

# Aplicación de modelos markovianos en sistemas de comunicación móvil celular GSM900\*

Alex A. Monclou S.

Javier D. Mantilla F.

Andrés Navarro C.

Rafael Camerano F.

Fecha de recepción: 11-3-2003

Fecha de aceptación: 17-9-2003

## RESUMEN

El presente artículo muestra en forma clara que el canal de acceso RACH del sistema GSM (Global System for Mobile) se puede modelar como una cadena de Markov discreta. La teoría de cadenas de Markov se emplea para encontrar el comportamiento de estado estable en el modelo de seis estados planteado por la norma GSM utilizando un lenguaje de alto nivel

como Matlab, que se emplea para simular el modelo planteado teóricamente. Los resultados de las simulaciones muestran el comportamiento estadístico del proceso de selección y reelección de celda del terminal móvil en el sistema GSM.

## PALABRAS CLAVES

Cadenas de Markov, GSM, radio móvil, sistemas celulares.

\* Proyecto de investigación apoyado por la Escuela de Ingeniería Electrónica y el Departamento de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga.

## ABSTRACT

The present paper shows —clearly— that implicit probabilistic and stochastic processes in reference layer one of the Global System for Mobile Communications standard, can be modeled like a discrete time Markovian Chain. The Markovian theory is used to find the steady-state behavior of a six states model (Idle and Dedicated Mode) using a high level language (MatLab) that implements the

algorithm formulated in the development. The results of the simulation of the Markovian model express the probabilistic behavior of the cell selection sub process on the physical layer of a GSM900 Mobile Station.

## INDEX TERMS

GSM900, Markovian chain, Slotted ALOHA, MatLab.

**Clasificación:** A

## INTRODUCCIÓN

GSM es actualmente el estándar de comunicaciones móviles más ampliamente usado en todo el mundo. La madurez de su tecnología y la seguridad de sus procedimientos lo convierten en una opción moderna y eficaz al momento de desarrollar una red móvil. Una discusión más extensa de la arquitectura de red y servicios que presta GSM está disponible en el texto de Eberspächer, Vögel y Bettesteller.<sup>1</sup>

El estudio de los procesos implícitos en las diferentes capas de referencia GSM se viene realizando durante cerca de dos décadas; la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) ha desarrollado una profunda normatización que actualmente se encuentra bajo la dirección del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). Dentro de estas normas, las funciones relativas de una estación móvil en la capa física de la red se definen mediante los procesos de selección de PLMN (*Public Land Mobile Network*), selección de célula y registro de localización.<sup>2</sup> Estos procesos pueden ser descritos cada uno por un conjunto de estados, los cuales determinan el comportamiento global del móvil. La relación entre los tres estados es determinante tal que un evento que causa un cambio de estado en un proceso específico puede generar un cambio de estado en alguno de los otros dos procesos.

Los modos de operación Inactivo (*Idle mode*), esto es, encendido pero sin ningún canal físico asignado y, Dedicado (*Dedicated mode*) que se caracteriza por pertenecer a un grupo de transmisión pero sin poseer una conexión dedicada; forman parte in-

trínseca de los tres procesos mencionados, proporcionando una apreciación integral de las tareas emprendidas por una estación móvil GSM cuando intenta acceder a los servicios que posee en la red.

Este estudio caracteriza los modos de operación Inactivo y Dedicado de una MS (*Mobile Station*) en un conjunto de seis estados con características estocásticas que definen el proceso como una cadena markoviana de tiempo discreto. De igual manera, se determina el comportamiento probabilístico de las transiciones entre estados del diagrama de seis estados, las cuales están sujetas a las peculiaridades propias del mismo, los subprocesos desarrollados y las condiciones necesarias para que se genere una transición.

La principal cuestión que hace el análisis tratable es la identificación y elección de los comportamientos más influyentes en las transiciones entre estados. Con nuestra elección estos patrones determinan el comportamiento probabilístico de la cadena markoviana, de modo tal que se ajustan al sistema en forma aproximada.

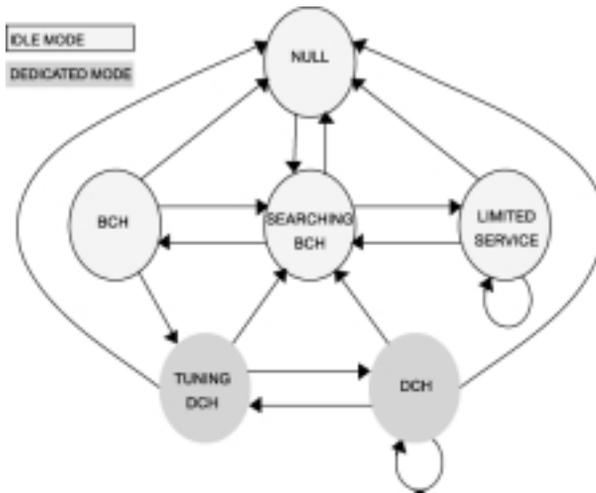
En la actualidad no podemos afirmar categóricamente si es factible trasladar este análisis a otras tecnologías de comunicaciones móviles, pero resultaría de gran interés si estas ideas se tornan de aplicabilidad en el análisis de las capas físicas en modelos de ingeniería relacionados.

## DEFINICIÓN DEL ESPACIO DE ESTADOS

En la capa física de una MS GSM, se definen los siguientes estados:<sup>2,3</sup>

- 1) **Null:** El equipo se encuentra apagado.
- 2) **Searching BCH:** La capa física rastrea el mejor BCCH (*Broadcast Control Channel*) dentro de los 30 que posee GSM900.
- 3) **Limited Service:** La MS no ha encontrado una célula aceptable en términos de un BCCH apropiado.
- 4) **BCH:** La capa física escucha los BCCH/CCCH (*Common Control Channel*) y está en capacidad de realizar un procedimiento de acceso aleatorio sobre el RACH (*Random Access Channel*).
- 5) **Tuning DCH:** La capa física intenta adherirse a un canal físico dedicado.
- 6) **DCH:** La estación móvil se ha adherido a un canal físico dedicado y puede establecer una comunicación a través de canales lógicos.

La Figura 1 muestra el diagrama de estados de la capa física GSM. Todas las transiciones entre estados son controladas por la dirección del recurso de radio de la capa 3 que en función de la información obtenida por la estación móvil, activa y desactiva, configura y desconfigura los canales físicos y lógicos que componen la red.



**Figura 1.** Estados de la capa física en una estación móvil.

El diagrama de seis estados de la capa física no está especificado en la red, sólo está determinado en la estación móvil. Los estados en la red se ven reflejados en las características de operación de los canales lógicos GSM.

### A. Operación en modo inactivo

En este modo, la MS no tiene asignado ningún canal físico dedicado; escucha el CCCH y el BCCH. En este modo la estación móvil debe implementar los criterios de selección (C1) y reelección de célula (C2) con el pro-

pósito de conectarse a una célula en la cual pueda decodificar con fiabilidad la información del enlace de bajada y exista una alta probabilidad de comunicaciones en el enlace ascendente.<sup>4</sup>

En la MS se definen dos procedimientos para la selección óptima de una célula de la red GSM, sin conocer ésta cuáles canales de la red son canales de difusión (BCCH).

**1) Selección normal:** La estación móvil debe rastrear todos los canales RF (max. 124) dentro de su banda de operación, captar al menos cinco lecturas del nivel de potencia de cada uno y realizar un promedio de éstas en un lapso de cuatro a cinco segundos. Una vez encontrada una portadora BCCH la MS debe intentar sincronizarse a ella y leer su información de difusión.<sup>4</sup>

**2) Selección de lista almacenada:** La estación móvil puede almacenar opcionalmente información de las portadoras BCCH utilizadas por PLMN's seleccionadas con anterioridad, de modo tal que puede utilizar esta información para rastrear directamente los canales RF que posean BCCH's, disminuyendo de esta forma el tiempo requerido para conectarse a una célula aceptable. Esta información es almacenada en el módulo de identificación de usuario o tarjeta SIM (*Subscriber Identity Module*).

## B. Operación en modo dedicado

En este modo la MS tiene asignado un canal físico dedicado que contiene por lo menos dos canales lógicos, uno de ellos es el Canal Lento de Control Asociado (*Slow Associated Control Channel* SACCH). El propósito del

modo dedicado es determinar la célula más conveniente mientras escucha un grupo de difusión.<sup>2</sup>

Existen varios requerimientos que una célula debe satisfacer antes de que una MS intente conectarse a ella:

- i. Debe ser una célula perteneciente a la PLMN seleccionada.
- ii. La célula no debe encontrarse saturada o colapsada.
- iii. La célula no debe pertenecer a un área de localización que se encuentre en la lista de prohibidas para funciones de seguimiento (*roaming*).
- iv. Las pérdidas en el canal de radio entre la estación móvil y la estación base deben estar por debajo del umbral definido por el operador de la PLMN.
- v. No debe ser una célula con servicios de área localizada; aunque esta condición sólo aplica para móviles que soportan este servicio.

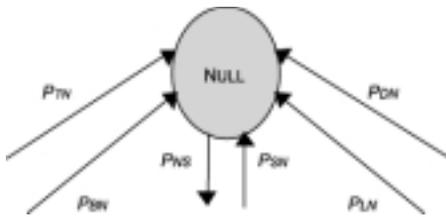
Por conveniencia, las anteriores condiciones se asumen válidas dentro del modelo matemático, de modo que se hace prescindible el establecimiento previo de estos parámetros.

## MATEMÁTICAS DE TRANSICIÓN

La aplicación de modelos probabilísticos a cada transición del sistema de seis estados proporciona una predicción cuantitativa del comportamiento de los modos de operación los cuales se ponen a consideración del lector a continuación.

**1) Estado Nulo (*Null State*):** En este estado la MS se encuentra apagada. Por conveniencia y evidencia se asume  $P_{NS} = 1$  la probabilidad de en-

cendido del móvil. Por otro lado se supone que el usuario siempre mantendrá su móvil encendido en espera de una llamada entrante o en capacidad de generar una; por estas razones las probabilidades de apagado de la MS (transiciones entrantes) son nulas ( $P_{SN}, P_{LN}, P_{BN}, P_{TN}, P_{DN} = 0$ ). No se tiene en cuenta la duración de la batería del móvil y se desprecia el tiempo de apagado entre cambio de baterías (Figura 2).



**Figura 2.** Probabilidades de transición del estado nulo.

**2) Búsqueda de BCH (Searching BCH):** En general todo el proceso está sujeto a las características cambiantes del canal de radio; pero es en este estado donde se determina la calidad y niveles de potencia de las radiofrecuencias del espectro radioeléctrico asignado, de modo que en función de ésta y de los parámetros definidos y transmitidos por el operador de red sobre los canales de difusión (BCH) se elige la mejor célula de la red sobre la cual el móvil puede conectarse.

En este caso se han definido y tenido en cuenta los siguientes parámetros operativos:

2.1) *Canal físico:* El medio más hostil por el cual se puede transmitir in-

formación, puede ser simulado acercándose bastante al fenómeno real, utilizando los desvanecimientos *Rician* y *Rayleigh*. El desvanecimiento se debe a la propagación multitrayecto: múltiples réplicas de la señal transmitida recorren diferentes trayectos y se ven sometidas a diversos mecanismos de propagación: difracción, reflexión y *scattering*. El resultado es que la señal recibida puede variar ampliamente en amplitud y fase. En ciertas condiciones la naturaleza estadística variable en el tiempo de la señal recibida puede ser descrita por los tipos de distribución mencionados.

a) *Desvanecimiento Rician:* Es un tipo de desvanecimiento de baja escala que ocurre sobre un componente de la señal dominante estacionaria, en un trayecto con visión directa entre el transmisor y el receptor.

La distribución Rician está definida por la amplitud pico de la señal dominante y la función Bessel modificada de primera clase y orden cero. Es más útil para nosotros si describimos la función Rician en términos del parámetro  $K$  que define el *ratio* entre la potencia de la señal y la varianza del multitrayecto, esto es:

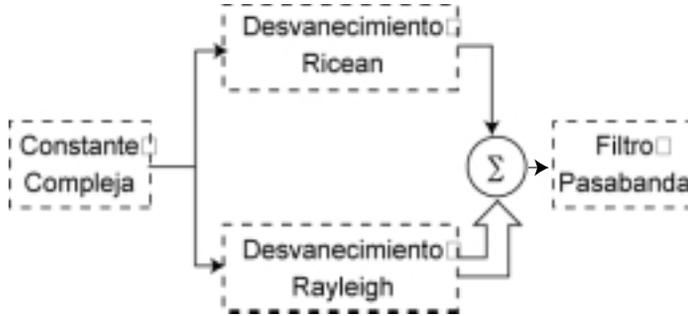
$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ dB} \quad (1)$$

El parámetro  $K$  es conocido como el factor Rician, el cual a nivel de simulación es expresado linealmente (no en decibeles) y es por defecto 1, aunque está sometido a cualquier tipo de variación para efectos de análisis.

b) *Desvanecimiento Rayleigh:* La distribución Rayleigh se utiliza generalmente para describir la naturaleza

estadística variable del desvanecimiento de la señal en el receptor a través de múltiples trayectos cuyas diferentes componentes presentan amplitudes similares.

En el modelo del canal de radio propuesto, son combinados los bloques de simulación de desvanecimiento Rician y Rayleigh, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Modelo del canal de radio móvil

Esta combinación de bloques simula un enlace de comunicación móvil en donde la señal transmitida puede viajar hacia el receptor a través de un trayecto directo (*Rician*), como a través de trayectos indirectos (*Rayleigh*). Por simulación, el número de trayectos utilizados por la señal para llegar al receptor, se define indirectamente con la asignación de ganancia a cada trayecto en un vector cuya longitud es igual a la longitud del vector de retrasos (*delays*) asociados a cada trayecto. Una aproximación similar y detalles más extensos en modelado de canales de radio pueden ser encontrados en Bibliografía.<sup>12</sup>

Implícito en cada tipo de desvanecimiento de la señal se tiene en cuenta la frecuencia Doppler como parámetro variante, que determina el efecto que causa el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. GSM y otras aplicaciones inalámbricas pre-

fieren expresar el desplazamiento Doppler en términos de la velocidad del móvil. Si el móvil se desplaza a una velocidad  $v$  formando un ángulo  $\theta$  con la dirección de avance del terminal móvil, entonces la frecuencia Doppler viene dada por:

$$f_d = \left(\frac{vf}{c}\right) \cos \theta \quad (2)$$

$f$ : frecuencia portadora.  $c$ : velocidad de la luz.

En general el modelo del canal de radio no determina directamente el comportamiento del estado de *Búsqueda de BCH*. Es en función de éste y un criterio específico definido por la ETSI, el *Path Loss Criterion* que la MS establece cuál célula del clúster es la mejor en términos de potencia y calidad de la señal:

c) *Path Loss Criterion*: El criterio de pérdidas por el camino (C1) es usado

para la selección y tenido en cuenta en la reelección de célula. Se define como:

$$C1(n) = (RxLev(n) - RxLev\_Access\_Min - \max(0, (MS\_TxPwr\_Max\_CCH - P))) \quad (3)$$

En donde:

$RxLev(n)$  = Nivel de potencia de la n-ésima portadora del espectro GSM. Se genera utilizando el modelo del canal de radio móvil.

$RxLev\_Access\_Min$  = nivel de potencia mínimo en la estación móvil requerido para acceder al Sistema. Se introduce como parámetro variable en la simulación conociendo que es el operador de la red quien modifica este parámetro, de acuerdo con el comportamiento o requerimientos del Sistema.

$MS\_TxPwr\_Max\_CCH$  = máxima potencia de transmisión de la estación móvil, usada para acceder al sistema. Igualmente es un parámetro variable en la simulación controlado por la Estación Transreceptora (*Base Transceiver Station* BTS) teniendo en cuenta que la variación se realiza en saltos de 3dB.<sup>5</sup>

$P$  = máxima potencia RF de la estación móvil según su clase. Parámetro variable en la simulación dentro de un rango de 200mW a 1W de acuerdo con la clase del móvil.

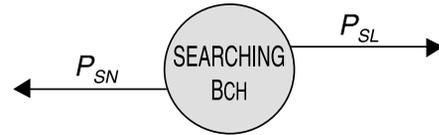
El *Path Loss Criterion* se satisface cuando  $C1 > 0$ .<sup>4</sup>

Es evidente que el modelo del canal de radio está implícito en el criterio

C1 de modo que es éste el que determina el comportamiento probabilístico de las transiciones salientes del estado de *Búsqueda de BCH*.

Si denotamos  $P_{C1Best}$  como la probabilidad de transición hacia el estado *BCH* en el mejor de los casos; es decir cuando las pérdidas por el camino son mínimas en función de los parámetros de C1; y definimos  $P_{Cn}$  como la probabilidad de transición calculada a partir de los datos generados por la simulación tenemos que:

$$P_{SB} = \frac{P_{Cn}}{P_{C1Best}} \quad \text{y} \quad P_{SL} = 1 - \frac{P_{Cn}}{P_{C1Best}} \quad (4) \text{ y } (5)$$

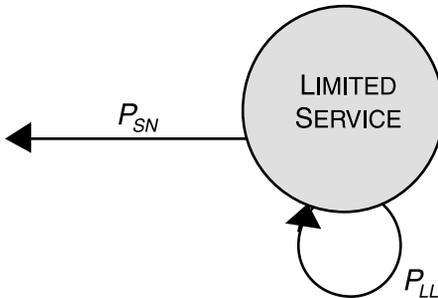


**Figura 4.** Probabilidades de transición del estado búsqueda de BCH.

Es necesario anotar que la probabilidad  $P_{Cn}$ , está calculada utilizando el C1 de la célula con mejores condiciones de señal y calidad de servicio; es decir la célula escogida.

**3) Estado de Servicio Limitado (*Limited Service*):** Una vez la estación móvil ha entrado en este estado, el proceso de selección de célula termina. En este estado el móvil puede realizar llamadas de emergencia si las requiere.<sup>2</sup> Debido a que la calidad de la señal y las condiciones de la red no son óptimas, la probabilidad de que el sistema permanezca indefinidamente en este estado es nula

( $P_{LL}=0$ ). Es evidente entonces que la probabilidad de que el móvil salga de este estado para iniciar un nuevo proceso de selección de célula es  $P_{LS}=1$ .



**Figura 5.** Probabilidades de transición del estado de servicio limitado.

**4) Estado BCH:** Dependiendo de su estado actual, una estación móvil puede usar solamente un subgrupo de canales lógicos ofrecidos por la estación base. En el estado BCH, la MS utiliza los canales de control y difusión para sincronizarse en tiempo con la trama TDMA y la BTS. Una vez sincronizada, la estación móvil realiza un procedimiento de acceso aleatorio a través del RACH usando la ráfaga de acceso (un tipo de ráfaga más corta); lo que disminuye las colisiones sobre el medio en el cual se está transmitiendo utilizando el principio de Aloha Ranurado.<sup>6</sup>

Si consideramos que cada terminal realiza un intento de transmisión en intervalos discretos, sin importar si posee o no un paquete; podemos definir un proceso de Bernoulli de intentos virtuales asociado a cada terminal, que en interacción con el comportamiento de acceso al canal de colisión nos lleva específicamente a defi-

nir la probabilidad de transición hacia *Tuning DCH* como el éxito de un proceso aleatorio con distribución Poisson.

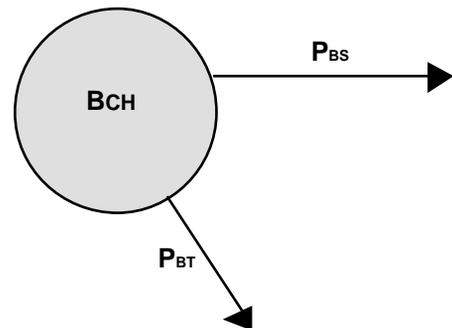
En el protocolo Aloha Ranurado, se restringe el terminal a transmitir sólo en una ranura de tiempo definida; lo que consecuentemente aumenta el desempeño del proceso *S* a un 36%, para un tráfico ofrecido o carga del canal *G* igual a uno; y una probabilidad de que una trama no sufra colisión, expresada como:

$$P_o = e^{-G} \quad (6)$$

A nivel de simulación; la expresión (8), determina la probabilidad de transición del estado BCH en el modo Inactivo al estado *Tuning DCH* en modo Dedicado, para una carga del canal *G* variable con distribución Poissoniana.

Esto es:

$$P_{BT} = e^{-G} \quad \text{y} \quad P_{BS} = 1 - e^{-G} \quad (7) \text{ y } (8)$$



**Figura 6.** Probabilidades de transición del estado BCH.

**5) Estado de Sintonización DCH (Tuning DCH):** La entrada de la estación móvil al estado *Tuning DCH*, determina un nuevo comportamiento dentro del modo Dedicado de operación, en el cual las condiciones de tráfico en la red se tornan influyentes y determinantes en el proceso de selección de célula.

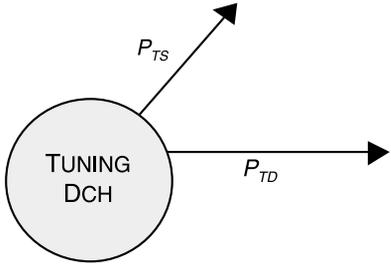
El tráfico en la red celular es caracterizado en este estado por el tipo de distribución *Erlang B*, de modo tal que el comportamiento probabilístico de las transiciones salientes de *Tuning DCH*, está sujeto y especificado en la probabilidad de bloqueo *Erlang B*, en función del número de canales lógicos y el tráfico celular.

A nivel de simulación, la expresión *Erlang B* se modificó de su estructura matemática original a un equivalente que suprime los términos exponenciales y factoriales implícitos, aumentando de esta forma la eficiencia del algoritmo desarrollado. La relación utilizada, conocida como teorema de Folk permite calcular la probabilidad de bloqueo en función del número medio de llamadas por unidad de tiempo  $\lambda$ , la tasa media de servicio  $\mu$ , y el número de canales  $n$ , definiendo las probabilidades de transición como:

$$P_{TS} = \frac{\rho \times P_{TS}}{1 + \frac{\rho \times P_{TS}}{k}} \quad \text{y} \quad P_{TD} = 1 - P_{TS} \quad (9) \text{ y } (10)$$

en donde:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}; k = 1 : n; P_{TS \text{ Inicial}} = 1$$



**Figura 7.** Probabilidades de transición del estado *Tuning DCH*.

**6) Estado DCH:** Cuando la estación móvil se conecta a un canal dedicado y puede generar o recibir llamadas, el tráfico de la red aunque sigue siendo importante, no se considera determinante en el comportamiento probabilístico del estado. Las condiciones del canal de radio y un segundo criterio definido por la ETSI, el criterio de reelección de célula (*Cell Re-selection Criterion*) determinan las condiciones de transición en función de parámetros definidos.

a) *Re-selection Criterion:* Este criterio determina la calidad de la señal de las células adyacentes (*C1*) de modo tal, que si encuentra una mejor en términos de potencia y servicio; un procedimiento de *handover* es solicitado.

El criterio de reelección se aplica en el estado DCH cada 30 segundos y se ejecuta en el estado *Searching BCH* si se requiere el *handover* o regresa al estado *Tuning DCH* para resintonizarse con la actual célula evidenciando que sigue siendo ésta la mejor en términos de potencia y calidad de servicio. El criterio de reelección (*C2*) se define como:

$$C2 = (C1_{actual} + Cell\_Re\_select\_Offset) \quad (11)$$

En donde:

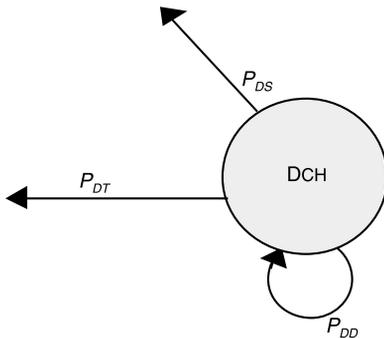
$C1_{actual} =$   
*path loss* de la célula actual.

$Cell\_Reselect\_Offset =$   
 proporciona una histéresis de 5 dB al criterio, con el fin de evitar el efecto ping-pong, en el cual condiciones de señal y calidad muy similares entre la celda actual y las celdas adyacentes, ocasionan repetitivos *handovers* entre estas, lo que sobrecarga el canal de señalización y deteriora la calidad de la comunicación.

El criterio de reelección de célula se satisface cuando el  $C1$  más alto de las células adyacentes es mayor que  $C2$ .

Si definimos  $P_{C2Best}$  como la probabilidad de transición hacia el estado *Tuning* DCH en el mejor de los casos; y  $P_{C2}$  como la probabilidad de transición calculada a partir de los datos generados por la simulación, tenemos que:

$$P_{DT} = \frac{P_{C1}}{P_{C1Best}} \quad \text{y} \quad P_{DS} = 1 - \frac{P_{C1}}{P_{C1Best}} \quad (12) \text{ y } (13)$$



**Figura 8.** Probabilidades de transición del estado DCH.

Debido a que el sistema debe aplicar el criterio de reelección cada 30 segundos es evidente que la probabilidad de que el sistema permanezca indefinidamente en el estado DCH es nula ( $P_{DD}=0$ ).

### MODELO MARKOVIANO

El modelo estocástico de los subprocesos que conforman el proceso de selección de célula en una estación móvil GSM900 se define como una cadena Markoviana de tiempo discreto, irreducible, aperiódica, no estacionaria y sin ningún estado absorbente.

Del diagrama de seis estados y el conocimiento del comportamiento probabilístico que definen cada una de sus transiciones, se tiene que la matriz de transición de estados se expresa como:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & P_{NS} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{SL} & P_{SB} & 0 & 0 \\ 0 & P_{LS} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{BS} & 0 & 0 & P_{BT} & 0 \\ 0 & P_{TS} & 0 & 0 & 0 & P_{TD} \\ 0 & P_{DS} & 0 & 0 & P_{DT} & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Ya que la cadena markoviana que describe nuestro sistema es ergódica (irreducible y aperiódica); es posible calcular las probabilidades estacionarias en función de la matriz de transición ( $\Lambda$ ) y las ecuaciones:

$$\sum_j P_j = 1 \quad \text{y} \quad P_j = \sum_i P_i \Lambda \quad (15) \text{ y } (16)$$

como:

$$P_N = 0$$

$$P_S = (P_{NS}P_N) + (P_{LS}P_L) + (P_{BS}P_B) + (P_{TS}P_T) + (P_{DS}P_D)$$

$$P_L = (P_{SL}P_S) \tag{17}$$

$$P_B = (P_{SB}P_S)$$

$$P_T = (P_{BT}P_B) + (P_{DT}P_D)$$

$$P_D = (P_{TD}P_T)$$

Lo que en forma matricial se puede expresar como:

$$\text{inv}(\Lambda^T) \times \begin{pmatrix} P_N \\ P_S \\ P_L \\ P_B \\ P_T \\ P_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{18}$$

Debido a que este sistema presenta una dependencia lineal entre sus ecuaciones; es necesario reemplazar una de éstas por la ecuación normalizada:

$$P_N + P_L + P_S + P_B + P_T + P_D = 1 \tag{19}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene la solución en equilibrio del sistema presentado en condiciones controladas de tráfico en la red, disponibilidad de canales, fenómenos físicos del canal de radio y parámetros operativos de la red celular GSM900.

## RESULTADOS

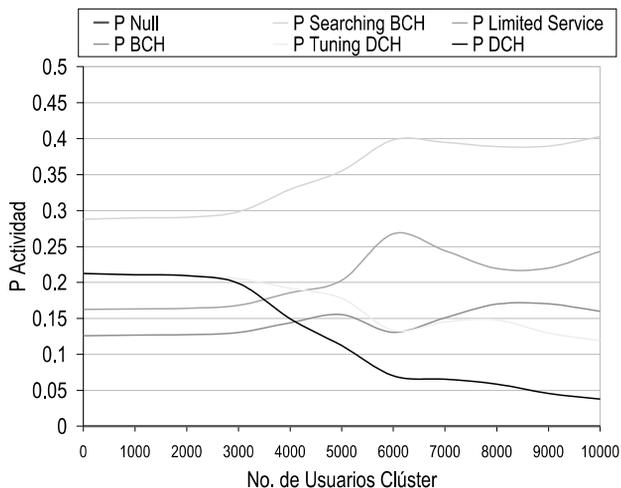
La simulación de los subprocesos que realiza una MS para seleccionar una célula aceptable en un sistema de comunicación celular GSM900 instantes previos a establecer una comunicación bidireccional, expone el comportamiento del móvil en función de sus seis estados en condiciones controladas de los parámetros específicos del simulador. El principio utilizado se basa en la variación de un parámetro sobre su rango de valores, manteniendo constantes los demás parámetros. Cada experimento está compuesto de diez simulaciones por variación, para un total de cien simulaciones por experimento, aproximadamente.

### 5.1 Experimento Uno:

**Tabla 1.** Parámetros de simulación, experimento uno

Tipo de análisis			Directo
No. usuarios clúster	<b>variable</b>		<b>variable</b>
No. llamadas promedio	3	Tráfico	
Duración promedio llamada	240 seg.		
No. de frecuencias portadoras			80
rxlev_access_min			-97
ms_txpwr_max_cch			27

### 5.1.1 Resultados gráficos



**Figura 9.** Resultados de experimento Uno

Se observa un comportamiento constante de las probabilidades de actividad de cada estado hasta aproximadamente un número de 3000 usuarios por clúster, en donde el sistema deja de ser óptimo y centra toda su atención principalmente en la búsqueda de una portadora BCCH.

El punto singular del sistema en 3000 usuarios por clúster; ocasionado por

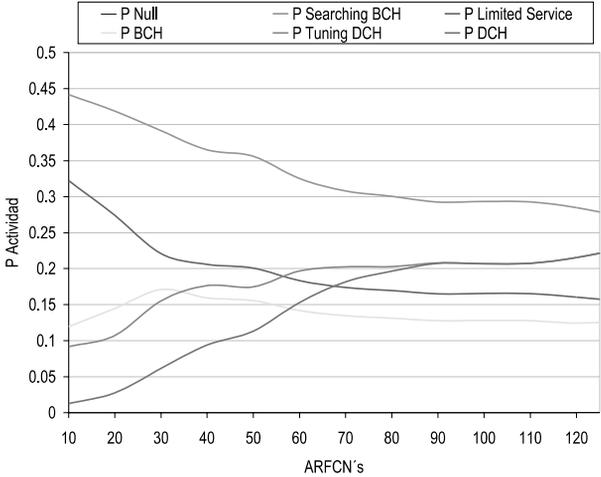
el aumento considerable del tráfico, aumenta la probabilidad de colisión (Aloha Ranurado) y la probabilidad de bloqueo Erlang B, hace que la MS permanezca más tiempo en modo inactivo, buscando, clasificando e intentando conseguir una portadora aceptable para establecer comunicación.

### 5.2 Experimento Dos:

**Tabla 2.** Parámetros de simulación, experimento dos

Tipo de análisis			Directo
No. usuarios clúster	3000	Tráfico	600 E
No. llamadas promedio	3		
Duración promedio llamada	240 seg.		
No. de frecuencias portadoras			<b>variable</b>
rxlev_access_min			-97
ms_txpwr_max_cch			27

### 5.2.1 Resultados gráficos



**Figura 10.** Resultados del experimento Dos

Se observa que el aumento del número de portadoras del espectro GSM asignado al operador influye en el comportamiento del sistema de selección de células de la MS, optimizándolo en forma directamente proporcional.

La probabilidad de que la MS se encuentre en modo inactivo en cual-

quier tiempo futuro decrece a medida que las portadoras aumentan; esta relación inversamente proporcional se traduce en que a iguales condiciones de tráfico y parámetros de sistema, el aumento del espectro GSM facilita el acceso a la red de la MS, teniendo ésta que competir menos por un canal de tráfico dedicado en la red.

### 5.3 Experimento Tres

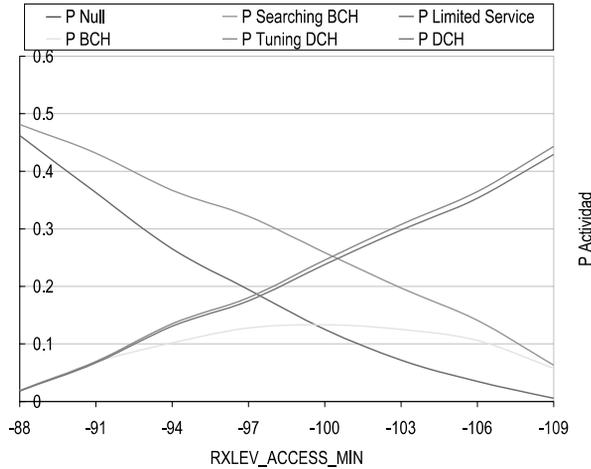
**Tabla 3.** Parámetros de simulación, experimento tres

Tipo de análisis			Directo
No. usuarios clúster	3000		600 E
No. llamadas promedio	3	Tráfico	
Duración promedio llamada	240 seg.		
No. de frecuencias portadoras			80
rxlev_access_min			<b>variable</b>
ms_txpwr_max_cch			27

Como se muestra en los resultados gráficos (Figura 11), la variación del parámetro  $rxlev\_access\_min$  del criterio C1 es indiscutiblemente determinante en el proceso de selección de potencia requerida establecida de la señal de la portadora BCCH; el sistema responde enérgicamente con una probabilidad de acceso más alta a la red.

### 5.3.1 Resultados Gráficos

Es importante notar que cuando el parámetro variable es  $rxlev\_access\_min$  el comportamiento del valor probabilístico de actividad de la MS en el modo dedicado es inversamente proporcional a la calidad del servicio; es decir, a medida que el parámetro  $rxlev\_access\_min$  toma



**Figura 11.** Resultados experimento tres

valores más tolerantes (menores) de niveles de potencia de las portadoras, la señal es más sensible a desvaneci-

mientos por el trayecto, lo que disminuye la condición del canal de comunicación.

### 5.4 Experimento Cuatro

**Tabla 4.** Parámetros de simulación, experimento cuatro

Tipo de análisis			Directo
No. usuarios clúster	3000	Tráfico	600 E
No. llamadas promedio	3		
Duración promedio llamada	240 seg.		
No. de frecuencias portadoras			80
$rxlev\_access\_min$			-97
$ms\_txpwr\_max\_cch$			<b>variable</b>

### 5.4.1 Resultados gráficos

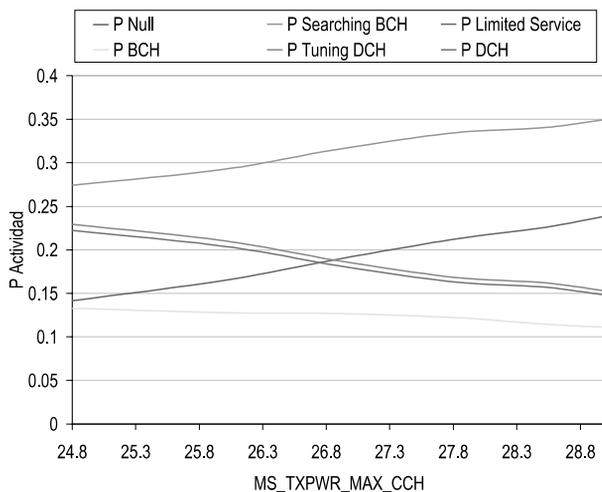


Figura 12. Resultados del experimento cuatro

A menor potencia de transmisión de la MS, la probabilidad de obtener un canal dedicado es mayor (se puede pensar lo contrario), debido a la relación de equilibrio que existe entre la potencia transmitida y la potencia recibida en el móvil, equilibrio guardado en el diseño del criterio de selección de célula C1, en donde se toma en cuenta la clase del móvil (y por lo tanto su potencia) para realizar el procesamiento de la información.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha presentado un modelo de simulación con base en un modelo matemático, el cual predice el comportamiento en estado estable del proceso de selección de célula que realiza una estación móvil GSM900.

El algoritmo gráfico desarrollado en MatLab implementa el proceso simulando en *Simulink* la capa física del sistema y utilizando la teoría de las máquinas de estados y de diagramas de flujo en *Stateflow* para definir las secuencias lógicas que determinan la naturaleza intrínseca del procedimiento.

La razón más importante del diseño del algoritmo de simulación del proceso de selección de célula con base en el modelo matemático, es la aplicabilidad de los diferentes tipos de análisis en la predicción del sistema, reconocimiento de su funcionamiento e identificación de las variables críticas de una forma eficiente. El algoritmo gráfico desarrollado usa los principios de la teoría de las máquinas de estados finitas para encontrar

las probabilidades de estado estable del sistema, el cual permite definir diferentes escenarios de operación en función de los parámetros más influyentes del sistema.

La cuestión principal que aproxima el software al comportamiento real del sistema es el enfoque sobre el comportamiento físico que existe entre las transiciones de sus estados, de aquí que con principios básicos de comunicaciones inalámbricas y unas herramientas matemáticas y de cálculo se obtenga la respuesta a las diversas preguntas que puedan surgir sobre los instantes previos de establecer una comunicación bidireccional en una red celular con el estándar más utilizado alrededor del mundo (GSM900).

Los resultados obtenidos después de sucesivas modificaciones del algoritmo, buscando reducir el tiempo de simulación y aumentar el desempeño del mismo, muestran alta precisión y eficiencia en el desarrollo del modelo.

La extensión del software permite análisis directo o análisis en función de tendencias del mundo real, de tal forma que el comportamiento del proceso es abarcado desde un punto de vista teórico-analítico o desde un punto de vista práctico-predictivo.

Es en la simulación continua y el estudio permanente de cada valor numérico, por inusual que parezca, que se alcanza a intuir de manera aproximada el comportamiento complejo de una MS, tomando en cuenta todos y cada uno de los parámetros y la influencia que éstos tienen en el proceso.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las importantes contribuciones de Andrés Navarro (Docente Universidad ICESI) y Rafael Camerano (Docente Universidad de los Andes).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Eberspächer. Jörg, Vögel. Hans Jörg, Bettstetter, Christian, "GSM Switching, Services and Protocols", 2nd ed., New York, Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2001, 332 p.
2. *GSM 03.22, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Functions related to Mobile Station (MS) in idle mode and group receive mode*, ETSI Technical Specification 100 930, V8.3.0, 2000.
3. *GSM 04.04, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Layer 1; General requirements*, ETSI Technical Specification 100 936, V8.1.1, 2001.
4. *GSM 05.08, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control*, ETSI Technical Specification 100 911, V8.5.0, 2000.
5. *GSM 05.05, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception*, ETSI Technical Specification V5.2.0, 1996.
6. *GSM 05.01, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical layer on the radio path; General description*, ETSI Technical Specification V5.4.0, 1998.

7. *TBR 5, European digital cellular telecommunications system; Attachment requirements for Global System for Mobile communications (GSM) mobile stations; Access*, ETSI Technical Basis for Regulation, 1993.
8. Anantharam. Venkat, "The Stability Region of the Finite-User Slotted ALOHA Protocol," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 37, No. 3, pp. 535-540, May 1991.
9. Hock. Chee, "Queueing Modelling Fundamentals", New York, Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2002, 222 p.
10. Higginbottom. Gary, "Performance Evaluation of Communication Network", Norwood MA, Ed. Artech House Inc., 1998, 366 p.
11. Haykin. Simon, "Communication Systems", 4<sup>th</sup> Edition, New York, Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2001, 816 p.
12. Fechtel, Stefan A, «A Novel Approach to Modeling and Efficient Simulation of Frequency-Selective Fading Radio Channels,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, pp. 422-431, April 1993.

## CURRÍCULOS

### **Alex Alberto Monclou Salcedo.**

Ingeniero Electrónico de la Universidad Javeriana, Bogotá D.C. Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Candidato a Magíster en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Autor de la investigación “*Aplicación de Modelos Markovianos en Sistemas de Comunicación Celular GSM900*”

amonclou@upbbga.edu.co

### **Javier Darío Mantilla Flórez.**

Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga. Soporte al proyecto de investigación con el proyecto de pregrado “*Comportamiento en Estado Estable del Proceso de Selección de Célula en GSM900*”.

jdmantilla@upbbga.edu.co - javiermantilla@ieee.org

**Andrés Navarro.** Ingeniero Electrónico Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Candidato a PhD. en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Docente Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga y Universidad ICESI, Cali.

Director del proyecto: “*Aplicación de modelos Markovianos en sistemas de comunicación celular GSM900.*”

anavarro@icesi.edu.co

**Rafael Camerano.** Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Magíster en Teleinformática. Especialista en Telefonía Móvil Celular.

Asesor del proyecto: “*Aplicación de modelos Markovianos en sistemas de comunicación celular GSM900.*”

camerano@latino.net.co 

