

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE
TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA**

**TRÁFICO DE TELEFONÍA MÓVIL:
CARACTERIZACIÓN E
IMPLICACIONES DEL TIEMPO DE
OCUPACIÓN DEL CANAL**

Autor: Francisco Barceló Arroyo
Director: Josep Paradells Aspas

CAPÍTULO 4

Distribución hiperexponencial del tiempo de ocupación del canal

En este capítulo se introducen algunos sistemas de telefonía móvil en los que el tiempo de ocupación del canal está distribuido de forma hiperexponencial en el sentido amplio de este término: el coeficiente de variación del tiempo de ocupación es mayor que la unidad. Para referirnos a la distribución hiperexponencial definida en la sección 4.1 lo haremos siempre como hiperexponencial- k , siendo k el número de etapas sin memoria que la componen. Se trata por tanto en este capítulo con sistemas muy diferentes entre sí, tales como sistemas PAMR a nivel de transmisión, ocupación del canal en sistemas de telefonía móvil celular, sistemas móviles que integran varios servicios y tercera generación de telefonía móvil asignación de canal a nivel de ráfaga. Para los dos primeros tipos de sistemas se presentan medidas y caracterizaciones similares a las presentadas en el capítulo 2 para nivel de mensaje en sistemas PAMR, y de hecho las herramientas utilizadas son las mismas: estimación mediante máxima verosimilitud (MLE) y test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. De los dos últimos se realizan algunas consideraciones basadas en la literatura existente que ponen de relieve la naturaleza hiperexponencial del tiempo de ocupación del canal.

Las implicaciones prácticas de los resultados de este capítulo son en cierto sentido inversas a las presentadas hasta este punto. De este modo, si asumimos una distribución exponencial del tiempo de servicio en sistemas cuya distribución es realmente hiperexponencial, estamos en general subdimensionando el sistema (diseñando menos canales que los necesarios para cumplir con el GoS requerido por la red). El capítulo 5 trata precisamente sobre la aplicación de las caracterizaciones presentadas aquí de cara a una estimación más precisa del GoS.

4.1 Funciones de distribución propuestas

La metodología con la que se realizarán las medidas de este capítulo es en todo análoga a la utilizada en el capítulo 2 (ver figura 2.1) excepto en algunos detalles que se referirán donde sea necesario. En este caso trabajaremos con distribuciones cuyo coeficiente de variación es mayor que la unidad, razón por la cual algunas de las distribuciones que han proporcionado buenos ajustes en el capítulo 2 no deben ser ni tan siquiera candidatas, tal es el caso de las distribuciones Erlang- k cuyo coeficiente de variación es siempre menor que la unidad. El criterio de elección de las distribuciones candidatas del capítulo 2 es mantenido en éste, considerándose por un lado distribuciones que resultan de la combinación de etapas “sin memoria” y por otro combinaciones de logonormales. La justificación para ello se encuentra en la sección 2.2, si bien en el caso de ocupación de canal en telefonía móvil pública aquella justificación no es suficiente (dado lo artificioso que puede resultar el tamaño de las células y la movilidad de los terminales) tal como se detallará en la sección 4.5. Por otra parte podemos probar aquí funciones que no fueron candidatas en el capítulo 2 tales como:

- **Hiperexponencial-2:** no fue candidata ya que su coeficiente de variación es siempre superior a la unidad. De hecho es la combinación de dos etapas sin memoria en paralelo y viene a substituir el papel de la Erlang- k (combinación de k etapas en serie) en distribuciones hipoexponenciales.

$$\text{f.d.p.} \quad f(t) = q \frac{1}{\beta_1} e^{-\frac{t}{\beta_1}} + (1-q) \frac{1}{\beta_2} e^{-\frac{t}{\beta_2}} \quad \text{para } t \geq 0$$

$$\text{F.D.P.} \quad F(t) = q(1 - e^{-\frac{t}{\beta_1}}) + (1-q)(1 - e^{-\frac{t}{\beta_2}}) \quad \text{para } t \geq 0$$

$$\text{Media:} \quad \frac{q}{\beta_1} + \frac{1-q}{\beta_2}$$

$$\text{Varianza:} \quad 2 \frac{q}{\beta_1^2} + 2 \frac{1-q}{\beta_2^2}$$

Estimador: por MLE, se obtiene de forma numérica a partir de la estimación por momentos.

- Logonormal-k: es la combinación (suma) de k distribuciones logonormales. No ha sido necesaria su utilización en el capítulo 2 ya que con $k=1$ se obtuvieron buenos resultados. La ausencia de buenos ajustes en base a distribuciones más sencillas nos hizo probar la logonormal-2 en el caso de transmisiones en sistemas PAMR con resultados sorprendentemente satisfactorios. En [BOL94a, b] se demuestra como la logonormal-3 ajusta muy bien a la duración de la llamada en telefonía fija lo cual hace obligado probar la misma distribución en el entorno celular.

$$\text{f.d.p.} \quad \sum_{i=1}^k q_i [f.d.p. \text{ logonormal}]_i$$

$$\text{F.D.P.} \quad \sum_{i=1}^k q_i [F.D.P. \text{ logonormal}]_i$$

$$\text{Media} \quad \sum_{i=1}^k q_i \text{media}_i, \text{ con } \text{media}_i \text{ la media de cada logonormal componente}$$

$$\text{Varianza} \quad \sum_{i=1}^k q_i \text{var}_i, \text{ con } \text{var}_i \text{ la varianza de cada logonormal componente}$$

Estimador: por MLE (aproximación numérica)

4.2 Duración de la transmisión en el sistema PAMR-1

En la fase de diseño de un sistema PMR troncal con gestión por transmisión (ver sección 1.6) debe de tenerse en cuenta que el canal se asigna para cada una de las transmisiones individuales, de modo que puede resultar extremadamente útil conocer no solo la duración media de la transmisión sino también su distribución completa. Dicha información servirá para alimentar de forma muy precisa las simulaciones de tráfico y de cara a la realización de cálculos del GoS.

Existen en la bibliografía consultada pocos antecedentes de medidas y caracterizaciones de las duraciones de las transmisiones en sistemas PMR monocal. En [COH84] se ofrecen estadísticas de las duraciones medias de las transmisiones y su desviación típica, clasificadas en base al objetivo de la flota que utiliza el sistema monocal. En este estudio no se modela la distribución de la duración de la

transmisión, aunque la información relativa al coeficiente de variación es un valor a tener en cuenta. De este modo se obtienen duraciones medias de la transmisión de entre 1,29 y 5,21 segundos dependiendo de la flota que hace uso del sistema. Los cuadrados de los coeficientes de variación de los tiempos de transmisión oscilan entre 0,7 y 2,25, siendo mucho más abundantes los coeficientes de variación mayores que la unidad que representan el 80% de las flotas investigadas. Otros estudios como [HAG76, BUR80] investigan el tiempo de transmisión solamente como una vía para obtener las duraciones de los mensajes mediante algoritmos empíricos que ellos mismos proponen.

El sistema PAMR-1 es el descrito en la sección 2.7. De cara a la obtención de los tiempos de transmisión no es suficiente el montaje de la figura 2.1 que es útil únicamente para proporcionar los tiempos de mensaje, ya que detecta la presencia o ausencia de portadora en el radiocanal y ésta está presente a lo largo de toda la conversación. De este modo ha sido necesario procesar la señal dentro de cada mensaje con el fin de identificar la señalización producida por el mecanismo de “cambio” al apretar los interlocutores el botón PTT de su terminal. De hecho el tiempo de transmisión en el que estamos interesados es el tiempo que media entre dos señalizaciones consecutivas de “cambio”. Para ello han sido grabadas las conversaciones y posteriormente digitalizadas y procesadas en el ordenador personal PC. La separación entre transmisiones diferentes se ha realizado en base a las frecuencias y niveles presentes en la señalización de “cambio” tal como se describe en [JOR97a, b]. De este modo se ha obtenido una muestra de 1.521 transmisiones a lo largo de aproximadamente tres horas de conversación, con una duración media de 2.523 ms. con valores desde 208 ms. hasta 41.264 ms.

La figura 4.1 representa la media del tiempo restante de una transmisión en función del tiempo transcurrido. Esta figura ha sido realizada del mismo modo que las figuras 2.2 y 2.6 (ver sección 2.7). Puede observarse un fenómeno opuesto al descrito en la figura 2.2 para las duraciones de los mensajes, de modo que en este caso cuanto más tiempo ha transcurrido de una transmisión más tiempo resta de la misma en media. Este comportamiento no es compatible con una distribución exponencial en la que el tiempo restante debería ser independiente del transcurrido, y de hecho representa un comportamiento hiperexponencial. La dispersión que se observa para valores altos del tiempo transcurrido es debida a que cuanto mayor es dicho tiempo, menor es el número de valores de que disponemos para promediar. Esto provoca por un lado el que la gráfica sea menos compacta por tener menos valores del tiempo remanente, y a la vez que dichos valores sean más dispersos. El carácter hiperexponencial de la distribución estadística subyacente a los datos acentúa este

fenómeno con respecto a las gráficas de las figuras 2.2 y 2.6 que están realizadas en base a distribuciones hipoexponenciales.

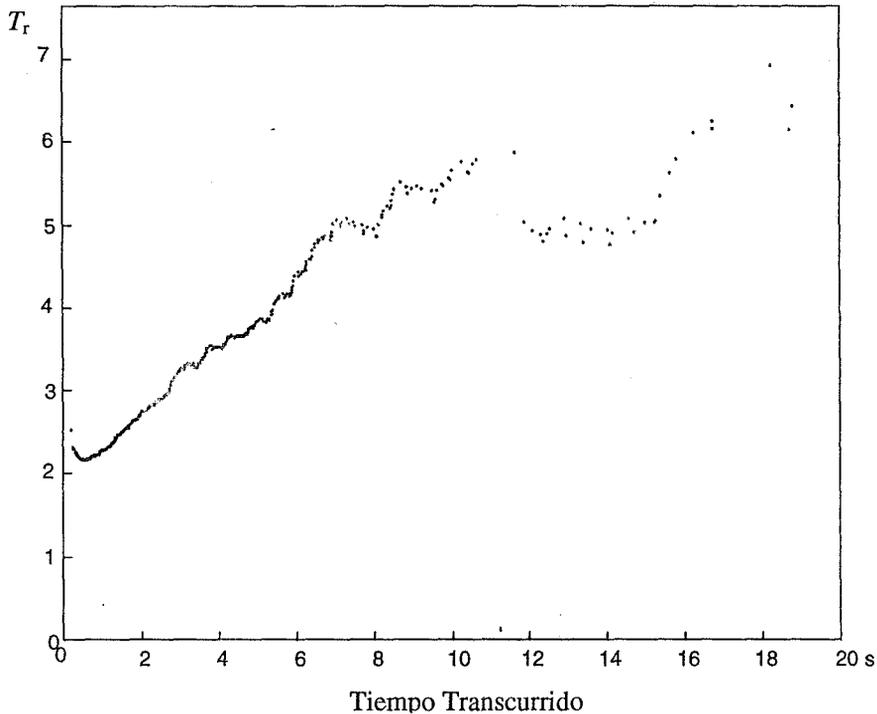


Figura 4.1 Tiempo medio restante en segundos en función del tiempo transcurrido.

Los resultados de los ajustes que se han probado se reflejan en la tabla 4.1. El ajuste exponencial aparece en la tabla a modo de referencia. La distribución hiperexponencial-2 proporciona un ajuste peor que la exponencial que se refleja en una mayor distancia modificada, dada la baja significancia en ambos casos. Además en este caso queda patente que no solamente por disponer de más parámetros una distribución permite un mejor ajuste, ya que con la logonormal se consigue un ajuste mucho mejor, dentro del margen de significancia del 5% habitualmente aceptado. De hecho la forma de la distribución que se intenta ajustar es crucial, y si ésta no satisface la estadística de los datos, el ajuste no se consigue aunque se disponga de muchos parámetros para realizarlo. La combinación de dos logonormales proporciona una significancia sorprendentemente buena del 96% y es de destacar como una de las dos logonormales que se combinan posee unos parámetros muy similares a los del ajuste con solo una logonormal (la mejora en significancia la debemos al complemento que aporta la segunda). En la figura 4.2 se representa el histograma de la muestra junto a la distribución que mejor ajusta, y en la figura 4.3 se representan los contornos de la función de distribución para un 5% de significancia.

Momentos de los tiempos de transmisión en el sistema PAMR-1							
Media	2.523 ms.						
c^2	1,38						
Ajustes							
Exponencial	D	α	β				
	4,874	0,000	2.523				
Erlang-jk	D	α	β	q	j	k	
	1,738	0,005	921	0,929	2	13	
HE-2	D	α	β_1	β_2	p		
	5,339	0,000	3.517	1967	0,359		
Logonormal	D	α	μ	σ			
	1,318	0,062	7,439	0,846			
Logonormal-2	D	α	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	q
	0,504	0,961	7,860	0,810	6,934	0,567	0,545

Tabla 4.1 Momentos y ajustes realizados para la muestra de tiempos de transmisión del sistema PAMR-1.

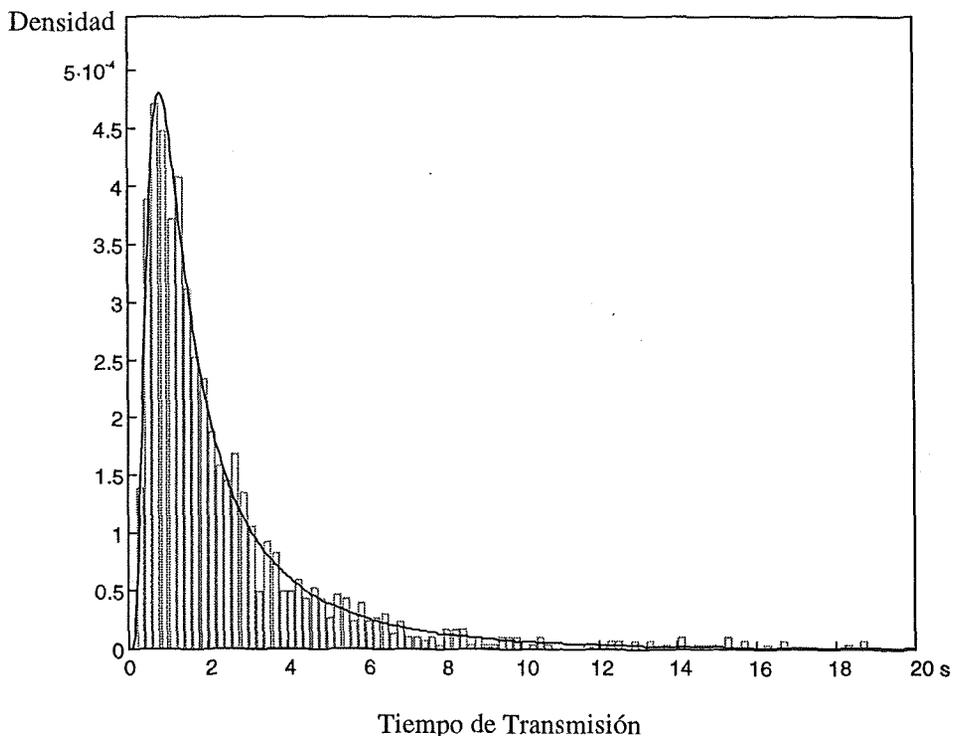


Figura 4.2 Histograma de la muestra PAMR-1 y ajuste logonormal-2.

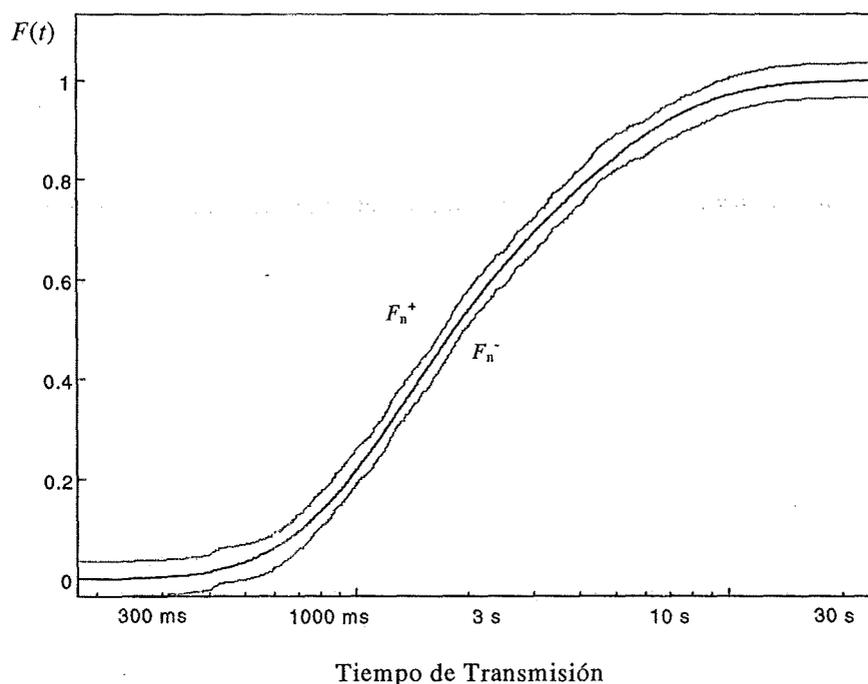


Figura 4.3 Contornos del 5% de probabilidad de error para el ajuste del sistema PAMR-1 con distribución lognormal-2.

4.3 Duración de la transmisión en el sistema PAMR-2

El sistema PAMR-2 es el descrito en la sección 2.8, que tal como se ha comentado en el capítulo 2 posee una carga inferior al sistema PAMR-1 y unas limitaciones de duración máxima de la llamada más relajadas. Mediante el mismo procedimiento descrito en la sección anterior se ha obtenido una muestra de 1.517 valores a lo largo de unas seis horas de monitorización con una media de 2.820 ms. (mínimo de 177 ms. y máximo de 24.650 ms). Esta media, mayor que en el sistema anterior, no queda del todo explicada por la menor carga y mayor relajación de las limitaciones impuestas por el sistema, que si explicaban fácilmente la mayor duración de los mensajes. De hecho la duración de la transmisión es menos controlable por parte del usuario y depende mucho más de la estructura y propósito de la comunicación e incluso del idioma utilizado. De cualquier modo cabe pensar que el hecho de hablar con prisa acelere la comunicación a todos los niveles, aunque también debe contemplarse un cierto componente de aleatoriedad en este aumento de la media.

La figura 4.4 representa el tiempo medio restante en función del tiempo de transmisión transcurrido. En ella se observa una gran estabilidad de dicho tiempo que obedece al hecho de que el coeficiente de variación sea cercano a la unidad. Puede observarse también la misma dispersión que en la figura 4.1 para valores altos del tiempo transcurrido.

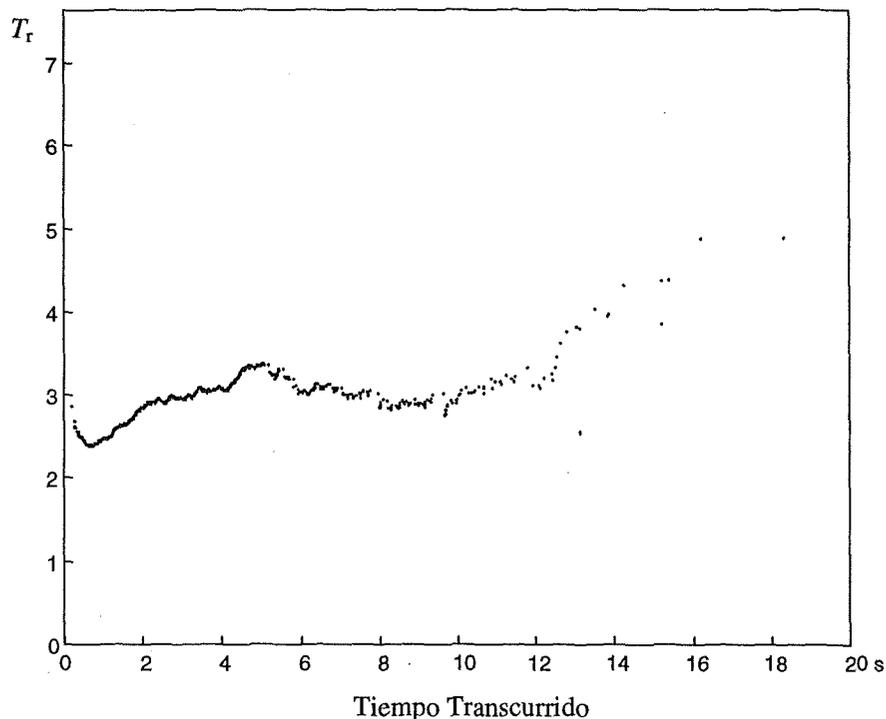


Figura 4.4 Tiempo remanente en función del transcurrido para el sistema PAMR-2.

En la tabla 4.2 se resumen los resultados de los ajustes que se han probado para este sistema. La distribución hiperexponencial no se ha podido ajustar debido a que el coeficiente de variación de la muestra es ligeramente inferior a la unidad. Otra vez la distribución logonormal-2 proporciona un ajuste extraordinariamente bueno con una significancia espectacular del 97%. En la figura 4.5 se representa el histograma de los datos utilizados junto al mejor ajuste conseguido.

Momentos de los tiempos de transmisión del sistema PAMR-2							
Media	2.858 ms						
c^2	0,95						
Ajustes							
Exponencial	D	α	β				
	5,354	0,000	2.858				
Erlang- jk	D	α	β	p	j	k	
	1,886	0,002	1.103	0,916	2	9	
Logonormal	D	α	μ	σ			
	1,587	0,013	7,598	0,838			
Logonormal-2	D	α	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	p
	0,497	0,966	8,465	0,567	7,190	0,592	0,320

Tabla 4.2 Momentos y ajustes realizados para la muestra de tiempos de transmisión del sistema PAMR-1.

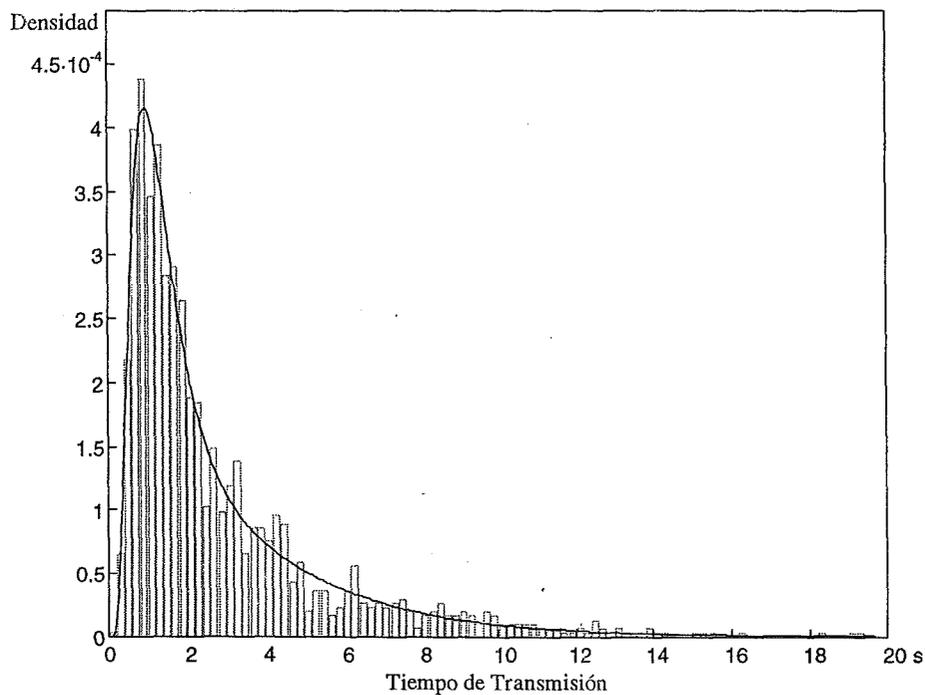


Figura 4.5 Histograma de la muestra PAMR-1 y ajuste logonormal-2.

De las medidas presentadas en estas dos últimas secciones pueden extraerse varias conclusiones:

- La configuración del sistema (situación de carga y limitaciones de tiempo) debería influir poco en los momentos de la duración de la transmisión a diferencia de lo que sucedía con los mensajes. De hecho la duración de la transmisión depende mucho más de la estructura de la comunicación e incluso del idioma utilizado que de la voluntad de los usuarios. A pesar de ello es razonable pensar que las prisas repercuten en cierta medida sobre todos los niveles de la comunicación, incluido el de transmisión.
- La comunicación half-duplex provoca unos tiempos de transmisión muy inferiores a los que se producirían en full-duplex. Esto es debido a que un interlocutor no puede saber lo que piensa el otro hasta que suelta el botón PTT a diferencia de lo que sucede en full-duplex donde cualquier interlocutor puede intervenir en cualquier momento de la conversación. También la disciplina del sistema PMR contribuye a esta brevedad y de hecho muchas transmisiones contienen solo palabras como “afirmativo” o “negativo”.
- Después de haber analizado ambos sistemas resulta absolutamente sorprendente la coincidencia del mejor ajuste (logonormal-2) y sobre todo la espectacular significancia (96-97%) en ambos casos. Estos resultados parecen corroborar la hipótesis que realiza Bolotin en [BOL94a, b] de que la causa de los buenos ajustes con logonormales estriba en la percepción logarítmica del tiempo por parte del ser humano. De hecho la escala logarítmica de percepción está probada para tiempos cortos, tales como los que se producen a nivel de transmisión, mientras que Bolotin debe generalizarla a tiempos largos para aplicar la hipótesis a los tiempos de ocupación de enlaces (nivel de llamada) en telefonía fija.
- Es curioso que el ajuste sea tan bueno (96-97% de significancia) a pesar de la diferencia en la dispersión (reflejada en los coeficientes de variación) de ambas poblaciones. El mayor coeficiente de variación del sistema PAMR-1 se produce debido a que ha aparecido alguna transmisión de 41 segundos frente a un máximo de 24 segundos en el sistema PAMR-2. El resultado da la razón a [DUF94] en el sentido de que para distribuciones de “cola pesada” (“heavy-tailed”) la aparición de un solo dato de valor elevado puede incrementar el coeficiente de variación en cualquier momento de la monitorización. De este modo el coeficiente de variación aparece como un parámetro más variable que la propia forma de la distribución.

- Los valores medios obtenidos en este estudio están dentro de los límites obtenidos por [COH84]. Debe de tenerse en cuenta que aquí estudiamos un sistema troncal, mientras que [COH84] trata con diversos sistemas convencionales por separado. Por lo tanto en nuestro estudio se mezclan llamadas de características diferentes facilitando también los ajustes mediante combinación de logonormales tal como explica Bolotin en [BOL94a, b].

4.4 Ocupación del canal en telefonía móvil celular

La duración de la ocupación del canal en un sistema de telefonía móvil celular es una fracción de la duración de la llamada. De hecho el tiempo de ocupación de canal coincidirá con el de llamada solamente en aquellos casos en los que no se realice ningún traspaso (la llamada se inicia y finaliza en una misma celda). No hay razón para pensar que la duración de la llamada en telefonía móvil sea diferente a la de telefonía fija. Así puede modelarse la duración de la llamada en telefonía móvil mediante una distribución exponencial negativa. Bolotin cita en [BOL94b] hasta 8 ponencias presentadas en un solo congreso (13th International Teletraffic Congress) asumiendo dicha distribución exponencial. Por otra parte el mismo autor en los artículos citados demuestra como las combinaciones de distribuciones logonormales ajustan mucho mejor que la exponencial negativa a la duración de la llamada en telefonía fija.

En cuanto a la duración de la ocupación de canal en telefonía móvil celular, parece claro que debiera ser en gran medida independiente de la duración de la llamada. Resulta más clara la dependencia de la forma y tamaño de las celdas y de la movilidad de los usuarios, y ambos pueden resultar muy artificiales. De hecho la distribución del tiempo de ocupación del canal tiende a la de la duración de la llamada si la tasa de traspasos es muy baja, pero esta situación solo ocurrirá para tamaños muy grandes de las celdas o para movilidades o velocidades de los terminales muy bajas. De este modo resulta más difícil proponer funciones de distribución candidatas en este caso, aunque es razonable mantener los criterios utilizados hasta aquí: combinaciones de etapas sin memoria dadas las facilidades que aportan a los cálculos analíticos, y logonormales por su relación con la percepción humana del tiempo (ver sección 2.2). Así por ejemplo en [RAP93] el autor generaliza resultados de trabajos anteriores al caso en que la ocupación del canal está distribuida conforme a una combinación de funciones exponenciales negativas, obteniendo resultados analíticos para los parámetros del GoS.

Existen en la literatura diversos trabajos en los que se obtiene de forma analítica o por simulación la distribución del tiempo de ocupación del canal, siempre partiendo de una distribución exponencial de la duración de la llamada. Así en [HON86] los autores obtienen resultados analíticos para el tiempo de ocupación del canal partiendo de un modelo de velocidad y dirección distribuidas de forma uniforme, cambiando estos dos últimos valores aleatoriamente al atravesar una frontera entre zonas de cobertura. La función de distribución obtenida no se corresponde con ninguna de las habituales presentadas por ejemplo en [HAS74], pero los autores la aproximan por una exponencial negativa para poder seguir investigando resultados analíticos. Guerin en [GUE87] simula una extensión geográfica grande basada en celdas circulares y una distribución uniforme del ángulo de dirección de los vehículos a la vez que una distribución exponencial del tiempo de permanencia de un terminal en una dirección determinada. Aplicando el test K-S a los resultados de simulación consigue un buen ajuste con una distribución exponencial de la ocupación del canal. En el artículo citado, Guerin obtiene también resultados analíticos (asumiendo hipótesis más restrictivas para la movilidad de los vehículos) obteniendo entonces distribuciones sofisticadas. De modo parecido Zonoozi. [ZON95b] simula un área con un esquema de movilidad presentado por los mismos autores [ZON95a] y mediante el test K-S obtienen una distribución exponencial del tiempo de ocupación del canal. Steele y Nofal obtienen en [STE92] también una distribución exponencial de forma analítica, partiendo de un área y esquema de movilidad basados en calles perpendiculares.

No deja de asombrar la disparidad entre los argumentos expuestos en los dos párrafos anteriores: por un lado parece que la distribución de ocupación del canal debiera ser independiente de la de la duración de la llamada, por otro diversos autores obtienen una distribución exponencial de la ocupación del canal siendo el único punto de partida común la distribución exponencial de la duración de la llamada y cambiando el resto de condiciones del modelo.

Tal vez sea en [RAP93] donde se establezca cierto orden en torno a este tema. El autor, que años antes ha participado en estudios analíticos sobre la distribución estadística del tiempo de ocupación del canal [HON86], dice: “Claramente, el tiempo de ocupación del canal depende de muchos factores como las condiciones de propagación, ... *sic*. Pero incluso si todos fueran conocidos, la dependencia es tan compleja que hay que recurrir a medidas obtenidas empíricamente. Una forma de evitar algunas de estas dificultades consiste en caracterizar el tiempo de ocupación del canal mediante una variable aleatoria conocida que se acomoda a los datos empíricos”. En el trabajo citado el autor obtiene resultados analíticos asumiendo que

la duración de la ocupación del canal está distribuida conforme a combinaciones de etapas sin memoria, una de las dos opciones que presentamos en esta tesis.

Por último hay que citar a [JED96], el único trabajo que conocemos con medidas de campo del tiempo de ocupación del canal en telefonía móvil pública celular. En él se pasa el test de bondad de ajuste de ji-cuadrado a la muestra de datos de ocupación del canal rechazando la hipótesis de distribución exponencial y aceptando la distribución lognormal.

4.5 Caracterización y medidas de la ocupación del canal en telefonía móvil celular

La metodología utilizada en esta sección es de nuevo la representada en la figura 2.1, sintonizando un canal de telefonía móvil celular y registrando en el ordenador personal los tiempos de ocupación. El sistema monitorizado es un sistema de telefonía móvil pública analógico FDMA, por lo que la presencia de portadora en una frecuencia determinada implica que un canal vocal está siendo utilizado. Para la obtención de muestras “limpias” ha habido que buscar radiocanales libres de interferencias, lo cual se ha realizado mediante monitorización aural de los mismos. Los datos obtenidos han sido sometidos a un sencillo procesamiento. De este modo han sido eliminadas las actividades inferiores a dos segundos consideradas espúreas (probablemente interferencias de muy corta duración) y los silencios inferiores a un segundo, la mayoría son debidos a cortes muy breves en una misma ocupación. También mediante monitorización aural se comprobó que este proceso acercaba los datos de la población obtenida a la realidad de las ocupaciones presentes en el sistema.

En este punto surge el problema de la influencia del tamaño de la celda en la que monitorizamos el radiocanal. Al desconocer que radiocanales operan en cada celda se ha procedido a la comparación entre los datos obtenidos para distintos radiocanales y los datos agregados de todos ellos. Los histogramas de los datos obtenidos para diferentes radiocanales son muy parecidos entre sí y muy parecidos al histograma de todos los datos agregados. De este modo llegamos a la conclusión de que los resultados de la caracterización de tráfico serán los mismos, probablemente debido a que las características de la mayoría de las células que monitorizamos son muy parecidas. Optamos por tomar datos representativos de un solo radiocanal en lugar de los agregados que podrían presentar vicios debido a la suma de datos de diferentes celdas (aunque parece claro de la observación de histogramas que esto

último no sucede siempre es mejor obrar con precaución en las valoraciones estadísticas).

El tamaño de la población así obtenida es de 2.445 datos de tiempos de ocupación del canal. La figura 4.6 representa el tiempo medio restante de ocupación en función del tiempo transcurrido, tal como se ha visto ya para otros sistemas y pone de manifiesto el carácter hiperexponencial de la distribución subyacente.

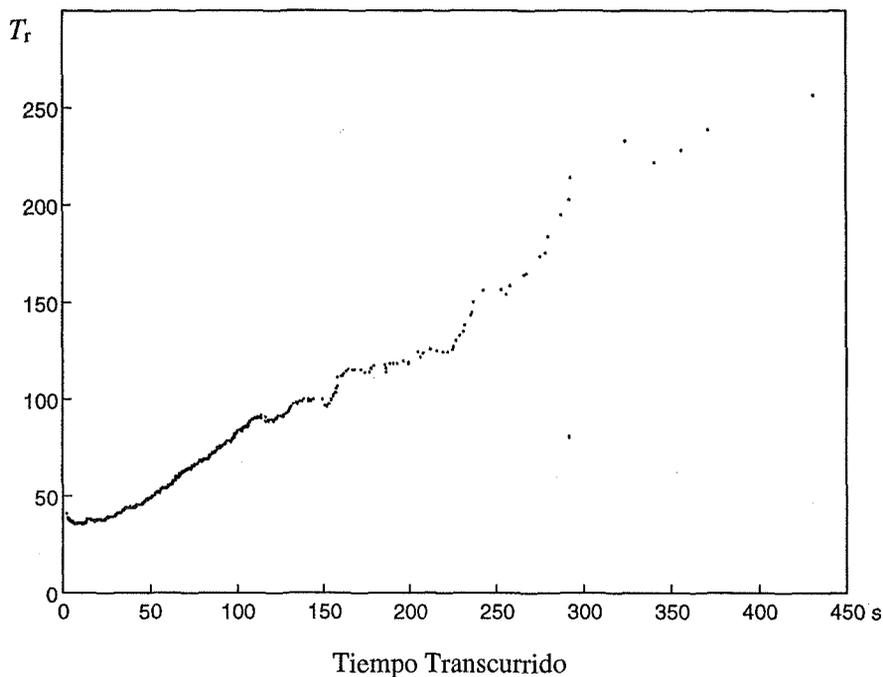


Figura 4.6 Tiempo medio remanente en segundos en función del tiempo transcurrido.

Los resultados de los ajustes probados se recogen en la tabla 4.3, observándose que el mejor ajuste se produce para la lognormal-3, obteniéndose una significancia del 10% a pesar de lo irregular de los datos. Puede observarse como la distribución hiperexponencial-2 proporciona un ajuste incluso peor que la exponencial. En la figura 4.7 se muestra el histograma de los datos junto al mejor ajuste, pudiéndose observar los picos que tiene dicho histograma en numerosos puntos. Estos picos son debidos a la histéresis que imponen los traspasos tal como explica [JED96], sin embargo el citado autor no explica como los filtra, y de hecho parece muy difícil filtrarlos sin incurrir en peligrosas ligerezas estadísticas. Así se ha optado por mantenerlos aun a costa de significancias menos espectaculares de las que se hubiesen obtenido de otro modo.

Momentos de la duración de ocupación del canal										
Media	40,6 s									
c^2	1,69									
Ajustes										
Exponencial	D	α	β							
	5,541	0,000	40,60							
HE-2	D	α	β_1	β_2	p					
	5,955	0,000	257,9	37,96	0,01					
Logonormal	D	α	μ		σ					
	1,554	0,016	3,287		0,891					
Logonormal-3	D	α	μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2	μ_3	σ_3
	1,230	0,097	3,327	1,043	0,527	3,554	0,502	0,339	2,439	0,286

Tabla 4.3 Momentos y ajustes realizados para la muestra de tiempos de ocupación del canal en telefonía móvil pública.

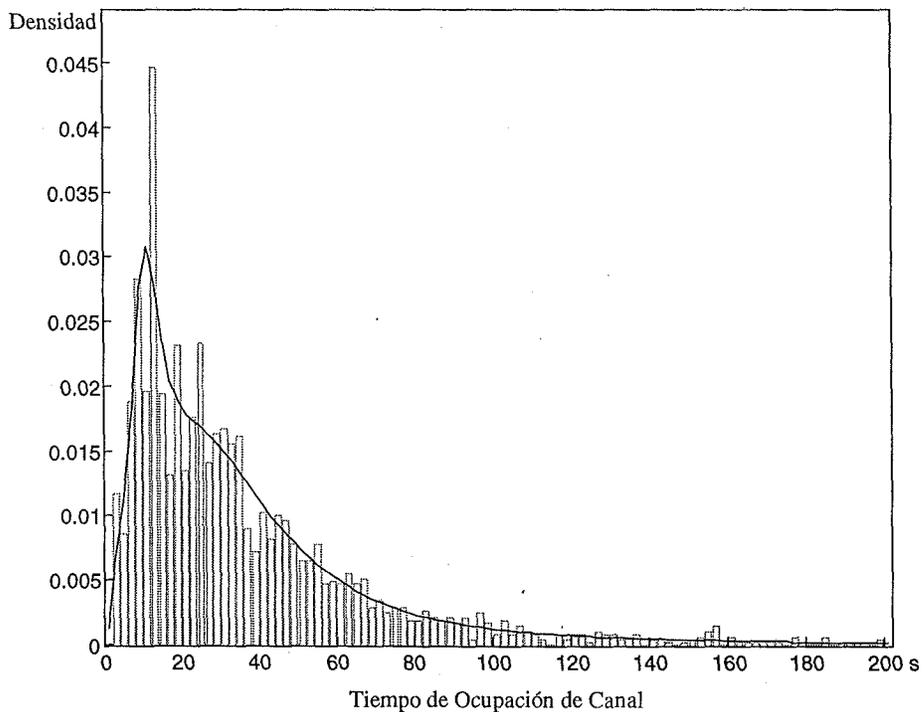


Figura 4.7 Histograma de los datos de ocupación del canal y distribución logonormal-3.

La coincidencia no deja de ser sumamente curiosa. Los autores que asumen distribución exponencial de la llamada obtienen mediante análisis o simulación una distribución exponencial de la ocupación del canal a pesar de los traspasos. Con medidas de campo obtenemos una lognormal-3 que coincide con la que ajusta [BOL94a, b] a la duración de la llamada sobre medidas de campo en telefonía fija. Esta distribución la obtenemos a pesar de que las ocupaciones de canal que sufren algún traspaso representan el 90% del total en nuestro estudio (ocupaciones que provienen de traspaso, que salen con traspaso o ambas cosas), es decir solo el 10% de las ocupaciones de canal son llamadas enteras que empiezan y finalizan en la misma celda. Por otra parte la duración media de ocupación del canal obtenida de tan solo 40,6 segundos, muy inferior a la duración media de una llamada, nos indica que el peso de los traspasos es efectivamente importante en el sistema medido.

El panorama expuesto podría inducir a la conclusión, pensamos que falaz, de que la ocupación del canal sigue la misma distribución que la duración de la llamada a pesar de los traspasos, pero con diferentes momentos: particularmente menor media debido a los traspasos. Más natural parece la hipótesis de que la mezcla de factores de muy distinta índole (movilidades particulares de los usuarios, propósitos de la llamada, tamaños de las celdas, etc.) conduce a distribuciones normales que son moduladas por la escala logarítmica que impone la percepción humana del tiempo. A pesar de todo, esta última no deja de ser una hipótesis entre otras muchas que puedan realizarse para interpretar este fenómeno.

La tasa de traspasos puede calcularse como la relación entre la duración media de la llamada y la duración media de la ocupación del canal. Este hecho intuitivo se demuestra en [NAN93]. Si consideramos que la duración media de la llamada es de 120 segundos tal como frecuentemente se asume en la literatura [GAV96] obtenemos una tasa de traspasos de $120/40,6=2,96$. Para una duración media de la llamada de 113 segundos [BOL94a] tendríamos una tasa de 1,78.

Tanto la duración media como las dispersiones obtenidas en este estudio son muy inferiores a las que se presentan en [JED96]. Las medias de tiempo de ocupación del canal que obtiene oscilan entre 53,22 y 72,18 segundos y los coeficientes de variación al cuadrado entre 2,93 y 4,15. Estos son datos de las distribuciones ajustadas ya que el autor no facilita los momentos de las series medidas. La menor duración media observada en este trabajo puede ser debida a una combinación de las tres siguientes razones: trabajamos con celdas más pequeñas, la movilidad es mayor, o bien la duración de la llamada es inferior. Esto último es posible principalmente por causa de la mayor sensibilidad al precio de nuestro entorno respecto a un mercado como el de Canadá, más acusado en servicios caros como la telefonía móvil. Más

difícil resulta encontrar argumentos sencillos que puedan justificar la menor dispersión (menor coeficiente de variación) de nuestro estudio, si bien debemos decir que nuestro resultado está más acorde con los resultados teóricos, analíticos y de simulación comentados en la sección 4.4 en los que se obtiene una distribución exponencial de la ocupación del canal con coeficiente de variación igual a uno..

4.6 Integración de servicios en redes móviles

En el caso de que una red de acceso móvil integre dos o más servicios con características diferentes de ocupación del canal, obtendremos que la distribución del tiempo de ocupación del canal es la combinación de las distribuciones individuales para cada tipo de servicio. Dado que la forma más habitual de modelar la duración de cada uno de los diferentes servicios mediante una exponencial negativa, el resultado será una hiperexponencial- k siendo k el número de servicios que se integran. Los pesos de ponderación de cada una de las exponenciales que integran la hiperexponencial- k serán proporcionales a las tasas de llegadas de cada uno de los servicios.

De este modo, la ocupación del canal en un sistema PAMR con posibilidad de interconexión a la RTP puede modelarse considerando la ocupación por cada servicio como una exponencial con distinta media (23 segundos típicamente para las llamadas de despacho [BAR97b] y 113 para las de interconexión [BOL94a]). El resultado es una hiperexponencial-2 en la que las proporciones coinciden con la proporción de cada una de las dos clases de llamadas. Si además existieran mensajes cortos con una duración media típica de algunas segundos, el modelo sería una hiperexponencial-3 con las proporciones adecuadas a las cantidades de cada tipo de llamada que se encuentran presentes en el sistema.

4.7 Acceso a nivel de ráfaga de voz

Una de las propuestas para la tercera generación de sistemas de telefonía móvil celular es la del acceso a nivel de ráfaga mediante el cual el usuario solamente está ocupando el canal durante el tiempo que dura la ráfaga de voz ("talkspurt") que produce. Las consideraciones que pueden realizarse sobre este modo de acceso son similares a las que pueden realizarse para el acceso a nivel de transmisión en sistemas PAMR, es decir, habrá una mejora de la eficiencia de los canales siempre y cuando no estemos ante unas necesidades de GoS muy superiores. Dado que las ráfagas ocupan alrededor de un 28% de la llamada, el máximo beneficio que podría obtenerse sería de

1/0,28 = 3,57 veces el número de canales vocales sobre el mismo número de radiocanales [BAR96b]. Los protocolos propuestos para implementar este modo de acceso son varios siendo el más difundido el PRMA [GOO90]. En algunos estudios de la capacidad de sistemas basados en este protocolo se exponen las razones por las cuales la mejora obtenida está siempre muy por debajo de la cota teórica. Así en [BAR96b] se obtienen mejoras de hasta 1,91.

La ITU-T recomienda un modelo de voz a nivel de ráfaga [ITU] basado en el modelo presentado en [LEE86a], en el cual tanto la duración de las ráfagas como de los intervalos de silencio entre ellas vienen descritos por dos distribuciones hipergeométricas (composición de dos variables aleatorias geométricas):

$$f_i(k) = C_1(1-U_1)U_1^{k-1} + C_2(1-U_2)U_2^{k-1}$$

$$f_s(k) = D_1(1-W_1)W_1^{k-1} + D_2(1-W_2)W_2^{k-1} \quad (4.1)$$

donde k representa el número de intervalos de longitud igual a 5 ms. En la tabla 4.4 se representan los valores facilitados por la ITU-T para las ecuaciones (4.1).

Ráfaga				Silencio			
C_1	0,6027	U_1	0,9244	D_1	0,7660	W_1	0,8970
C_2	0,3981	U_2	0,9891	D_2	0,3307	W_2	0,9979

Tabla 4.4 Valores de las ecuaciones (4.1).

Estas ecuaciones pasan a ser distribuciones hiperexponencial-2 sobre una base de tiempos continua. En tal caso y dado que la distribución de interés es la de la duración de la ráfaga (ocupación del canal) tendremos:

$$f_i(t) = D_1\mu_1 \exp(-\mu_1 t) + D_2\mu_2 \exp(-\mu_2 t) \quad (4.2)$$

donde los valores de los parámetros pueden obtenerse fácilmente de:

$$f_i(k) = \Pr\{(k-1)T < t < kT\} = \int_{(k-1)T}^{kT} f_i(t) dt \quad (4.3)$$

de donde:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= -\frac{\ln(U_1)}{T} = 15,723 \text{ segundos}^{-1} \\ \mu_2 &= -\frac{\ln(U_2)}{T} = 0,456 \text{ segundos}^{-1}\end{aligned}\tag{4.4}$$

Así la distribución sobre una base de tiempo continuo resulta en una duración media de la ráfaga de: $C_1/\mu_1 + C_2/\mu_2 = 0,22$ segundos. El cuadrado del coeficiente de variación para la duración de la ráfaga de voz es de 2,52. La figura 4.8 representa la distribución de las ecuaciones (4.1).

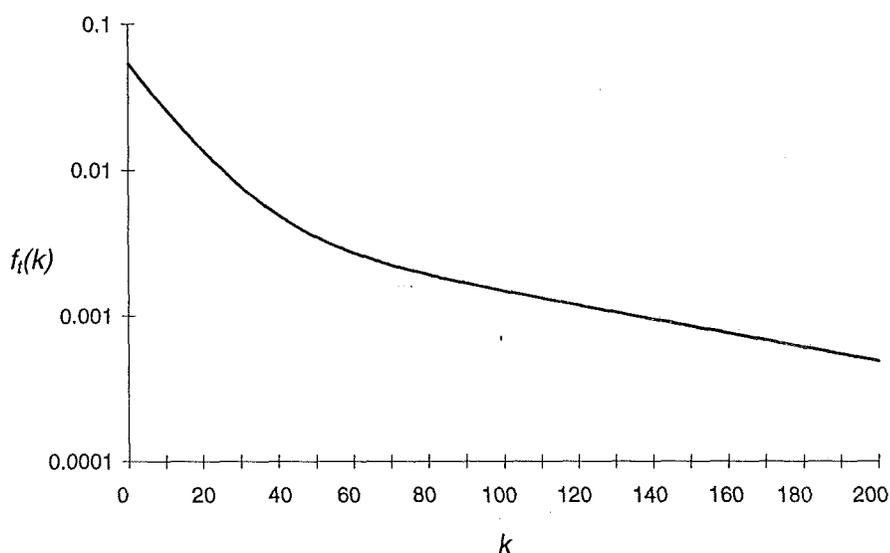


Figura 4.8 Función de densidad de probabilidad de la duración de la ráfaga de voz recomendada por la ITU-T.

Como complemento a lo expuesto, debemos citar que en [HAC83] los autores analizan el comportamiento de la voz a nivel de ráfaga en sistemas PMR, obteniendo coeficientes de variación al cuadrado de entre 2,7 y 3,1, algo superiores a los utilizados en el modelo descrito.

Todo lo expuesto hasta aquí es válido para la señal de voz “en crudo”, es decir sin procesar. Sin embargo el detector de actividad-silencio (DAS) requiere de un cierto tiempo para detectar la existencia de un nivel de señal. Por otra parte no es práctico utilizar la voz sin procesar mediante una cierta cantidad de “hangover” o “fill-in” que prolonga artificialmente las ráfagas y suprime los silencios más cortos. De este modo se simplifica la señalización al disminuir el número de ráfagas, pero se

incrementa de forma ficticia la actividad disminuyendo la ganancia de interpolación [BAR96a, b]. Estos procesos son tendentes a reducir el coeficiente de variación de la duración de las ráfagas, de modo que es frecuente la utilización de un modelo exponencial para la voz a nivel de ráfaga. Para ciertas duraciones del “hangover” este modelo exponencial produce resultados de evaluación muy similares a los que produciría el modelo propuesto por el ITU-T una vez añadido el proceso de “hangover”.