

# Planificador de paquetes del enlace de bajada de lte basado en evolución diferencial

## LTE Downlink Packet Scheduler based on Differential Evolution

Christian Fernando Vega, Claudia Milena Hernández Bonilla

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Correo-e: [crhistianvega@unicauca.edu.co](mailto:crhistianvega@unicauca.edu.co), [claudiah@unicauca.edu.co](mailto:claudiah@unicauca.edu.co),

**Resumen**— Este artículo presenta un Planificador de Paquetes en el Enlace de Bajada de LTE que tiene como objetivo la asignación inteligente de recursos radio a estaciones móviles en la red de acceso, soportado por un algoritmo evolutivo. El planificador propuesto fue comparado con cuatro algoritmos de referencia, los resultados muestran que el planificador basado en evolución diferencial, asigna los recursos radio eficazmente alcanzando valores adecuados de índice de justicia y *throughput*.

**Palabras clave**— Comunicaciones Móviles 4G, redes celulares, computación evolutiva, asignación de recursos, planificación, redes inalámbricas.

**Abstract**— This paper presents a LTE Downlink Packet Scheduler, which aims to intelligently allocate radio resources to mobile stations in an access network, supported by an evolutionary algorithm. The proposed scheduler was compared with four reference algorithms, the results show that the scheduler based in differential evolution, allocates the radio resources effectively reaching suitable values of fairness index and throughput.

**Key Word** — 4G mobile communication, cellular networks, evolutionary computation, resource allocation, scheduling, wireless networks.

### I. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento de usuarios de redes móviles y la demanda de servicios con altas exigencias de desempeño establecen nuevos retos para las redes celulares de nueva generación. Es así como el Proyecto de Cooperación en Tercera Generación (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) introdujo Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) [1] como respuesta a esta necesidad, estableciendo objetivos de desempeño coherentes la dinámica del mercado y definiendo nuevos procedimientos para el Núcleo de Paquetes Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*) y la Red de Acceso Radio Terrestre UMTS

Evolucionada (EUTRAN, *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*).

La red de acceso la componen: el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) y el Nodo B Evolucionado (ENB, *Evolved Node B*) que se encarga de la Gestión de Recursos de Radio (RRM, *Radio Resource Management*) con el objetivo de garantizar la calidad del servicio ante la variabilidad que presenta el canal y la demanda de tráfico de los usuarios.

Una las funciones que se establece en RRM para LTE, es la Planificación de Paquetes a nivel físico, que es responsable de organizar la transmisión de las tramas desde y hacia los usuarios haciendo uso eficiente de los recursos de radio. Por tanto, LTE define un planificador físico para el enlace de subida y otro para el enlace de bajada [2], de los cuales el segundo se ha considerado de mayor interés, dado que la comunicación entre el ENB y el UE es la que soporta el mayor tráfico. El planificador a nivel físico del enlace de bajada se relaciona directamente con el esquema de modulación y codificación determinadas por las condiciones del canal y las tasas de transmisión esperadas [3].

Los algoritmos de planificación de paquetes de mayor despliegue en los sistemas de comunicaciones móviles de la actualidad son Mejor Indicador de Calidad de Canal (Best-CQI, *Best Quality Channel Indicator*) Proporcionalidad Justa, (PF, *Proportional - Fairness*) y Round Robin (RR), los cuales se han estudiado y evaluado ampliamente para diversas tecnologías, entre ellas LTE [4].

Dado que el procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE es susceptible de representarse a través de un modelo de optimización con una función objetivo y restricciones, es posible resolverse por métodos heurísticos y metaheurísticos, presentándose de esta forma una alternativa llamativa a los algoritmos de planificación existentes. En el trabajo desarrollado en [5], se propone un planificador de

paquetes para LTE basado en un Algoritmo Genético (AG, *Genetic Algorithm*) que es posible configurar de acuerdo a políticas de alto nivel del administrador de la red, considerando dos casos principales: throughput priorizado y justicia priorizada, demostrando que las metaheurísticas tienen un alto potencial en la solución de problemas complejos de asignación de recursos radio.

El estudio se enfocó en desarrollar un planificador de paquetes a nivel físico en el enlace bajada de LTE basado en un algoritmo de Evolución Diferencial (DE, *Differential Evolution*), DE realiza modificaciones a la secuencia y funcionamiento del AG convencional, introduciendo un operador de mutación diferencial al inicio del algoritmo que promueve una mayor exploración del espacio de soluciones, en trabajos previos se ha evidenciado que DE obtiene soluciones adecuadas con menor carga computacional que el AG convencional [6], [7].

El planificador propuesto se implementó sobre la herramienta *LTE Downlink System Level Simulator v 1.7* de *Vienna University of Technology*. La herramienta es de código abierto y se ejecuta sobre versiones superiores a Matlab® R2009, el desempeño del planificador propuesto se comparó con los basados en AG, PF y RR empleando como métricas de desempeño *throughput* e índice de justicia.

## II. PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE

### A. Definición de la planificación de paquetes en LTE.

La planificación de paquetes es un procedimiento que controla la asignación de los recursos compartidos entre los usuarios en cada intervalo de tiempo [8]. En LTE el planificador de paquetes se implementa en el ENB y establece la forma en que se seleccionan los usuarios y se asignan los recursos de acuerdo a un algoritmo de planificación. La planificación de paquetes tiene como objetivo maximizar el throughput promedio de la celda manteniendo niveles aceptables de justicia en la asignación de recursos a los usuarios.

En el enlace de bajada ya que LTE implementa Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), los recursos radio son asignados simultáneamente en los dominios de tiempo y frecuencia [9]. En el dominio del tiempo los recursos de radio son distribuidos en TTI de 1ms; una trama de LTE está conformada por 10 TTI consecutivos, donde cada TTI está compuesto de dos ranuras de tiempo de 0.5 ms, que corresponden a 7 símbolos OFDM en la configuración por defecto con prefijo cíclico corto. En el dominio de la frecuencia el ancho de banda está dividido en canales de 180Khz cada uno con 12 subportadoras OFDM equitativamente separadas.

Un Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*) representa una ranura en el dominio del tiempo y un canal en el dominio de la frecuencia y es la unidad más pequeña de recurso radio que puede ser asignada al UE en cada transmisión de datos, como se muestra en la figura 1. El ancho de banda de canal determina la cantidad de RB disponibles para asignarse a los usuarios en la red de acceso como se presenta en la tabla 1.

La asignación de recursos a un usuario en LTE, se realiza basándose en el cálculo de una métrica que puede ser interpretada como la prioridad de transmisión de cada usuario en un RB específico. El cálculo de la métrica depende del algoritmo que haya utilizado para su cómputo y a nivel físico está relacionado con las condiciones de canal, estado de los buffers, el historial de transmisión y la categoría del dispositivo [10].

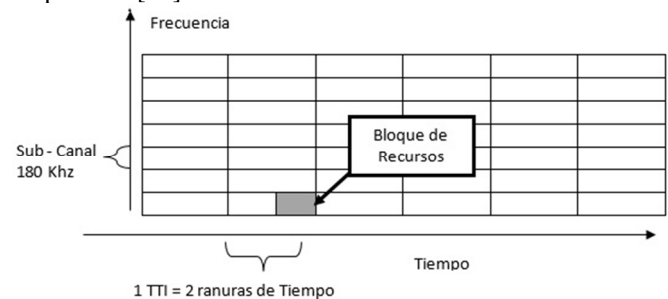


Figura 1. Conformación de un RB en LTE.

| Ancho de Banda (Mhz) | 1.4 | 3  | 5  | 10 | 15 | 20  |
|----------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Número de RB         | 6   | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

Tabla 1. Relación entre el ancho de banda y el número de RB en LTE.

El procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada LTE a nivel físico se puede entender como una secuencia de pasos que se repiten en cada Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*), y se mencionan a continuación:

- Cada UE decodifica las señales de referencia recibidas a través del PDCCH, y las envía a la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) a través del Canal Compartido de Enlace de Bajada (DL-SCH, *Downlink Shared Channel*).
- El UE realiza la estimación del Indicador de Calidad de Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), el cual se envía a través del Canal Compartido de Enlace de Subida (UL-SCH, *Uplink Shared Channel*) hacia la capa física del UE, donde se modula y codifica para transmitirlo a través de la interfaz radio por el Canal

Físico de Control de Enlace de Subida (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*).

- c. La capa física del ENB demodula y decodifica el CQI, el cual es llevado a través del UL-SCH al subnivel MAC y posteriormente al Planificador de Paquetes de Enlace de Bajada (DL-PS, *Downlink Packet Scheduler*), de acuerdo la métrica y algoritmo establecido por el planificador realiza la asignación de Bloques de Recursos y envía la solicitud al módulo de Codificación y Modulación Adaptativa (AMC, *Adaptive Modulation and Coding*), quien determina el esquema de codificación y modulación que será usado para la transmisión de datos al usuario.
- d. El planificador entrega la información acerca de los usuarios planificados, los RB asignados y el MCS al subnivel MAC quien procesa los datos de capas superiores y los envía a través de los canales de transporte a la capa física.
- e. La capa física del ENB codifica y modula la información de acuerdo a la planificación establecida en la fase anterior y la transmite a los terminales a través del DL-SCH.
- f. Cada terminal recupera la información del PDCCH, en caso de que le hayan sido asignado recursos, accede a la carga útil del Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*).

- a. Best-CQI: Los RB se asignan a los usuarios que reportan el mayor valor de CQI en cada TTI. Por tanto Best-CQI es capaz de maximizar el throughput de celda y beneficia a aquellos usuarios que cuentan con condiciones favorables de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*), y por ende reportan los más altos valores de CQI, sin embargo a aquellos usuarios que se encuentren al borde de la celda con condiciones pobres de canal pueden acceder a pocos o ningún RB, dada esta situación Best-CQI se considera un algoritmo elitista.
- b. Round Robin: Se basa en el algoritmo Primero en Entrar Primero en Salir (FIFO, *First In First Out*) donde se asignan los recursos a los usuarios de acuerdo al orden de las solicitudes, sin considerar el CQI reportado por el UE, por ende RR se considera un algoritmo justo.
- c. Proporcionalidad Justa: Es una solución intermedia entre Best-CQI y RR, ya que procura por un balance entre el *throughput* del sistema y la justicia en la asignación de recursos, la métrica de PF se presenta en la expresión 1.

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{d_k^i(t)}{\bar{R}^i} \tag{1}$$

Donde:

- $d_k^i(t)$  es el throughput esperado para el usuario  $i$  en el TTI  $t$  y el  $k$ -ésimo RB, respectivamente.
- $\bar{R}^i(t)$  es el throughput promedio alcanzado por el usuario  $i$  hasta el TTI  $t$ , dentro de una ventana de observación.

En la figura 2 se presenta un esquema simplificado de la interacción entre las entidades de la arquitectura de LTE que participan en el procedimiento de planificación de paquetes.

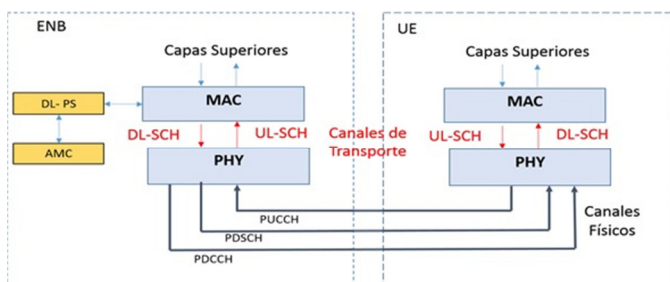


Figura 2. Elementos de la arquitectura de LTE que participan en el procedimiento de planificación de paquetes.

### B. Algoritmos de planificación de paquetes en LTE.

El algoritmo de planificación tiene como función determinar los RB que serán asignados a los UE de la red de acceso, empleando como criterio un valor denominado métrica. Los algoritmos de mayor despliegue en la actualidad que soportan la planificación de paquetes en LTE son los siguientes:

## III. METODOLOGÍA

El estudio se aborda desde un paradigma positivista, un enfoque cuantitativo, un método empírico analítico y un tipo de investigación correlacional tomando como base la secuencia metodológica descrita en [11]. Las fases se encuentran definidas en la figura 3 y se describen a continuación.

### A. Definición del problema

El estudio tiene como objetivo el análisis del desempeño de la planificación de paquetes a nivel físico, en el enlace de bajada de LTE aplicando un algoritmo evolutivo que considere selección por torneo con retención del mejor individuo y mutación diferencial.

La figura 4 muestra el modelo general del planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en algoritmos genéticos considerando sus entradas y salidas. El planificador

requiere en cada TTI conocer la cantidad  $I$  de usuarios que solicitan recursos, la cantidad de  $K$  RB disponibles, y el CQI para cada RB. El planificador obtiene  $X$  que representa el perfil de asignación de recursos, es decir establece que bloques de recursos son asignados a los usuarios que solicitaron recursos en la celda. La otra salida es  $M$  que representa el perfil de asignación del MCS para cada RB planificado.

B. Diseño de estudio.

El diseño del estudio considera los supuestos, los modelos necesarios para poder llevar a cabo el estudio y las herramientas empleadas para la implementación y pruebas del planificador propuesto.

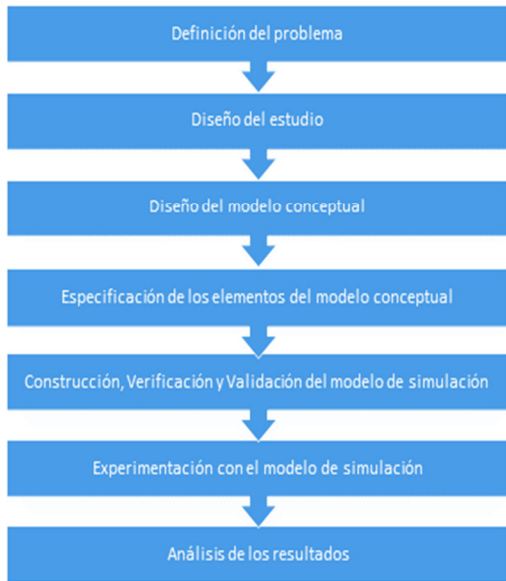


Figura 3. Metodología empleada para el desarrollo del estudio.

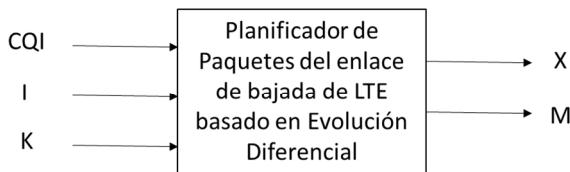


Figura 4. Modelo general del planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en evolución diferencial.

a. *Supuestos.* El estudio asume que la distribución de los usuarios es bidimensional, la asignación de recursos se realiza en cada TTI, durante el tiempo de simulación siempre hay tráfico por entregar a los usuarios, esto hace que los usuarios en todos los TTI sean constantes, la cantidad de bloques de recursos disponibles en cada TTI es constante, el modelo no considera mecanismos de corrección de errores y la posición de los terminales es fija para el tiempo de simulación considerado en el estudio.

b. *Modelos requeridos por el estudio.* Modelo general del sistema, modelo general del planificador (descrito en la figura 4), modelo de asignación de RB a usuarios, considerando función objetivo, codificación del vector solución y las restricciones.

c. Para llevar a cabo el estudio se emplea como herramienta *LTE Downlink System Level Simulator v 1.7* de *Vienna University of Technology*. La herramienta es de código abierto y se ejecuta sobre versiones superiores a *Matlab® R2009*.

C. Diseño del modelo conceptual. En esta fase se consideran los modelos que permiten representar los componentes del sistema y su interrelación.

a. *Modelo general del sistema.* El planificador de paquetes del enlace bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo se enmarca dentro del modelo general del sistema que se representa en el diagrama de bloques de la figura 5. Se procesan parámetros de entrada (número de UE, distribución espacial de UE, ancho de banda y número de bloques de recursos) con el fin de obtener la asignación de RB a los UE del sector y estimar el *throughput* e índice de justicia, métricas empleadas para evaluar el desempeño del sistema.

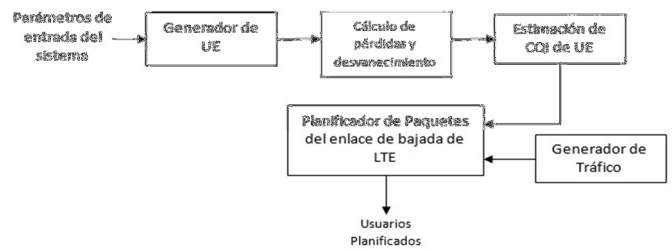


Figura 5. Modelo general del sistema.

b. *Modelo de Asignación de RB a usuarios.* El siguiente modelo describe el planteamiento la asignación de RB a los usuarios en el enlace de bajada de LTE, donde se asignan los  $K$  bloques de recursos disponibles entre los  $I$  usuarios de la celda, con el objetivo de maximizar la métrica de desempeño global del enlace entre el ENB y los UE.

En la ecuación 2a, se presenta la función objetivo (*fitness*) propuesta para la asignación de RB a usuarios en el enlace de bajada de LTE, la cual es una métrica agregada evaluada en los  $K$  bloques de recursos disponibles entre los usuarios del conjunto  $I$ ; donde,  $m_{ik}$  es la métrica calculada para el usuario  $i \in I$ , en el bloque de recurso  $k \in K$ , y  $x_{ik}$  es una variable de decisión binaria que es 1 cuando un bloque de recurso del conjunto  $K$  es asignado un usuario del conjunto  $I$ , de lo contrario es 0.

Adicionalmente, se consideran restricciones que garantizan la validez de la asignación de recursos. La primera restricción, de la ecuación 2b, indica que un bloque  $k \in K$ , solo puede ser asignado a un usuario, es decir, un bloque puede quedarse sin asignar, o ser asignado a un usuario, pero no debe ser asignado a más de un usuario en un mismo intervalo de transmisión. Sin embargo, es posible asignar un usuario a varios bloques de recursos.

La restricción en la ecuación 2c, indica que la asignación  $X$  no puede ser mayor a la cantidad de bloques, es decir, que el número de usuarios asignados a los bloques no puede superar la cantidad de bloques de recursos, donde  $X$  es un perfil de asignación que determina cómo se relacionan todos usuarios con los bloques de recursos, el cual se define como en las expresiones 3a y 3b.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} m_{ik} x_{ik} \tag{2a}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} \leq 1, \forall k \in K \tag{2b}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik} \leq K \tag{2c}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \forall k \in K, \forall i \in I \tag{2d}$$

$$X \tag{3a}$$

$$= \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1k}, x_{21}, x_{22}, \dots, \} \tag{3b}$$

$$i \in I, k \in K.$$

La métrica  $m_{ik}$  propuesta para la conformación de los coeficientes de la función objetivo del planificador propuesto para el enlace de bajada de LTE está basada en la empleada por el algoritmo Proporcionalidad Justa Generalizada (GPF, *Generalized Proportional Fairness*) [12] de la expresión 4.

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[a_k^i(t)]^\varepsilon}{[\bar{R}^i(t-1)]^\varphi} \tag{4}$$

Donde:

- $\varepsilon$  y  $\varphi$  son parámetros que se ajustan de acuerdo a la política de planificación y toman valores entre 0 y 1.

D. Especificación de los elementos del modelo conceptual.

En esta fase se describe con mayor detalle los elementos del modelo general del sistema presentado en la figura 5, tomando en cuenta trabajos previos en LTE y recomendaciones técnicas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) para LTE.

- Generador de UE.* Este bloque se encarga de establecer la ubicación de los UE sobre el sitio, a partir de los parámetros  $a_i$  y  $b_i$  que representan la abscisa y ordenada de la posición de los UE en el espacio de trabajo, los cuaa partir de distribuciones de probabilidad uniformes.
- Planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en un algoritmo de evolución diferencial.* El planificador propuesto realiza la asignación de recursos en cada TTI empleando un algoritmo de evolución diferencial que maximiza la métrica agregada para los usuarios en la celda. El proceso llevado a cabo por el planificador se repite  $T$  veces, es decir la cantidad de TTI en la cual se va a experimental con el sistema. En la figura 6 se presenta el diagrama de flujo del proceso llevado a cabo por el planificador.

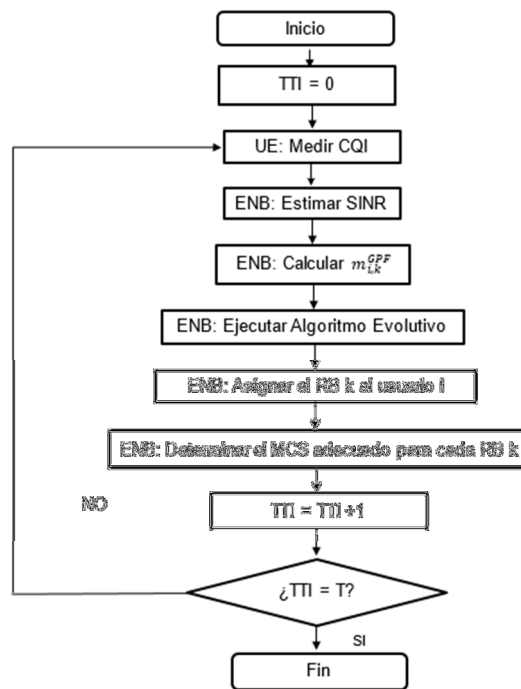


Figura 6. Diagrama de flujo del planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en evolución diferencial.

La ejecución del algoritmo genético implica el desarrollo de fases (mutación, recombinación y selección) que conducen a otorgar un perfil de asignación de recursos para los UE del sistema. El proceso desarrollado por el Algoritmo Evolutivo se presenta en el diagrama de flujo de la figura 7.

Primero se genera un conjunto de vectores de tamaño  $N$ , llamado población inicial o vectores objetivos iniciales  $P\{X_n(0)\}$ . Los vectores objetivos tienen una dimensión  $i$ . A estos vectores se les aplica el operador de mutación diferencial que consiste en la construcción de  $N$  vectores aleatorios  $X_n^M$  creados a partir de un vector objetivo  $X_n$  y dos vectores aleatorios mutuamente excluyentes  $X_b$  y  $X_c$ . Por tanto el vector mutado para el vector objetivo para el individuo  $n$  se calcula a través de la expresión 7 propuesta por [13].

$$X_n^M = X_n \text{ OR } (X_b \text{ XOR } X_c) \quad (7)$$

Una vez obtenidos los vectores se pasa al proceso de recombinación, donde se mezcla el material genético de los vectores objetivo  $X_n$  y los vectores mutados  $X_n^M$  de la población usando un cruzamiento doble punto [14], que es controlado por una tasa de mutación  $\rho_c$ .

En cuanto al proceso de selección se optó por la estrategia de torneo con retención del mejor individuo. En primera instancia se calcula la función de bienestar para los vectores de prueba  $X_n^P$  y los vectores objetivo  $X_n$  de la población  $P$ . Entonces se deja pasar a la siguiente generación aquel vector que obtenga el mayor valor de función de bienestar, de esta forma se obtiene la siguiente generación de vectores objetivo  $X_n(g+1)$ .

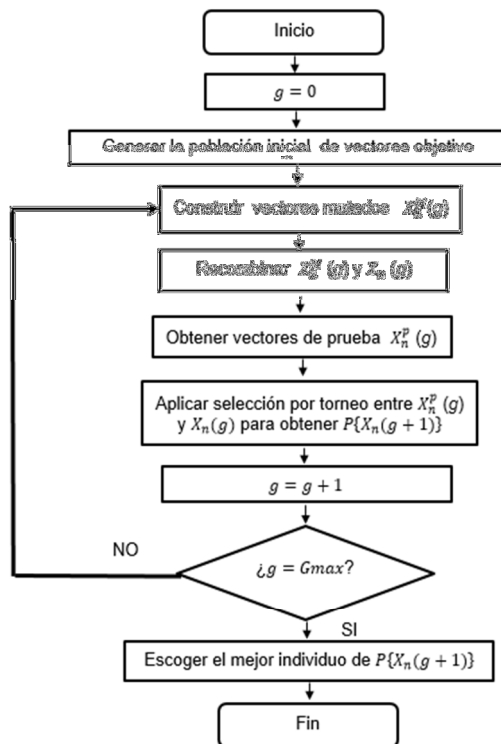


Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo empleado en el planificador del enlace de bajada de LTE propuesto.

Los procesos descritos anteriormente se repiten hasta que  $g$  alcanza el valor de  $Gmax$ , que representa la cantidad de generaciones que se ejecuta el algoritmo. Posterior a ello se determina el mejor individuo de la última generación quien representa la solución entregada por el algoritmo.

Para determinar el MCS adecuado se realiza un mapeo entre el CQI y MCS de acuerdo a la especificación TS36.212 [15].

c. *Modelo de canal*. Se toma como referencia el modelo de respuesta impulsiva del canal basado en el Modelo de Línea de Retardo *Tapped* (TDLM, *Tapped Delay Line Model*), dicho modelo se caracteriza por el número de tomas, el retardo temporal en relación a la primera toma, la potencia medio respecto a la toma más intensa y el espectro Doppler de cada tap [16]. Para el estudio se consideran los parámetros que corresponden a la Extensión del Modelo Peatonal B (ExtPedB, *Extension of Pedestrial B*) el cual es adecuado para canalizaciones superiores a 5MHz [17] y es el caso de dispersión mediana de los retardos que se produce frecuentemente [16].

d. Cálculo de pérdidas y desvanecimiento en UE. Para la pérdida de trayecto se considera el modelo de la ecuación 14 de acuerdo a al reporte técnico TR 136.942 [18]. El desvanecimiento por sombra representa las variaciones en la pérdida de canal causadas por obstáculos en el trayecto de propagación entre el equipo terminal y la estación base. Esta pérdida se modela a través de una variable aleatoria  $L_s$  con distribución lognormal [19], cuyos valores típicos para media y desviación estándar  $\mu = 0$  y  $\sigma = 6dB$  [19].

e. Estimación de CQI en UE. El objetivo de este bloque es la obtención del valor del CQI en cada RB para los usuarios que solicitan recursos al ENB. Para ello se obtiene un valor de SINR que luego es mapeado a un valor discreto de CQI, este parámetro se utiliza por el planificador para el proceso de asignación de RB y la determinación del esquema de modulación y codificación más adecuado. Para obtener la SINR en cada RB en el UE se utiliza el modelo propuesto en [20]. Para obtener el valor de CQI correspondiente a la SINR en el equipo terminal se utiliza la función de mapeo que se describe en [21].

f. Generador de tráfico. De acuerdo a la recomendación técnica TR 36.814 [22], se emplea Búfer Lleno (FB, *Full Buffer*) como modelo de tráfico, en FB los búferes de los usuarios tienen una cantidad ilimitada de datos para transmitir y por tanto la carga de datos a transmitir nunca finaliza. Por tanto en este modelo



de tráfico la cantidad de usuarios de la celda es constante porque siempre tienen datos por transmitir.

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Número de UE $I$                          | 10, 20, 30, 40 y 50                  |
| Parámetros GPF ( $\varepsilon, \varphi$ ) | (3,1), (2, 1), (1, 1), (1, 2), (1,3) |

Tabla 2. Escenarios de simulación.

- g. Evaluación del desempeño. Las métricas consideradas para la evaluación del Planificador de Paquetes basado en LTE Algoritmo Genético son: *throughput*, índice de justicia del sistema y porcentaje de ocupación de RB. El *throughput* de cada UE es la tasa efectiva de bits que se transmiten a dicho terminal por unidad de tiempo, la tasa efectiva para éste modelo de simulación está relacionada con la eficiencia del MCS. El *throughput* del sistema, es la sumatoria de las tasas efectivas de todos los terminales de un sector durante un TTI, por tanto, el *throughput* promedio del sistema se calcula a través de la relación entre el *throughput* del sistema y el tiempo total de simulación del sistema definido por  $T$  intervalos de tiempo. Para determinar la equidad en la asignación de RB a los UE del sector se emplea el índice de justicia descrito por Jain en [23].

| Parámetro                                 | Valor                     |
|---|---------------------------|
| Topología                                 | 1 sitio / 3 sectores      |
| Tamaño de espacio de trabajo.             | 1.2Km x 1.2 Km            |
| Frecuencia de operación $f$               | 2.140 Ghz                 |
| Ancho de banda                            | 10 Mhz                    |
| Bloques de Recursos $K$                   | 50                        |
| Modo de transmisión                       | SISO                      |
| Potencia de Trasmisión ENB $P_{tx}$       | 40 dBm                    |
| Ganancia máxima de la antena ENB $G_{tx}$ | 15 dBi                    |
| Modelo de pérdida de trayecto             | TS 36.942 entorno urbano. |
| Modelo de Canal                           | ExtPedB                   |
| Tiempo de Simulación (Repeticiones)       | 1000 TTI                  |

Tabla 3. Configuración de parámetros del sistema.

E. Construcción, verificación y validación de los escenarios de simulación

En la figura 8 se presenta el pseudocódigo del algoritmo de evolución diferencial que se aplica al procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE, basado en el diagrama de flujo de la figura 7, la programación del procedimiento DE se desarrolló en Matlab® y fue acoplada al simulador *LTE Downlink System Level Simulator* v 1.7 de *Vienna University of Technology*.

Para el conjunto de datos obtenidos en las simulaciones de cada escenario se empleará como medida de localización la media, y como medidas de variabilidad la varianza y el coeficiente de variación, que se adquirirán utilizando el paquete de computación estadística R versión 3.2.2, el coeficiente de variación permitió la comparación de variables aleatorias libres de efectos de escala.

```

Procedimiento DE
Definir los parámetros del DE
Generar la población inicial de vectores objetivo  $P\{X_n(0)\}$ 
Para  $g = 1$  hasta  $G_{max}$ 
  Construir los vectores mutados  $X_n^m(g)$ 
  Recombinar  $X_n^m(g)$  y  $X_n(g)$ 
  Obtener vectores de prueba  $X_n^p(g)$ 
  Aplicar selección por torneo entre  $X_n^p(g)$  y  $X_n(g)$  para obtener  $P\{X_n(g+1)\}$ 
  Incrementar  $g$ 
Escoger el mejor individuo de  $P(g)$ 
Fin Procedimiento DE
    
```

Figura 8. Pseudocódigo del algoritmo evolutivo para el procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE.

IV. RESULTADOS

En esta sección se pretende comparar el desempeño del planificador de paquetes basado en DE con planificadores basados en PF RR y AG a nivel de las métricas de sistema *throughput* e índice de justicia, posteriormente se presenta la comparación de la *fitness* y el tiempo de ejecución entre los planificadores basados en AG y DE.

Con el fin de evidenciar el impacto de las variables del planificador propuesto y poder realizar el análisis comparativo con los algoritmos de referencia se plantearon cinco escenarios, los cuales se presentan en la tabla 2. La configuración general de parámetros del sistema LTE en el enlace de bajada se muestra en la tabla 3.

Para el planificador DE se considera la configuración de la tabla 4 con la cual se obtuvieron resultados adecuados. El tamaño de población 4D se seleccionó ya que los valores de 6D, 8D y 10D obtenían resultados similares del orden del 5% con respecto a 4D a expensas de una penalización significativa en el tiempo de ejecución del algoritmo, el mismo criterio se empleó para la escogencia de  $G_{max}$  e  $I$  donde las variaciones de las métricas de desempeño para los casos subsiguientes presentaban variaciones mínimas. En el caso de  $p_r, p_m, \varepsilon$  y  $\varphi$  se consideran para la comparación 0.9, 0.1, 1 y 2 respectivamente porque fueron las configuraciones con las que se obtuvieron los valores más altos de *throughput* del sistema.

| Escenario                        | Valores                                      |
|----------------------------------|--|
| Tamaño de Población $N$          | D/2, D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D.                 |
| Probabilidad de Cruce $p_r$      | 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9                      |
| Número de Generaciones $G_{max}$ | 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 |

| Parámetro                       | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Tamaño de población             | 4D    |
| Probabilidad de cruce ( $p_r$ ) | 0.9   |

|                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Número de Generaciones $G_{max}$   | 100                             |
| Parámetros GPF                     | $\varepsilon = 1, \varphi = 2.$ |
| Probabilidad de mutación ( $p_m$ ) | 0.1                             |
| Número de UE $I$                   | 40                              |

Tabla 4. Parámetros seleccionados del planificador basado en DE.

En la figura 9 se observa que el planificador con mejor desempeño es el basado en Best-CQI, mientras que el planificador DE logra un desempeño similar al obtenido por el planificador AG.

Según la figura 10 el planificador basado en RR es el que mejor justicia aplica en la asignación de recursos, por su parte DE obtiene un desempeño aceptable similar a AG y Best-CQI.

Al realizar un seguimiento a la *fitness* de los algoritmos DE y AG, tal como se observa en la figura 11, se aprecia como los dos algoritmos tienen un incremento gradual y similar conforme se incrementa el número de generaciones, siendo AG el que mejor desempeño obtiene en la centésima generación.

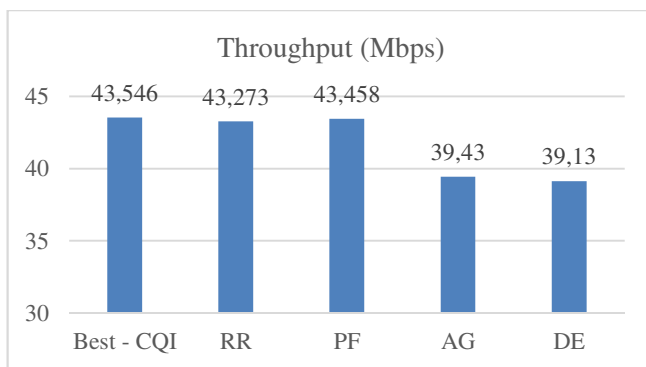


Figura 9. *Throughput* del sistema obtenido por los planificadores basados en Best-CQI, PF, RR, AG y DE.

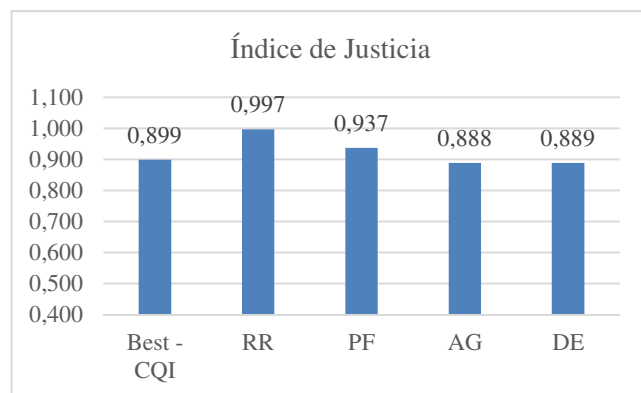


Figura 10. Índice de Justicia obtenido por los planificadores Best-CQI, PF, RR, AG y DE.

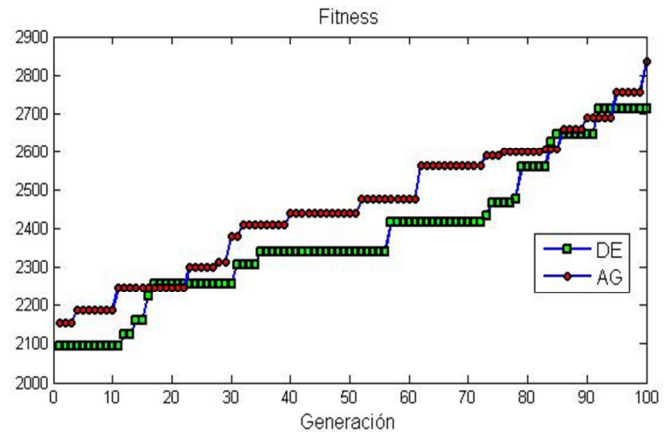


Figura 11. Comportamiento de la función objetivo de los algoritmos AG y DE.

En la figura 12 se presenta el comportamiento del tiempo de ejecución de cada generación para los planificadores AG y DE se observa que el planificador DE obtiene el mejor desempeño disminuyendo en promedio un 32.39% el tiempo empleado por el planificador basado en AG.

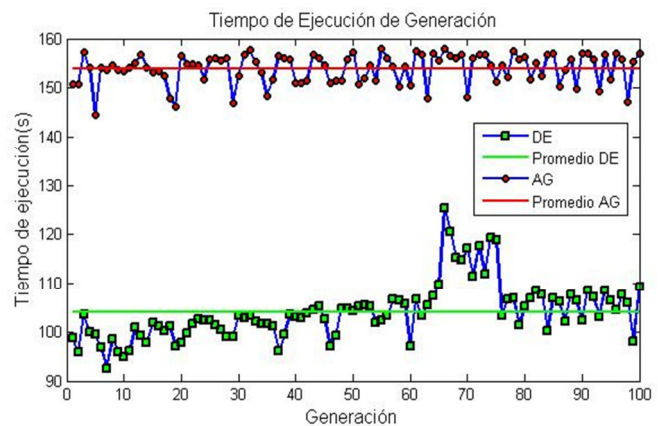


Figura 12. Tiempo de ejecución de generación para los algoritmos AG y DE.

## V. CONCLUSIONES

Se empleó un planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en evolución diferencial para determinar perfiles adecuados de asignación de recursos como una alternativa a los algoritmos existentes, la evaluación del desempeño del planificador propuesto mostró resultados repetibles y equiparables a los obtenidos por planificadores basados en Best-CQI, RR, PF y AG en cuanto a *throughput* e índice de justicia.

Los resultados obtenidos sugieren que el planificador basado en DE presenta una reducción sustancial en el tiempo de ejecución con respecto al planificador basado en AG, que lo posiciona como una opción eficaz para la asignación de recursos radio en redes móviles de cuarta generación.



## RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se sugiere la incorporación de restricciones de capacidad o justicia en la asignación en el modelo matemático del planificador y la evaluación del desempeño de los planificadores, así mismo la exploración de otras técnicas metaheurísticas de optimización que propendan por la mejora en la eficiencia y eficacia del proceso de planificación de paquetes en LTE.

Se agradece al PhD. Roberto Carlos Hincapié del Grupo GIDATI de la Universidad Pontificia Bolivariana y al Mg. John Barco de la Universidad de Nariño por sus aportes al desarrollo del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] 3GPP, “3GPP TR 25.913 Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)(Release 7)”, 2007.
- [2] B. Liu, H. Tian, and L. Xu, “An efficient downlink packet scheduling algorithm for real time traffics in LTE systems,” *IEEE 10th Consum. Commun. Netw. Conf.*, pp. 364–369, 2013.
- [3] H. A. M. Ramli, R. Basukala, K. Sandrasegaran, and R. Patachaianand, “Performance of well known packet scheduling algorithms in the downlink 3GPP LTE system,” in *Proceedings - MICC 2009: 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications with a Special Workshop on Digital TV Contents*, 2009, pp. 815–820.
- [4] X. Wang and S. Konishi, “Optimization formulation of packet scheduling problem in LTE uplink,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2010.
- [5] H. F. Gemic, I. Hokelek, and H. A. ??irpan, “GA based multi-objective LTE scheduler,” in *2014 1st International Workshop on Cognitive Cellular Systems, CCS 2014*, 2014.
- [6] S. Das and P. N. Suganthan, “Differential evolution: A survey of the state-of-the-art,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011.
- [7] P. Krömer, J. Platoš, and V. Snášel, “A brief survey of differential evolution on Graphic Processing Units,” in *Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Differential Evolution, SDE 2013 - 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2013*, 2013, pp. 157–164.
- [8] E. Dahlman, Y. Jading, S. Parkvall, and H. Murai, “3G radio access evolution - HSPA and LTE for mobile broadband,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, no. 5, pp. 1432–1440, 2009.
- [9] 3GPP, “Physical Channels and Modulation, Technical Specification 36.211, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA).” 2014.
- [10] A. Shahid, S. Aslam, H. S. Kim, and K. G. Lee, “Genetic algorithm based self-organized resource allocation in LTE-Advanced network,” *Int. Conf. Ubiquitous Futur. Networks, ICUFN*, pp. 133–137, 2014.
- [11] O. M. Ulgen, J. J. Black, B. Johnsonbaugh, and R. Klungle, “Simulation Methodology - a Practitioner’S Perspective,” *Int. J. Ind. Eng. Appl. Pract.*, vol. 1, no. 2, p. 16, 1994.
- [12] C. Wengerter, J. Ohlhorst, and A. G. E. Von Elbwart, “Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA,” *2005 IEEE 61st Veh. Technol. Conf.*, vol. 3, no. 2, pp. 0–4, 2005.
- [13] J. Barco, A. Guerra, L. Muñoz, and N. Quijano, “Optimal Routing and Scheduling of Charge for Electric Vehicles: Case Study,” Oct. 2013.
- [14] K. M. Passino, “Biomimicry for optimization, control, and automation,” *Biomimicry for Optimization, Control, and Automation*. pp. 1–926, 2005.
- [15] 3GPP, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding,” *3GPP TS 36.212 version 11.1.0 Release 11*, vol. 0, 2013.
- [16] Itu, “Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000,” *Recommendation ITUR M1225*, vol. 93. pp. 148–56, 1997.
- [17] T. B. Sorensen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, “Extension of the ITU channel models for wideband (OFDM) systems,” *VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Veh. Technol. Conf. 2005.*, vol. 1, pp. 392–396, 2005.
- [18] 3GPP, “TR 136 942 - V8.1.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 8.1.0 Release 8),” vol. 0, pp. 0–84, 2009.
- [19] D. Giancristofaro, “Correlation model for shadow fading in mobile radio channels,” *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 11, p. 958, 1996.
- [20] H. Claussen, “Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems,” *2005 IEEE 16th Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun.*, vol. 1, no. x, pp. 512–516, 2005.
- [21] J. C. Ikuno, M. Wrulich, and M. Rupp, “System Level

Simulation of LTE Networks,” *2010 IEEE 71st Veh. Technol. Conf.*, no. i, pp. 1–5, 2010.

- [22] 3GPP, “TR 36.814 v9.0.0, Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects.” 2010.
- [23] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. R. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system,” *DEC technical report TR301*, vol. cs.NI/9809, no. DEC-TR-301. pp. 1–38, 1984.