

## Capítulo 8 Estudio y Caracterización de la Pérdida de Paquetes en Sistemas de Voz sobre IP

### Chapter 8 Doping and Tapering of Optical Fibers for Temperature Sensing

TORAL-CRUZ, Homero†\*, CHAN-PUC, Freddy Ignacio, VÁZQUEZ-ÁVILA, José Luis y MAY-ALARCÓN, Manuel

*Universidad de Quintana Roo (UQROO), División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo, México.  
Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Facultad de Ingeniería, C.56, No. 4, C.P. 24180, Cd. Del Carmen, Campeche, México.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Homero, Toral-Cruz* / **ORC ID:** 0000-0002-4421-3775, **CVU CONACYT ID:** 44459

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Freddy Ignacio, Chan-Puc* / **ORC ID:** 0000-0002-2564-3841, **CVU CONACYT ID:** 83879

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *José Luis, Vázquez-Ávila* / **ORC ID:** 0000-0002-9654-2431, **CVU CONACYT ID:** 102415

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Manuel, May-Alarcón* / **ORC ID:** 0000-0003-1586-4496, **CVU CONACYT ID:** 121176

**DOI:** 10.35429/H.2021.16.71.80

H. Toral, F. Chan, J. Vázquez y M. May

\*htoral@uqroo.edu.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021

## Resumen

La tecnología de voz sobre el protocolo de Internet (VoIP) habilita la transmisión de voz sobre las redes IP; sin embargo, las redes IP proporcionan un servicio de mejor esfuerzo y la calidad de servicio (QoS) no está garantizada. La tasa de pérdida de paquetes (PLR) es un parámetro importante que afecta la QoS de los sistemas VoIP. Varios estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta dependencia temporal, por tanto, si se pierde un paquete, existe una alta probabilidad que también se pierda el siguiente paquete. Este fenómeno se conoce como comportamiento de pérdida de paquetes a ráfagas. Esta dependencia temporal puede modelarse eficazmente mediante una cadena de Markov de estados finitos. Además, se propone una descripción de la pérdida de paquetes de VoIP basada en comportamientos microscópicos y macroscópicos, donde estos comportamientos pueden ser modelados por cadenas de Markov de dos y cuatro estados, respectivamente.

## **Pérdida de Paquetes, Voz sobre IP, Modelos de Markov, Comportamiento Microscópico, Comportamiento Macroscópico**

### Abstract

Voice over Internet Protocol (VoIP) technology enables voice transmission over IP networks; however, IP networks provide a best effort service, and the quality of service (QoS) is not guaranteed. The packet loss rate (PLR) is an important parameter that impacts the QoS of VoIP systems. Several studies have shown that packet loss exhibit a finite temporal dependency; so, if a packet is lost, then there is a high probability that the next packet will also be lost. This phenomenon is known as a bursty packet loss behavior. This temporal dependency can be effectively modeled by a finite states Markov chain. Furthermore, a description of VoIP packet loss based on microscopic and macroscopic behaviors is proposed, where these behaviors can be modeled by Markov chains of two and four states, respectively.

### **Packet Loss, Voice over IP, Markov Models, Microscopic Behavior, Macroscopic Behavior**

#### 1. Introducción

Hace un par de décadas, la calidad de servicio de los sistemas de voz sobre el protocolo de Internet estaba afectada principalmente por el ancho de banda y otros parámetros como: retardos y pérdida de paquetes. En esa época se pensaba que el incremento del ancho de banda solucionaría el problema de calidad de servicio. Los recientes avances en la electrónica digital han permitido el surgimiento de nuevas técnicas de compresión de voz y multiplexación, que han contribuido significativamente en mejorar el funcionamiento de los sistemas VoIP; en este contexto se suman también el surgimiento de nuevas tecnologías de comunicaciones como la red óptica pasiva con capacidad de gigabit (GPON - Gigabit-capable Passive Optic Network) (Abbas & Gregory, 2016), la red móvil de quinta generación (5G - Fifth Generation Mobile Network) (Panwar, Sharma, & Singh, 2016) y redes Wi-Fi de próxima generación (Next Generation Wi-Fi - Wi-Fi 6) (Edward, y otros, 2021), que permiten altas velocidades de transmisión de los datos. Sin embargo, el problema de calidad de servicio en los sistemas VoIP persiste y el reto se centra en disminuir los retardos y atenuar los efectos de la pérdida de paquetes.

Existen diferentes parámetros que determinan la calidad de servicio en los sistemas VoIP; sin embargo, el parámetro pérdida de paquetes es el principal deterioro que los convierte perceptualmente diferente del sistema telefónico clásico o red telefónica pública conmutada (Public Switched Telephone Network - PSTN). Debido al comportamiento dinámico de las redes IP, la pérdida de paquetes puede mostrar una gran variedad de distribuciones. La distribución de paquetes perdidos más estudiada en pruebas de calidad de voz es la de pérdidas aleatorias o de Bernoulli (Torral-Cruz, Pathan, & Ramírez Pacheco, 2013) (pérdida de paquetes homogéneas). La pérdida de paquetes homogénea significa que la pérdida de los paquetes se presenta de forma independiente, es decir, la pérdida de un paquete en particular es independiente de la pérdida de paquetes anteriores. Diversos estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta naturaleza ráfagoza (pérdida de paquetes no homogéneas) y muestra una dependencia temporal. Por lo tanto, si el paquete  $n$  se pierde, entonces existe una mayor probabilidad de que el paquete  $n + 1$  también se pierda. Por consiguiente, existe una fuerte correlación entre la pérdida de paquetes consecutivos, lo que resulta en un comportamiento de pérdida de paquetes a ráfagas. Un modelo generalizado que permite representar la dependencia temporal entre paquetes perdidos es el modelo de Markov de estados finitos (Jelassi & Rubino, 2018).

Una forma de representar el comportamiento temporal de la pérdida de paquetes es mediante periodos microscópico y macroscópico. Donde el comportamiento microscópico puede ser modelado adecuadamente por una cadena de Markov de dos estados, mientras que el comportamiento macroscópico puede ser modelado correctamente por una cadena de Markov de cuatro estados. En este capítulo, se presenta el estudio de la pérdida de paquetes de un sistema de voz sobre el protocolo de Internet y la caracterización de su comportamiento temporal.

## 2. Pérdida de Paquetes

En las redes IP, la pérdida de paquetes es muy común y esperada debido a su naturaleza de recursos compartidos. Algunos protocolos de datos utilizan la pérdida de paquetes para conocer las condiciones de la red y poder reducir el número de paquetes que se envían (Davidson & Peters, 2006). La pérdida de paquetes marca la diferencia entre la tecnología VoIP y PSTN (Rake, 2006); es producida por errores en los medios de transmisión, congestión en la red o inestabilidad en el enrutamiento. La pérdida por congestión es la causa más común, los paquetes IP de diversas fuentes se ponen en la cola de los router que forman la subred del backbone de Internet para su transmisión hacia su destino final, sin embargo, cuando la cola se llena, los paquetes entrantes son descartados y se producen pérdidas.

El nivel aceptable de pérdida de paquetes esta en función del tamaño del paquete, un tamaño de paquete de alto valor disminuirá el retardo extremo a extremo, pero si el paquete se pierde, la degradación será proporcional al tamaño del paquete. Un sistema VoIP puede tolerar un porcentaje mayor de pérdidas si el tamaño de los paquetes a transmitir es reducido, sin embargo, un tamaño de paquete pequeño aumenta el retardo de extremo a extremo (Ransome & Rittinghouse, 2004). Por tal motivo existe un compromiso entre los retardos y la pérdida de paquetes.

Diversos estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta naturaleza ráfagoza, es decir, si un paquete se pierde, existe una alta probabilidad que el siguiente paquete también se pierda. A este fenómeno se le conoce como pérdida de paquetes a ráfagas. Un modelo que permite representar este fenómeno es el modelo de Markov de estados infinitos o cadenas de Markov. Una cadena de Markov de dos estados puede ser utilizada para representar una ráfaga de paquetes perdidos (burst) o una ráfaga de paquetes que llegaron correctamente a su destino (gap). Para lograr un comportamiento similar al que ocurre en Internet, es necesario usar una cadena de Markov de cuatro estados. Así podremos tener varias transiciones entre bursts y gaps.

## 3. Distribución de Pérdida de Paquetes

Debido al comportamiento dinámico o variable en el tiempo de Internet, la pérdida de paquetes puede presentar diversas distribuciones. Una de las distribuciones más utilizadas para representar la pérdida de paquetes es mediante el modelo de Bernoulli o Gilbert-Elliott; en el cual, un periodo de tiempo delimitado por paquetes perdidos con una tasa alta es conocido como burst, y un periodo entre dos bursts es llamado gap, en el cual los paquetes son recibidos correctamente (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un burst corresponde al periodo de tiempo durante el cual la tasa de pérdida de paquetes es lo suficientemente alta para producir una degradación notable en la calidad de la voz (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un gap corresponde al periodo de tiempo durante el cual los paquetes son recibidos correctamente o pueden ocurrir pérdidas aisladas, sin producir degradaciones significativas en la calidad de la voz y en general, el efecto de estas pérdidas aisladas puede ser resuelto por algún mecanismo de atenuación o recuperación de paquetes perdidos (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un burst se define, en términos de un valor denominado  $G_{min}$ , como la secuela más larga que: (a) comienza con un paquete perdido, (b) no contiene ocurrencias de  $G_{min}$  o más paquetes recibidos consecutivamente, y (c) termina con un paquete perdido (Friedman, Caceres, & Clark, 2003). Formalmente, un gap se define como cualquiera de los siguientes: (a) el periodo desde el inicio de una sesión RTP al tiempo de la recepción del último paquete recibido antes del primer burst, (b) el periodo desde el final del último burst, ya sea a la hora del informe o al final de la sesión RTP, lo que ocurra primero, o (c) el periodo de tiempo entre dos bursts (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Consideremos el arribo (paquete recibido correctamente) y la pérdida de un paquete hacia un destino, como los resultados mutuamente excluyentes  $A$  y  $\bar{A}$  que ocurren con probabilidades  $p$  y  $q$ , respectivamente. Ahora, definamos la variable aleatoria discreta  $X$ , donde  $X = 1$  cuando  $A$  ocurre y  $X = 0$  cuando  $\bar{A}$  ocurre. Lo anterior podemos escribirlo de la siguiente manera (Gebali, 2008):

$$\begin{aligned} p(1) &= p \\ p(0) &= q \\ q &= 1 - p \end{aligned} \tag{1}$$

La media y la varianza para  $X$  están dadas por las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$\mu = p \tag{2}$$

$$\sigma^2 = p(1 - p) \tag{3}$$

El uso de esta distribución de Bernoulli no será de mucha utilidad, porque esta distribución considera que las pérdidas se presentan de manera independientes, es decir, que la pérdida de un paquete no depende si el paquete anterior se perdió o arribó; a esto llamaremos pérdidas homogéneas. Esta distribución no representa el comportamiento real de internet; cuando un paquete se pierde es muy probable que el siguiente también se pierda, y los consiguientes también, creando una ráfaga de paquetes perdidos en un periodo de tiempo dado (Toral-Cruz, Pathan, & Ramírez Pacheco, 2013).

Por consiguiente, usaremos el término burst para referirnos a una ráfaga de paquetes perdidos, es decir, que si el paquete  $n$  se pierde es muy probable que el paquete  $n - 1$  también se pierda, esto crea por consiguiente una dependencia temporal entre  $n$  y  $n - 1$  (Rake, 2006).

#### 4. Modelado de Pérdida de Paquetes

Una serie de tiempo de paquetes perdidos o traza de pérdida de paquetes de tráfico VoIP, puede modelarse usando modelos de estados finitos en tiempo discreto, tales como, las cadenas de Markov. Se puede obtener un modelo simplificado de una traza de pérdida, utilizando únicamente una cadena de Markov de dos estados. Para lograr mayor precisión, es conveniente utilizar más números de estados (Rake, 2006).

Consideremos una secuencia de variables aleatorias  $X_0, X_1, \dots$ , y supongamos que el conjunto de todos los posibles valores es  $\{0, 1, \dots, M\}$ . Donde  $X_n$  es el estado de algún sistema en el tiempo  $n$ , y, de acuerdo con la interpretación, decimos que el sistema está en estado  $j$  en el tiempo  $n$  si  $X_n = j$ . La secuencia de variables aleatorias nos dice que una cadena de Markov está formada por:

$$P_{ij} = P(X_n = j | X_{n-1} = i) \tag{4}$$

Una cadena de Markov es un proceso aleatorio donde el valor de la variable aleatoria en un instante  $n$  depende solo de su valor en su pasado inmediato  $n - 1$  (Ross, 2012).

Los valores  $P_{ij}$ ,  $0 \leq i \leq M$ ,  $0 \leq j \leq M$ , son llamados probabilidades de transición de la cadena de Markov y satisfacen lo siguiente:

$$P_{ij} \geq 0 \quad \sum_{j=0}^M P_{ij} = 1 \quad i = 0, 1, \dots, M \tag{5}$$

Las probabilidades de transición  $P_{ij}$  entre estados pueden ser representadas mediante una matriz cuadrada de la siguiente forma:

$$T = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0M} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M0} & P_{M1} & \dots & P_{MM} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Para obtener el  $n$ -ésimo paso de la matriz de transición es necesario multiplicar la matriz por sí misma  $n$  veces, es decir:

$$T = T^n \quad (7)$$

$P_{ij}$  representa las probabilidades en estado estable  $S_i$ . El estado estable (steady-state) de la matriz de transición, puede ser obtenido a partir de lo siguiente (Estrada-Vargas, Torres-Roman, & Toral-Cruz, 2009):

$$\bar{S} = \bar{S}T \quad (8)$$

o, equivalentemente a:

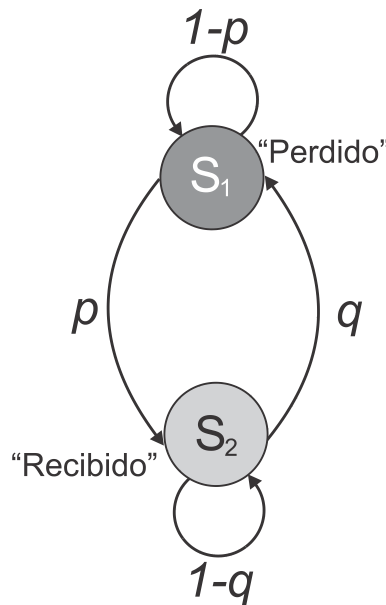
$$(I - T')\bar{S} = 0 \quad (9)$$

donde  $\bar{S} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_M]$ ,  $T'$  es la transpuesta de la matriz  $T$  e  $I$  la matriz identidad.

Una ráfaga de paquetes perdidos y recibidos sigue el comportamiento de una cadena de Markov de dos estados (también conocido como modelo de Gilbert) y puede ser descrita mediante dos parámetros ( $p$  y  $q$ ) (Rake, 2006), como se muestra en la Figura 1.

Donde  $p$  y  $q$  son las dos probabilidades de transición,  $q$  (transición de recibido→perdido) y  $p$  (transición de perdido→recibido). El estado  $S_1$  representa los paquetes perdidos y  $S_2$ , representa el estado en el que los paquetes son recibidos (Estrada-Vargas, Torres-Roman, & Toral-Cruz, 2009).

**Figura 1** Cadena de Markov de 2 estados



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

La matriz de transición de esta cadena de Markov de dos estados, estará dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{bmatrix}; \quad p + q = 1 \quad (10)$$

Sustituyendo la transpuesta de la matriz de la ecuación (10), tenemos:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \left[ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1-p & q \\ p & 1-q \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & -q \\ -p & q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación (11) podemos encontrar que:

$$0 = pS_1 - qS_2 = -pS_1 + qS_2 \quad (12)$$

Al despejar la ecuación (12) obtenemos:

$$S_2 = \frac{p}{q} S_1 \quad (13)$$

Como  $S_2 + S_1 = 1$ , podemos sustituir la ecuación (13) para obtener:

$$S_1 = \frac{q}{p+q} \quad (14)$$

$$S_2 = \frac{p}{p+q}$$

Donde  $S_1$ , representa la tasa de pérdida de paquetes de la comunicación.

La distribución de pérdida descrita con el modelo de Markov de 2 estados, puede también ser caracterizado por un vector o secuencia binaria; este vector estará compuesto por paquetes perdidos (unos) y paquetes recibidos (ceros) (Rake, 2006). La distribución del número consecutivo de paquetes perdidos ( $f_b(k)$ ) y paquetes recibidos ( $f_g(k)$ ), pueden ser expresados en términos de  $p$  y  $q$  (Rake, 2006).

$$f_b(k) = p(1-p)^{k-1} \quad (15)$$

$$f_g(k) = q(1-q)^{k-1} \quad (16)$$

Estas dos distribuciones geométricas nos indican el número de pasos  $k$  para cambiar de un estado a otro, en este caso, del estado de paquetes perdidos al estado de paquetes recibidos  $f_b(k)$ , o viceversa  $f_g(k)$ . El promedio de paquetes perdidos y recibidos consecutivamente pueden ser calculados como la esperanza de  $k$  y deducidas a partir de las ecuaciones (15) y (16). El promedio de paquetes perdidos consecutivamente se puede calcular de la siguiente manera (Rake, 2006):

$$\bar{b} = E\{k\} = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(1-p)^{k-1} \quad (17)$$

donde  $q = 1 - p$ . Después de sustituir  $p$  en la ecuación (17) tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \sum_{k=1}^{\infty} k q^{k-1} \quad (18)$$

Sin embargo  $\frac{d}{dq}(q^k) = kq^{k-1}$ . Entonces la ecuación (18), se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{dq}(q^k) \quad (19)$$

Intercambiando el orden de la derivada y la sumatoria tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \frac{d}{dq} [\sum_{k=1}^{\infty} q^k] \quad (20)$$

Desarrollando la sumatoria:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{k=1}^{\infty} q^k = q^1 + q^2 + q^3 + q^4 + \dots \\ S &= q^1 + q^2 + q^3 + q^4 + \dots \\ S &= q(1 + q^1 + q^2 + q^3 + \dots) \\ S &= q(1 + S) = q + qS \\ S - qS &= q \\ S(1 - q) &= q \\ S &= \frac{q}{(1-q)} \end{aligned} \quad (21)$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación (21) en la ecuación (20) y derivando:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \frac{d}{dq} \left[ \frac{q}{(1-q)} \right] = p \left[ \frac{(1-q) \frac{d}{dq}(q) - q \frac{d}{dq}(1-q)}{(1-q)^2} \right] \quad (22)$$

$$\bar{b} = E\{k\} = p \left[ \frac{(1-q) - q(-1)}{(1-q)^2} \right] = \frac{p}{(1-q)^2}$$

donde  $p = 1 - q$ . Después de sustituir  $q$  en la ecuación (22) tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = \frac{p}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (23)$$

Aplicando el mismo procedimiento utilizado para el cálculo del promedio de paquetes perdidos, podemos calcular el promedio de paquetes recibidos consecutivamente, quedando de la siguiente forma:

$$\bar{g} = E\{k\} = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot q(1-q)^{k-1} = \frac{1}{q} \quad (24)$$

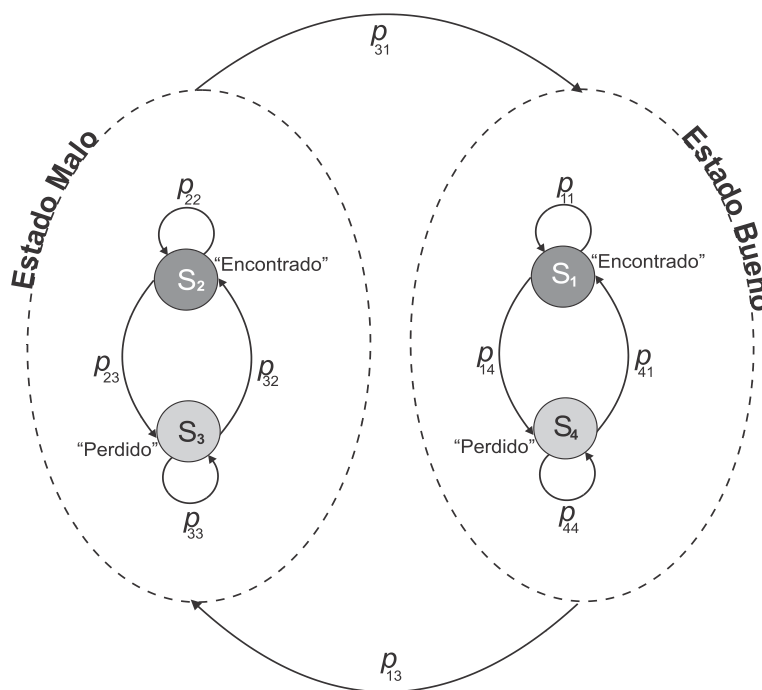
A partir de las ecuaciones (23) y (24) podemos encontrar la tasa de pérdida de paquetes de la comunicación ( $S_1$ ), como se expresa en la ecuación (14):

$$S_1 = \frac{q}{p+q} = \frac{\bar{b}}{\bar{b}+\bar{g}} \quad (25)$$

$$S_1 = \frac{\bar{b}}{\bar{b}+\bar{g}} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} = \frac{\frac{q+p}{p}}{\frac{(p)(q)}{(p)(q+p)}} = \frac{q}{(p+q)}$$

Para lograr una mejor aproximación en el modelado de la serie de tiempo de *PLR* o traza de pérdida de paquetes de tráfico VoIP, debemos usar un mayor número de estados, es decir, una cadena de Markov de  $n$  estados. En este trabajo nos limitaremos a analizar únicamente cadenas de Markov de dos y cuatro estados.

**Figura 2** Cadena de Markov de 4 estados



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

En la Figura 2 se muestra una cadena de Markov de 4 estados. Este modelo explica que existen dos niveles de rafagosidad, una donde hay muchos paquetes perdidos (estado malo) y otra donde hay pocos paquetes perdidos (estado bueno).

En una cadena de Markov de cuatro estados, los estados  $S_3$  y  $S_4$  (los estados de paquetes perdidos), los estados  $S_1$  y  $S_2$  (los estados de paquetes recibidos) y los parámetros  $[p_{14}, p_{41}, p_{23}, p_{32}, p_{13}, p_{31} \in (0,1)]$  son necesarios para hallar todas las probabilidades de transición (Estrada-Vargas, Torres-Román, & Toral-Cruz, 2010). La probabilidad de estado estable de estar en el estado bueno esta dada por la siguiente ecuación (Toral-Cruz, 2010):

$$\pi_B = \frac{P_{13}}{P_{13}+P_{31}} \quad (26)$$

y la probabilidad de estado estable de estar en el estado malo esta dada por la siguiente ecuación (Estrada-Vargas, Torres-Román, & Toral-Cruz, 2010), (Toral-Cruz, 2010):

$$\pi_G = \frac{P_{31}}{P_{31}+P_{13}} \quad (27)$$

En el estado “bueno” ( $G$ ) la perdida de paquetes ocurre con probabilidad baja  $P_G$ , mientras que en el estado “malo” ( $B$ ) ocurre con probabilidad alta  $P_B$ .

Todos los paquetes perdidos en un estado bueno o malo pueden ser calculados siguiendo las ecuaciones que a continuación se presentan:

$$P_G = \frac{p_{14}}{p_{14}+p_{41}} \quad (28)$$

$$P_B = \frac{p_{23}}{p_{23}+p_{32}} \quad (29)$$

La probabilidad total de todos los paquetes perdidos para una cadena de Markov de cuatro estados está dada por la ecuación:

$$PLR = \pi_G P_G + \pi_B P_B \quad (30)$$

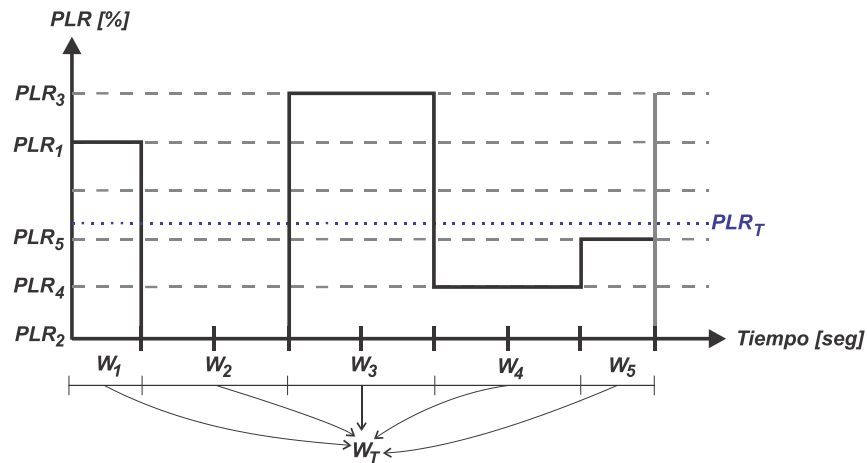
## 5. Comportamiento Microscópico y Macroscópico

La pérdida de paquetes en un sistema VoIP puede ser descrita en función de ventanas de tiempo angostas y amplias. Donde, el comportamiento de los paquetes perdidos en una ventana de tiempo angosta será llamada Microscópica, y el comportamiento de pérdida de paquetes en una ventana de tiempo amplia será llamado Macroscópica (Toral-Cruz, 2010).

El comportamiento microscópico corresponde al periodo de pérdida de paquetes observado en una ventana de tiempo  $W_1$  de una comunicación VoIP; donde este periodo de paquetes perdidos tiene un valor  $PLR_1$  específico (Toral-Cruz, 2010).

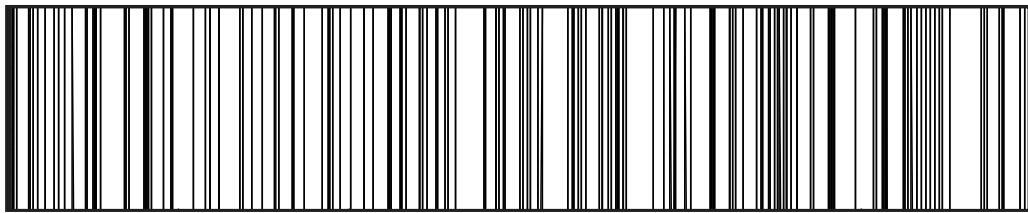
Por otra parte, el comportamiento macroscópico se refiere al conjunto de periodos microscópicos ( $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ ) observado en toda la duración de la comunicación VoIP; en el que cada periodo microscópico tiene su propio valor  $PLR$  ( $PLR_1, PLR_2, PLR_3, \dots, PLR_n$ ), como se muestra en la Figura 3. En la Figura 3 se puede observar que existen diferentes niveles de  $PLR$  para cada periodo microscópico, es decir, la pérdida de paquetes se concentra en algunos intervalos de tiempo u ocurre a ráfagas (burst). El comportamiento microscópico puede ser modelado por una cadena de Markov de dos estados, mientras que el comportamiento macroscópico puede ser modelado por una cadena de Markov de cuatro estados (Toral-Cruz, 2010).



**Figura 3** Comportamiento microscópico y macroscópico

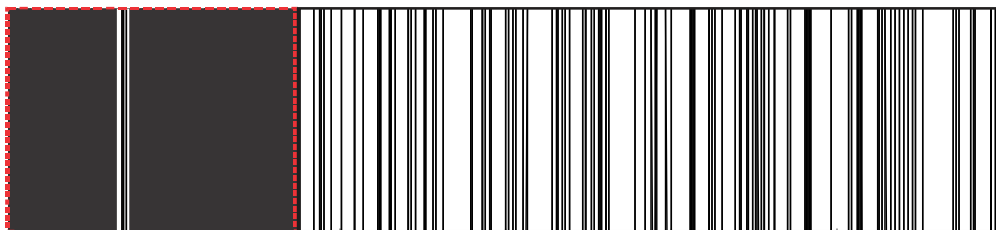
Fuente de Consulta: Elaboración Propia

En la Figura 4 se representa el comportamiento de la pérdida de paquetes de forma homogénea; es decir, el patrón de paquetes perdidos está representado por un periodo microscópico.

**Figura 4** Paquetes perdidos de forma homogénea

Fuente de Consulta: Elaboración Propia

Por otro lado, en la Figura 5 se representa el comportamiento de la pérdida de paquetes de forma no homogénea; es decir, el patrón de paquetes perdidos está representado por más de un periodo microscópico.

**Figura 5** Paquetes perdidos de forma no homogénea

Fuente de Consulta: Elaboración Propia.

Con el fin de simplificar esta descripción de paquetes perdidos, los periodos microscópicos pueden ser clasificados en dos conjuntos; uno para pérdidas bajas y otra para pérdidas altas de paquetes. El umbral usado para delimitar los dos conjuntos es una función de la percepción de la calidad, buena o mala, de acuerdo con el cálculo de valores  $MOS$  (Torral-Cruz, 2010).

En la Figura 4.3, el periodo microscópico con altas pérdidas de paquetes está delimitado por un recuadro punteado, mientras que un periodo microscópico con bajas pérdidas está delimitado por un recuadro continuo.

## 7. Conclusiones

Las redes IP no garantizan la calidad de servicio en aplicaciones multimedia tales como VoIP, esto debido a que proporcionan un servicio de mejor esfuerzo. Por tal motivo, retardos, jitter y pérdida de paquetes son los deterioros más comunes en la transmisión de voz sobre las redes IP. Derivado de estos puntos, muchos trabajos han sido orientados al análisis de las principales métricas de desempeño. En este capítulo se presenta el estudio y caracterización de la pérdida de paquetes basada en su dependencia temporal, lo cual indica que existe una fuerte correlación entre la pérdida de paquetes consecutivos (pérdida de paquetes a ráfagas). Se presenta una descripción de comportamientos microscópico y macroscópico, donde estos comportamientos pueden ser modelados mediante cadenas de Markov de dos y cuatro estados, respectivamente.

## Agradecimientos

Agradecemos a la UQROO y UNACAR por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Los autores declaramos que no hay conflicto de interés acerca de la publicación de este artículo.

## Referencias

- Abbas, H. S., & Gregory, M. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53-74.
- Davidson, J., & Peters, J. (2006). *Voice Over IP Fundamentals*. NJ: Cisco Press.
- Edward, O., Lehr, W., Katsaros, K., Selinis, I., Bubleye, D., & Kusuma, J. (2021). Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, 45, 1-15.
- Estrada-Vargas, L., Torres-Román, D. L., & Toral-Cruz, H. (2010). Characterization and modeling of packet loss of a VoIP communication. *World Academy of Science, Engineering and Technology* (págs. 912-916). Paris: WASET.
- Estrada-Vargas, L., Torres-Roman, D., & Toral-Cruz, H. (2009). Analytical Description of a Parameter-based Optimization of the Quality of Service for VoIP Communications. *WSEAS Transactions on Communications*, 9, 1042-1052.
- Friedman, T., Caceres, R., & Clark, A. (2003). *RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)*. Washington D.C: Network Working Group / Request for Comments.
- Gebali, F. (2008). *Analysis of Computer and Communication Networks*. Boston, MA: Springer.
- Jelassi, S., & Rubino, G. (2018). A perception-oriented Markov model of loss incidents observed over VoIP networks. *Computer Communications*, 128, 80-94.
- Panwar, N., Sharma, S., & Singh, A. (2016). A survey on 5G: The next generation of mobile communication. *Physical Communication*, 18, 64-84.
- Rake, A. (2006). *Speech Quality of VoIP: Assessment and Prediction*. London: John Wiley & Sons Inc.
- Ransome, J., & Rittinghouse, J. (2004). *Voice over Internet Protocol (VoIP) Security*. Amsterdam: Elsevier Digital Press .
- Ross, S. (2012). *First Course in Probability*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Toral-Cruz, H. (2010). *Modelado de los Parámetros de QoS de Tráfico VoIP Auto-similar y una Mejora al Modelo E*. Guadalajara: CINVESTAV.
- Toral-Cruz, H., Pathan, A.-S., & Ramírez Pacheco, J. C. (2013). Accurate modeling of VoIP traffic QoS parameters in current and future networks with multifractal and Markov models. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(11-12), 2832-2845.