

Evaluación del desempeño de un planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE empleando un algoritmo evolutivo

Performance evaluation of LTE downlink packet scheduler using an evolutionary algorithm

Christian Fernando Vega C.¹
Claudia Milena Hernández B.²
Universidad del Cauca, Colombia

RESUMEN

El constante aumento de usuarios móviles y la demanda de aplicaciones de altos requerimientos de desempeño implican nuevos retos para el despliegue de los sistemas de comunicación inalámbricos, que pese a todas las limitaciones deben propender por la calidad de la experiencia de los abonados. La planificación de paquetes en el enlace de bajada juega un rol importante en los sistemas cuarta generación, ya que es la responsable de asignar en forma inteligente los recursos de radio a los usuarios, de acuerdo a un algoritmo establecido. En el estudio llevado a cabo se desarrolló un planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en un algoritmo evolutivo; el desempeño obtenido es equiparable al de planificadores de paquetes convencionales.

Palabras clave: Asignación de recursos, Computación evolutiva, Comunicaciones móviles 4G, Planificación, Redes celulares.

ABSTRACT

The constant growth of mobile users and high performance requirements of applications imply new challenges for deployment of wireless communication systems, which despite all the limitations should tend for the quality of the subscriber experience. The downlink packet scheduling plays an important role in the fourth generation systems, because it is responsible for intelligently allocate radio resources to users, according to an algorithm set. In the study carried out a downlink packet scheduler based on an evolutionary algorithm was developed; the obtained performance is comparable to conventional packet schedulers.

Key words: Resource allocation, Evolutionary computation, 4G mobile communication, Scheduling, Cellular networks.

1. Ingeniero Electrónico. Estudiante de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Grupo I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT). Universidad del Cauca. christianvega@unicauca.edu.co

2. Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones. Docente Tiempo Completo. Grupo I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT). Universidad del Cauca. claudiah@unicauca.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda en servicios de red, tales como Voz sobre IP (VoIP, *Voice over Internet Protocol*), navegación, y video en tiempo real, con altas exigencias en métricas de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), 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, planteando objetivos de desempeño 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*).

Dentro EUTRAN se encuentra el Nodo B Evolucionado (ENB, *Evolved Node B*) que se encarga de la Gestión de Recursos de Radio (RRM, *Radio Resource Management*), cuyo objetivo es garantizar la calidad del servicio ante la variabilidad que presenta el canal y la demanda de tráfico de los usuarios.

Una de las más importantes funciones que se establece en RRM para LTE, es la Planificación de Paquetes a nivel físico, que es responsable de seleccionar la información de los usuarios, organizarlos y transmitirlos de forma inteligente haciendo uso eficiente de los recursos de radio. 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 la estación base y el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*) es la que soporta la mayor cantidad de 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 la actualidad son: Tasa Máxima (MR, *Maximum-Rate*), Proporcionalidad Justa (PF, *Proportional-Fairness*), Espera Equitativa Ponderada (WFQ, *Weight Fair Queuing*) y Round Robin (RR), los cuales se han estudiado y evaluado para diversas tecnologías, entre ellas LTE [4].

El estudio se enfocó en desarrollar un planificador de paquetes a nivel físico en el enlace bajada de LTE en el dominio de la frecuencia y el tiempo basado en un algoritmo evolutivo, que implemente selección por torneo con retención del mejor individuo y mutación diferencial [5], estrategias implementadas en algoritmos de evolución diferencial y que han demostrado obtener soluciones adecuadas y con menor número de iteraciones.

2. EL PROCEDIMIENTO DE PLANIFICACIÓN DE PAQUETES EN LTE

2.1. Definición y objetivo 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 [6]. En LTE el planificador de paquetes se imple-

menta en el ENB y la forma en que se seleccionan los usuarios y se asignan los recursos depende del algoritmo de planificación que se aplique y los criterios que empleen. 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 de LTE, los recursos de radio son asignados simultáneamente en los dominios de tiempo y frecuencia [7]. En el dominio de tiempo los recursos de radio son distribuidos en TTI de 1 ms; 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 180 khz 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 de 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 (ver 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 [8].

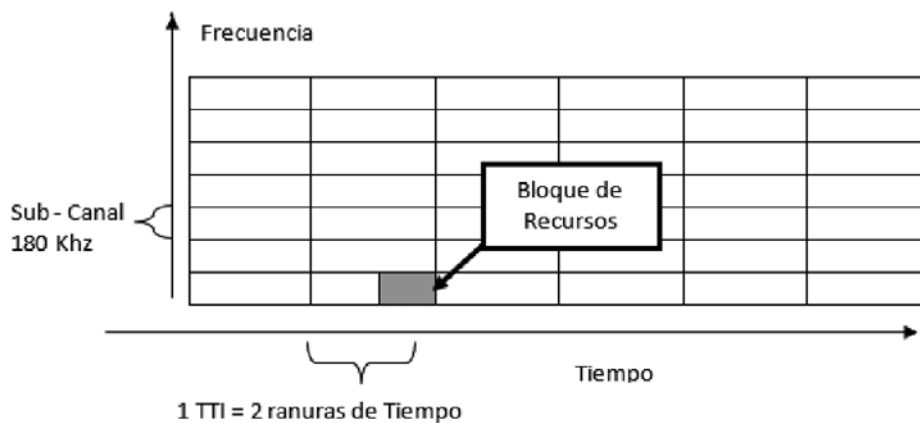


Figura 1. Conformación de un RB en LTE

Fuente: Elaboración de los autores

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

Ancho de Banda	1,4 Mhz	3 Mhz	5 Mhz	10 Mhz	15 Mhz	20 Mhz
Número de RB	6	15	25	50	75	100

Fuente: Elaboración de los autores

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:

1. 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*).
2. 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*).
3. 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 a 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*), que determina el esquema de codificación y modulación que será usado para la transmisión de datos al usuario.
4. El planificador entrega la información acerca de los usuarios planificados, los RB asignados y el MCS al subnivel MAC, que procesa los datos de capas superiores y los envía a través de los canales de transporte a la capa física.
5. 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.
6. Cada terminal recupera la información del PDCCH, en caso de que le hayan sido asignados recursos, accede a la carga útil del Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*).

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.

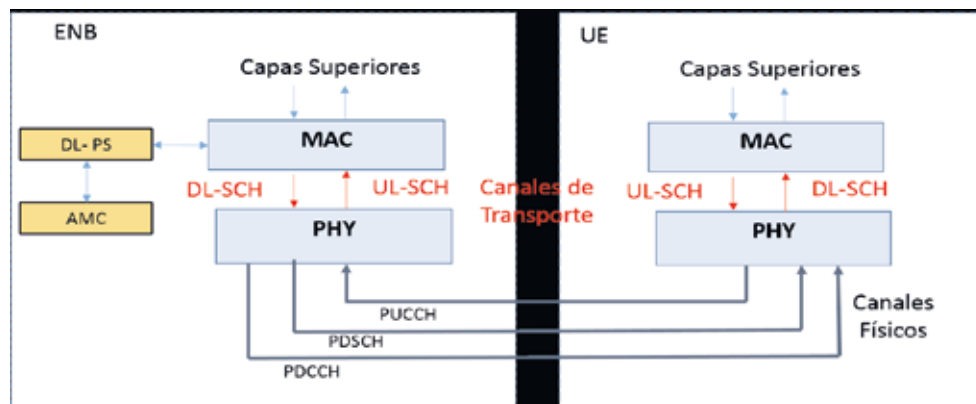


Figura 2. Planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE

Fuente: Elaboración de los autores

2.2. Algoritmos de planificación de paquetes

El algoritmo representa uno de los componentes más importantes de un planificador de paquetes, es el encargado de determinar los RB que serán asignados a los usuarios. Los algoritmos de mayor despliegue en la actualidad que soportan la planificación de paquetes en LTE son los siguientes:

2.2.1. Maximum Rate

En el algoritmo MR, los RB se asignan a los usuarios que logran el máximo *throughput* en cada TTI. La métrica de MR para un usuario i sobre el bloque de recurso k ($m_{i,k}^{MR}$) se puede expresar de acuerdo a la ecuación 1.

$$m_{i,k}^{MR} = d_k^i(t) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$d_k^i(t)$ es el *throughput* esperado para el usuario i en el TTI t y el k -ésimo RB, respectivamente y se calcula a partir de la expresión 2:

$$d_k^i(t) = \log[1 + SINR_k^i(t)] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Por tanto, MR es capaz de maximizar el *throughput* de celda y beneficia a aquellos usuarios que cuentan con condiciones favorables de SINR, 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 se denomina injusta la asignación de recursos que realiza MR.

2.2.2. Proportional Fairness

La métrica para PF $m_{i,k}^{PF}$ se obtiene combinando las métricas de Tasa máxima $m_{i,k}^{MR}$ y *Throughput* Equitativo Ciego (BET, *Blind Equal Throughput*), $m_{i,k}^{BET}$ para el usuario i en el bloque de recurso k , como lo muestra la expresión 3.

$$m_{i,k}^{PF} = m_{i,k}^{MR} \cdot m_{i,k}^{BET} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La métrica del algoritmo BET se obtiene a través de la expresión 4.

$$m_{i,k}^{BET} = \frac{1}{\bar{R}^i(t-1)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$\bar{R}^i(t)$ es el *throughput* promedio alcanzado por el usuario i hasta el tiempo t y se calcula con la expresión 5.

$$\bar{R}^i(t) = \beta \bar{R}^i(t-1) + (1-\beta)r^i(t) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$r^i(t)$ es la tasa de bit alcanzada por el usuario i en el tiempo t y β un parámetro que está entre cero y uno.

3. 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 [9]. Las fases se encuentran definidas en la Figura 3 y se describen a continuación.

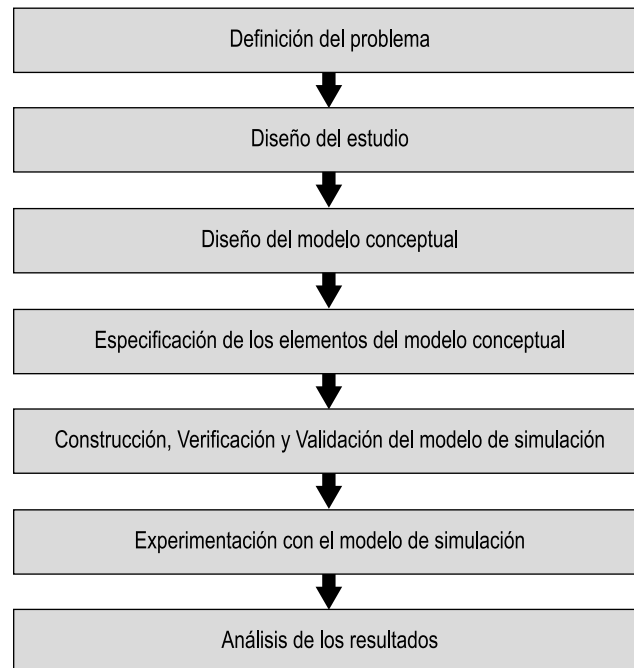


Figura 3. Metodología empleada para el desarrollo del estudio

Fuente: Elaboración de los autores

3.1. 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 cuáles 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.

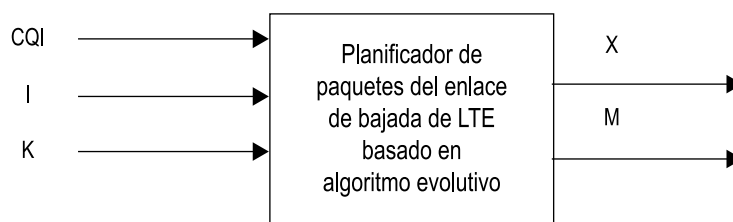


Figura 4. Modelo general del planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo

Fuente: Elaboración de los autores

3.2. Diseño del estudio

3.2.1. Supuestos

Se consideran los siguientes supuestos: 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 ellos 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.

3.2.2. Modelos necesarios

El estudio comprende los siguientes modelos:

- Modelo general del sistema en el cual actúa el planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo.
- Modelo general del planificador de paquetes: se describió en la Figura 4.
- Modelo de asignación de RB a usuarios, considerando función objetivo, codificación del vector de solución y restricciones.

3.2.3. Herramientas

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.

3.3. Diseño del modelo conceptual

3.3.1. 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.

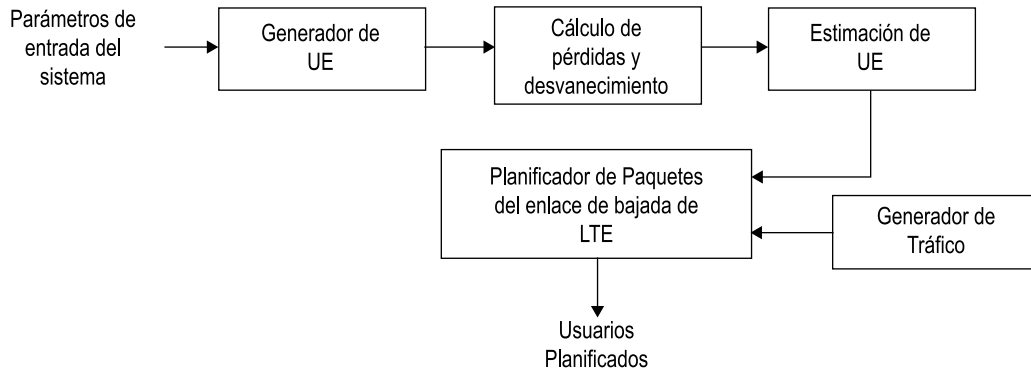


Figura 5. Modelo general del sistema

Fuente: Elaboración de los autores

3.3.2. Modelo de asignación de RB a usuarios

El siguiente modelo describe el planteamiento de 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 seleccionados a partir del planificador en el dominio del tiempo, con el objetivo de maximizar la métrica de desempeño global del enlace entre el ENB y los UE.

Para facilitar la comprensión del modelo, en la Tabla 2 se resume la notación utilizada en la formulación del problema.

Tabla 2. Notación del modelo de asignación de RB a usuarios

K	Conjunto de bloques de recursos.
I	Conjunto de usuarios que solicitan recursos en la celda.
$K = K $	Número de elementos del conjunto K , es decir, el número de bloques de recursos.
$I = I $	Número de elementos del conjunto I , es decir, el número de usuarios que solicitan recursos en la celda.
m_{ik}	La métrica calculada para el usuario, $i \in I$, en el bloque de recursos $k \in K$.
x_{ik}	Variable binaria, indica que el bloque k se asigna al usuario i .

Fuente: Elaboración de los autores

En la ecuación 6a, se presenta la función objetivo 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 ; m_{ik} donde, 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 a 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 6b, 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 deber 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 6c indica que la asignación 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 los usuarios con los bloques de recursos, el cual se define como en las expresiones 7a y 7b.

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} m_{ik} x_{ik} \quad (\text{Ecuación 6a})$$

$$\sum_{i \in I} x_{ik} \leq 1, \forall k \in K \quad (\text{Ecuación 6b})$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik} \leq K \quad (\text{Ecuación 6c})$$

$$I \leq N \quad (\text{Ecuación 6d})$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \forall k \in K, \forall i \in I \quad (\text{Ecuación 6e})$$

$$X = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1k}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{ik}\} \quad (\text{Ecuación 7a})$$

$$i \in I, k \in K. \quad (\text{Ecuación 7b})$$

Donde:

X es un vector compuesto por las variables de decisión binarias x_{ik} del modelo de asignación de RB.

Finalmente, la restricción 6d establece que la cantidad de usuarios seleccionados por el planificador en el dominio del tiempo no puede superar la cantidad de usuarios que solicitan recursos en la celda.

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 GPF [10] de la expresión 8.

$$m_{i,k}^{GPF} = \frac{[d_k^i(t)]^\varepsilon}{[\bar{R}^{i(t-1)}]^\varphi} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

ε y φ son parámetros que se ajustan de acuerdo a la política de planificación y toman valores entre 0 y 1.

3.4. Especificación de los elementos del modelo conceptual

3.4.1. 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 la ordenada de la posición de los UE en el espacio de trabajo, los cuales se obtienen a partir de distribuciones de probabilidad uniformes como se presenta en las expresiones 9 y 10.

$$f_a(x) = \begin{cases} \frac{1}{A_{max}} & \text{para } 0 < x < A_{max} \\ 0 & \text{para } x > A_{max} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$f_b(y) = \begin{cases} \frac{1}{B_{max}} & \text{para } 0 < y < B_{max} \\ 0 & \text{para } y > B_{max} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

A_{max} , representa el mayor valor posible de la abscisa de acuerdo a la configuración del espacio de trabajo.

B_{max} , representa el mayor posible de la ordenada de acuerdo a la configuración del espacio de trabajo.

En la Figura 6 se muestra el diagrama del bloque de generación de ENB y UE.

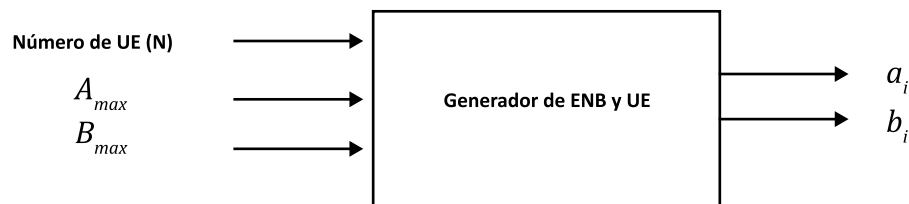


Figura 6. Generador de UE y ENB

Fuente: Elaboración de los autores

3.4.2. Planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo

El planificador propuesto realiza la asignación de recursos en cada TTI empleando un algoritmo evolutivo con mutación 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 experimentar con el sistema. En la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo de este proceso.

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 8 y se describe a continuación.

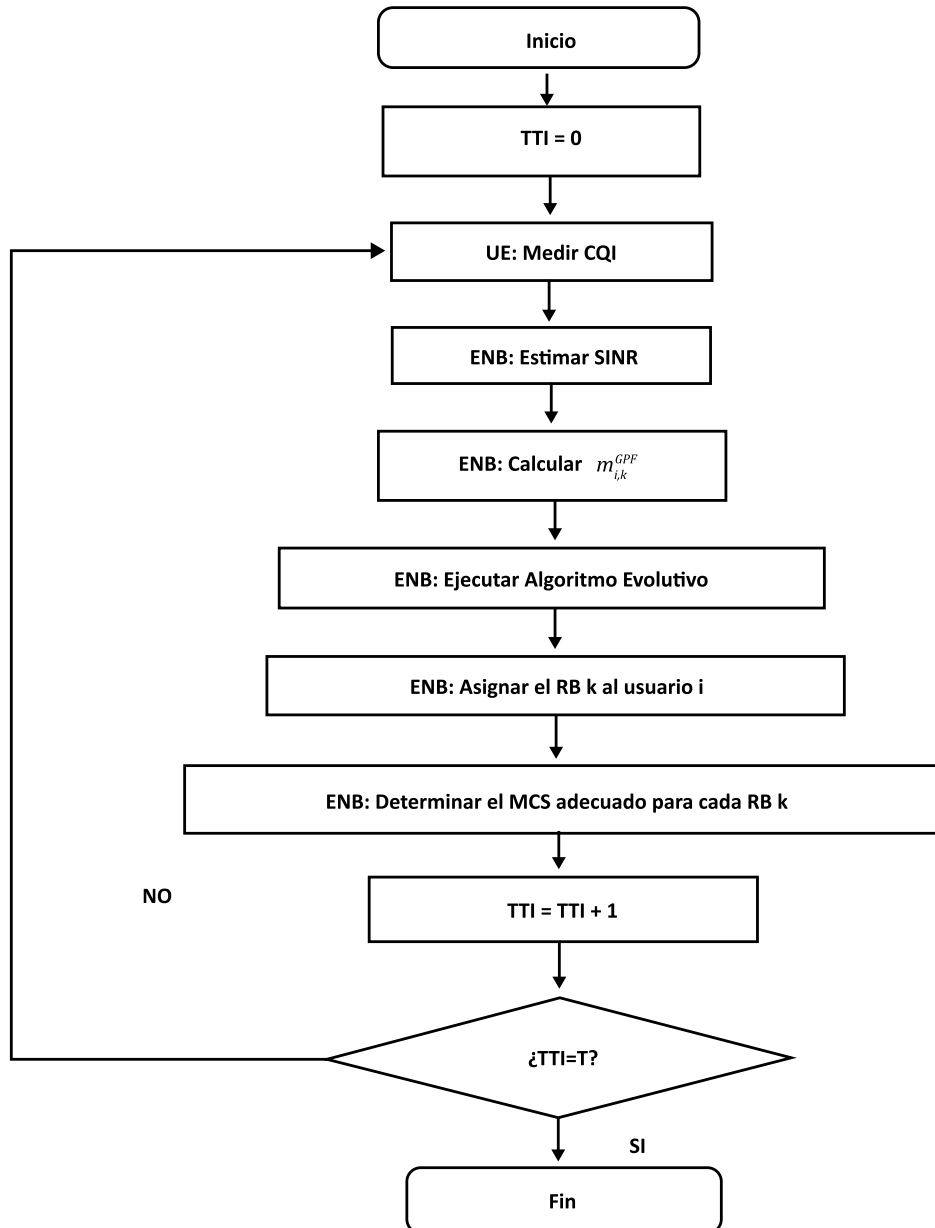


Figura 7. Diagrama de flujo del planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo

Fuente: Elaboración de los autores

Primero, se genera un conjunto de vectores de tamaño N , llamado población inicial o vectores objetivo iniciales $P\{X_n(0)\}$. Los vectores objetivo 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 11.

$$X_n^M = X_n - F (X_b - X_c)$$

(Ecuación 11)

Donde:

F es un parámetro que controla la tasa de mutación.

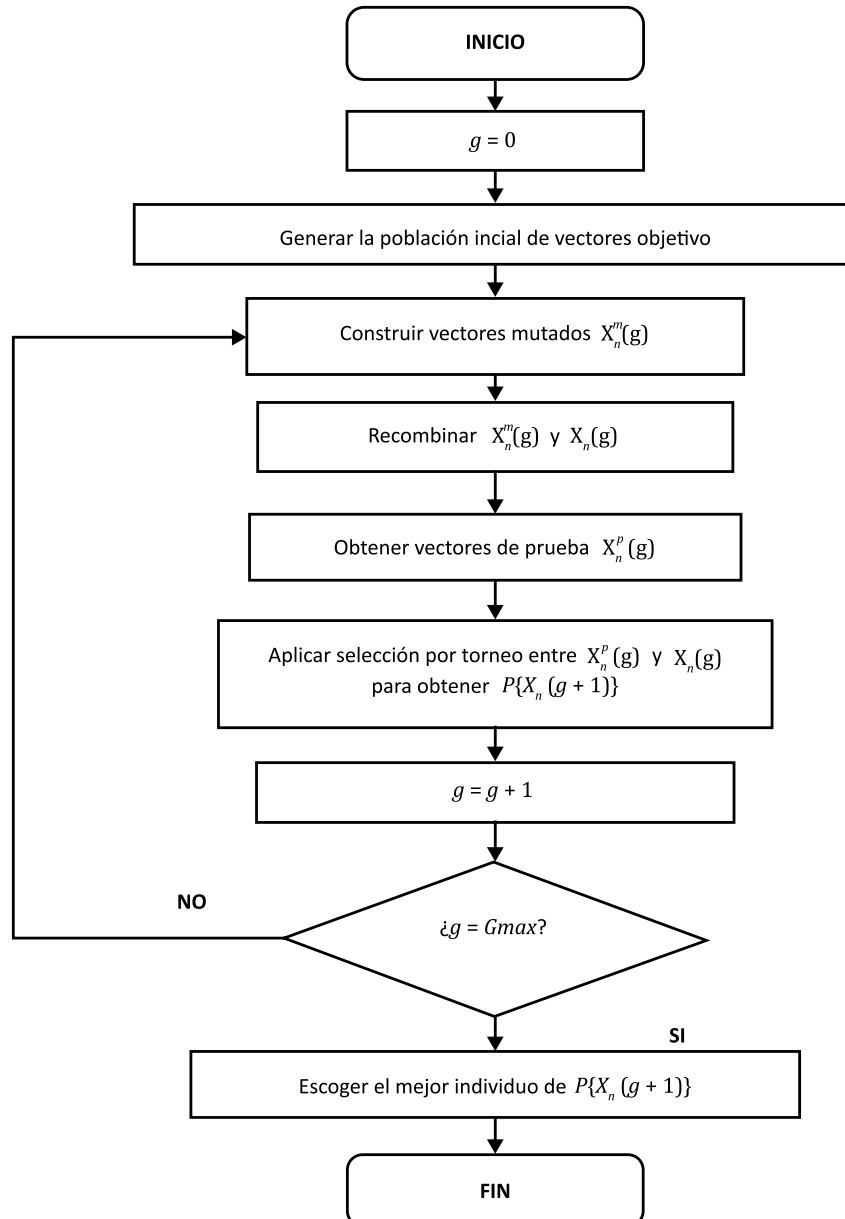


Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo evolutivo empleado en el planificador del enlace de bajada de LTE propuesto

Fuente: Elaboración de los autores

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, obteniendo los vectores de prueba X_n^P aplicando la función de la expresión 12.

$$X_n^P = \begin{cases} X_n^M(i) & \text{para } li \leq i \leq ls \\ X_n(i) & \text{para otro caso} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

li y ls corresponden al límite inferior y superior de la recombinación entre los vectores objetivo y los vectores mutados. Estos valores se obtienen aleatoriamente a partir de una tasa de recombinación ρ_c comprendida en el intervalo $0 \leq \rho_c \leq 1$.

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 $X_n(g+1)$.

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

3.4.3. 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 toma [11]. Por tanto, la respuesta impulsiva de un canal basado en el modelo de línea de retardo *tapped* corresponde a la expresión 13.

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N c_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

$h(t, \tau)$ es la respuesta impulsiva en el instante t , y el retardo τ .

$c_i(t)$ es la i -ésima componente de la respuesta impulsiva en el instante t .

$\delta(\tau - \tau_i)$ corresponde a la función impulso unitario evaluada en el retardo τ_i .

N es la cantidad de componentes que se consideran relevantes para el modelo.

Para el estudio se consideran los parámetros que corresponden a la Extensión del Modelo Peatonal B (ExtPedB, *Extension of Pedestrian B*), el cual es adecuado para canalizaciones superiores a 5 MHz [12] y es el caso de dispersión mediana de los retardos que se producen frecuentemente [11].

3.4.4. Cálculo de pérdidas y desvanecimiento del UE

Para la pérdida de trayecto se considera el modelo de la ecuación 14, de acuerdo a la recomendación TS 36.942 [13].

$$L_p = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hb}) \cdot \log_{10}(R) - 18 \cdot \log_{10}(D_{hb}) + 21 \cdot \log_{10}(f) + 80dB \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

R es la separación entre la estación base y el equipo de usuario en kilómetros.

f es la frecuencia portadora en MHz.

D_{hb} es la altura de la antena de la estación base en metros, medida desde el nivel promedio del techo.

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 [14], cuya función de densidad de probabilidad se presenta en la ecuación 15.

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Se emplean valores típicos para media y desviación estándar $\mu = 0$ y $\sigma = 6dB$ [14].

Por tanto, la pérdida total para cada terminal está dada por la expresión 16.

$$L = L_p + L_s \quad (\text{Ecuación 16})$$

La potencia recibida P_{rx} se estima a partir del balance de enlace de la expresión 17.

$$P_{rx}(dBm) = P_{tx}(dBm) + G_{tx}(dBi) - L(dB) \quad (\text{Ecuación 17})$$

3.4.5. Estimación de CQI en cada 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 es utilizado 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 de la expresión 18 [15].

$$SINR (dB) = P_{rx} (dBm) - 10 \text{ Log} \left(\frac{1}{|h_0|^2} n^2 \right) (dB) - \sum_{l=1}^{N_{int}} \frac{|h_l|^2}{|h_0|^2} P_{rx,l} (dB) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

P_{rx} es la potencia recibida.

n es una variable aleatoria que obedece a una distribución normal y representa el ruido del canal.

l es el índice de transmisores interferentes.

N_{int} representa el número total de transmisores interferentes.

$\frac{1}{|h_0|^2}$ y $\frac{|h_l|^2}{|h_0|^2}$ representan los parámetros de ruido e interferencia respectivamente.

Para obtener el valor de CQI correspondiente a la SINR en el equipo terminal se utiliza la función de mapeo [16] que se presenta en la Figura 9. En los casos en que la SINR estimada se encuentre entre dos valores de CQI, se selecciona el menor de ellos.

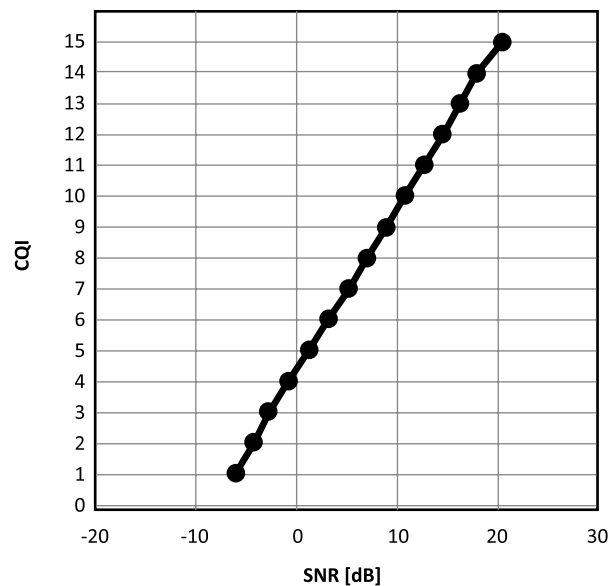


Figura 9. Función de mapeo entre SINR y CQI

Fuente: Notación tomada de [16]

3.4.6. Generador de Tráfico

De acuerdo a la recomendación TR 36.814 [17], 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, su carga nunca finaliza. Por tanto, en este modelo de tráfico la cantidad de usuarios de la celda es constante porque siempre tienen datos por transmitir.

3.4.7. 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 este 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 cantidad de bits efectivos que son entregados a un determinado usuario i en un intervalo de tiempo dado t , se introduce el concepto de Tamaño del Bloque de Transporte (TBS, *Transport Block Size*) que se calcula a partir de la expresión 19.

$$TBS_i^t(\text{bits}) = 160 \cdot \eta \cdot K_i^t \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

η es la eficiencia de la codificación de canal.

K_i^t es la cantidad de RB asignados a un usuario i en el TTI t .

El total de bits asignados a un usuario durante T Intervalos de Tiempo de Transmisión (TTBS) se determina por la expresión 20.

$$TTBS_i = \sum_{t=1}^T TBS_i^t \quad (\text{Ecuación 20})$$

A su vez el *throughput* promedio del sistema se obtiene al sumar el total de bits asignados a todos los usuarios y dividirlo entre los T intervalos de tiempo que se prueba el sistema, como se presenta en la expresión 21.

$$\bar{R}(\text{Mbps}) = \frac{\sum_i TTBS_i}{10^6 T} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Para determinar la equidad en la asignación de RB a los UE del sector se emplea el índice de justicia de Jain [18] el cual se calcula de acuerdo a la expresión 22.

$$J = \frac{(\sum \bar{R}_i)^2}{n \sum (\bar{R}_i)^2} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

\bar{R}_t es el *throughput* promedio de cada usuario durante los T intervalos de tiempo de transmisión que toma la simulación.

El índice de ocupación de RB es una métrica de eficiencia de la planificación que se define a través de la expresión 23.

$$RBO(t) = \frac{RB_a(t)}{RB_d(t)} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ik}}{K} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

$RB_a(t)$ es la cantidad de bloques de recursos asignados en un TTI t .

$RB_d(t)$ es la cantidad de bloques de recursos disponibles en un TTI t .

i identifica al i -ésimo usuario del sistema.

k identifica al k -ésimo usuario del sistema.

I es el número de usuarios del sistema.

K es la cantidad de RB disponibles en el sistema.

Si el sistema se evalúa en T intervalos de tiempo el porcentaje de ocupación de RB se calcula a través de la ecuación 24.

$$\%RBO = \frac{\sum_{t=1}^T RBO(t)}{T} \cdot 100 \% \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

$RBO(t)$ es el índice de ocupación de recursos para cada TTI t .

T es la cantidad de intervalos de tiempo en el cual se evalúa el sistema.

3.5. Construcción, verificación y validación del modelo de simulación

3.5.1. Diseño de códigos computacionales para el planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en algoritmo evolutivo

En la Figura 10 se presenta el pseudocódigo del algoritmo genético 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 8.

3.5.2. Definición de los escenarios de simulación

Con el fin de experimentar con el modelo de simulación propuesto y evidenciar la respuesta del sistema a diversos parámetros se plantearon cinco escenarios. Las métricas empleadas para la evaluación del

desempeño del sistema son: *throughput* del sistema e índice de justicia. La configuración general de parámetros del sistema LTE en el enlace bajada se muestra en la Tabla 3.

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

Figura 10. Pseudocódigo del algoritmo evolutivo para el procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 3. Configuración general de parámetros del sistema

Parámetro	Valor
Topología	1 sitio/3 sectores
Tamaño de espacio de trabajo	1,2 km 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 transmisión 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

Fuente: Elaboración de los autores

En la Tabla 4 se presentan los escenarios considerados en el estudio y los valores de los parámetros que constituyeron los casos.

Tabla 4. Escenarios de simulación

Distribución de UE	Parámetros Algoritmo Evolutivo				Escenario 5 Parámetros GPF	
	Escenario 1 Tamaño de Población	Escenario 2 Probabilidad de Cruce p_c	Escenario 3 Número de Generaciones G_{max}	Escenario 4 Número de UE I	ε	ϕ
Uniforme en el espacio de trabajo	D/2, D, 2D, 4D, 6D, 8D, 10D	0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200	10, 20, 30, 40 y 50	3 2 1 1 1	1 1 1 2 3

Fuente: Elaboración de los autores

3.5.3. Validación del modelo de simulación

3.5.3.1. Validez estadística de los datos obtenidos

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 permite la comparación de variables aleatorias libres de efectos de escala, un coeficiente de variación superior al 30 % indica problemas en los datos recolectados o que el experimento se encuentra fuera de control [18, 19].

En la Tabla 5 se muestra la escala de fiabilidad propuesta para el coeficiente de variación en los datos obtenidos de *throughput*, índice de justicia y porcentaje de ocupación de RB en la simulación de los escenarios propuestos.

Tabla 5. Escala de fiabilidad propuesta para el coeficiente de variación

Escala de fiabilidad	Rango coeficiente de variación
Adecuado	<10 %
Aceptable	10 % - 20 %
Inaceptable	>30 %

Fuente: Elaboración de los autores

3.5.3.2. Escalas cualitativas para las métricas de desempeño

Dado el carácter continuo de las métricas de desempeño empleadas en el estudio se proponen escalas cualitativas ordinales [20] que facilitan el análisis de los datos obtenidos en la simulación de los escenarios propuestos. En la Tabla 6 se presenta la propuesta de escalas cualitativas para las métricas de desempeño, índice de justicia y porcentaje de ocupación de RB que se desarrolló a partir del análisis de los valores obtenidos en estudios previos [21-26] para diversos algoritmos de planificación en el enlace de bajada de LTE.

Tabla 6. Escalas de fiabilidad propuestas para índice de justicia y porcentaje de ocupación de RB

Escala de fiabilidad	Índice de justicia (J)	Ocupación de RB (%)
Muy adecuado	0,950 – 1,000	0,900 – 1,000
Adecuado	0,900 – 0,949	0,800 – 0,899
Aceptable	0,800 – 0,899	0,700 – 0,799
Inadecuado	0,700 – 0,799	0,600 – 0,699
Muy inadecuado	< 0,700	<0,600

Fuente: Elaboración de los autores

Para el análisis del desempeño del planificador en lo referente a *throughput* se genera una escala de fiabilidad basada en la expresión 25 [27].

$$R_N = \frac{\bar{R}}{R_{MR}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

Donde:

R_N corresponde al *throughput* normalizado.

\bar{R} es el *throughput* promedio del sistema obtenido por el planificador de paquetes del enlace de bajada de LTE basado en algoritmos genéticos.

R_{MR} es el *throughput* promedio del sistema obtenido por el planificador MR.

La escala de fiabilidad propuesta se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Escala de fiabilidad propuesta para el análisis del *throughput*

Escala de fiabilidad	<i>Throughput</i> normalizado
Muy adecuado	0,900 – 1,000
Adecuado	0,800 – 0,899
Aceptable	0,700 – 0,799
Inadecuado	0,600 – 0,699
Muy inadecuado	<0,600

Fuente: Elaboración de los autores

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se pretende comparar el desempeño del Planificador de Paquetes con Evolución Diferencial (PS-DE, *Packet Scheduler Differential Evolution*) con planificadores basados en PF y RR de amplio despliegue en los sistemas de comunicaciones.

Para el planificador PS-DE se considera la configuración de la Tabla 8 por ser la que mejores resultados obtuvo de manera general en las métricas estudiadas.

Tabla 8. Parámetros del planificador del enlace de bajada de LTE considerados en la comparación con los planificadores RR y PF

Parámetro	Valor
Tamaño de población	10 D
Probabilidad de cruce (p_c)	0,9
Número de Generaciones G_{max}	200
Parámetros GPF	$\varepsilon = 1, \varphi = 2$

Fuente: Elaboración de los autores

4.1. Análisis comparativo de *throughput* del sistema y *throughput* normalizado

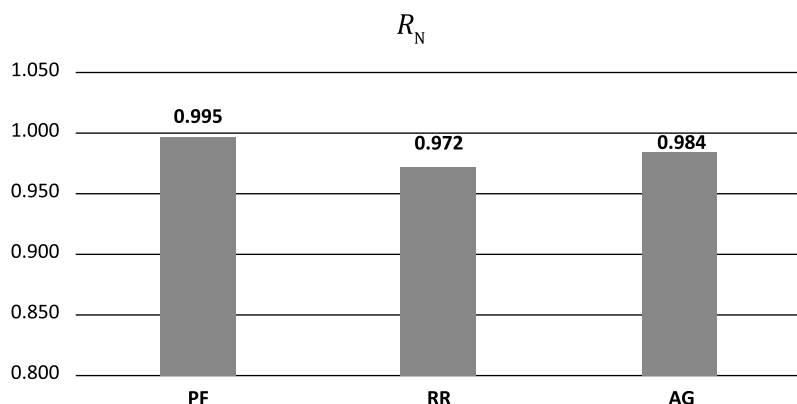
En la Tabla 9 se presentan los valores obtenidos de *throughput* del sistema y *throughput* normalizado de los planificadores PF, RR y PS-DE, el coeficiente de variación máximo es de 1,141 % y la varianza máxima obtenida es de 0,314 por tanto, los resultados son repetibles y estadísticamente adecuados.

Tabla 9. Resultados *throughput* del sistema para los planificadores PF, RR y PS-DE

Planificador	Valor Promedio $R(Mbps)$	Valor Normalizado R_N	Varianza σ^2	Coefficiente de Variación (%)
PF	44.001	0,995	1.189×10^{-2}	0,248
RR	42.952	0,972	0,314	1,304
PS-DE	43.514	0,984	0,246	1,141

Fuente: Elaboración de los autores

La Figura 11 presenta los resultados de *throughput* normalizado para los planificadores empleados en el estudio; se observa que el planificador propuesto supera en desempeño al planificador basado en RR con una diferencia de $R_N = 0,012$, a su vez el planificador propuesto es superado en desempeño por el planificador PF por $R_N = 0,011$.

**Figura 11. *Throughput* normalizado de los planificadores PF, RR y PS-DE**

Fuente: Elaboración de los autores

4.2. Análisis comparativo del índice de justicia

En la Tabla 10 se presentan los valores obtenidos de índice de justicia en la experimentación con los planificadores PF, RR y PS-DE, el coeficiente de variación máximo es de 5.974 % y la varianza alcanzó un valor de 2.248×10^{-3} , por tanto, los resultados son repetibles y estadísticamente adecuados.

Tabla 10. Resultados de índice de justicia para los planificadores PF, RR y PS-DE

Planificador	Valor Promedio J	Varianza σ^2	Coefficiente de Variación (%)
PF	0,925	9.468×10^{-4}	3.328
RR	0,934	2.248×10^{-3}	5.974
PS-DE	0,725	3.330×10^{-4}	2.518

Fuente: Elaboración de los autores

La Figura 12 presenta los resultados de índice de justicia para los planificadores empleados en el estudio; se observa que el planificador propuesto presenta el peor desempeño al obtener $J = 0,725$, mientras el planificador basado en RR obtuvo el mejor desempeño con $J = 0,934$. Es importante resaltar

que para la comparación el planificador propuesto se configuró con 200 generaciones, con un menor número de generaciones, pese a reducirse los valores de R_N , el índice de justicia promedio logró valores muy adecuados como se evidenció en los resultados del escenario cuatro alcanzando un máximo de $J = 0,968$.

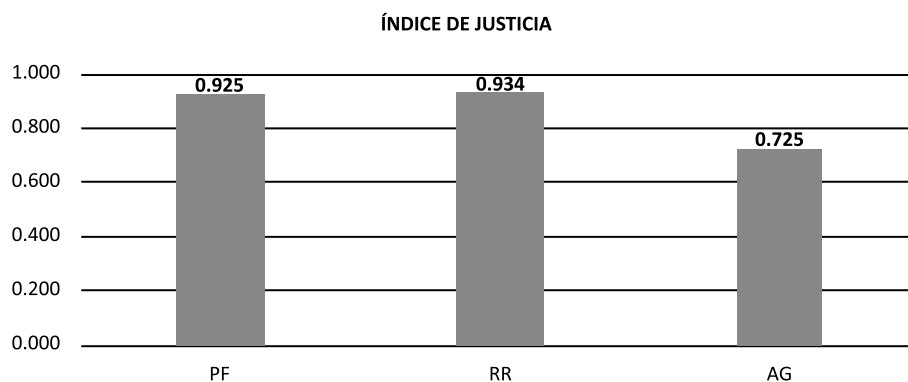


Figura 12. Índice de justicia de los planificadores PF, RR y PS-DE

Fuente: Elaboración de los autores

4.3. Análisis comparativo del porcentaje de ocupación de RB

En la Tabla 11 se muestran los valores obtenidos de porcentaje de ocupación de RB; los resultados obtenidos son repetibles y estadísticamente adecuados presentando valores máximos de coeficiente de variación y varianza de 0,005 % y 2.778×10^{-5} en el caso del planificador basado en RR.

Tabla 11. Resultados de porcentaje de ocupación de RB para los planificadores PF, RR y PS-DE

Planificador	Ocupación de RB (%)	Varianza σ^2	Coefficiente de Variación (%)
PF	100.000	0,000	0,000
RR	99.995	2.778×10^{-5}	0,005
PS-DE	100.000	0,000	0,000

Fuente: Elaboración de los autores

La Figura 13 presenta los resultados de porcentaje de ocupación de RB para los planificadores empleados en el estudio, se observa que el planificador propuesto presenta el mejor desempeño al obtener un porcentaje de ocupación del 100 % como ocurre con el planificador basado en PF. De esta manera se evidencia que el planificador propuesto realiza una asignación completa de todos los recursos disponibles.

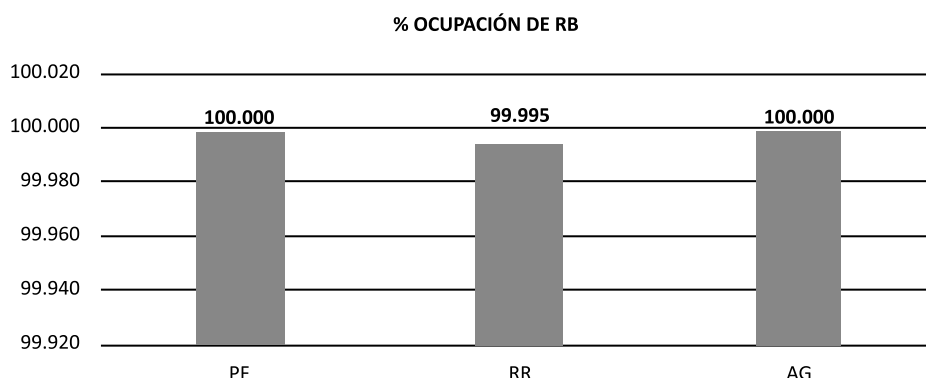


Figura 13. Porcentaje de ocupación de RB para los planificadores basados en PF, RR y PS-DE

Fuente: Elaboración de los autores

5. CONCLUSIONES

El procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE a nivel físico se representó con un modelo inspirado en el problema de la mochila, definiendo una función objetivo que maximiza la métrica agregada de los RB ocupados por los UE del sistema, y considerando como restricciones el número de RB determinado por el ancho de banda de canal y la imposibilidad de asignar un RB a más de un usuario. La métrica empleada por el planificador propuesto es flexible, en la medida que permite ajustar parámetros para priorizar *throughput* del sistema o índice de justicia.

Se empleó un planificador de paquetes en el enlace de bajada de LTE basado en un algoritmo evolutivo con mutación diferencial y selección por torneo con retención del mejor individuo 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 PF y RR.

La metodología empleada en el estudio permitió evidenciar el impacto de la variación de parámetros propios del algoritmo, tales como el número de generaciones, tamaño de población, la tasa de recombinación y los parámetros GPF de la función objetivo, sobre el desempeño del sistema. Al evaluar el comportamiento del planificador propuesto ante el incremento de usuarios asociados al ENB se demostró que responde de forma adecuada manteniendo valores adecuados el *throughput* del sistema y el porcentaje de ocupación de RB.

El modelo general del sistema considera elementos importantes para la evaluación del desempeño, tales como: la ubicación en posiciones aleatorias de los usuarios, modelo de canal, pérdidas y desvanecimiento, estimación del CQI por parte del UE y la generación de tráfico en el enlace de bajada. La herramienta de simulación permite recrear estos elementos acorde con las recomendaciones de la ITU para sistemas LTE.

En el estudio se evidencia el potencial de las técnicas metaheurísticas para soportar el procedimiento de planificación de paquetes en el enlace de bajada de LTE, siendo adecuado para trabajos futuros explorar otras técnicas que tiendan a mejorar las métricas de desempeño del sistema o a reducir los recursos computacionales empleados.

Para el estudio se delimitó la planificación de paquetes para un escenario unicolor y modo de transmisión SISO; es pertinente que trabajos futuros analicen el impacto del traspaso de usuarios entre celdas y el uso de sistemas MIMO sobre el desempeño del sistema.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 3GPP. Tech Specif 25.913. Group Radio Access Network - Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRA), 2010.
- [2] L. Bin, T. Hui, y X. Lingling, "An efficient downlink packet scheduling algorithm for real time traffics in LTE systems", presentado en *Consumer Communications and Networking Conference*, Las Vegas, USA, 2013.
- [3] H. Mohd, et al., "Performance of Well Known Packet Scheduling algorithms in Downlink 3GPP LTE System", presentado en *9th Malaysia a International Conference Communications*, Kuala Lumpur, Malasia, diciembre, 2009.
- [4] X. Wang, "Optimization Formulation of Packet Scheduling Problem in LTE Uplink", presentado en *71st Vehicular Technology Conference*, Taipei, Taiwan, 2010.
- [5] S. Das, P. Suganthan, "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art", *Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 15, no. 1, pp. 4-31, feb., 2011.
- [6] E. Dalman, et al., *3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Amsterdam, Holanda: Academic Press, 2008, pp. 105-106.
- [7] 3GPP, "Physical Channels and Modulation", Technical Specification 36.211, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), 2014.
- [8] S. Adnan, A. Saleem, K. Hyung and L. Kyung-Geun, "Genetic algorithm based self-organized resource allocation in LTE-Advanced network", presentado en *6th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Vienna, Austria, julio, 2014.
- [9] O. Ülgen, "Simulation Methodology - A Practitioner's Perspective", *International Journal of Industrial Engineering*, 2006.
- [10] J. Wengerter, "Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA", presentado en *61st Vehicular Technology Conference VTC*, Estocolmo, Suecia, 2005.
- [11] ITU-R, "Recomendación ITU-R M. 1225 Pautas de Evaluación de las Tecnologías de Transmisión Radioeléctrica para las IMT – 2000", 1997.
- [12] T. Sorensen, P. Mogensen and F. Frederiksen, "Extension of the ITU channel models for wide-band (OFDM) systems", presentado en *Vehicular Technology Conference*, Dallas, USA, 2005.

- [13] 3GPP, "Radio Frequency (RF) system scenarios", Technical Specification 36.942, Group Radio Access Network Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), 2014.
- [14] D. Giancristofaro, "Correlation model for shadow fading in mobile radio channels", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 11, pp. 958-959, mayo, 1996.
- [15] H. Claussen, "Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems", presentado en *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Berlin, Alemania, septiembre, 2005.
- [16] J. Ikuno, M. Wrulich, M. Rupp, "System Level Simulation of LTE Networks", presentado en *Vehicle Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, Taipei, Taiwan, mayo, 2010.
- [17] 3GPP, Technical Report 36.814 v9.0.0, "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects", 2010.
- [18] R. Jain, D. CHI and W. Hawe, *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Hudson, MA: Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984.
- [19] C. Brown, *Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences*. Virginia, USA: Springer Science & Business Media, 2012, pp. 155-157.
- [20] T. Knapp, "Treating ordinal scales as interval scales: an attempt to resolve the controversy", *Nursing research*, no. 39, pp. 121-123, 1990.
- [21] A. Virdis, G. Stea, G. Nardini, "SimuLTE - A modular system-level simulator for LTE/LTE-A networks based on OMNeT++", presentado en *International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH)*, Vienna, Austria, agosto, 2014.
- [22] M. Hamed, S. Shukry, M. El-Mahallawy, S. El-Ramly, "Modified earliest deadline first scheduling with channel quality indicator for downlink real-time traffic in LTE networks", presentado en *Third International Conference on e-Technologies and Networks for Development (ICeND)*, Beirut, Líbano, abril-mayo, 2014.
- [23] L. Tian, D. Kao, C. Mung, A. Sabharwal, "An Axiomatic Theory of Fairness in Network Resource Allocation", presentado en *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, San Diego, Estados Unidos, marzo, 2010.
- [24] I. Comsa, M. Aydin, S. Zhang, P. Kuonen, J. Wagen, "Multiobjective resource scheduling in LTE networks using reinforcement learning". *International Journal of Distributed Systems and Technologies*, no. 3, pp. 39-57, 2012.
- [25] A. Raniwala, D. Pradipta, S. Sharma, "End-to-End Flow Fairness Over IEEE 802.11-Based Wireless Mesh Networks", presentado en *26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Anchorage, USA, mayo, 2007.
- [26] S. Schwarz, C. Mehlhruher, M. Rupp, "Low complexity approximate maximum throughput scheduling for LTE", presentado en *Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, USA, noviembre, 2010.
- [27] O. Gemici, I. Hokelek, H. Ali Cirpan, "GA based multi-objective LTE scheduler", (CCS), presentado en Rhine River, Alemania, septiembre, 2014.