

# ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO EN UN CENTRO COMERCIAL POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS\*

## ANALYSIS OF A WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM IN A SHOPPING MALL THROUGH DISCRETE EVENT SIMULATION

*Carlos Iván Páez Rueda\*\**

**Resumen:** en este artículo se presenta el análisis de un sistema de comunicación inalámbrico de funcionamiento dentro de un centro comercial. Por medio de la técnica de simulación por eventos discretos, se plantea un modelo del sistema, se implementa y se obtienen algunos parámetros de diseño. Los resultados encontrados permiten valorar el sistema inalámbrico propuesto, por medio de las curvas de la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de terminación abrupta de una llamada en curso o *drop*, considerando como parámetros de entrada el tráfico ofrecido por celda, la movilidad pedestre de los abonados, el modelo del canal de radiofrecuencia, entre otros.

**Palabras clave:** sistemas de tiempo discreto —modelos matemáticos, sistema de comunicación inalámbrico, análisis de sistemas—.

**Abstract:** In the present paper the analysis of wireless communications systems in a shopping mall is presented. By means of the discrete events simulation technique, a model of the system is proposed; it is implemented and the design parameters are obtained. The results allow to determine the blocking probability and the dropping probability, in function of traffic offered by cell, the mobility of subscribers, the model of radio frequency channel and other typical parameters.

**Key words:** Discrete-time systems —mathematical models, wireless communication system, system analysis.

---

\* Fecha de recepción: 22 de marzo de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 6 de agosto de 2007. Este artículo corresponde a un proyecto de innovación y desarrollo tecnológico.

\*\* Ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Master en Ingeniería Electrónica, Universidad de los Andes, Colombia. Profesor asistente, Departamento de Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: paez.carlos@javeriana.edu.co

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de análisis de sistemas complejos de telecomunicaciones hace cada vez más difícil el modelado teórico de los sistemas y permite un amplio campo de acción a otros tipos de disciplinas relacionadas con la simulación de sistemas. En el presente artículo se pretende ilustrar el modelado, la implementación y el posterior análisis de un problema de telecomunicaciones por medio de la técnica de simulación por eventos discretos.

El caso de estudio analizado es un sistema inalámbrico de cubrimiento dentro de un centro comercial, en el cual se analizan los parámetros de desempeño de probabilidad de bloqueo y la probabilidad de *drop*, en función del número de estaciones base por piso, la cantidad de canales de tiempo y portadoras de frecuencia asignados por la tecnología de acceso, el número total de abonados en el sistema y el modelo del canal de radiofrecuencia.

El presente artículo está basado en la descripción de un sistema de telecomunicaciones inalámbrico digital de tipo *cordless* (DCTS), evaluado en Fapojuwo, McGirr y Kazeminejad (1992), en el cual se utiliza una técnica de acceso múltiple TDMA, combinado con una técnica de *duplexación por división en tiempo* (TDD). La herramienta desarrollada permite la toma de decisiones complejas de diseño y evalúa parámetros de desempeño cuyo análisis teórico sería muy complejo.

La simulación planteada es flexible, ya que permite encontrar los resultados de desempeño ante situaciones tan complejas como el cambio de las distribuciones de probabilidad que rigen cada proceso. El modelo del sistema de comunicación inalámbrico se realizó por medio del lenguaje de programación C++, con programación orientada a objetos, a fin de encapsular y facilitar la interpretación del modelo desarrollado.

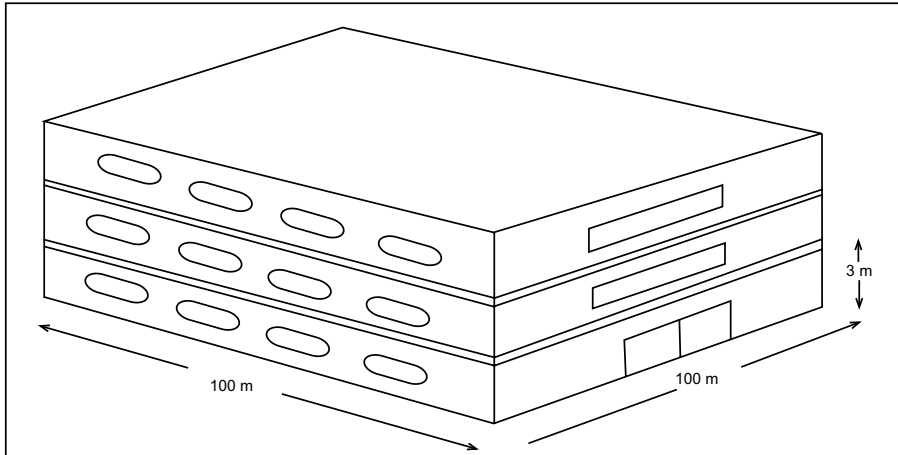
En la primera parte se presenta la descripción del sistema inalámbrico DCTS bajo el escenario de un centro comercial. En la segunda parte se muestra el modelado y la implementación de dicho sistema por medio de la técnica de simulación por eventos discretos. En la tercera parte se presentan los resultados obtenidos por medio de la simulación. Finalmente, se relacionan las conclusiones.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INALÁMBRICO PROPUESTO

### 1.1 ESCENARIO DEL CENTRO COMERCIAL

El sistema de telecomunicaciones inalámbrico se evalúa en un escenario conformado por una construcción que emula las longitudes típicas de un centro comercial de tamaño mediano. Las dimensiones físicas modeladas fueron de 100×100 metros (m) de base, conformado por M-pisos y con una separación entre pisos típica de 3 m, como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Escenario típico de un centro comercial de tamaño mediano



Fuente: presentación propia del autor.

Las características técnicas de cada uno de los elementos que van a intervenir dentro de la simulación se describen a continuación.

## 1.2 ABONADOS

Los tipos de abonados que se modelan en el centro comercial son de dos categorías. La primera tendrá dentro de la simulación una localización fija durante el transcurso de su llamada. La segunda tendrá características móviles pedestres durante la llamada, con una velocidad constante de movimiento de 1,4 m/s y una duración del movimiento antes de un cambio de dirección distribuida de forma exponencial con media de 50 segundos.

El ángulo que representa la nueva dirección de movimiento será distribuido de forma uniforme en el intervalo  $[0, 2\pi]$  radianes. Cada uno de los abonados generará una demanda de tráfico de 0,2 Erlang y tendrá una duración de la llamada distribuida de forma exponencial con media de 120 segundos. Se considerará que el proceso de llegada de las llamadas de cada abonado es un proceso de Poisson (Medhi, 2003) con una tasa de arribo de seis llamadas por hora. El sistema de transmisión de potencia de radiofrecuencia de cada abonado estará conformado por una antena isotrópica de ganancia de valor 0 dBi y una potencia de transmisión constante de valor +10 dBm.

## 1.3 ESTACIONES BASE

Los tipos de estaciones base que se consideran en el modelo de la simulación son de tipo Picocelda (Pahlavan y Levesque, 1995), donde la región de cubrimiento de cada celda es menor a decenas de metros. Por ende, se modela cada piso cubierto por  $K$  estaciones base equidistantes unas de otras, a fin de formar una grilla cuadrada (Rappaport y

Brickhouse, 1999). Se analiza la relación del nivel de potencia en comparación con la interferencia o *carrier to interference* (C/I) en el enlace descendente (o *downlink*). Cada estación base estará conformada por una antena isotrópica de ganancia 0 dBi y tendrá implementada una estrategia de *HandOff* (Rappaport, 2002) para todos los usuarios.

#### 1.4 CANAL DE RADIOFRECUENCIA

En el canal de radiofrecuencia se asumen los efectos más representativos para el desempeño del sistema propuesto. El canal modelado tendrá características de desvanecimiento plano y lento (Molisch, 2005; Rappaport y Brickhouse, 1999); por ende, las condiciones estadísticas del canal permanecerán constantes durante una *slot* de tiempo y no existirá interferencia intersímbolo (ISI) (Li, Lee y Lane, 2000).

El modelo de pérdidas del canal promedio o *path loss* será modelado de forma radial, tomando en cuenta la distancia de separación entre el transmisor y el receptor. Este modelo de atenuación a gran escala (Molisch, 2005) utilizado para describir este fenómeno será el planteado en Fapojuwo, McGirr y Kazeminejad (1992), el cual está caracterizado por la función de transferencia (Ecuación 1).

$$PL(R) = \begin{cases} 30 + 20 \log_{10}(R) & R \leq 10 \text{ m} \\ 20 + 30 \log_{10}(R) & 10 \text{ m} < R \leq 20 \text{ m} \\ -19 + 60 \log_{10}(R) & 20 \text{ m} < R \leq 40 \text{ m} \\ -115 + 120 \log_{10}(R) & R > 40 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

En el canal de radio se tomará en cuenta el fenómeno de pequeña escala, denominado *shadow fading* o desvanecimiento del nivel de potencia, producido por los diferentes objetos que se atraviesan en la vía entre el abonado que cursa la llamada y la estación base (Corazza, De Maio y Vatalaro, 1998). Este efecto se modela por medio de una atenuación en el nivel de potencia recibido, distribuido según una variable aleatoria de tipo *log-normal*, con media cero y desviación estándar de 6 dB (Pahlavan y Levesque, 1995; Kocaturk y Gupta, 1994).

Las señales que traspasan los diferentes pisos del centro comercial pueden afectar considerablemente las medidas de desempeño del sistema propuesto; por esta razón, se toma en cuenta dentro del modelo del canal de radio las pérdidas de potencia producidas al atravesar cada piso. Estas pérdidas se modelan como una variable constante de valor típico entre 10 dB y 15 dB por piso (Fapojuwo, McGirr y Kazeminejad, 1992; Pahlavan y Levesque, 1995).

Un modelo de radiopropagación determinístico que incluya un mayor detalle de los fenómenos electromagnéticos presentados en un edificación, como los implementados por Patzold *et al.* (1998), Schäfer y Wiesbeck (2005) y Gorce y Jaffrès-Runser (2007), podrían ser desarrollados sobre una arquitectura particular de un centro comercial; por lo tanto,

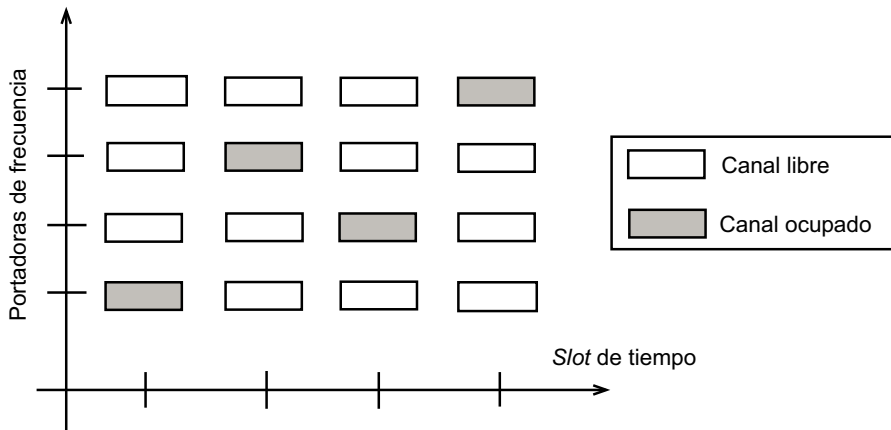
el modelo de canal utilizado en el presente trabajo pretende servir de plataforma típica o genérica para evaluar las medidas de desempeño del sistema propuesto.

### 1.5 TIPO DE ACCESO Y DUPLEXACIÓN

La tecnología utilizada está basada en un esquema de acceso múltiple de tipo TDMA (Molisch, 2005; Kocaturk y Gupta, 1994), combinado con un esquema de *duplexación* TDD (Molisch, 2005). Esta característica técnica simplifica el funcionamiento de la estación base, ya que cada una dispondrá de X canales de frecuencia en un mismo *slot* de tiempo por portadora.

Asimismo, cada estación base podrá tener acceso a Y portadoras diferentes en un ancho de banda determinado. La disponibilidad total del sistema será de X×Y canales lógicos diferentes en una trama de tiempo que no acepta el paralelismo temporal. En la Figura 2, se observa una disponibilidad máxima del sistema de 16 canales lógicos, pero una capacidad máxima por una estación base de cuatro canales disyuntos en el tiempo, ya que por simplicidad y costo del sistema no se permite el paralelismo temporal por estación base.

Figura 2. Representación tiempo-frecuencia del sistema propuesto TDMA



Fuente: presentación propia del autor.

Se especifica que el sistema modelado no tendrá canales lógicos dedicados a sincronismo y señalización; por lo tanto, estos parámetros deberán estar incluidos dentro de cada *slot* de tiempo.

### 1.6 PROCEDIMIENTO PARA ESTABLECER UNA LLAMADA

En el sistema evaluado sólo se considera el tráfico generado desde el interior de su red. El procedimiento generado por un abonado que solicita cursar una llamada telefónica a través de la red es el siguiente:

- El dispositivo del abonado que desea realizar una llamada buscará la estación base con mayor nivel de potencia y verificará si algún canal lógico cumple los requerimientos de un nivel aceptable de portadora a interferencia o C/I.
- En caso de que ningún canal lógico de la estación base escogida cumpla los requerimiento mínimos de C/I, el dispositivo de abonado buscará la estación base con el siguiente nivel de potencia más representativo y volverá a comparar el requerimiento de C/I en todos sus canales lógicos.
- En caso de que ninguno de los primeros R estaciones base cumplan el requerimiento de C/I para algún canal lógico, se asumirá que la llamada no fue posible cursarla por red y, por ende, ésta se considerará bloqueada.

En el sistema inalámbrico propuesto se evaluará la relación C/I referida al enlace *downlink* en cada dispositivo del abonado. Esta relación indica, en el punto donde se encuentra el abonado, el nivel de potencia en el dispositivo debido a la estación base, en la cual está interesado en conectarse o que actualmente está conectado, comparado con el nivel de potencia recibido de las demás estaciones base que simultáneamente están utilizando el mismo canal lógico para otra llamada en curso.

### 1.7 PROCEDIMIENTO DE *HANDOFF*

El procedimiento de *HandOff* ocurre cuando en una llamada ya establecida, por los efectos del canal de radio, el nivel de C/I en el dispositivo del abonado disminuye de un umbral predeterminado. Para no perder la llamada en curso, el sistema trata de ejecutar la acción de *HandOff* o cambio dinámico del canal lógico a un nuevo canal que garantice la continuación de la llamada con un nivel de C/I aceptable. En primera medida, el sistema modelado tratará de cambiar el canal lógico asignado a un nuevo canal lógico en la misma estación base. En caso de no ser posible el intercambio, el sistema buscará en las R-1 celdas cercanas en potencia un canal que cumpla el requerimiento de C/I de umbral. En caso de que no sea posible encontrar dicho canal lógico para la llamada en curso, entonces se considerará que la llamada ha sido interrumpida abruptamente o *dropped*.

### 1.8 ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

En el sistema modelado se considera una asignación de frecuencias dinámicas o DCA (Haas y Winters, 1997), donde cada estación base tiene la disponibilidad de asignar  $X \times Y$  canales lógicos de forma dinámica. La utilización de cada canal lógico podrá ser de tipo adyacente mientras no supere el nivel de C/I de umbral definido para la tecnología. Por simplicidad de una futura implementación del sistema descrito, se considera que cada estación base está en la disponibilidad de utilizar los  $X \times Y$  canales lógicos, pero sin admitir paralelismo en los *slots* de tiempo. Esto significa que cada estación base no podrá simultáneamente asignar dos portadoras de fre-

cuencia diferentes en el mismo *slot* de tiempo y, por lo tanto, la cantidad máxima de canales lógicos por estación base o la cantidad máxima de llamadas cursadas simultáneamente por cada estación base será de  $X$ .

## 1.9 RESOLUCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DEL ABONADO

Para la simulación se asume que la tecnología utilizada en el sistema inalámbrico es de tipo *cordless* de bajo costo (Pahlavan y Levesque, 1995; Rappaport, 2002; Molisch, 2005) y, por ende, un nivel típico de umbral para el C/I es de 21 dB (Fapojuwo, McGirr y Kazeminejad, 1992).

### 1.10 PARÁMETROS DE ENTRADA Y SALIDA DEL SIMULADOR

Los parámetros considerados entradas en el simulador son los siguientes:

- Cantidad de portadoras de frecuencia y *slot* de tiempo por estación base.
- Tamaño de la grilla rectangular para la asignación de las posiciones de los transmisores.
- Parámetros de tráfico de los abonados del sistema.
- Niveles de umbral del C/I para empezar a solicitar el procedimiento de *HandOff* y el proceso de establecimiento de la llamada.
- Porcentaje de abonados que pueden tener movilidad y los parámetros esperados para la duración media del movimiento y el cambio de dirección.

Los parámetros en los cuales se está interesado para evaluar el sistema son los siguientes:

- Probabilidad de bloqueo y de *drop*, considerando el número de estaciones base, el número de canales lógicos por estación base, el tráfico por usuario y el número de pisos que conforman el centro comercial.
- El desempeño del sistema ante la movilidad y el desempeño del sistema ante el número  $R$  de estaciones base utilizadas para buscar una interconexión.

## 2. MODELADO DEL SISTEMA POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS

Mediante la nomenclatura de la técnica de simulación por eventos discretos (Ross, 1999) se define la variable de tiempo, las variables que describen el estado del sistema, las variables de salida de la simulación y la lista de eventos del sistema de telecomunicaciones.

### 2.1 VARIABLE DE TIEMPO

Variable denotada por  $t$ , que representa la simulación en el tiempo actual.

## 2.2 VARIABLES DEL ESTADO DEL SISTEMA

Representadas por dos vectores tipo fila, denotadas como  $AB=[AB_1, AB_2, \dots, AB_N]$  y  $Tx=[Tx_1, Tx_2, \dots, Tx_C]$ . El primer vector representa los abonados que están cursando en el tiempo actual una llamada por el sistema. Cada abonado contiene las variables de la posición espacial donde se encuentra  $(X, Y, Z)$ , el tipo de movimiento que realiza y el ángulo en el cual se está moviendo.

El segundo vector representa los transmisores distribuidos en la grilla. Cada transmisor contiene la información de la posición donde se encuentra  $(X, Y, Z)$  y la matriz de canales lógicos, donde es posible asignar una canal lógico a un usuario por medio de la adecuada escogencia de un *slot* de tiempo y una portadora de frecuencia.

## 2.3 VARIABLES DE SALIDA

Las variables de salida que describen el desempeño del sistema son:  $L$ , que representa el número total de intentos de llamadas;  $B$ , que reporta la cantidad de llamadas que ha bloqueado el sistema, y  $D$ , que indica la cantidad de llamadas que se han interrumpido abruptamente o *dropped*.

## 2.4 LISTA DE EVENTOS

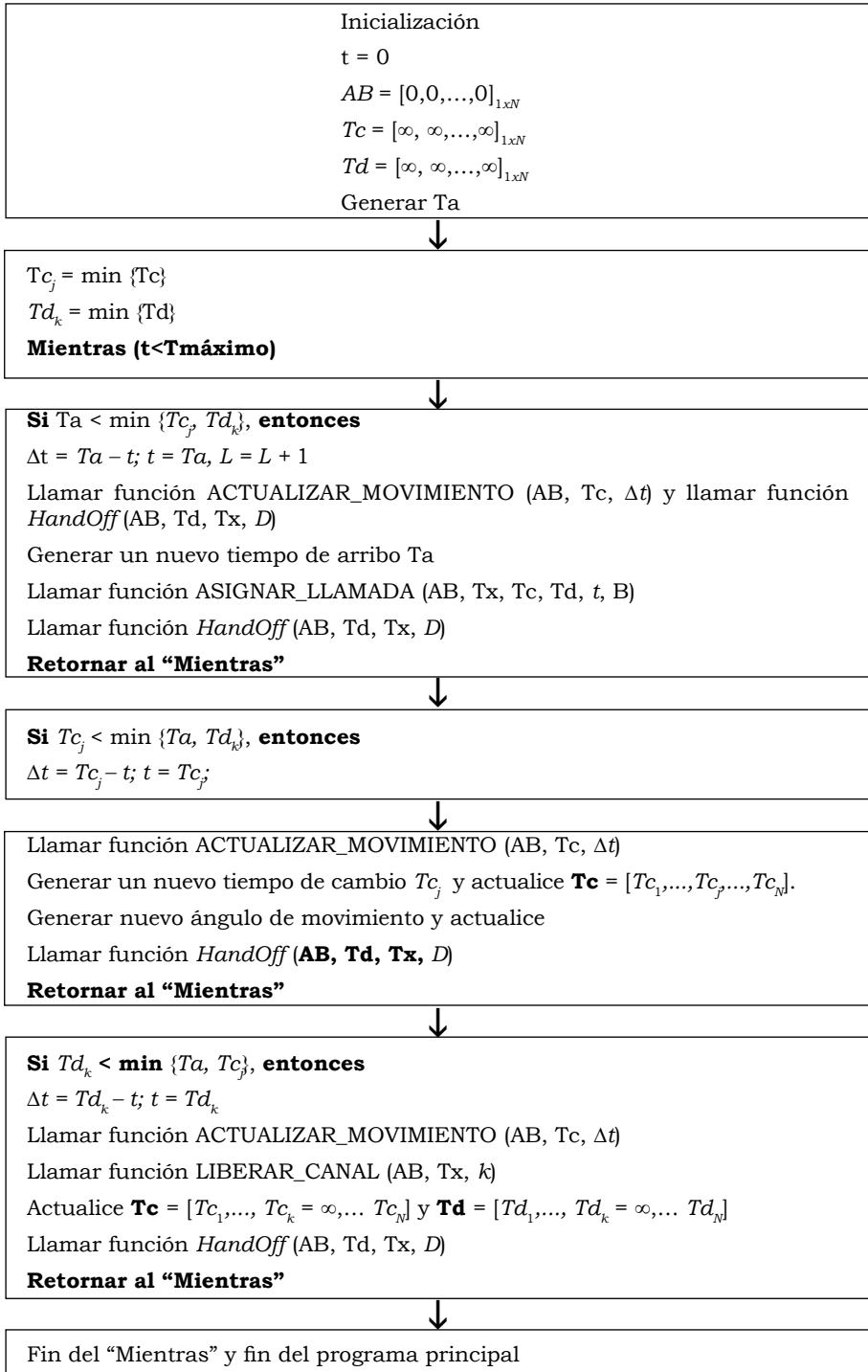
Las variables relacionadas con la lista de eventos serán tres:  $Ta$ ,  $Tc=[Tc_1, Tc_2, \dots, Tc_N]$  y  $Td=[Td_1, \dots, Td_k, \dots, Td_N]$ . La primera variable representa el tiempo en el cual un abonado requerirá generar una llamada a través del sistema inalámbrico dentro del centro comercial. La segunda variable es un vector tipo fila que representa el tiempo donde ocurre un cambio en la dirección del abonado  $k$ -ésimo que cursa una llamada. La última es un vector tipo fila que representa el tiempo de conclusión de las llamadas de los abonados  $k$ -ésimos que cursan actualmente una llamada.

La variable  $N$  representa el número máximo de canales disponibles en el sistema, y  $C$ , el número máximo de estaciones base en el centro comercial. Debido a la estrategia planteada de asignación de canales lógicos, el sistema total podrá asignar sólo  $N=X \times C$  canales lógicos y, por ende, podrá cursar máximo  $N$  usuarios simultáneamente.

## 2.5 ALGORITMO PRINCIPAL

A continuación se muestra el seudocódigo que describe el funcionamiento del sistema inalámbrico propuesto por medio de la técnica de simulación por eventos discretos.





Fuente: presentación propia del autor.

## 2.6 ALGORITMOS SECUNDARIOS

A continuación se describe el seudocódigo de las funciones más representativas invocadas en el programa principal.

**Función ACTUALIZAR MOVIMIENTO** (AB, Tc,  $\Delta t$ )

Para todo  $j = 1, \dots, N$  y  $Tc_j \neq \infty$

$AB_j.X = AB_j.X + \Delta t^* (\text{VELOCIDAD}) \cos(AB_j.ANGULO)$

$AB_j.Y = AB_j.Y + \Delta t^* (\text{VELOCIDAD}) \sin(AB_j.ANGULO)$

Llamar función VERIFICAR\_LÍMITES

**Retornar**

**Función HANDOFF** (AB, Td, Tx, D)

Para todo  $m = 1, \dots, N$  y  $Td_m \neq \infty$

$Tx_r = \text{BUSQUE\_CONEXIÓN}(Tx, AB_m)$

$C2I = Tx_r.C2I AB_m$

Si ( $C2I < \text{umbral\_C2I}$ ) Entonces

$Tx_r.LIBERAR\_CANAL(AB_m)$

Si ( $AB_m.ASIGNAR\_CANAL == \text{Falso}$ ), entonces

**AB** = [ $AB_1, \dots, AB_m = 0, \dots, AB_N$ ]

**Tc** = [ $Tc_1, \dots, Tc_m = \infty, \dots, Tc_N$ ]

**Td** = [ $Td_1, \dots, Td_m = \infty, \dots, Td_N$ ]

D=D+1

Retornar

Fuente: presentación propia del autor.

## Función ASIGNAR\_LLAMADA (AB, Tx, Tc, Td, t, B)

$Td_j = \max(Td)$ ;

Si ( $Td_j \neq \infty$ ), entonces

B=B+1; **Retornar**;

Generar posición aleatoria ( $AB_j$ )

Si ( $AB_j.ASIGNAR\_CANAL == \text{Falso}$ ), entonces

B=B+1; **Retornar**;

Sino ( $U[0,1] < \text{PROBABILIDAD\_MOVILIDAD}$ )

Genere tiempo entre cambios de dirección Tc; **Tc** = [ $Tc_1, \dots, Tc_j = t + Tc, \dots, Tc_N$ ]

Genere tiempo de duración de la llamada Td; **Td** = [ $Td_1, \dots, Td_j = t + Td, \dots, Td_N$ ]

**Retornar**

Fuente: presentación propia del autor.

## 2.7 FUNCIONES ADICIONALES UTILIZADAS EN EL PROGRAMA

A continuación se describen otras funciones que se utilizan en el programa y que por su simplicidad no dificultan la interpretación del modelo. Tales funciones manejan la misma notación de vectores descritas con anterioridad:

- Función POTENCIA: calcula el nivel de potencia entre el abonado ( $AB_j$ ) y el transmisor ( $T_r$ ), al cual se encuentra conectado o realizando el procedimiento de conexión.
- Función TRANSMISORES\_CERCANOS: identifica los primeros R transmisores más cercanos al abonado ( $AB_j$ ) considerando como criterio el nivel de potencia.
- Función C2I: calcula la relación de potencia a interferencia o C/I, considerando la potencia entre el transmisor  $T_r$  y el abonado  $AB_j$ , con relación a todos los demás transmisores que tienen una llamada en curso, en el mismo *slot* de tiempo y en la misma portadora. Debe mencionarse que el modelo implementado considera para los cálculos del C/I un valor típico del piso de ruido, razón por la cual formalmente es la relación  $C/(I+N)$ .
- Función BUSQUE\_CONEXIÓN: se encuentra implícita en la estructura de datos manejada, ya que todo abonado denotado por  $AB_j$  tiene una variable asociada que le indica a que transmisor  $T_r$  se encuentra conectado.
- Función ASIGNAR\_CANAL: busca un *slot* de tiempo y una portadora que cumpla con los requisitos de C/I mínimos especificados por la tecnología propuesta. En caso de no lograr un canal lógico que cumpla estos requerimientos, la función arroja el valor de falso. En caso contrario, la función retorna el número del canal encontrado.
- Función LIBERAR\_CANAL: libera el canal asignado entre el abonado  $AB_j$  y el transmisor  $T_r$ .
- Función VERIFICAR\_LÍMITES: restringe la movilidad de los abonados al piso donde iniciaron su conversación. Si debido a la movilidad, el usuario queda fuera del piso, la función localiza al abonado en la pared más cercana y configura el ángulo de dirección a un valor igual a 180 grados el ángulo actual de movimiento, es decir, el abonado regresa en la misma dirección en la cual se estaba movilizándose.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 VERIFICACIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta la necesidad de comprobar que el modelo y los resultados de la simulación estén correctos, se planteó un escenario en el cual se pudiera comparar los resultados con un modelo de la teoría clásica de tráfico. Por tal motivo se planteó un escenario donde se analiza el centro comercial conformado por un solo piso y cubierto

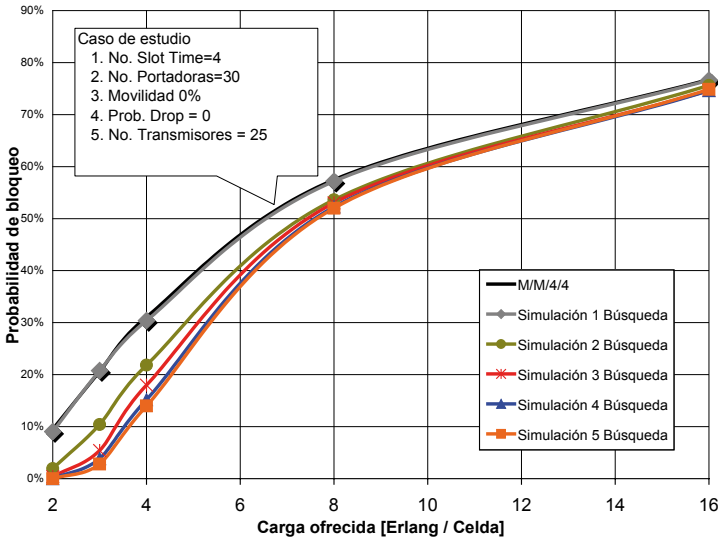
por 25 picoceldas, con 4 slot de tiempo, 30 portadoras de frecuencia por estación base y un tráfico uniforme.

Se configuró cada abonado para no tener movilidad y el sistema para sólo buscar la estación base con el nivel de mayor potencia. Con este escenario, la probabilidad de *drop* es cero, ya que existen más portadoras que transmisores. Es posible modelar el sistema propuesto según la notación Kendall (Medhi, 2003), por medio de un sistema de espera tipo M/M/4/4. En este sistema, la probabilidad de bloqueo denotada por  $P_B$  está determinada por la Ecuación 2, donde  $a$  es la carga ofrecida por la celda.

$$P_B = \frac{a^4}{4!} / \sum_{i=0}^4 \frac{a^i}{i!} \tag{2}$$

En la Figura 3 se observa la medida teórica del sistema M/M/4/4 comparada con los resultados de la simulación, utilizando la estrategia de búsqueda de una sola estación base. Los resultados de la simulación fueron diseñados para tener una confiabilidad del 99% de estar dentro del intervalo  $\pm 0,005$ .

Figura 3. Estimación de la probabilidad de bloqueo con ningún usuario en movimiento y con solo un piso

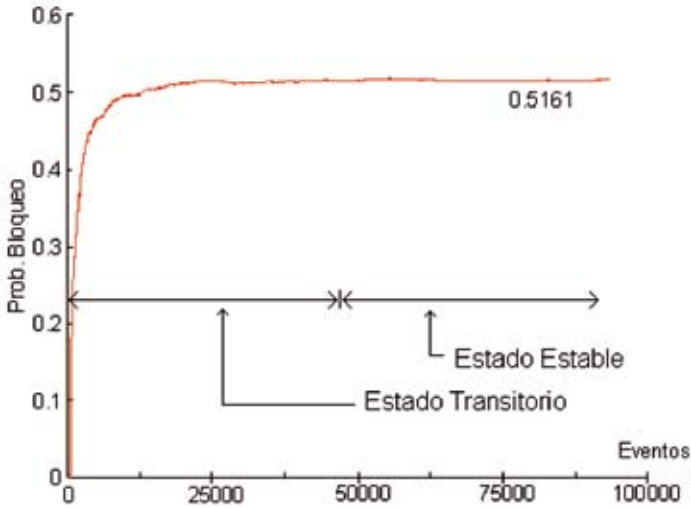


Fuente: presentación propia de los autores.

En la simulación se consideró que las medidas estimadas de la probabilidad de bloqueo y *drop* hubieran pasado el estado transitorio, relacionado con la cadena de Markov en tiempo continuo que describe el proceso. Por tal razón, las probabilidades evaluadas fueron las pro-

babilidades límite (Medhi, 2003), independientes del estado inicial del sistema. Se encontró que con una cantidad mayor a 50.000 eventos, estas medidas ya se encontraban estables, esto si se considera la carga de tráfico en la que se evaluó el sistema. En la Figura 4 se observa un resultado de la simulación, donde se ilustra el estado transitorio y cómo, a medida que los eventos ocurren en el sistema, la medida de probabilidad de bloqueo tiende a su valor límite.

Figura 4. Ejemplo de una realización del estimador no sesgado de la probabilidad de bloqueo con respecto a la cantidad de eventos evaluados



Fuente: presentación propia de los autores.

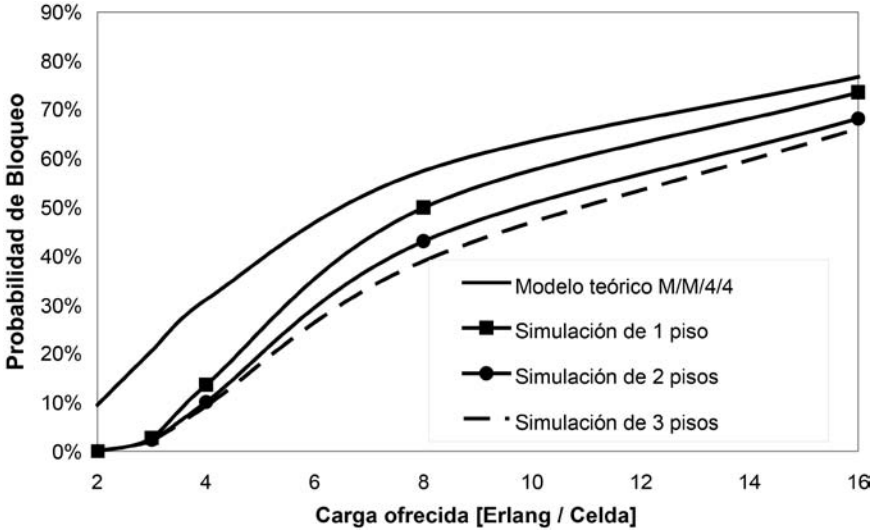
La cantidad de eventos requeridos para la simulación del sistema permite concluir que la secuencia pseudoaleatoria utilizada para la generación de las variables aleatorias no llega a su valor de periodicidad y, por ende, las secuencias generadas en la simulación son independientes.

### 3.2 ANÁLISIS

En la Figura 3 se puede observar la mejora en la probabilidad de bloqueo cuando se utiliza como estrategia de búsqueda de interconexión de un abonado las  $R$  estaciones base más cercanas en potencia. Allí se observa la mejora en la probabilidad de bloqueo cuando se utilizan 2, 3, 4 y 5 estaciones base y cómo esta estrategia supera las expectativas de desempeño de un sistema  $M/M/4/4$ . También es posible concluir que complicar el algoritmo del abonado con una búsqueda mayor o igual a cuatro estaciones no tiene una mejora importante en dicha medida de desempeño.

El supuesto de analizar el sistema independiente del número de pisos e independiente de si el abonado tiene perfil de movilidad pedestre es incorrecto, como se observa en los resultados de la simulación ilustrados en la Figura 5, bajo el escenario de prueba.

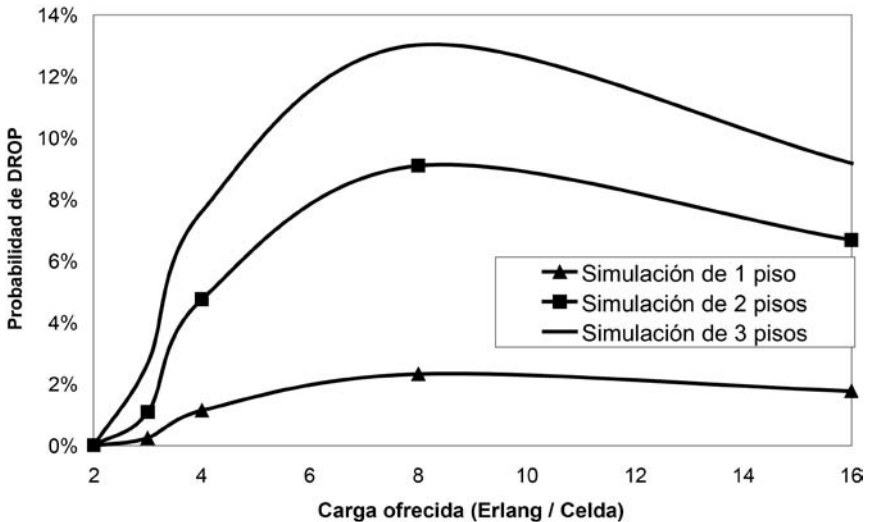
Figura 5. Probabilidad de bloqueo considerando el número de pisos y la movilidad de los abonados



Fuente: presentación propia del autor.

En la Figura 6 se puede observar la probabilidad de caída de una llamada en curso o la probabilidad de *drop*. En el modelo del sistema propuesto, el fenómeno de la terminación abrupta de una llamada en curso es posible que ocurra, ya que cada nueva llamada aceptada en una estación base puede incrementar la interferencia de las demás llamadas en curso.

Figura 6. Probabilidad de *drop* considerando el número de pisos y la movilidad de los abonados



Fuente: presentación propia del autor.

Al comparar la variación de las curvas de la probabilidad de bloqueo y las curvas de la probabilidad de *drop* con respecto al número de pisos modelados en el centro comercial, se encuentra que esta última presenta una mayor variación relativa. Como conclusión, la medida de la terminación abrupta de una llamada en curso es vital para el diseño y análisis del sistema, en especial cuando se consideran edificaciones con múltiples pisos.

Es interesante observar en la Figura 6 que la disminución de la probabilidad de *drop* para una carga ofrecida por celda mayor a 8 Erlang se debe a que en el sistema analizado la carga cursada por celda realmente disminuye, ya que la probabilidad de bloqueo aumenta considerablemente.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se planteó y modeló un sistema de telecomunicaciones por medio de la técnica de simulación por eventos discretos. Se presentaron los cálculos de las probabilidades de bloqueo y de *drop* para un escenario arquitectónico general de un centro comercial, incluido el efecto del número de pisos de la edificación y la movilidad pedestre de los abonados vinculados al sistema.

Los resultados encontrados son valiosos, ya que permiten identificar algunos supuestos no válidos en el diseño del sistema, como son desprestigiar la movilidad de los usuarios, suponer que se puede diseñar el sistema independiente del número de pisos que lo conforman o no considerar la influencia de las ondas electromagnéticas entre pisos.

El trabajo realizado permite ilustrar la metodología de diseño, modelado, implementación y análisis de un sistema de telecomunicaciones por medio de una técnica muy utilizada en investigación de operaciones.

#### 5. TRABAJO FUTUROS

Es el interés de parte del grupo de trabajo de la sección de comunicaciones del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana continuar el análisis de otros sistemas de telecomunicaciones modernos y sus estándares, por medio de la técnica de simulación por eventos discretos. En particular, se dirigirán los esfuerzos a los problemas de diseño de un *call center*, el problema de diseño de redes *wi-fi* en edificaciones comerciales y el análisis de redes inalámbricas móviles con acceso CDMA.

#### AGRADECIMIENTOS

Parte de los resultados plasmados en el presente artículo fueron realizados en el marco del proyecto final de la asignatura Simulación, en la Maestría en Ingeniería Electrónica, de la Universidad de los Andes,

dirigida por el profesor Roberto Bustamante Miller, cursada por el autor en 2001. El autor desea agradecer las orientaciones en esta asignatura para el planteamiento y el modelado del presente problema.

## REFERENCIAS

- CORAZZA G. E.; DE MAIO G. and VATALARO, F. CDMA Cellular Systems Performance with Fading, Shadowing, and Imperfect Power Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, 47 (2): 450-459.
- FAPOJUWO, A. O.; MCGIRR, A. and KAZEMINEJAD, S. A Simulation Study of Speech Traffic Capacity in Digital Cordless Telecommunications Systems. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 1992, 41 (1): 6-16.
- GORCE, J. M. and JAFFRÈS-RUNSER, K. Deterministic Approach for Fast Simulations of Indoor Radio Wave Propagation. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55 (3): 938-948.
- HAAS, Z. J. and WINTERS, J. H. Simulation Results of the Capacity of Cellular Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1997, 46 (4): 805-817.
- KOCATURK M. and GUPTA, S. C. Simulation of Co-Channel Interference in Coexisting Cellular TDMA Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43 (3): 753-761.
- LAW, A. and KELTON, W. D. *Simulations Modeling and Analysis*. Washington: McGraw Hill Science, 1999.
- LI, H. J.; LEE, M. L. and LANE, R. Y. ISI Simulation for Indoor Wireless Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2000, 49 (2): 413-421.
- MEDHI, J. *Stochastic Models in Queueing Theory*. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2003.
- MOLISCH, A. *Wireless Communications*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 2005.
- PAHLAVAN, K. and LEVESQUE, A. H. *Wireless Information Networks*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1995.
- PATZOLD, M. *et al.* On the Statistical Properties of Deterministic Simulation Models for Mobile Fading Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1988, 47 (1): 254-269.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. New York: Prentice Hall, 2002.
- \_\_\_ and BRICKHOUSE, R. A. A Simulation of Cellular System Growth and its Effect on Urban In-Building Parasitic Frequency Reuse. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, 48 (1): 286-294.
- ROSS, S. M. *Simulación*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Prentice Hall, 1999.



SCHÄFER, T. M. and WIESBECK, W. Simulation of Radiowave Propagation in Hospitals Based on FDTD and Ray-Optical Methods. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53 (8): 2381-2388.