 muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Proportional Fair*.

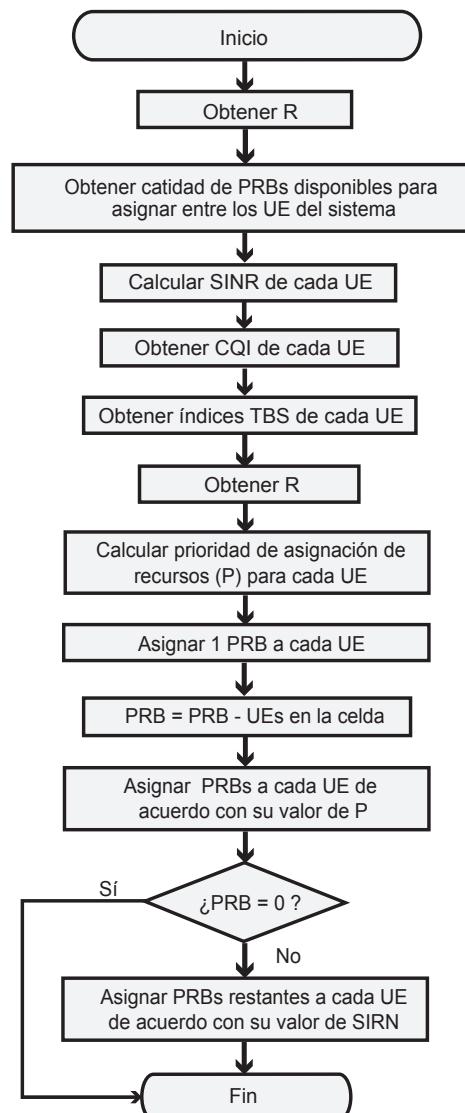


Figura 7. Diagrama de flujo para planificador PF

Modelado del algoritmo para el planificador de recursos radio Maximum Rate

En este caso, los PRBs son asignados a los usuarios cuya SINR sea mayor o igual a la SINR objetivo del sistema, en

caso de que ningún UE cumpla dicho requisito, los PRBs serán asignados al usuario con las mejores condiciones de canal radio.

Los coeficientes de priorización α y β serán 1 y 0 respectivamente, reemplazando en la ecuación 3 se tiene:

$$P = T \quad \text{Ec. 6}$$

En la Figura 8 se muestra el diagrama de flujo desarrollado para modelar el algoritmo del planificador de recursos radio *Maximun Rate*.

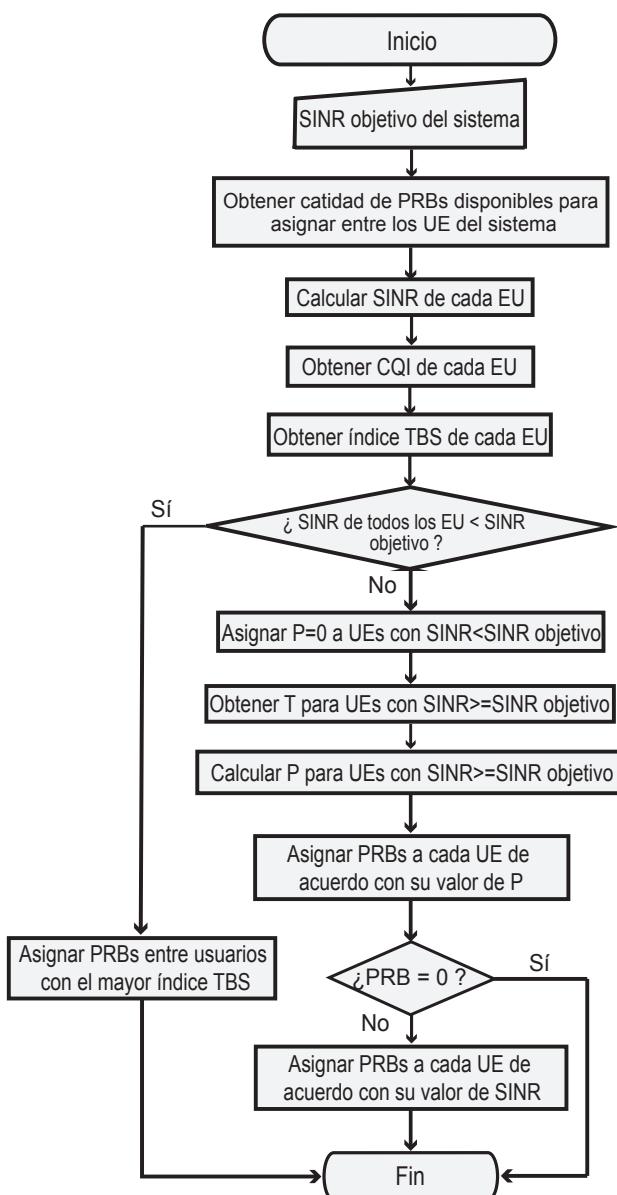


Figura 8. Diagrama de flujo para planificador MR

Es importante mencionar que los flujos de información de los UEs del sistema son ubicados por cada planificador de recursos radio en una estructura de frecuencia-tiempo definida como Bloque de Recursos de Planificación (SRB, *Scheduling Resource Block*), formada por dos PRB, es decir, que tienen 180 KHz de ancho y un tiempo de duración igual a una subtrama (1mseg) de largo. Dicha duración corresponde con la mínima granularidad temporal en la asignación de recursos radio (Cáceres, 2014).

3. Resultados y análisis

3.1. Definición del Escenario de Simulación

Las condiciones sobre las cuales se desarrolla la simulación tratan de 4 celdas hexagonales sectorizadas cada 120°, en el centro de cada celda se encuentra el eNB, este usa 3 antenas Katherein 742215 direccionaladas hacia cada sector, transmitiendo a una potencia de 20W. Se estableció en el sistema una SINR mínima de -6.7dB y una SINR objetivo de 4.3 dB, la primera representa el valor mínimo necesario para que el eNB le asigne recursos al UE, y la segunda determina la probabilidad de que el servicio se degrade, al considerar que a los usuarios que perciben una SINR por debajo de este valor se les asigna el esquema de modulación QPSK.

El resumen de los aspectos más importantes de la simulación se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3.
Parámetros de simulación

| Parámetros | Valor |
|---|--|
| Disposición de las celdas | 4 celdas hexagonales |
| Patrón de antena | Antena directiva |
| Número de antenas transmisoras | 1 |
| Número de antenas receptoras | 1 |
| Reuso de frecuencia | 1 |
| Potencia de transmisión eNB [W] | 20 |
| Frecuencia de transmisión [MHz] | 1900 |
| Tipo de antena | Katherein 742215 |
| Modelo de propagación | COST 231 macro urbano |
| Desvanecimiento | Lento |
| Algoritmos de planificación | Round Robin, Proportional Fair, Maximun Rate |
| Radio de la celda (Km) | 1 |
| Espacio entre subportadoras | 15 KHz |
| Ancho de banda de un PRB | 180 KHz |
| Ruido térmico (No) | -174dBm/Hz |
| Duración subtrama | 1 mseg |
| Duración de la trama | 10 mseg |
| Número de usuarios por sector (distribuidos aleatoriamente) | 5 |

Fuente: La investigación

Caso de Estudio I

El objetivo se centra en evaluar el desempeño de los planificadores de recursos radio en términos de la capacidad del sistema, se establece el ancho de banda del sistema en 20 MHz y se analiza bajo desvanecimiento lento.

El simulador básico a nivel de sistema para LTE con planificadores de recursos radio integrados despliega el modelo de las celdas y distribución de los UE, como se muestra en la Figura 9. Esta permite hacer una predicción de los resultados obtenidos a partir de la distancia a la cual está separado cada usuario del eNB, pues a mayor distancia y sin ningún tipo de desvanecimiento se espera que la potencia que perciba el UE sea menor en comparación con la de los que se encuentran más cerca al eNB, lo que se traduce en bajos niveles de SINR y throughput.

El simulador además permite desplegar las gráficas de throughput por celda y por sistema, de SINR por UE y los SRBs asignados a cada usuario según el planificador.

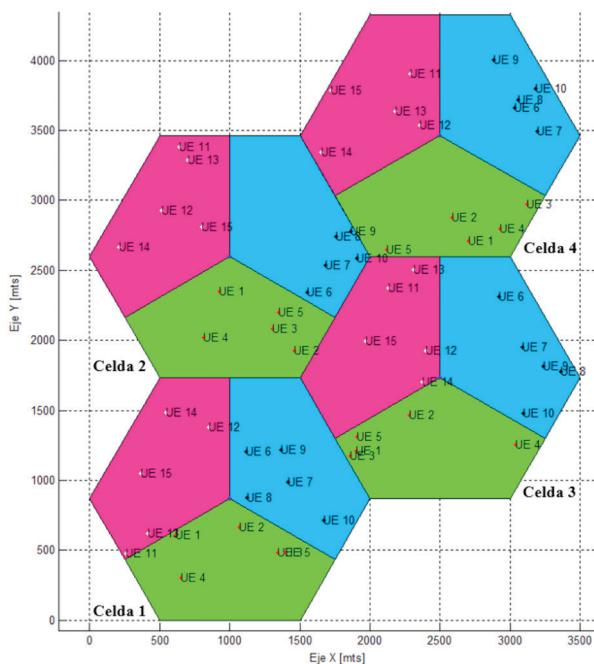


Figura 9. Escenario de simulación

A continuación se realiza una descripción de la asignación de SRBs entre los UEs de la celda 1, empleando las diferentes estrategias de planificación de recursos radio LTE.

En la Figura 10 se muestra la distribución de los SRBs empleando la estrategia de planificación RR, se observa que la asignación de recursos radio entre los usuarios es equitativa, dándole a cada uno 6 SRBs por subtrama. Para este

caso, aquellos usuarios que presenten malas condiciones del canal radio serán incapaces de utilizar todos los SRBs que les fueron asignados, mientras los que presentan buenas condiciones de canal no podrán explotar dicha ventaja pues los SRBs asignados son muy pocos.

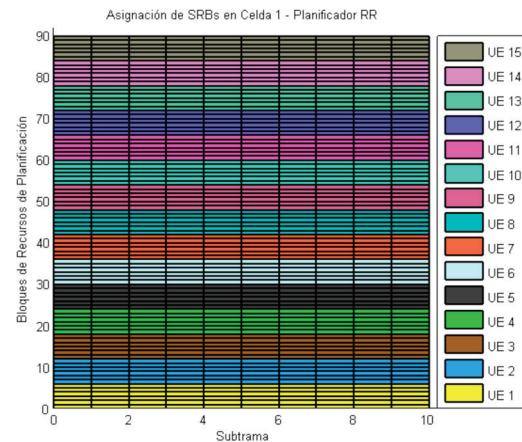


Figura 10. Asignación de SRBs por el planificador RR

La Figura 11 ilustra la distribución de los SRBs del sistema a partir de la estrategia de planificación PF en la cual se puede apreciar que a todos los UE se les asignó por lo menos un SRB por subtrama. Además se observa que al UE 2 y UE 8 se les ha asignado la mayor cantidad de SRBs en cada subtrama como se esperaba, pues son los usuarios que se hallan más cerca del eNB y por lo tanto tendrán las mejores condiciones de canal radio.

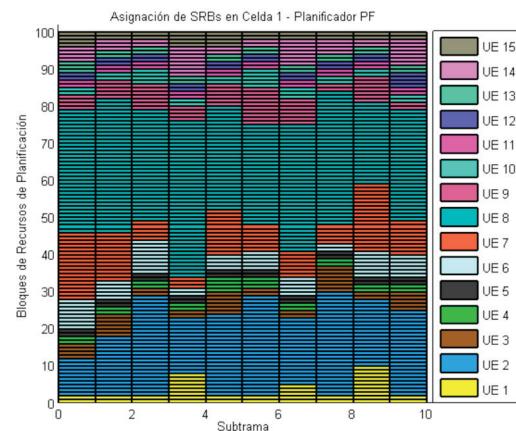


Figura 11. Asignación de SRBs por el planificador PF

Finalmente, en la Figura 12 se tiene la distribución de SRBs a partir de la estrategia de planificación MR. Se observa que solo se asignaron recursos a unos pocos usuarios, estos son los que lograron obtener una SINR que supera la SINR objetivo del sistema (4.3dB), al resto no le prestó el servicio pues no superan dicho valor y el planificador los descarta durante el proceso de asignación de SRBs.

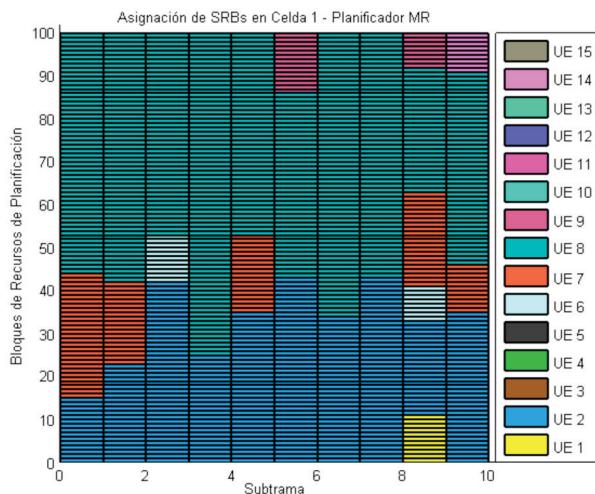


Figura 12. Asignación de SRBs por el planificador MR

La Figura 13 muestra el comportamiento del UE 7, se observa que su SINR tiene un comportamiento dinámico debido al desvanecimiento lento que revela el sistema y específicamente en las subtramas 3, 4, 6, 7 y 8 presenta valores inferiores a la SINR objetivo del sistema. También se puede observar la relación de la SINR de este usuario con los SRBs que se le han asignado, de esta manera: el planificador RR le asignó la misma cantidad de SRBs sin tener en cuenta su SINR, el planificador PF hizo una asignación de SRBs más eficiente pues en cada subtrama intenta ceñirse al nivel de SINR y finalmente el planificador MR le asignó SRBs cuando sus niveles de SINR son superiores a la SINR objetivo, en caso contrario no le asignó SRBs.

En la celda 1 el planificador MR permitió alcanzar una *throughput* promedio de 52 Mbps, mientras que con los planificadores PF y RR se logró una *throughput* promedio de 35 Mbps y 10 Mbps respectivamente, como se muestra en la Figura 14.

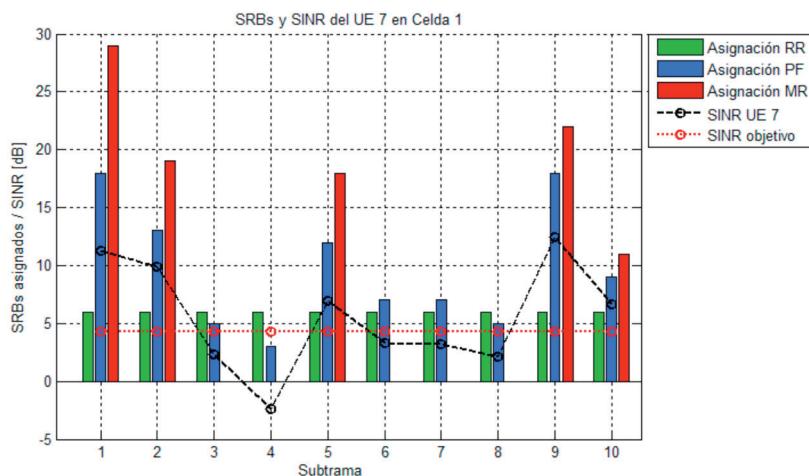


Figura 13. SRBs y SINR del UE 7 en Celda 1

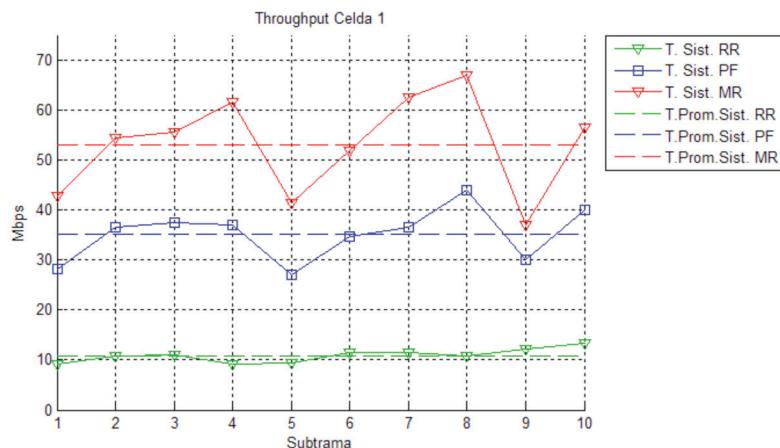


Figura 14. Throughput de celda 1 en cada subtrama

En la Figura 15 se presenta la Función de Distribución Acumulativa (*CDF, Cumulative Distribution Function*) para el *throughput* total del sistema, se observa que con el planificador RR se obtiene el desempeño más pobre en el sistema, debido a que los UEs con las peores condiciones de canal radio subutilizan los SRBs asignados por el eNB y el *throughput* total que se puede alcanzar se verá disminuido, por el contrario con el planificador MR alcanzó el mayor desempeño en el sistema pues los SRBs se asignaron a los UEs con las mejores condiciones del canal, permitiéndoles alcanzar altos *throughputs* en cada subtrama, sin embargo, varios usuarios del sistema no serán servidos lo cual es inaceptable en todo sistema celular, finalmente se observa que con el planificador PF se tiene un balance entre los planificadores de recursos radio RR y MR pues este le asigna una cantidad de SRBs justa a cada UE de acuerdo con sus condiciones de canal.

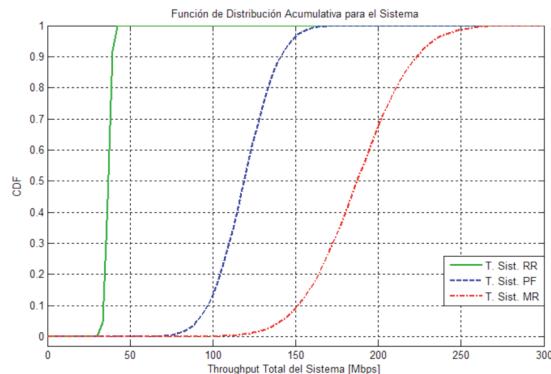


Figura 15. Función de distribución acumulativa para el *Throughput* total del sistema

Finalmente, en la Figura 16 se muestra el *throughput* total del sistema, se puede observar que el planificador MR permitió alcanzar una *throughput* promedio de 190 Mbps, mientras que con los planificadores PF y RR se alcanzó una *throughput* promedio de 120 Mbps y 40 Mbps, respectivamente.

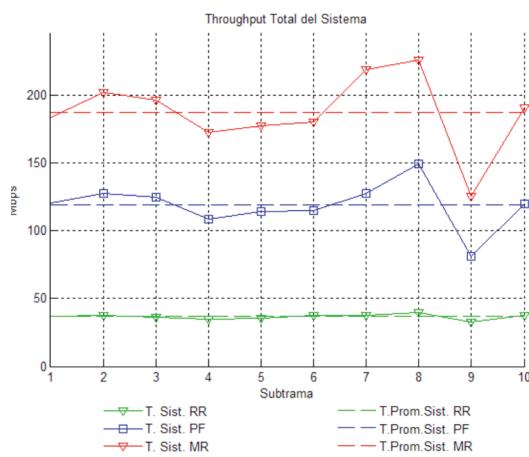


Figura 16. *Throughput* total del sistema en cada subtrama

Caso de Estudio 2

El objetivo es evaluar el desempeño en capacidad de un sistema LTE cuando se varía el ancho de banda, empleando los planificadores de recursos radio *Round Robin*, *Proportional Fair* y *Maximun Rate*. Se establecieron los parámetros definidos en la Tabla 3, los anchos de banda son 5 MHz y 15 MHz²

Para este caso de estudio, el escenario generado por la herramienta desarrollada se muestra en la Figura 17.

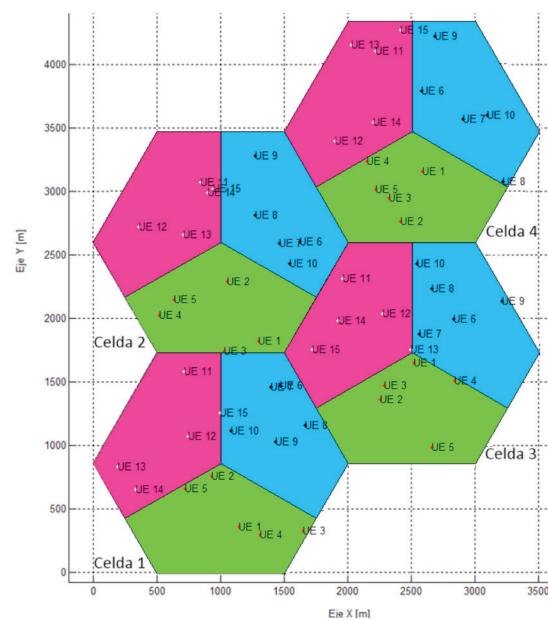


Figura 17. Escenario de simulación para el caso de estudio 2

A continuación se hace una descripción detallada de la asignación de SRB llevada a cabo por los planificadores de recursos radio LTE para los 15 UE de la celda 1, empleando los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz.

• Planificador Round Robin

En este caso se le asignó a todos los UE del sistema la misma cantidad de SRB, sin tener en cuenta sus condiciones de canal radio como se muestra en la Figura 18.

Se observa que el planificador RR no hizo una asignación eficiente cuando el ancho de banda fue de 5 MHz, pues solo asignó 15 de los 25 SRB disponibles, debido a que dividió la cantidad de SRB entre el número total de UE obteniendo 1.66 SRB/UE y por lo tanto asignó la parte entera inferior, correspondiente a 1 SRB/UE, con lo cual el sistema fue subutilizado, por otra parte, con el ancho de banda de 15 MHz no ocurrió el mismo problema, pues el número de UE y SRB disponibles son múltiplos, lo cual asegura que todos los SRB sean asignados.

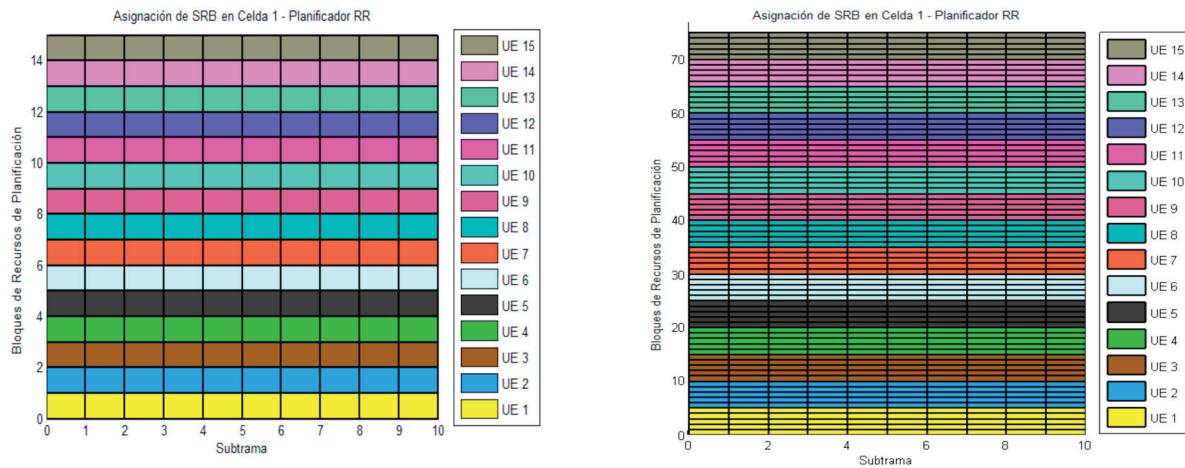


Figura 18. Asignación de SRB por el planificador RR en celda 1

- **Planificador Proportional Fair**

En la Figura 19 se muestra la asignación de recursos radio llevada a cabo por este planificador. Al variar el ancho de banda en el sistema se tiene una cantidad diferente de SRB para asignar; cuando se emplea un ancho de banda de 5 MHz se tienen 25 SRB disponibles, el planificador PF asigna 1 SRB a cada UE y seguidamente asigna los 10 SRB restantes, teniendo como criterio dar una mayor prioridad de asignación a los UE que presentan los niveles de SINR más altos; por otra parte, cuando se emplea un ancho de banda de 15 MHz se tienen 75 SRB disponibles, después de asignar 1 SRB a cada UE se tienen 60 SRB restantes, los cuales son asignados siguiendo el criterio anterior.

La asignación de recursos radio por parte del planificador PF es más eficiente cuanto mayor sea el ancho de banda del sistema, ya que se tienen más SRB disponibles y se le puede asignar una mayor cantidad a los UE que presenten los niveles de SINR más elevados, con lo cual el desempeño en capacidad del sistema aumenta notablemente.

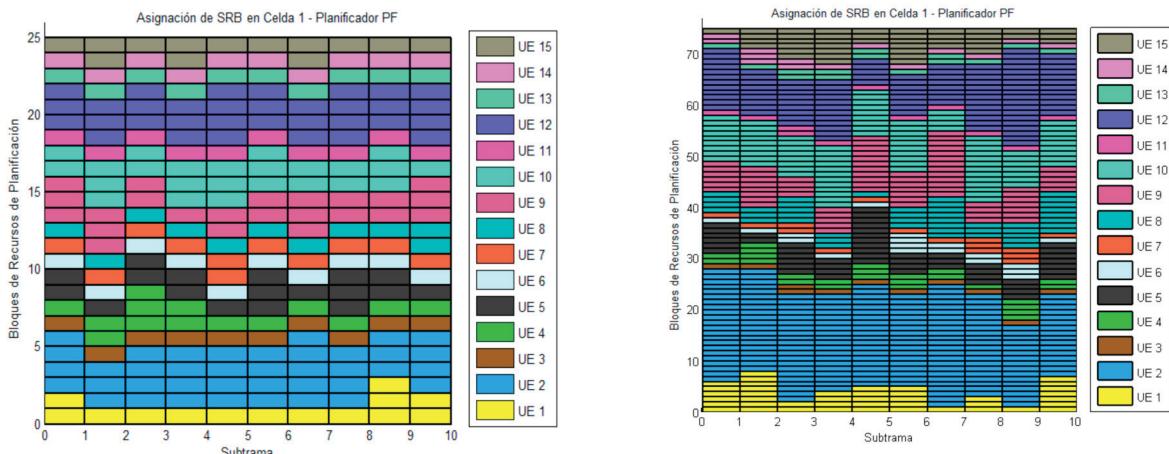


Figura 19. Asignación de SRB por el planificador PF en celda 1

- **Planificador Maximum Rate**

En este caso, los SRB disponibles de cada ancho de banda solo son asignados a los usuarios cuya SINR sea superior a la SINR objetivo. Los UE 2, UE 10 y UE 12 tienen los niveles más altos de SINR en la celda 1 y por lo tanto se les asignó la mayor cantidad de SRB en cada subrama, como se puede observar en la Figura 20.

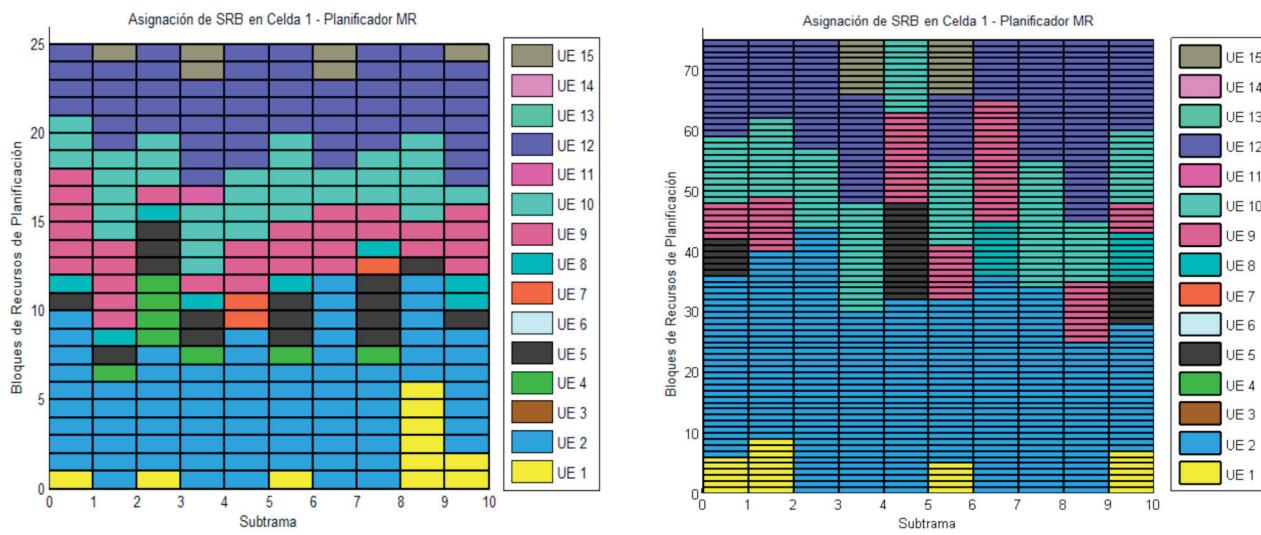


Figura 20. Asignación de SRB por el planificador MR en celda 1

Teniendo en cuenta que el planificador MR descarta en el proceso de asignación a los UE que no superan la SINR objetivo, este tiene una mayor cantidad de SRB para asignar entre los UE que superan dicho nivel, con lo cual el sistema trabaja en límites cercanos a su máxima capacidad, dado que los UE pueden alcanzar altas tasas de transmisión de datos. Al igual que con el planificador PF, el planificador MR es más eficiente cuanto mayor sea el ancho de banda del sistema, ya que se tienen más SRB disponibles para asignar a los UE cuya SINR supere el nivel de la SINR objetivo.

4. Resultados y análisis del sistema

La Tabla 4 presenta los valores de media, mediana y desviación estándar del throughput en el sistema según el tipo de planificador, para los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz.

En la Tabla 4 se observa que al emplearse un ancho de banda de 5 MHz, los planificadores MR, PF y RR permitieron alcanzar un throughput promedio de 48.5 Mbps, 31.2 Mbps y 11.8 Mbps respectivamente, por otra parte, cuando se

empleó un ancho de banda de 15 MHz, el planificador MR permitió lograr un *throughput* promedio de 130.2 Mbps, y los planificadores PF y RR permitieron un *throughput* promedio de 98.1 Mbps y 47.1 Mbps respectivamente.

La Figura 21 presenta la función de distribución acumulativa del *throughput* en el sistema, cuando se emplean los anchos de banda de 5MHz y 15MHz.

Se observa que para los anchos de banda de 5 MHz y 15 MHz, el planificador MR tuvo las probabilidades más altas de alcanzar un determinado valor de *throughput* en comparación con los planificadores PF y RR, describiendo un comportamiento similar al de la celda 1.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el análisis realizado por cada planificador y en el sistema, se comprobó que al seleccionar el mismo tipo de planificador de recursos radio, ya sea RR, PF o MR, el desempeño en capacidad (medido en *throughput*) que se puede alcanzar en el sistema es mayor, cuanto mayor sea el ancho de banda empleado.

Tabla 4.

Medidas estadísticas del throughput total en el sistema.

| Tipo de Planificador | Media | | Throughput (Mbps) | | Mediana Throughput (Mbps) | | Desv. Estándar Throughput (Mbps) | |
|----------------------|---------|----------|-------------------|----------|---------------------------|----------|----------------------------------|----------|
| | BW 5MHz | BW 15MHz | BW 5MHz | BW 15MHz | BW 5MHz | BW 15MHz | BW 5MHz | BW 15MHz |
| RR | 11.875 | 47.132 | 11.975 | 46.563 | 0.437 | 1.679 | | |
| PF | 31.263 | 98.115 | 31.452 | 97.458 | 1.322 | 6.354 | | |
| MR | 48.576 | 130.236 | 48.634 | 128.64 | 2.058 | 7.854 | | |

Fuente: La investigación

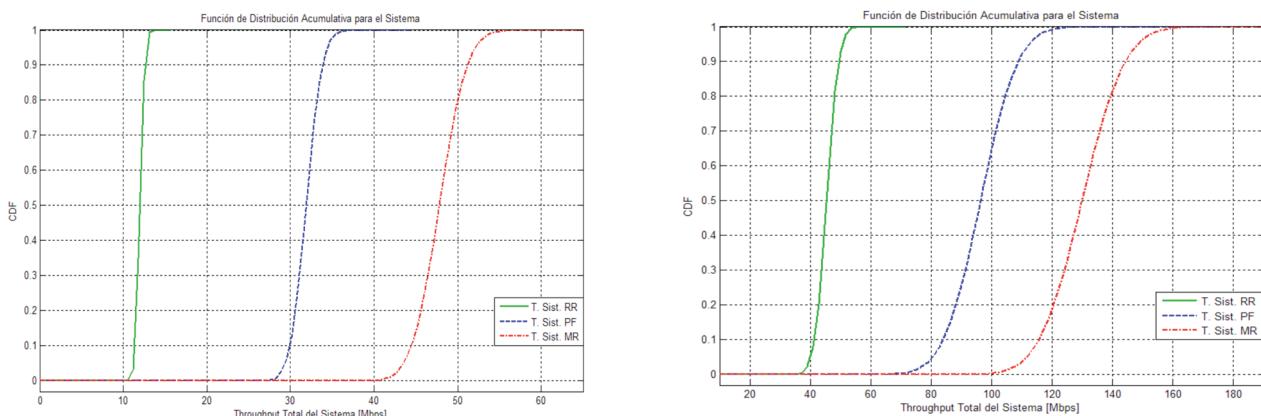


Figura 21. Función de distribución acumulativa del *throughput* total en el sistema

5. Conclusiones

Dentro del proceso de modelado de los algoritmos para los diferentes planificadores de recursos radio LTE, los diagramas de flujo se constituyeron en una herramienta muy útil pues permitieron representar gráficamente las distintas etapas de cada uno de ellos y sus interacciones, lo que facilitó la comprensión de su funcionamiento y su posterior implementación en el simulador estático básico a nivel de sistema para LTE.

Existe una estrecha relación entre los planificadores de recursos radio y el desempeño que se puede alcanzar en un sistema LTE, dicha relación fue posible comprobarla dentro de la sección VI en la cual se observó que siempre el planificador MR administra los recursos de tal manera que el sistema alcanza los mayores valores de *throughput*, superando el desempeño obtenido con el planificador PF e incluso cuadruplicando lo alcanzado por el planificador RR. Aunque con el planificador de recursos radio Maximum Rate se alcanza un mayor *throughput*, no implica que sea el planificador más adecuado para implementar en el sistema LTE pues los usuarios que poseen malas condiciones de canal radio no serán servidos. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y el análisis realizado en la sección VI se concluye que la estrategia de planificación de recursos radio más adecuada para implementar en un sistema LTE es Proportional Fair pues siempre permite obtener un buen *throughput* y al mismo tiempo garantiza a todos los usuarios el servicio, a pesar de que sus condiciones de canal radio no sean las mejores.

A partir del análisis y los resultados obtenidos en el caso de estudio dos, se puede concluir que el ancho de banda en un sistema LTE es una característica que lo hace muy versátil y adaptable a diferentes entornos, ya que con la variación de

este parámetro se determina la cantidad de usuarios que soportará el sistema, en ese sentido; si se va a prestar el servicio en un entorno rural es adecuado emplear un ancho de banda de 5MHz o 10MHz ya que el número de usuarios en estas zonas es bajo, por otra parte, si se desea prestar el servicio en zonas urbanas, en las cuales la cantidad de usuarios es mucho mayor, se recomienda emplear un ancho de banda de 20MHz.

En sistemas LTE, una buena combinación entre ancho de banda y planificador de recursos radio asegura un buen desempeño, pues con una adecuada asignación de los bloques de recursos radio disponibles, el sistema trabajará en límites cercanos a su máxima capacidad y los usuarios podrán alcanzar altos *throughput*. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones y especialmente en el caso de estudio 2, se recomienda combinar con todo ancho de banda el planificador de recursos radio Proportional Fair, con lo cual siempre será posible obtener un buen *throughput* y al mismo tiempo garantizar a todos los usuarios el servicio, aunque sus condiciones de canal radio no sean las mejores.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad del Cauca, por el acompañamiento, orientación y soporte brindados durante el desarrollo de este artículo, de igual manera extendemos nuestros agradecimientos al cuerpo de docentes de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de dicha institución, por su tiempo, paciencia, dedicación y pasión en la formación de personas íntegras tanto a nivel profesional como personal.

Notas

1. Simulador estático básico: simulador que permite representar el sistema en un tiempo determinado según las condiciones del canal y la SINR
2. Las figuras de este caso de estudio se dividen en parte a y b, en las cuales se consignan los resultados obtenidos para el ancho de banda de 5 MHz y 15 MHz, respectivamente.
13. SESIA, Stefanía. TOUFIK, Issam y BAKER, Matthew. Introduction and Backgroud En LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory To Practice. Segunda Edición. Reino Unido, Wiley, 2011. p.1-22

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. 3GPP TS 36.101; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception. Sophia Antipolis (Francia), 2011. p.18.
2. AGUSTI, Ramon. ÁLVAREZ, Francisco. CASADEVALL, Fernando. FERRÚS, Ramon. PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas Tendencias En Comunicaciones Móviles". España, Fundación Vodafone, 2010
3. BARAYAN, Yaser. y KOSTANIC, Ivica. Performance Evaluatio of Proportional Fairness Schedulling in LTE. En: Lecture Notes in Engineering and Computer Science. San Francisco (USA), 2013.
4. CÁCERES, Jesús. Planificación Radioeléctrica de una Red LTE. Tesis de grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación. Sevilla: Universidad de Sevilla 2014. 102p
5. DAHLMAN, Erik. PARKVALL, Stefan y SKOLD, Johan. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Reino Unido, Elsevier, 2011.
6. GUEVARA, Andrea Patricia y VÁSQUEZ, Viviana Gabriela. Estado actual de las redes LTE en latinoamérica. Tesis de grado Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. Cuenca (Ecuador): Universidad de Cuenca 2013. 229p
7. HOLMA, Harri y ANTTI, Toskala. LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. Reino Unido, Wiley, 2009. p.8, p.25
8. KARLSSON, Jonas. y RIBACK, Mathias. Initial field performance measurements of LTE. En: The next major step in mobile radio communications, Ericsson Review. 2008. p.22-28.
9. LÓPEZ, Nicolás Antonio. Efecto de las redes de cuarta generación (LTE) en los servicios móviles en Chile. Tesis de pregrado Ingeniería Civil Eléctrica. Santiago de Chile: Universidad de Chile 2011. 77p
10. MENDO, Luis. Capacidad en Sistemas Celulares W-CDMA. Tesis Doctoral departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid 2001. 383P
11. PRESSMAN, Roger. Ingeniería del Software un enfoque práctico. Quinta Edición. España, Mc Graw Hill, 2002. p. 20-21
12. RAMIS, Jaume. CARRASCO, Loren. FEMENIAS, Guillem y RIERA, Felipe. Algoritmos de Planificación de recursos para redes inalámbricas 4G. Palma (España): Universidad de las Islas Baleares 2010.