



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

**Evaluación del Impacto del Intercalado de Paquetes en Servicios de
Voz sobre Redes de Paquetes Propensas a Pérdidas en Ráfagas**

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Autor: Ing. Erisbel Orozco Crespo

Tutor: MSc. Carlos A. Rodríguez López

Santa Clara, Cuba, 2016



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

**Evaluación del Impacto del Intercalado de Paquetes en Servicios de
Voz sobre Redes de Paquetes Propensas a Pérdidas en Ráfagas**

Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática

Autor: Ing. Erisbel Orozco Crespo

Tutor: MSc. Carlos A. Rodríguez López

Santa Clara, Cuba, 2016

PENSAMIENTO

*Y viaja en el tiempo
todo el silencio
que los hombres dejaron
detrás de sí*

Santiago Feliú - Iván Latour

DEDICATORIA

A todo mi equipo.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos por su empeño, del cual depende este trabajo.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una evaluación del impacto que significa intercalar paquetes para enfrentar las pérdidas en ráfaga, enmarcado en un servicio de VoIP. El comportamiento de las pérdidas se emula siguiendo un modelo de Markov de 2 estados. En función de la secuencia de paquetes de voz emulada, se modela la utilización de: cinco intercaladores de diferente orden; no utilizar intercaladores, pero utilizar ocultamiento de pérdidas (PLC) y por último, utilizar intercaladores con PLC. Se analiza el impacto que tuvo cada uno de las alternativas citadas anteriormente, mediante una configuración del Modelo E que incluye la utilización del códec G722.2. Los mejores resultados en términos de R/MOS se obtienen casi siempre con el I-3x3. Cuando la pérdida de paquetes es de baja razón, por ejemplo 0.5%, el impacto del mejor de los intercaladores no mejora significativamente R . En un caso extremo con pérdidas del 6.0% el mejor intercalador es I-3x4. Aunque los resultados de este trabajo pueden interpretarse para un servicio de VoIP genérico, algunos parámetros utilizados se corresponden con un servicio de voz sobre LTE.

Lista de Acrónimos

ADSL	<i>Asynchronous Digital Subscriber Line</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat request</i>
CPN	<i>Cognitive</i>
D _{MTE}	<i>Mouth To Ear Delay</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
IQX	<i>Exponential Interdependency of QoE and QoS</i>
HO	<i>Handover</i>
HEVC	<i>High Efficiency Video Coding</i>
ITU-T	
LDGM	<i>Low-Density Generator-Matrix</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE-Advanced</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
PESQ	<i>Perceptual Evaluation of Speech Quality</i>
PLC	<i>Packet Loss Concealment</i>
POLQA	<i>Perceptual Objective Listener Quality Assessment</i>
PSQA	<i>Pseudo-Subjective Quality Assessment</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoR	<i>Quality of Resilience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RPT	<i>Redundant Packet Transmission</i>
SNR	<i>Signal to Noise Rate</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WFL	<i>Weber-Fechner Law</i>

Índice

Introducción	1
CAPÍTULO 1. CALIDAD DEL SERVICIO DE VOZ Y PÉRDIDA DE PAQUETES ...	6
1.1 QoE: enfoque hacia el usuario	6
1.1.1 QoE frente a la tradicional QoS	7
1.1.2 Modelos para la estimación de la QoE del servicio de voz	9
1.1.3 El Modelo E	12
1.2 Pérdida de paquetes	15
1.2.1. Pérdida de paquetes aleatorios y pérdidas en ráfagas	16
1.2.2. Consideraciones al respecto del Modelo de Markov de 2 estados	16
1.2.3. Mecanismos para enfrentar la pérdida de paquetes en ráfagas según la bibliografía consultada.....	17
1.2.4. Intercaladores	20
1.3. Consideraciones finales del capítulo	21
CAPÍTULO 2. MECANISMO DE INTERCALADO DE PAQUETES Y MODELO DE EVALUACIÓN	22
2.1 Concepción del arreglo del intercalado	22
2.2 Presentación del problema para la elección de los mejores esquemas de intercalado de paquetes	24
2.3 Diseño del mecanismo de selección y evaluación mediante el Modelo E	26
2.4 Consideraciones finales del capítulo	32
CAPÍTULO 3. REALIZACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	33
3.1 Realización del modelo de Gilbert-Elliott y relación con los parámetros del Modelo E.....	33

3.2	<i>Realización del intercalador y relación con los parámetros del Modelo E</i>	36
3.3	<i>Realización del Modelo E</i>	37
3.4	<i>Procedimiento de evaluación: juntar las piezas</i>	38
3.5	<i>Análisis de los resultados para $Eb = 3$</i>	39
3.6	<i>Análisis de los resultados para $Eb = 5$</i>	45
3.7	<i>Consideraciones finales del capítulo.</i>	49
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES.....	53
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

Introducción

El servicio telefónico por un período de más de 100 años estuvo soportado en tecnologías de conmutación de circuitos. El cambio de conmutación de circuitos a conmutación de paquetes trajo consigo desafíos a la comunicación telefónica de voz tradicional, ya que la voz debe ser llevada a paquetes, enviada a través de la red y luego desempacada en el extremo receptor. Esto introduce problemas que no existían antes, debido a que la naturaleza de las redes de paquetes puede afectar negativamente a los servicios isócronos, dentro de los cuales está la telefonía. Es por ello que para ofrecer un servicio de voz óptimo, equivalente al que los usuarios estaban habituados, se ha prestado especial atención a la calidad de voz ofrecida en las redes de paquetes, así como a los mecanismos con los cuales enfrentar la demora y pérdida de paquetes a lo largo de la red.

A pesar de que en publicaciones como [1, 2] se toma la pérdida de paquetes como eventos aleatorios, según [3, 4] en los sistemas reales las pérdidas siguen ciertas distribuciones de probabilidad, lo cual se manifiesta en la existencia de ráfagas de pérdida de paquetes. Desde el punto de vista de la calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*), las ráfagas de pérdidas tienen un mayor impacto en los servicios de voz, concretamente VoIP (*Voice over Internet Protocol*). En interés de representar sistemas reales, en este trabajo se utilizará un modelo de pérdidas que contempla la ocurrencia de ráfagas.

Para afrontar la pérdida de paquetes en ráfagas se han propuesto mecanismos dentro de los cuales está el intercalado de paquetes, que busca esparcir los paquetes perdidos consecutivamente, de tal forma que el impacto en la QoS de estos eventos sea menor. Sin embargo, al intercalar los paquetes se altera la secuencia con la que estos deben ser reproducidos, por lo que, tanto al intercalar como al reordenar en el otro extremo se introduce una demora adicional al sistema. Se mantiene entonces el problema de la demora, que es uno de los factores que pueden causar pérdidas de paquetes. Esto es así porque, desde el punto de vista de los búferes en los extremos, se adiciona un tiempo de almacenamiento correspondiente a la demora de intercalar los paquetes antes de transmitirlos; así mismo

sucede a la hora de reorganizarlos en el receptor. Entonces, resulta necesario conocer cómo el mecanismo de intercalado impacta en la calidad del servicio de voz.

Existen modelos para evaluación de la calidad del servicio, quizás el más usado es el llamado Modelo E, recogido en la recomendación de la ITU-T G.107 [5]. A partir de la revisión de [6, 7] se determinó la utilización del Modelo E para conocer como el mecanismo de intercalado impacta en la calidad del servicio de voz. Este modelo se emplea mucho debido a que es fácil de implementar, está muy bien documentado y estudiado; los resultados que se obtienen con su uso se corresponden en al menos un 80% con apreciaciones subjetivas del mismo problema y cuyo resultado solo se obtiene mediante el diseño de costosos experimentos [2].

En [4] se realiza un estudio sobre la influencia de las pérdidas de paquetes en ráfaga en la calidad de escucha de las conexiones de Voz sobre IP (VoIP). Se utiliza en este artículo el modelo de Markov de 2 estados para generar los patrones de pérdidas. Se comparan los resultados de los modelos de evaluación de la calidad del servicio VoIP: PESQ, POLQA, Modelo E y un experimento subjetivo con análisis de varianza. Sin embargo no está dentro los objetivos de este trabajo estudiar formas de enfrentar las ráfagas de pérdidas.

Por otro lado, en [3] se estudia el impacto de intercalar paquetes en una WAN (*Wide Area Network*) emulada, buscando resultados que aclaren la importancia de que eliminar la correlación entre los paquetes perdidos. No obstante, en este trabajo no se analiza el impacto directo en un servicio VoIP, sino que los autores especifican que lograr los resultados esperados en servicios reales no es una tarea fácil.

De lo anteriormente expuesto se desprende la situación del problema del presente trabajo:

¿Cuál será el impacto del intercalado de paquetes sobre la calidad del servicio de voz, entregado en redes inalámbricas propensas a pérdidas de ráfagas?

Para indagar en la situación del problema presentado, a continuación se realizan las siguientes interrogantes científicas.

- ¿Cómo modelar un escenario de VoIP con pérdidas en ráfagas?
- ¿Cómo los diferentes intercaladores para determinar o no su factibilidad como solución ante las pérdidas en ráfaga?

- ¿Cómo implementar un mecanismo de evaluación para determinar el impacto que tiene en la experiencia de la calidad el intercalado de paquetes frente a pérdidas en ráfagas?
- ¿Cuáles intercaladores son más apropiados y en cuáles casos?

Para responder estas y otras interrogantes se plantea el siguiente objetivo general:

Evaluar mediante el empleo del Modelo E el impacto del intercalado de paquetes en la calidad del servicio de voz, percibida por los usuarios en canales propensos a la pérdida de paquetes en ráfagas.

Como objetivos específicos se plantearon:

1. Caracterizar modelos estandarizados que permitan evaluar la percepción de la calidad del servicio de voz en redes de conmutación de paquetes, así como soluciones antecedentes orientadas a combatir la pérdida de paquetes en los servicios de voz.
2. Modelar analíticamente la distribución de correlación de errores obtenidos antes y después de ser aplicado el proceso de intercalado, con y sin ocultamiento de pérdidas aisladas de paquetes.
3. Evaluar el desempeño de los intercaladores propuestos en función de indicadores típicos de calidad en aplicaciones de voz, de manera que se obtengan los mejores candidatos en caso de que su uso impacte positivamente en la percepción de la calidad.

Para cumplir con estos objetivos trazados y en virtud a las interrogantes de la formulación del problema científico, se definieron las siguientes tareas. En primer lugar, modelar la comunicación de voz y fenómenos de pérdidas como objeto de estudio, para lo cual habrá que atender a la probabilidad de pérdida de paquetes y al tamaño promedio de las ráfagas. En segundo lugar deberá modelarse el mecanismo de intercalación, de manera que se pueda comparar el resultado de intercalar con la secuencia de paquetes original. Por último, deberá utilizarse el modelo E para evaluar el impacto que tiene intercalar en la secuencia de paquetes con pérdidas en ráfaga.

En cuanto a los métodos científicos, los del nivel teórico de análisis-síntesis e inductivo-deductivo facilitaron la construcción del marco teórico conceptual, el procesamiento de la información empírica, la valoración del estado en que se encuentra el tratamiento del fenómeno de la pérdida de paquetes y los mecanismos estandarizados para estimar la calidad o experiencia

de la calidad en un servicio de VoIP. Entre los métodos empíricos, el experimento científico y la simulación son usados para evaluar el impacto que tiene en la experiencia de la calidad del servicio de voz, el generar diversidad temporal en la secuencia de paquetes.

Este trabajo puede encontrar aplicación en tecnologías móviles emergentes, conocidas como de Cuarta Generación o 4G, que significan un avance importante con respecto a las redes anteriores en cuanto a velocidad de conexión y de razón efectiva de transferencia de datos. Estas tecnologías dan respuesta a la necesidad de contar con un soporte para aplicaciones tales como el video en línea, videoconferencia o video-llamada en tiempo real, la navegación web, así como la descarga de ficheros de gran tamaño; cuestiones que venían popularizándose entre los usuarios de la telefonía móvil. Para ello las redes 4G, materializadas en LTE/LTE-A (*Long Term Evolution/LTE-Advanced*), abandonaron completamente la conmutación de circuitos aún usada en las redes precedentes. En su lugar adquirieron una estructura basada totalmente en la conmutación de paquetes, facilitando además la integración de la telefonía móvil con el mundo IP y el Internet. Este trabajo puede ser importante además para cualquier estudio sobre calidad de servicio aplicado a VoIP.

El informe del trabajo está estructurado de la siguiente forma: Introducción, Capítulo 1, Capítulo 2, Capítulo 3, Conclusiones, Recomendaciones y Referencias Bibliográficas.

Capítulo 1: Calidad del servicio de voz y pérdida de paquetes.

En este capítulo se presenta el enfoque de calidad de servicio tal y como se maneja en la bibliografía consultada. Se resalta la experiencia de la calidad como una forma actual de tratar la percepción del grado de satisfacción por parte del usuario, que es el objetivo de generar un servicio. Además se revisa el tema de los modelos de evaluación estándares, con sus virtudes y sus aspectos negativos; desde el punto de vista de la bibliografía consultada. Por último se aborda el fenómeno de la pérdida de paquetes y de los mecanismos para enfrentarlo, que forma parte del núcleo de este trabajo.

Capítulo 2: Mecanismo de intercalado de paquetes y modelo de evaluación.

En esta segunda sección se profundiza en el funcionamiento del intercalado de paquetes, como mecanismo de diversidad temporal que puede enfrentar la pérdida en ráfaga. Se explican los tipos de intercaladores y su impacto en la demora total del sistema. El otro

contenido fundamental de esta sección es la discusión sobre la elección de los parámetros a utilizar en el Modelo E para este trabajo.

Capítulo 3: Realización de los modelos y análisis de los resultados.

En el tercer capítulo se presenta la forma en la que se realizaron los modelos en Matlab: el que modela la secuencia de paquetes, el del mecanismo de intercalado y el Modelo E. Por último se analizan los resultados obtenidos al respecto de utilizar los intercaladores ante las distintas condiciones de probabilidad de pérdidas y tamaño de ráfagas.

CAPÍTULO 1. CALIDAD DEL SERVICIO DE VOZ Y PÉRDIDA DE PAQUETES

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica acerca de la Calidad de Experiencia (*Quality of Experience*, QoE) relacionada al servicio de voz. Se exponen los modelos que posibilitan estimar la QoE, con énfasis en el popular modelo E. También se analiza el problema de la pérdida de paquetes para aplicaciones de voz en redes basadas en la conmutación de paquetes y se exponen los mecanismos propuestos por las fuentes bibliográficas para enfrentarlo.

1.1 QoE: enfoque hacia el usuario

De acuerdo con [6], la Calidad de Experiencia es un concepto amplio que comprende factores de diferentes dominios y disciplinas. Estos factores se pueden agrupar en tres grandes pilares, llamados: sistema (que en este caso es la **red**), **humano** y **contexto**; que tomados en conjunto abarcan completamente la QoE.

El pilar **red** consiste de cualquier parámetro que afecte la calidad de extremo-a-extremo (*end-to-end*), tal y como es descrito por la Calidad de Servicio (*Quality of Service*, QoS), el Grado de Servicio (*Grade of Service*, GoS) y la Calidad de Resiliencia (*Quality of Resilience*, QoR). Comprende las características técnicas de la red en cuestión, las especificaciones del equipamiento, las características de las aplicaciones, etc. Este pilar está fuertemente conectado con los factores específicos de la red, que son particularmente importantes y decisivos para el operador [6].

En el pilar **humano** se halla un subconjunto de cuatro categorías, donde cada una contiene un área científica que afecta la impresión general de calidad que tiene el usuario. Inicialmente, el área Psicofísica cuantifica la relación entre un estímulo físico (por ejemplo, un sonido o una imagen) y la percepción resultante del sistema sensorial humano. Luego, la Ciencia Cognitiva estudia la mente humana y cómo trabaja en términos de interpretación,

razonamiento, juicio, procesamiento de información, entre otros criterios. La Psicología y la Sociología ayudan a entender el carácter humano y el comportamiento como unidad y como parte de la sociedad, que afecta unívocamente la concepción de calidad que tiene el usuario. Finalmente, la Teoría de Decisión estudia la racionalidad y optimización en la toma de decisiones [6].

Por último, el pilar **contexto** incluye cualquier tipo de información circundante que consciente o inconscientemente afecta el juicio del usuario. Por ejemplo, la QoE es influenciada por el ambiente espacio-temporal donde es brindado el servicio, el equipo usado, el servicio y tipo de contenido multimedia, el contenido mismo del servicio, así como otras informaciones contextuales relacionadas con aspectos financieros o de negocios [6].

Es necesario tener en cuenta que históricamente en las redes de telecomunicaciones, debido al despliegue de los mecanismos de QoS, la QoE ha sido relegada a una posición secundaria. Hasta ahora ninguna generación de redes de telecomunicaciones ha sido diseñada originalmente con los principios de QoE. Sin embargo, el enfoque «hacia el sistema» del aprovisionamiento de QoS ya no es suficiente y necesita ser reemplazado o complementado con un acercamiento más enfocado «hacia el usuario». Así, el cambio de redes centradas en QoS hacia redes que apunten a la QoE es un desafío emergente y abierto [6].

1.1.1 QoE frente a la tradicional QoS

Actualmente, la única oportunidad que los proveedores de redes tienen de evaluar la QoE ofrecida de sus productos o servicios se encuentra en la etapa de diseño, o sea, antes de la operación en tiempo real. Esto puede ser logrado mediante la compra de equipos especiales de otras compañías, capaces de realizar mediciones de calidad de voz/audio/visual a través de la simulación de la percepción humana. Los operadores pueden usar tales conjuntos de mediciones de calidad para probar el rendimiento de nuevos servicios/dispositivos y así acelerar su salida al mercado. Esto, sin embargo, es el único curso de acción actualmente factible; pero con los nuevos esquemas de QoE propuestos se abren posibilidades para el monitoreo en tiempo real de la calidad y una administración de la QoE más inteligente que toma en cuenta las condiciones actuales de las comunicaciones y los clientes del proveedor [6].

La primera posibilidad brindada es la grabación y el monitoreo de estimaciones en tiempo real de la calidad por sesión. Adquirir información acerca de QoE puede ayudar al operador a comprender y manejar mejor las experiencias generales de los clientes durante un largo tiempo, aumentando con ello su nivel de lealtad. Los operadores también pueden beneficiarse mediante el ofrecimiento de servicios especializados basados en análisis del perfil de los usuarios. Aún más, de la creación de nuevos modelos de negocios basados en la QoE surge la oportunidad de beneficios tanto para el usuario (por ejemplo, a través del recibo de calidad diferenciada según su demanda) como para el proveedor (aplicando tarifas correspondientes a dichos compromisos) [6].

Otra posibilidad es la de mejorar la QoE de un flujo deseado, o maximizar la suma/media de la QoE de ciertos usuarios. Una mejora en la calidad puede ser requerida proactiva o reactivamente. En el primer caso se requiere la predicción de errores de la red por medio de alarmas basadas en la QoE, mientras que el segundo caso significa reaccionar a problemas que ya se encuentran presentes. Potencialmente, cualquier medida de control de red (tal como el control de admisión y la prioridad de flujo) puede ser implementada, de acuerdo a las políticas y restricciones de la red. Además se pueden mantener seguimientos de la efectividad de esas decisiones y por tanto, ser capaz de adaptar y optimizar los métodos utilizados para resolver problemas de calidad [6].

Finalmente, emerge la posibilidad de explotar el conocimiento de la QoE como vía para salvar potencialmente en recursos de red sin comprometer la experiencia del usuario. Esto puede ser posible ya sea identificando momentos y casos de operación en donde brindar recursos extras a un usuario final no mejore su QoE percibida, o mediante la explotación de la relación no lineal entre QoS y QoE [8-10]. Esta relación no lineal entre QoS y QoE generó análisis cuantitativos como los de la hipótesis IQX (*Exponential Interdependency of QoE and QoS*) y la ley WFL (*Weber-Fechner Law*) [11, 12]; la primera afirma la existencia de una dependencia exponencial negativa entre los valores de QoE percibidos y los parámetros de QoS degradados, mientras que la segunda describe el impacto logarítmico que tiene el estímulo físico sobre la percepción humana [6].

1.1.2 Modelos para la estimación de la QoE del servicio de voz

Los modelos de QoE imitan el proceso humano que ocurre dentro de un contexto específico en un momento dado, para unas características determinadas de la red. Un modelo de QoE puede ser definido formalmente como un procedimiento que apunta a modelar la relación entre diferentes factores influyentes en la QoE y las dimensiones cuantificables de QoE para un escenario de servicio dado [13].

Según [6], los modelos de QoE son generalmente clasificados según su método de evaluación en:

- Modelos de la capa de media: Hacen uso de las señales transmitidas y/o recibidas. Se basan en la necesidad o no de que la señal original de la fuente sea usada como entrada. Posteriormente fueron caracterizados como referencia total (*full-reference*), referencia reducida o parcial (*reduced-reference*) o sin referencia (*no-reference*).
- Modelos de la capa de paquetes: Extraen la información de las cabeceras de los paquetes, mientras que los modelos de flujo de bits (*bitstream models*) usan la información tanto de las cabeceras como de la carga útil.
- Modelos paramétricos: Utilizan parámetros y métricas de planeación de red específicos, así como parámetros del diseño de terminales.
- Modelos de mapeo de QoS a QoE: Están basados en la dependencia no lineal entre los parámetros de QoS y los valores de QoE.

Entre los modelos de la capa de media se encuentra el ITU-T P.862 o PESQ (*Perceptual Evaluation of Speech Quality*) que compara la señal de referencia original con la señal degradada de salida, por lo que es considerado un modelo de referencia total. Este toma como entradas la señal de voz degradada de salida, la señal de voz original, además de modelos perceptuales y cognitivos que son requeridos para procesar estas dos señales. Es utilizado para el monitoreo, pruebas en tiempo real de redes prototipos o simuladas, evaluación y selección de códecs y como indicador de calidad. En su aplicación para redes móviles celulares se presentan como desventajas que la señal de referencia no está rápidamente disponible en tiempo real, lo que lo hace imposible de usar para el monitoreo en tiempo real de redes; además de que es computacionalmente pesado, levanta cuestiones polémicas de

privacidad y trata la red como una caja negra. Por otro lado, ofrece como ventaja que puede ser usado para el dimensionamiento y la planificación de redes [6].

Otro de los modelos de la capa de media es el ITU-T P.563. Este requiere una etapa de pre-procesamiento, una etapa de estimación de distorsión y un estado subsecuente de mapeo perceptual. Como entradas toma la señal de voz de salida y varios tipos de parámetros de señal calculados, tales como los descriptores básicos de voz, el análisis del tracto vocal, estadísticas de voz, relación señal a ruido (*Signal to Noise Rate*, SNR) estática y segmentada, así como las interrupciones y silencios. Es utilizado para la asistencia no intrusiva de calidad de voz, monitoreo de redes en tiempo real y pruebas con fuentes de voz desconocidas en el extremo receptor. Este modelo tiene como desventajas que puede no ser muy exacto cuando parte de la señal de salida se pierde debido a errores de la red, además de que solo sirve para la evaluación de la calidad de voz. Como ventajas ofrece un monitoreo de calidad factible de extremo a extremo y que su uso no está necesariamente restringido a aplicaciones de banda estrecha [6].

Por otra parte, el modelo paramétrico ITU-T G.107, conocido también como Modelo E, brinda una fórmula computacional bien definida con parámetros específicos de entrada. Dichas entradas son parámetros de calidad obtenidos desde varios equipos de la red y terminales (por ejemplo, la SNR, demora, códec, eco, ruido, pérdida de paquetes, entre otros), así como un factor de compensación o *advantage factor*. Este modelo tiene como propósito la evaluación del rendimiento, planificación y diseño de la red, con lo que ayuda a evitar el fenómeno de sobre-dimensionamiento o sub-dimensionamiento de la red. Tiene como desventajas que, en su formato original, el modelo no tiene dentro de su alcance la evaluación de la red en tiempo de servicio; requiere de señalización extra para recolectar y transportar los parámetros de entrada hasta el punto de evaluación de la QoE; además de que solo es exacto para escenarios específicos recomendados. No obstante, este modelo ofrece importantes ventajas como la posibilidad de ser simplificado hasta una métrica de nivel de transporte para un monitoreo simple en tiempo real de la red, así como la sencillez de implementación de las fórmulas de un modelo analítico. Para servicios de VoIP, el Modelo E es comúnmente utilizado, debido principalmente a su importante característica de brindar distintas fórmulas para cuantificar el impacto de la demora de paquetes y la tasa de pérdidas en la QoE [6].

Para la estimación de la QoE también existe el modelo híbrido conocido como PSQA (*Pseudo-Subjective Quality Assessment*) ampliamente tratado en [14-16]. PSQA utiliza herramientas de análisis estadísticos. Como entrada recibe parámetros de la red y del equipo del usuario, tales como el códec, factor de corrección de error, desfasaje, tasa de pérdida de paquetes, tamaño promedio de pérdidas en ráfagas, intervalo de conformación de los paquetes y tramas, demora en un sentido, variación de la demora, etc. Su finalidad es optimizar dinámicamente la calidad a través de la comprensión de la relación entre los parámetros que afectan la calidad y la QoE percibida. Como desventaja se observa que su utilización para aplicaciones en tiempo real es ambigua debido a la intervención humana en las pruebas y validaciones, además de que su presencia provoca un incremento en la complejidad de la red. Como ventaja ofrece la posibilidad de capturar la influencia de los factores humano, de contexto y técnicos [6].

Como modelos de mapeo de QoS a QoE se encuentran IQX y WQL. La hipótesis IQX traslada el nivel de red genérico de QoS a QoE mediante una dependencia exponencial, mientras que la ley WQL describe el efecto de los estímulos físicos en la percepción humana basado en el conocimiento psicofísico, lo cual muestra una dependencia logarítmica. Ambas toman como entradas cualquier parámetro degradado de QoS, uno por función de mapeo, por ejemplo, la tasa de pérdida de paquetes, el tiempo de establecimiento de una conexión inalámbrica, el tiempo de espera y de respuesta, etc. Estos modelos se pueden emplear para el monitoreo de QoE y el control proactivo de la QoE y ya han sido considerados para la evaluación del rendimiento de aplicaciones de video con demandas de calidad como YouTube. Sin embargo, presentan como inconvenientes que la función de mapeo debe ser estimada de antemano y validada regularmente; así como la dependencia de ambos de la disponibilidad de los parámetros de QoS, del nivel de red para la IQX y del nivel de aplicación para la WQL. Por otro lado, brindan ventajas como la implementación de mecanismos de control de QoE en tiempo real basados en el monitoreo de la QoS y la distribución más eficiente de los recursos de control, ubicando dichos recursos donde los usuarios realmente apreciarán la diferencia [6].

En general, el uso de modelos de capa media no está recomendado para la estimación de calidad en redes móviles celulares debido a la complejidad o incluso la imposibilidad de establecerlos. Por el contrario, los modelos paramétricos o de capa de paquetes permiten la

adquisición de información ya disponible a través de varios nodos de la red. Sin embargo, los modelos de capa de paquetes no se encuentran aún bien estandarizados y la recolección y explotación de la información de las cabeceras de paquetes requiere una gran dosis de trabajo original. Así, actualmente, los modelos paramétricos parecen ser los candidatos perfectos para la administración en tiempo real de la QoE. Además, ellos provocan menos carga por uso de cabeceras (*overhead*) y son capaces de monitorizar las sesiones de comunicación a través de infraestructuras heterogéneas de transporte, lo cual es ideal para los ambientes móviles modernos [6].

Por otra parte, los modelos *Full-reference* (FR) son comúnmente usados para el monitoreo activo de la red. Actualmente, dos modelos FR estandarizados se encuentran en uso. El más antiguo, PESQ, es aun ampliamente usado, aunque el más nuevo, el modelo POLQA [17-19], se encuentra disponible desde el 2011. La mayor desventaja de los modelos FR es que necesitan de la asignación de un canal para una prueba, mientras el algoritmo compara el nivel de señal de voz original con el transmitido. Este acercamiento, sin embargo, brinda resultados más confiables que los obtenidos de modelos alternativos que no dependen de una señal de referencia, o sea, de los modelos paramétricos, tal como el Modelo E. No obstante, todos los modelos paramétricos poseen como ventaja sobre los FR que no son intrusivos, por lo que pueden ser empleados también para el monitoreo pasivo. Esto significa que, al no ser requerido un acceso a la señal de voz original de referencia, el monitoreo de la calidad puede ser realizado en llamadas en curso sin ninguna interrupción [4].

1.1.3 El Modelo E

La Recomendación ITU-G.107 define el estándar para el llamado Modelo E, mencionado anteriormente. Este modelo computacional puede ser útil a los planificadores de transmisión, para ayudar a asegurar que los usuarios estén satisfechos con el rendimiento de la transmisión de extremo a extremo. La salida primaria del modelo es una escala de evaluación de la calidad de la transmisión. Además, una característica importante de este modelo es el uso de factores de deterioro de la transmisión que reflejan el efecto de los modernos dispositivos de procesamiento de señales [5].

El Modelo E ha probado ser útil como una herramienta para evaluar los efectos combinados de las variaciones de parámetros de transmisión que afectan la calidad de una conversación

en un canal telefónico de 3.1 KHz. Aunque la salida primaria de este modelo es el factor de evaluación R , este puede ser transformado para dar estimaciones de la Calificación Media de Opinión (*Mean Opinion Score*, MOS). Tales estimaciones son hechas solo para propósitos de planificación y no para la predicción real de la opinión del cliente [5].

El resultado de cualquier cálculo con el Modelo E en un primer paso es el factor de evaluación R , que combina todos los parámetros de transmisión relevantes para la conexión considerada. La ecuación del factor R es según (1.1) [5]:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A \quad (1.1)$$

Donde R_0 representa la relación básica de señal a ruido, incluyendo las fuentes de ruido tales como el ruido del circuito y el ruido de la habitación. Por su parte el factor I_s es una combinación de todas las degradaciones que ocurren más o menos simultáneamente con la señal de voz. El factor I_d representa las degradaciones causadas por la demora. El factor de deterioro efectivo del equipamiento I_{e-eff} representa las degradaciones causadas por la baja tasa de bits de los códecs, además incluye deterioros debido a pérdidas de paquetes distribuidas aleatoriamente. El factor de ventaja (*advantage factor*) A permite la compensación de los factores de deterioro cuando el usuario se beneficia de otros tipos de acceso. El término R_0 y los valores I_s e I_d son subdivididos en otros valores de deterioros específicos [5].

El factor de evaluación R puede estar dentro del rango de 0 a 100, donde $R = 0$ representa una calidad extremadamente mal y $R = 100$ representa una calidad muy alta. El Modelo E puede proveer una estimación estadística de mediciones de calidad si es usado y registrado sistemáticamente.

Un estimado del MOS_{CQE} para una situación conversacional en la escala del 1 al 5 puede ser obtenido del factor R utilizando las ecuaciones (1.2), (1.3) y (1.4) [5]:

$$\text{Para } R < 0: \quad MOS_{CQE} = 1 \quad (1.2)$$

$$\text{Para } 0 < R < 100: \quad MOS_{CQE} = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)7 * 10^{-6} \quad (1.3)$$

$$\text{Para } R > 100: \quad MOS_{CQE} = 4.5 \quad (1.4)$$

Una guía para la interpretación del factor R calculado con propósitos de planificación se ofrece a continuación en la Tabla 1-1. Esta tabla también muestra los valores equivalentes de MOS_{CQE} estimados para la conversación.

Valor de R (límite inferior)	MOS_{CQE} (límite inferior)	Satisfacción del usuario
90	4.34	Muy satisfecho
80	4.03	Satisfecho
70	3.60	Algunos usuarios insatisfechos
60	3.10	Muchos usuarios insatisfechos
50	2.58	Casi todos los usuarios insatisfechos

Tabla 1.1 Interpretación del factor de evaluación R y conversión del mismo a la escala MOS [5].

Es importante tener en cuenta que el Modelo E supone que diferentes tipos de degradaciones son aditivas en la escala del factor de evaluación R . Esta característica sin embargo no ha sido verificada hasta un nivel satisfactorio. Especialmente, muy pocas investigaciones tratan la interacción de códecs de baja tasa de bits con otros tipos de degradaciones, por ejemplo, con el ruido en la habitación [5].

Además, hasta ahora no ha sido aclarado bajo qué condiciones los valores dados para el factor de ventaja A deben ser aplicados. Se espera que estos valores dependan, por ejemplo, del grupo del usuario; también es de esperar que los valores absolutos cambien con el tiempo [5].

Con la presente versión del algoritmo, las distribuciones de pérdidas caracterizadas por dependencias de pérdidas medias (de corto plazo, opuestas a las dependencias de pérdidas de largo plazo) han sido integradas en el Modelo E. Hasta el momento, el acercamiento incluido ha sido evaluado solo para el códec ITU-T G.729(A), pero se asume que sea aplicable también al códec ITU-T G.723.1 y supuestamente a otros códecs [5].

Cabe mencionar que el principio del factor de evaluación propuesto por el Modelo E ha sido exitosamente empleado para describir la calidad de transmisiones de voz en banda estrecha (*narrowband* o NB) durante el planeamiento de una red. De acuerdo con este principio, es posible transformar todas las degradaciones relevantes a una “escala de evaluación de la

transmisión” (*transmission rating scale* o *R-scale*) que representa la calidad general en una comunicación bidireccional, tomando en cuenta el canal completo de boca-a-oido y viceversa; teniéndose que para el caso de banda estrecha, el rango de dicha escala varía desde $R = 0$ hasta $R = 100$. En esta escala, cada “factor de deterioro” representa la degradación resultante de una característica específica de la señal, tal como la atenuación, ruido, demora, eco o distorsión de codificación. La calidad general de la conexión también puede ser calculada substrayendo los respectivos factores de deterioro del valor óptimo. Así, se asume que los factores de deterioro son aditivos en la escala de evaluación de la transmisión [20].

El Modelo E es actualmente el modelo paramétrico más popular para la evaluación de la calidad de voz, que fue desarrollado como una herramienta para la planificación de redes y que su uso para el monitoreo no es recomendado. Además, la Calificación de Opinión Media producida por el Modelo E es típicamente inferior a la calidad juzgada en pruebas reales. De este modo, como el modelo fue creado para la planificación de la red, donde el diseñador se propone evitar los peores casos de MOS, es apropiado para esta aplicación. Sin embargo, en un contexto de monitoreo, son deseables MOS más realistas [4]. Investigaciones detalladas concluyeron que el factor de correlación entre el resultado del Modelo E y pruebas subjetivas realizadas con humanos sobre el mismo experimento, es 0.8 [2, 21]. Este coeficiente de correlación alto muestra la efectividad del algoritmo cuando se especifican las condiciones más justas para el experimento.

1.2 Pérdida de paquetes

La pérdida de paquetes es uno de los factores más influyentes sobre la calidad de voz en conversaciones VoIP. Ha sido estudiado desde el surgimiento de la telefonía VoIP, típicamente considerando la pérdida de paquetes aleatorios el cual es, sin embargo, de una ocurrencia relativamente baja en redes IP. Ha sido demostrado que el impacto en la calidad de voz depende de la distribución de la pérdida de paquetes [4]. De esta manera la pérdida de paquetes, especialmente cuando ocurre en ráfagas, degrada el rendimiento de las aplicaciones basadas en IP, afectando la calidad percibida por el usuario, o sea, la QoE [3].

Además, la degradación percibida introducida por la pérdida de paquetes depende del porcentaje de paquetes perdidos, su distribución aleatoria o en ráfagas, el número de tramas codificadas incluidas en un paquete, el tipo de códec de audio usado en la conexión, así como

del uso o no de estrategias para la corrección de errores o de Ocultación de Paquetes Perdidos (*Packet Loss Concealment* o PLC) [20].

1.2.1. Pérdida de paquetes aleatorios y pérdidas en ráfagas

Para una aplicación como VoIP, es conveniente conocer la distribución típica o el patrón de las pérdidas de paquetes en la red a través de la cual corre dicha aplicación. En este sentido, en [3] se expone que las pérdidas de paquetes en Internet no son aisladas, sino que ocurren en ráfagas. El problema radica entonces en que el rendimiento de las aplicaciones recibe un mayor impacto por las pérdidas en ráfagas que cuando ocurren igual número de estas, pero de forma aislada. La literatura científica ha demostrado que muchas aplicaciones sufren debido a las pérdidas en ráfagas y por tanto logran un mejor rendimiento si las pérdidas no están correlacionadas [3].

De acuerdo con [4], bajo condiciones de pérdidas en ráfagas donde el número medio de paquetes perdidos consecutivamente es igual a cinco, el daño en el flujo VoIP es tan severo que ni el códec G.711 ni el G.722 con técnicas de PLC son capaces de reconstruir los períodos de habla perdidos. Además, cuando se aplica PLC, la calidad de voz percibida tiende a ser mayor para el caso de pérdidas aleatorias, que cuando varios paquetes se pierden uno detrás del otro.

1.2.2. Consideraciones al respecto del Modelo de Markov de 2 estados

Para generar los patrones de pérdida de paquetes en ráfaga a utilizar en las simulaciones, [4] coinciden con otros autores en recomendar la utilización del Modelo de Markov de 2 estados o modelo Gilbert-Elliot. Un gráfico de estados de dicho modelo se muestra a continuación en la Figura 1.1.

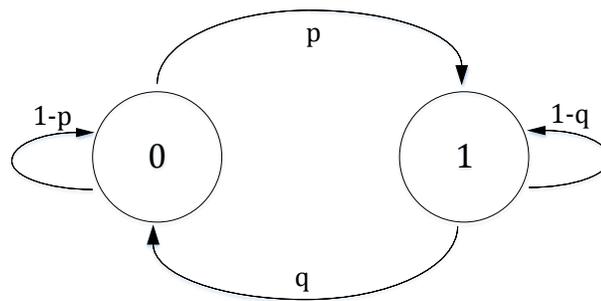


Figura 1.1 Modelo de pérdidas de 2 estados de Markov (2-MC), o de Gilbert-Elliot. Elaborado a partir de [4], cuya figura presenta un pequeño error en las transiciones.

En el estado 1 un paquete se pierde, mientras que en el estado 0 no ocurren pérdidas. Este modelo es descrito por tan solo dos parámetros: p (probabilidad de transición del estado 0 al 1) y q (probabilidad de transición del estado 1 al 0). Algunos parámetros indicadores del impacto de la pérdida de paquetes en la calidad de voz son $\mu_{10} = 1/q$ (el número medio de paquetes perdidos consecutivamente) y $p_c = 1 - q$ (la probabilidad condicional de perder el paquete siguiente dado que se perdió el paquete anterior). Para cuantificar las pérdidas de paquetes en ráfagas cortas con respecto a las pérdidas aleatorias se introduce el factor *BurstR* (*Burst ratio* o Razón de ráfaga) cuya expresión es la mostrada en (1.5) [4]:

$$BurstR = (1 - p_l)/(1 - p_c) \quad (1.5)$$

Donde p_l indica la tasa de pérdida de paquetes. El factor *BurstR* también puede ser interpretado como la relación del número medio de paquetes perdidos consecutivamente con respecto al número medio de paquetes perdidos consecutivamente para una distribución aleatoria de pérdidas. Como resultado, en el Modelo de Markov analizado, cuando $BurstR > 1$, significa que la distribución de pérdidas es en ráfagas. Para $BurstR = 1$, la distribución es aleatoria, o sea, uniforme. Por último, cuando $BurstR < 1$ las pérdidas son espaciadas [4].

El modelo de pérdidas basado en el Modelo de Markov de 2 estados ha mostrado ser capaz de capturar la correlación potencial entre pérdidas consecutivas tanto para ambientes inalámbricos como para Internet. Cabe mencionar que el Modelo de Markov de 2 estados no es el único o el más justo para las pérdidas de paquetes. De hecho, se ha demostrado que Cadenas de Markov con más estados son capaces de obtener una mayor precisión en algunos casos. Sin embargo, con 2 estados se obtiene el mejor compromiso entre complejidad y exactitud [3].

1.2.3. Mecanismos para enfrentar la pérdida de paquetes en ráfagas según la bibliografía consultada

Diferentes técnicas han sido propuestas para resolver el problema de las pérdidas de paquetes en ráfagas, las cuales en su mayoría están basadas en mecanismos FEC (*Forward Error Correction*) o ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). Tales mecanismos normalmente implican sobrecarga de cabeceras (*overhead*) en términos de información de corrección de errores, que debe ser añadida antes de la transmisión (para las técnicas con FEC) o retransmitidas en caso

de pérdidas (para aquellas con ARQ). El intercalado, también conocido como diversidad temporal, representa un buen candidato para escenarios de redes propensas a las pérdidas en ráfagas, ya que permiten espaciar las pérdidas sin transmitir información adicional. En general la diversidad, tanto en el tiempo como en el espacio, representa una solución bien conocida para tratar escenarios de redes afectadas por pérdidas en ráfagas [3].

Para VoIP, se ha trabajado [22] en el diseño y verificación de una técnica VoIP que hace uso del intercalado y una transformación basada en matrices. Para ello, el receptor continuamente informa al emisor acerca del estado del canal, por ejemplo, del patrón de pérdidas del mismo. Entonces el emisor aplica el intercalado a las muestras de voz para compensar el efecto de las muestras que se pierden [3].

Para las redes inalámbricas, se ha propuesto [23] un esquema de intercalado con el fin de alterar el orden de los símbolos antes de aplicar un esquema de FEC. Tomando en cuenta redes de Bluetooth, fueron presentados resultados analíticos y de simulaciones que muestran cómo cambiando el orden de los bits dentro de cada paquete individual y aplicando luego la técnica FEC estándar de Bluetooth hace posible obtener un mejor rendimiento [3].

Otros autores [24] también proponen una estructura analítica y una métrica para la pérdida de paquetes en ráfagas sobre canales inalámbricos. Además, plantean un esquema de conformación de paquetes que ajusta adaptativamente el tamaño del paquete en función de la razón de pérdidas prevista y de la pérdida en ráfagas [3].

En [25] se sugiere el uso de codificación de red cuando el ancho de banda disponible es escaso y ocurren pérdidas en redes con canales inalámbricos con múltiples saltos en frecuencia para una aplicación de video en línea o *streaming*. Los autores realizan simulaciones para exponer las mejoras alcanzadas con su propuesta. Los resultados muestran que la calidad de video aumenta considerablemente, especialmente ante la presencia de pérdidas en ráfagas [3].

En el mismo año, [26] concibe el uso de un esquema FEC simplificado para mejorar la calidad de video en el extremo receptor. Los autores emplean para ello el código de un Generador Matricial de Baja Densidad (*Low-Density Generator-Matrix* o LDGM) aplicados a MPEG y demuestran, a través de simulaciones, que el porcentaje de paquetes recuperados

es mayor con respecto a otros esquemas más complejos de FEC, en presencia de pérdidas en ráfagas [3].

También han sido estudiados [27] nuevos códecs de videos para hacer frente a las pérdidas de paquetes. En particular, se ha investigado la robustez del Codificador de Video de Alta Eficiencia (*High Efficiency Video Coding* o HEVC), utilizando para ello trazas reales de pérdidas. Las trazas usadas por los autores incluyen períodos de pérdidas aleatorias y en ráfagas. Los resultados obtenidos indicaron que el HEVC es menos robusto a tales tipos de pérdidas con respecto al H.264/AVC, especialmente en escenas de mucho movimiento, aunque requiere de un menor ancho de banda [3].

En estudios recientes de VoIP se han propuesto nuevas arquitecturas de redes tales como la Red Cognitiva de Paquetes (*Cognitive Packet Network* o CPN), una Subcapa de Red Definida por Software que provee QoS orientada al usuario mediante el enrutamiento adaptativo basado en sensores y mediciones en línea (*on-line*). Los autores [28] mostraron qué métricas deben ser consideradas como objetivos de la QoS para obtener un mejor rendimiento general en las aplicaciones de voz. Además, exponen las causas de las pérdidas en ráfagas en esta arquitectura y sugieren cómo lidiar con ellas [3].

También para VoIP, los autores [29] propusieron un acercamiento fundamentado en una nueva codificación, basada en G.729, que es capaz de enfrentar largas pérdidas de paquetes. Para ello emplearon el Modelo de Markov para las pérdidas, el cual toma en cuenta específicamente la correlación entre las pérdidas. En este trabajo, los autores mostraron cuáles parámetros del códec tienen mayor influencia en la calidad percibida de la VoIP [3].

Por último, en [30] se presenta un nuevo esquema de protección contra pérdidas llamado Transmisión de Paquetes Redundantes (*Redundant Packet Transmission* o RPT). De acuerdo con los autores, este nuevo esquema tiene una baja latencia y una alta robustez. Dicho esquema es validado a través de varios análisis para diferentes tipos de pérdidas, entre las que se incluyen las pérdidas en ráfagas. Los resultados muestran que la Transmisión Redundante disminuye la tasa de pérdida de datos en una mayor magnitud que los esquemas de FEC típicos aplicados en las comunicaciones de video en tiempo real [3].

1.2.4. Intercaladores

Dentro de las posibles soluciones encontradas en la bibliografía para el problema de la pérdida de paquetes en ráfagas, el uso del intercalado de paquetes es especialmente atractivo. La idea general del intercalado no es nueva. El intercalado se utiliza en las capas MAC/Física, por ejemplo en enlaces ADSL o WiFi o también en la capa de Aplicación, por ejemplo de conjunto con codificadores específicos de video. Los beneficios de estos empleos han sido analizados extensivamente en la literatura y algunos de ellos son comúnmente usados en la actualidad (por ejemplo, en algunas configuraciones de ADSL). Sin embargo, estos usos han sido limitados, en el sentido de que han estado atados a una tecnología de capa MAC/Física en particular o a una arquitectura/protocolo de la capa de aplicación específica. En contraste, el uso del intercalado en la capa IP permite la independencia de la tecnología usada en las capas inferiores y de las aplicaciones utilizadas en las capas superiores. Además, como IP es empleado actualmente con casi todos los posibles protocolos de capas inferiores y superiores, intercalar a nivel IP permite una solución más general al problema. Así, el intercalador propuesto en [3] puede ser usado en redes reales sin ser dependiente de una aplicación, códec o protocolo particular.

La idea básica de realizar el intercalado de paquetes es reordenar estos antes de la transmisión. El reordenamiento permite separar paquetes originalmente cercanos, de manera que una pérdida de paquetes consecutivos se traduzca en una pérdida de paquetes distantes. La principal desventaja del intercalado de paquetes es la demora introducida. Para poder reordenar un determinado número de paquetes, es necesario esperar por ellos. Tal demora es, sin embargo, aceptable para muchas aplicaciones (por ejemplo, aplicaciones de audio y video, de intercambio de archivos *peer-to-peer*, etc.) y más importante, es controlable a través del tamaño de la secuencia [3].

Una vez escogido el tamaño de la secuencia, determinar la permutación óptima para tal secuencia no es una tarea sencilla. Debido a que la búsqueda exhaustiva de la permutación óptima usualmente no es factible, el intercalado se implementa comúnmente en bloques, lo que se ha denominado intercalado en bloques o *block interleaving* en inglés. El intercalado en bloques se realiza insertando paquetes en las filas de una matriz (*Insertion*) y extrayéndolos en columnas (*Transmission*) como se muestra en la Figura 1.2.

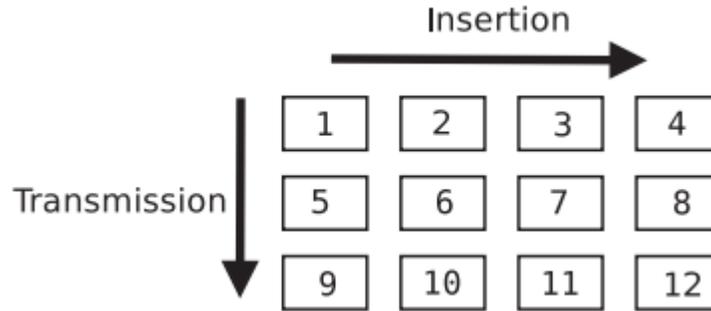


Figura 1.2 Arreglo de intercalado [3].

Básicamente, el flujo del tráfico es dividido en secuencias de k paquetes. Cada secuencia es entonces puesta en un bloque: una matriz de tamaño $k = n * m$ donde n , el número de filas, es llamado profundidad del intercalado (*interleaving depth*).

La efectividad de tal esquema de transmisión depende de los valores de n y m , así como de las condiciones de la red: una ráfaga de tamaño B será convertida en ráfagas más pequeñas de tamaño B/n . Cuando $n \geq B$ se es capaz de convertir la ráfaga en un número equivalente de pérdidas aisladas, separadas m o $m - 1$ paquetes. Por tanto, incrementar n y m aumenta la capacidad de convertir ráfagas en pérdidas aisladas. Por otro lado, esto conlleva dos desventajas: la primera, que el número de pequeñas pérdidas aumenta y la segunda, que la demora en el buffer se incrementa [3].

1.3. Consideraciones finales del capítulo

Dentro de los modelos estándares para la evaluación de la calidad de servicio o de la experiencia de la calidad, el Modelo E es un excelente candidato debido a su naturaleza analítica y fácil realización en software. Aunque el Modelo E no es del todo exacto sí puede entregar un margen de justicia útil para lograr el objetivo propuesto, siempre que se elijan los parámetros apropiadamente. En la bibliografía consultada sobresale el modelo 2-MC como un buen candidato para recrear el fenómeno de pérdidas atendiendo a un proceso *markoviano* de dos estados con sus probabilidades correspondientes. Por otro lado, de los mecanismos para enfrentar las ráfagas de pérdidas de paquetes, los intercaladores se manifiestan en la bibliografía con un buen candidato; aunque estos no hayan sido analizados en profundidad en cuanto a cuáles usar en los diferentes escenarios de pérdidas.

CAPÍTULO 2. MECANISMO DE INTERCALADO DE PAQUETES Y MODELO DE EVALUACIÓN

Para realizar la evaluación mediante la utilización del Modelo E, del impacto que tiene el uso del intercalado en aplicaciones de voz que están expuestas a pérdidas de paquetes en ráfagas, el método de simulación es uno de los más accesibles debido a su bajo costo, así como su relativa sencillez de implementación. Entre los programas con los que se puede simular, MATLAB es una de las herramientas más empleadas gracias a sus potentes módulos y al ser además considerado como el asistente matemático para la Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, fue el escogido para la puesta en práctica de las ideas expuestas anteriormente.

En este capítulo se recogen y proyectan los diferentes esquemas de intercalado a emplear, mostrándose las características principales de cada uno. Luego se introduce el problema de la elección del intercalador más adecuado para las condiciones de pérdidas presentes en el canal de comunicación y qué consideraciones existen al respecto. Por último, se diseña el mecanismo de evaluación de la calidad de voz mediante la implementación del Modelo E y se muestran cuáles de las muchas variables del mismo deben tenerse en cuenta para el estudio perseguido.

2.1 Concepción del arreglo del intercalado

El impacto que puede tener un esquema de intercalado sobre la calidad de voz percibida en un canal propenso a sufrir pérdidas de paquetes en ráfagas, varía particularmente de acuerdo a su profundidad n y a sus dimensiones $n \times m$ en general. Es por ello que cobra sentido conformar varios intercaladores con diferentes dimensiones para aplicarlos por separado y ver cuáles tienen un efecto más positivo sobre la calidad de voz en las condiciones de pérdidas consideradas. Con este fin, a continuación se exponen las características de los diversos arreglos de intercalados utilizados en el presente trabajo.

En la Tabla 2.1 se muestra el primer arreglo empleado. El mismo consiste de una matriz de 3x3 con una profundidad de intercalado de $n = 3$. Con este intercalador primero se almacenan 9 paquetes en el buffer insertándolos en las filas del arreglo según van llegando y luego se extraen en columnas, por lo que la transmisión de los 9 paquetes será en el orden: 1-4-7, 2-5-8, 3-6-9. Este intercalador es capaz de separar hasta 3 paquetes perdidos consecutivamente y hacerlos paquetes perdidos individualmente.

Interleaving		
1	2	3
4	5	6
7	8	9

Tabla 2.1 Arreglo de intercalado 3x3.

A continuación, en la Tabla 2.2 se presenta el segundo arreglo de intercalado, consistente en una matriz de 3x4, con una profundidad $n = 3$ al igual que el anterior. En cambio, en este arreglo $m = 4$ y en el buffer se almacenan ahora 12 paquetes ordenados en filas tal y como se muestra. Este intercalador también es capaz de separar solamente hasta 3 paquetes perdidos consecutivos.

Interleaving			
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12

Tabla 2.2 Arreglo de intercalado 3x4.

Seguidamente se expone en la Tabla 2.3 el tercer esquema de intercalación a utilizar. En este, $n = 4$ y $m = 3$, por lo que ahora pueden separarse hasta 4 paquetes perdidos de manera consecutiva y el buffer almacena 12 paquetes para realizar el intercalado.

Interleaving		
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12

Tabla 2.3 Arreglo de intercalado 4x3.

Luego, en la Tabla 2.4, aparece el cuarto intercalador empleado. La matriz del mismo es de 3x5, contando con una profundidad de $n = 3$ que brinda la posibilidad de separar hasta 3

paquetes perdidos. Además, el buffer de este intercalador debe almacenar 15 paquetes para luego transmitirlos por columnas.

Interleaving				
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

Tabla 2.4 Arreglo de intercalado 3x5.

Por último, en la Tabla 2.5 puede observarse el quinto arreglo de intercalado concebido. En este, la profundidad es de $n = 5$, lo que permite que una ráfaga de hasta 5 paquetes perdidos sea separada en pérdidas individuales.

Interleaving		
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15

Tabla 2.5 Arreglo de intercalado 5x3.

Para los arreglos considerados anteriormente, teniendo en cuenta sus diferencias particulares, se debe esperar que cada uno impacte de manera diferente sobre la calidad percibida de la voz por el usuario final, al ser aplicados en la comunicación para enfrentar el problema de las pérdidas de paquetes en ráfagas. En general, la elección del intercalador más adecuado no es una tarea sencilla. Es este el problema tratado a continuación.

2.2 Presentación del problema para la elección de los mejores esquemas de intercalado de paquetes

Diversos acercamientos pueden ser considerados para decidir la preferencia de la aplicación de un intercalador de paquetes sobre otro. De acuerdo con [3], con el uso de un intercalador con un bloque de intercalado de profundidad n es posible transformar una ráfaga de n paquetes en pérdidas individuales espaciadas m o $m-1$ paquetes. Esto brinda una primera idea para el dimensionamiento adecuado del tamaño del bloque de intercalación. De hecho, si las pérdidas en ráfagas tuvieran siempre un tamaño fijo (por ejemplo, de 3 paquetes), se podría fácilmente dimensionar el bloque de intercalado de manera que se perdiera la correlación entre todas las ráfagas (por ejemplo, haciendo $n \geq 3$). Sin embargo, como las ráfagas tienen

tamaños diferentes y es deseable elegir el mínimo tamaño posible para el boque, se debe encontrar algún criterio probabilístico. Claramente, un primer criterio pudiera ser fijar el tamaño del bloque de manera que sea igual al tamaño promedio de las ráfagas. Esto permitiría decorrelacionar todas las ráfagas con un tamaño menor o igual al tamaño promedio. Para aplicar este criterio se debe encontrar en el Modelo de Markov el tamaño de ráfagas promedio, que es igual al tiempo de permanencia esperado en el estado b (ver Figura 1-1), según lo expresado en la ecuación (2.1) [3]:

$$E(\text{tamaño de ráfaga}) = \frac{1}{q} \quad (2.1)$$

Luego se impone, según (2.2) [3]:

$$n \geq \frac{1}{q} \quad (2.2)$$

Una cuestión a tener en cuenta con este criterio es que, la distribución de pérdidas en ráfagas puede tener una gran asimetría, lo que significa que solo unas pocas muestras serán menores o iguales al tamaño promedio. Por tanto, con este criterio se logra decorrelacionar solamente un pequeño porcentaje de las ráfagas de pérdidas. Un criterio más efectivo puede ser el configurar el intercalador para que decorrelacione una fracción determinada de las ráfagas. En detalle, se trata de decorrelacionar el $d\%$ de todas las ráfagas. Para ello se debe configurar la profundidad n del intercalador de manera que sea igual al d -ésimo porciento del tamaño de la distribución de las pérdidas en ráfagas, de acuerdo con (2.3) [3]:

$$n \geq d\text{-ésimo porciento} \quad (2.3)$$

A esta profundidad del intercalador le llamamos profundidad de $d\%$ y con ella se asegura decorrelacionar el $d\%$ de todas las ráfagas del canal. Este criterio es mejor que el de hacer n igual al tamaño promedio de las ráfagas principalmente porque se tiene un parámetro (d) que permite controlar cuán efectivo queremos que sea el intercalador. Evidentemente, dado un cierto canal, mientras más incrementemos d , más incrementaremos n y consecuentemente la demora en el buffer. Por lo tanto, debemos encontrar la relación de compromiso adecuada entre la profundidad n del intercalador y la demora en el buffer, considerando el escenario de aplicación [3].

De lo anteriormente enunciado se desprende el problema fundamental para la elección de los mejores esquemas de intercalado ya que, al incrementar la profundidad del intercalador, se elimina la correlación de las pérdidas de paquetes en ráfagas y consecuentemente se mejora la calidad de la voz percibida en el extremo receptor. Sin embargo, es de esperar que se llegue a un punto a partir del cual aumentar n traiga como resultado la degradación de la calidad, debido a la demora ocasionada por el buffer al tener que almacenar más y más paquetes antes de comenzar el intercalado, hecho que impacta negativamente en la comunicación. Por ello es recomendable la prueba de los diversos arreglos de intercalados expuestos anteriormente y el análisis detallado de los resultados de la aplicación de cada uno de ellos en el canal tratado.

2.3 Diseño del mecanismo de selección y evaluación mediante el Modelo E

El algoritmo del Modelo E, capaz de estimar la calidad de la voz percibida por un usuario final a través de un valor en escala de evaluación MOS, se apoya en un gran número de variables que están destinadas incluir todos los fenómenos y degradaciones presentes en un canal de comunicación. Mediante las ecuaciones proporcionadas por el propio modelo para el cálculo de algunas de esas variables y con el conocimiento de los valores típicos de otras para el canal que será analizado, es posible simular las condiciones de la comunicación de manera que se logre una aproximación muy cercana a la realidad, a partir de la cual puedan sacarse conclusiones certeras. Para ello, un potente software como MATLAB permite la creación de códigos de programación que implementen las ecuaciones necesarias, carguen grandes variables, trabajen con extensas cantidades de datos y muestren los resultados perseguidos. De esta manera, es posible simular efectivamente las pérdidas de paquetes en ráfagas para diferentes condiciones del canal, llevar a la práctica los distintos esquemas de intercalado propuestos y realizar la evaluación, mediante el Modelo E, de la calidad de voz percibida antes y después de la aplicación del intercalador para conocer qué impacto tuvo en la misma. A continuación, se exponen las variables que deben ser consideradas para la ejecución de los códigos anteriormente presentados.

Uno de los elementos más importantes a tener en cuenta, en concordancia con [31], es la demora total o de boca a oído (*Mouth To Ear*) o D_{mte} , que considera la demora del transmisor (codificación y análisis para la compresión o *look-ahead*), la demora de red (colas y

transmisión de los paquetes), y la demora del receptor (decodificación y reproducción). En [31] se utiliza una D_{mte} típica de 180 ms. Diversos autores toman valores a una conveniencia que tratan de fijar por debajo de 200 ms, porque la percepción de la calidad después de este valor se ve afectada considerablemente por la D_{mte} como se observa en la Figura 2.1.

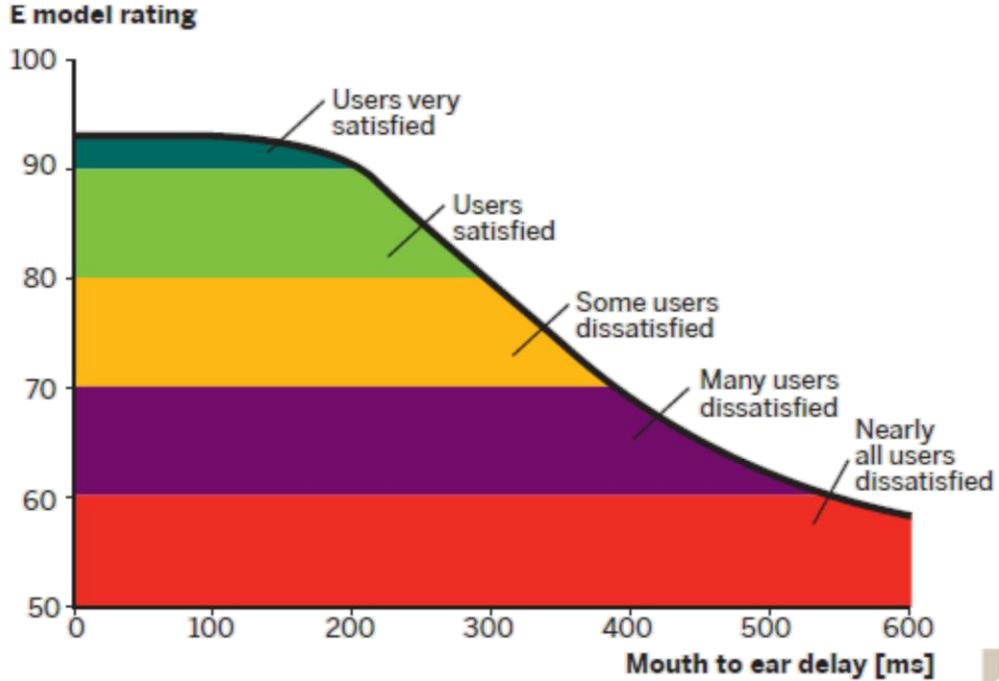


Figura 2.1 Satisfacción de los usuarios contra D_{mte} extremo a extremo [32]. Nótese el límite del impacto en el factor R en cerca de 200 ms.

Como se expresa en la ecuación 2.4, la D_{mte} no contempla las demoras adicionales provocadas por el intercalado ni las demoras de HO. En [2] se explica con claridad los términos de la expresión que expresan no más de lo enunciado anteriormente.

$$D_{mte} = \underbrace{t_{en} + t_{lh}}_{emisor} + \underbrace{\sum_{i=0}^N (t_{qu}^i + t_{tx}^i)}_{red} + \underbrace{t_{dj} + t_{de}}_{receptor} \quad (2.4)$$

El impacto de la demora del intercalado es precisamente el inconveniente fundamental del uso de este mecanismo de diversidad temporal. Si se toman 20 ms de demora en la red en cada uno de los extremos y 40 ms de tamaño de buffer de eliminación de *jitter* (equivalente a 4 paquetes de 10 ms), entonces la demora total de boca a oído sería de 80 ms. Este valor, aunque no tiene en cuenta la demora en el núcleo de transporte, es bien aceptado si se tiene en cuenta criterios como los publicados en [32]. A estos 80ms se le incorporarían la

correspondiente demora en el uso de los intercaladores antes analizados. La Tabla 2.6 recoge las demoras totales en cada caso.

Intercalador	Demora de base	Demora introducida por el intercalador	Demora total
I-3x3	80	$100 = 2 * 50$	180
I-3x4		$140 = 2 * 70$	220
I-4x3		$180 = 2 * 90$	260
I-3x5			
I-5x3			

Tabla 2.6 Configuración de las D_{mte} totales en cada caso de intercaladores a usar.

Dentro de las variables presentes en el Modelo E a ser consideradas se encuentra la relación señal a ruido básica (*Basic signal-to-noise ratio*) o R_0 , definida en [5]. Este valor puede ser calculado tomando valores por defecto en la Tabla 3 de la recomendación G.107. El resultado es 93.2, porque como bien se explica en [2] y en muchas otras publicaciones, los valores por defecto son seleccionados para casi todos los parámetros salvo algunos de interés para el experimento. El resultado es una simplificación de la expresión (1.1) que luce como la siguiente:

$$R = 93.2 - I_d - I_{e-eff} \tag{2.5}$$

También allí se define I_d (*Delay impairment factor*) como el factor de degradación que contiene a todas las degradaciones ocasionadas por la demora de las señales de voz. Este parámetro puede calcularse por dos vías equivalentes. La primera sería según la Recomendación G.107 de la UIT [5]; la otra variante es según [2, 33]. Ambas son las que se presentan a continuación, respectivamente.

Variante G.107:

$$I_{dd} = 25 \left\{ \left(1 + X^6 \right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left(1 + \left[\frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\} \tag{2.6}$$

$$X = \frac{\log\left(\frac{Ta}{100}\right)}{\log 2} \quad (2.7)$$

Variante de aproximación de [2, 33]:

$$I_d = 0.024d + 0.11(d - 177.3)H(d - 117.3) \quad (2.8)$$

Donde d es la demora en un solo sentido y $H(x)$ es la función de Heavyside o paso unitario:

$$\begin{aligned} H(x) &= 0 & \text{si } x < 0 \\ H(x) &= 1 & \text{si } x \geq 0 \end{aligned}$$

Por otro lado, las degradaciones introducidas por diferentes tipos de códecs de baja tasa de bits son expresadas por el factor de degradación del equipamiento I_e (*Equipment impairment factor*). Este factor idealmente debe cubrir todos los diversos efectos perceptibles tales como la distorsión, degradación del sonido, degradación de la calidad de voz, etc. Estos efectos perceptibles no deseados pueden estar asociados con el códec utilizado en la conexión, excepto aquellos que ya han sido cubiertos de alguna otra manera por el Modelo E, por ejemplo, la atenuación total y la demora absoluta. Debe saberse además que para la utilización del Modelo E en el planeamiento extremo-a-extremo de una transmisión, cada códec puede ser asignado con un I_e específico, que es un parámetro de entrada de dicho modelo [34].

Así, los valores del factor de degradación del equipamiento I_e para los elementos que utilizan códecs de baja tasa de bits no están relacionados con otros parámetros de entrada. Ellos solo dependen de los resultados de las pruebas subjetivas del MOS, así como de la experiencia de los equipos en la red. En el Apéndice I del estándar [34] se encuentran los valores recomendados actualmente para el I_e [5]. No obstante, para el códec G.722.2 o AMR-WB (*Adaptive Multi-Rate Wideband*) [35] la recomendación G.113 no especifica valores. En ese caso se pueden tomar los valores de la Tabla V de [20] (ver Tabla 2.7). El interés en este códec está marcado por la usabilidad del mismo en LTE/LTE-A, donde encuentra aplicación este trabajo de intercaladores.

Los valores específicos de los factores de degradación para códecs que operan bajo condiciones de pérdidas aleatorias de paquetes, han sido tratados formalmente utilizando tablas con los valores del I_e dependientes de las pérdidas de paquetes como la Tabla 2.7. Así

se ha definido el factor de robustez ante pérdida de paquetes (*packet-loss robustness factor* o B_{pl}) como un valor específico del códec. Luego, el factor de deterioro efectivo del equipamiento (*effective equipment impairment factor* o I_{e-eff}) dependiente de la pérdida de paquetes se ha obtenido usando el valor específico del códec para el factor de degradación del equipamiento I_e cuando no existen pérdidas de paquetes y el factor B_{pl} , ambos listados en el Apéndice I de la Recomendación G.113 [34], para muchos códecs.

<i>Codec (bit-rate)</i>	$I_{e,WB}$	B_{pl}
G.722 (64)	12	4.5
G.722 (56)	18	
G.722 (48)	31	
G.722.1 (32)	14	11.0
G.722.1 (24)	18	12.0
G.722.2 (6.6)	39	12.8
G.722.2 (8.85)	25	13.5
G.722.2 (12.65)	11	13.0
G.722.2 (14.25)	10	14.1
G.722.2 (15.85)	7	13.1
G.722.2 (18.25)	5	12.5
G.722.2 (19.85)	4	12.3
G.722.2 (23.05)	1	13.0
G.722.2 (23.85)	6	12.2

Tabla 2.7 Lista propuesta de los factores I_e y B_{pl} para códecs de banda ancha. Tomada de [20].

Debe decirse que aparte del códec, el factor B_{pl} también depende del número de tramas de voz incluidas en un paquete, así como de la potencia de las estrategias de corrección de errores aplicadas por el codificador y/o el decodificador [20].

Entonces, con la probabilidad de pérdida de paquetes (*packet-loss probability* o P_{pl}), el factor I_{e-eff} es calculado mediante la ecuación (2.4) [5]:

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) * \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}} \quad (2.4)$$

Es de notar que el valor fijo de 95 en la ecuación anterior representa de forma aproximada el valor del factor de evaluación R para el canal de banda estrecha. Cuando se aplica un acercamiento similar al anteriormente descrito, para calcular el I_e para un canal de banda

ancha, se obtiene una ecuación similar a la precedente con la excepción de que el factor constante en ella debe ser igual a $R_{max} = 129$ en lugar de ser 95 [20].

También debe repararse que en la ecuación anterior el Modelo E toma en cuenta las pérdidas de paquetes en ráfagas a través del parámetro $BurstR$, que es la razón de ráfaga (*Burst Ratio*), definida en (2.5) como [5]:

$$BurstR = \frac{BurstArr}{BurstExp} \quad (2.5)$$

Donde $BurstArr$ es el tamaño promedio de las ráfagas observadas en una secuencia arribada mientras que $BurstExp$ es el tamaño promedio de ráfagas esperadas para la red bajo pérdidas aleatorias.

Según el modelo cuando la pérdida de paquetes es aleatoria (independiente) $BurstR = 1$, mientras que cuando la pérdida de paquetes es en ráfaga (dependiente) $BurstR > 1$. Por ejemplo, para una distribución de pérdida de paquetes correspondiente a un modelo de Markov de 2 estados con probabilidad p de transición entre el estado de “encontrado” y “perdido” y de q entre el “perdido” y “encontrado”, la razón de ráfaga puede ser calculada, según [5], como se muestra en (2.6):

$$BurstR = \frac{1}{p+q} = \frac{Ppl/100}{p} = \frac{1-Ppl/100}{q} \quad (2.6)$$

Pendiente de una futura verificación, se sugiere que el algoritmo del Modelo E no debe ser usado con razones de pérdidas en ráfagas mayores de $BurstR = 2.0$. Asimismo, se expresa que el modelo solo puede aplicarse también a razones de pérdidas de ráfagas mayores de 2.0 si el porcentaje de pérdida de paquetes Ppl es menor del 2% [5].

Por último, debe señalarse que los valores predefinidos para todos los parámetros usados por el algoritmo del Modelo E, se listan en [5]. También allí se recomienda especialmente la utilización de estos valores para todos los parámetros que no varíen durante la etapa de planificación de los cálculos. Si todos los parámetros son puestos con sus valores por defecto, los cálculos resultan en una muy alta calidad con un factor de $R = 93.2$ [5].

A continuación en la Tabla 2.8 se recogen los rangos permitidos para la utilización de los parámetros. Es importante notar que la especificación del valor dentro de este rango

determina la objetividad del Modelo E. Por lo tanto se pueden obtener resultados útiles o resultados totalmente inútiles o absurdos.

Parámetro	Abreviatura	Unidad	Valor predefinido	Rango permitido
Factor de degradación del equipamiento	Ie	-	0	0...40
Factor de robustez ante pérdida de paquetes	Bpl	-	4.3	4.3...40
Probabilidad de pérdida de paquetes aleatorios	Ppl	%	0	0...20
Tasa de ráfaga	BurstR	-	1	1...8

Tabla 2.8 Valores predefinidos y rangos permitidos para los parámetros utilizados [5].

2.4 Consideraciones finales del capítulo

Resulta necesario estudiar hasta qué punto es ventajoso el aumento de la profundidad del intercalador de paquetes para espaciar ráfagas de pérdidas de mayor tamaño, debido a que el incremento consiguiente de la demora en el buffer de almacenamiento de los paquetes impacta negativamente en la calidad de la conversación, por lo que debe establecerse la relación de compromiso adecuada entre estos dos factores. Para cumplir esta finalidad, el empleo del algoritmo de evaluación del Modelo E es una manera práctica de ir estimando el efecto que van teniendo los diferentes esquemas de intercalado concebidos sobre la calidad de la voz percibida por el usuario final, hasta encontrar cuál es el más adecuado para las condiciones dadas. Con el uso de la herramienta de software MATLAB, resulta posible llevar a cabo la implementación de los diseños expuestos anteriormente y analizar los resultados obtenidos. Es importante tener en cuenta para ello los parámetros elegidos en este capítulo así como las demoras analizadas para cada intercalador.

CAPÍTULO 3. REALIZACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1 Realización del modelo de Gilbert-Elliott y relación con los parámetros del Modelo E

Para la realización del 2-MC mediante el empleo de MATLAB se crea en el mismo una variable *cadena* que simula una transmisión seriada de paquetes sobre un canal de comunicación determinado. Esta variable *cadena* está compuesta de dos dígitos que representan los dos estados en que pueden encontrarse los paquetes en el extremo receptor: el 0, que representa un paquete que arribó correctamente y el 1, que simboliza un paquete perdido durante la transmisión. De esta manera, cada uno de estos dígitos representa el estado de un paquete en particular.

El control de las condiciones del canal, para analizar diversos escenarios donde las pérdidas de paquetes sean más o menos frecuentes, se realiza en concordancia con el 2-MC a través de las variables q y p . La variable q denota la probabilidad de transición del estado de paquete perdido al de recibido, mientras que p expresa la probabilidad de transición del estado de paquete recibido al de perdido. Para que estas transiciones ocurran, se crea una variable llamada *ruleta* con igual número de elementos que *cadena*, pero en ella cada elemento individual es un número decimal pseudo-aleatorio entre 0 y 1 obtenido mediante el empleo de una función **rand** ofrecida por MATLAB. Dicho valor se compara con las probabilidades de transiciones p y q de un estado a otro de la siguiente forma: si el paquete anterior al analizado se recibió (estado 0) y el valor del paquete actual en *ruleta* es menor que la probabilidad p de que el paquete se pierda, entonces se pone un 1 en el paquete correspondiente en *cadena* y se da por perdido. En una variable denominada b se coloca como un elemento nuevo de esta el número del paquete en el que ocurrió la transición de 0 a 1. En el caso que el valor actual en *ruleta* sea mayor que p , se pone un 0 en *cadena* en el

elemento analizado. Si el paquete anterior al analizado no se recibió (estado 1) y el valor del paquete actual en *ruleta* es menor que la probabilidad q de que el paquete se reciba, entonces se pone un 0 en el paquete correspondiente en cadena y se da por recibido. En una variable denominada g se coloca como un elemento nuevo de esta el número del paquete en el que ocurrió la transición de 1 a 0. En el caso contrario de la comparación entre el valor de *ruleta* y q , se pone un 1 en *cadena* en la posición correspondiente al elemento analizado. Estas operaciones se realizan para cada elemento de *cadena*, desde el segundo hasta el último. Además, debe notarse que los valores de p y q influyen en la frecuencia y tamaño de las ráfagas de paquetes perdidos. Lo expresado hasta este momento se expone a continuación en la Figura 3.1 donde se observa el código correspondiente en MATLAB.

```
function [cadena, Pl, Eb, Br, cadenapl, Plc, Ebc, Brc] = Burst(q, p)
    n=1800000;      %para representar 3min de conversacion para 100 usuarios
                  %conversacion considerando tramas de 10ms
                  %para obtener una tendencia clara del
                  %comportamiento de los resultados.
    cadena = zeros(1,n); %para que siempre comience en 0 que es estado bueno
    ruleta = rand(1,n); %func. aleatoria, da valores dec. /0 y 1
    b = [];          %arreglo b
    g = [];          %arreglo g
    for i = 2 : n    %Para todo paq. desde el 2do hasta el n
        if cadena(i-1) == 0 %Si se recibió el paq. anterior al actual
            if ruleta(i) < p %y si prob_paq_actual < prob_de_trans_a_perd
                cadena(i) = 1; %entonces el paq. actual se pierde
                b = [b i]; %Pone en b el # del paq. en el que
                           %hubo transic. de "0" a "1".
            else %o si prob_paq_actual > prob_de_trans_a_perd
                cadena(i) = 0; %entonces el paq. actual se recibe
            end
        elseif cadena(i-1) == 1 %Si no se recibió el paq. anterior
            if ruleta(i) < q %y si prob_paq_actual < prob_de_trans_a_no_perd
                cadena(i) = 0; %entonces el paq. actual se recibe
                g = [g i]; %Pone en g el # del paq. en el que
                           %hubo transic. de "1" a "0".
            else %o si prob_paq_actual > prob_de_trans_a_no_perd
                cadena(i) = 1; %entonces el paq. actual se pierde
            end
        end
    end
end
```

Figura 3.1 Código en MATLAB para la realización de una Cadena de Markov de 2 estados.

Las variables q y p se obtienen a partir de un cálculo para el cual se fija el tamaño esperado de la ráfaga y la probabilidad de pérdida de paquetes. Variando estos dos parámetros entonces

se pueden hacer simulaciones con varias entradas de q y p . En este trabajo se utilizaron las siguientes.

	Datos	p	q
$Eb = 3$	$Pl = 0.5\%$	0.0017	0.3333
	$Pl = 1.0\%$	0.0034	
	$Pl = 2.0\%$	0.0068	
	$Pl = 6.0\%$	0.0213	
$Eb = 5$	$Pl = 0.5\%$	0.0010	0.20
	$Pl = 1.0\%$	0.0020	
	$Pl = 2.0\%$	0.0041	
	$Pl = 6.0\%$	0.0128	

Tabla 3.1 Valores de q y p utilizados en el modelo 2M-C.

De la *cadena* formada anteriormente se obtiene uno de los parámetros de entrada del Modelo E: la probabilidad de pérdida de paquetes Pl o Ppl . Para ello se emplea la ecuación mostrada en la Figura 3.2, que representa esencialmente el número de paquetes perdidos entre el número de paquetes totales empleados. En la Figura 3.2 puede apreciarse además otros parámetros de interés para el análisis posterior, tal como la variable Br , que es un arreglo que contiene el tamaño de cada ráfaga de pérdidas obtenido de la resta de g menos b . También se obtiene Eb , que es el tamaño promedio de las ráfagas. Otros valores que se obtienen están comentados en la propia Figura 3.2.

```

Pl = sum(cadena)/n;    %Prob. de pérd. de paq.
Br = g-b;             %Arreglo con el tamaño de c/ráfaga de pérd. de paq.
Eb = mean(Br);        %Tamaño promedio de las ráfagas de pérd.
cadenapl = cadena;
cadenapl(b(Br==1)) = 0;
Plc = sum(cadenapl)/numel(cadenapl);
Brc = Br;
Brc(Brc==1) = [];
Ebc = mean(Brc);      %Tamaño prom. de las ráfagas cdo se usa PLC.
Br = numel(Br);       %Cantidad de ráfagas de pérdidas
Brc = numel(Brc);     %Cantidad de ráfagas de pérdidas cdo se usa PLC

```

Figura 3.2 Código en MATLAB para la obtención de los resultados Pl , Br , Eb , Plc , Brc y Ebc .

3.2 Realización del intercalador y relación con los parámetros del Modelo E

La potencia para el trabajo con matrices de MATLAB es fundamental para la realización del intercalador y del proceso de intercalado de los paquetes representados en *cadena*. Este proceso tiene que ser según el orden de arriba de los paquetes al intercalador escogido y teniendo en cuenta las dimensiones de este.

En primer lugar se crea *intercalador* como un arreglo con los números de los paquetes distribuidos en una sola fila. Un ejemplo de esto puede observarse en la Figura 3.3, que muestra uno de los arreglos de intercalado concebidos. La variable n es el número de paquetes de *cadena* que deben ser intercalados, z es el número máximo de paquetes que puede almacenar el buffer para intercalar y *máscara* es donde se hacen copias de los valores que van de 0 a $n/z - 1$, formando una fila, donde cada valor se repite z veces. A continuación se hace de *máscara* una matriz de n/z filas $x(z)$ columnas, con cada elemento multiplicado por z . Luego, el intercalador escogido se redimensiona haciendo que *intercalador* se vuelva una fila con el *intercalador* original repetido n/z veces (ver Figura 3.3).

```

intercalador = [1 4 7 10 13 2 5 8 11 14 3 6 9 12 15];           %Ejemplo de Intercalador
% Nota: n=numel(cadena); z=numel(intercalador)
mascara = repmat([0:(numel(cadena) ./ numel(intercalador) - 1)]',1,numel(intercalador)); %Hace copias
    %en "máscara" de valores de "0" a "n/z - 1", formando una fila donde c/valor se repite "z" veces.
mascara = mascara * numel(intercalador);                       %Hace "máscara" una matriz de
    %(n/z)filas x (z)columnas, con c/element. multiplicado x "z".
intercalador = repmat(intercalador,size(mascara,1),1); %Hace una fila con "intercalador" repetido
    %"n/z" veces.
mascara = (mascara + intercalador)';                            %Organiza en c/Column. de "máscara" los element. de "0"
    %a "n" de acuerdo a la disposic. del interc.
mascara = reshape(mascara,1,numel(mascara));                   %Se organiza "máscara" en una sola fila con todos sus
    %elemnt. reordenados según el interc. uno detrás del
    %otro (con "n" Columnas).
cadenaint = cadena(mascara);                                   %Se reordena la "cadena" original según los element. de
    %la "máscara",o sea, se realiza el Intercalado en
    %"cadena" y se guarda en "cadenaint".

```

Figura 3.3 Realización del intercalado de paquetes de una cadena de datos según el esquema de intercalado escogido.

Como se muestra en la Figura 3.3, se organizan en cada columna de *máscara* los elementos de 0 a n de acuerdo a la disposición del intercalador, por ejemplo, la columna #1 sería igual a 1, 4, 7, 10, 13, 2, 5, 8, 11, 14, 3, 6, 9, 12, 15, y así sucesivamente con las demás columnas hasta llegar al último elemento. Posteriormente se organiza *máscara* en una sola fila con todos sus elementos reordenados según el intercalador uno detrás del otro, con n columnas. Entonces se reordena la *cadena* original según los elementos de la *máscara*, o sea, se realiza el intercalado en *cadena* y se guarda en la variable *cadenaint*.

Después de haber llevado a cabo el intercalado de los paquetes, se procede a la obtención de la probabilidad de pérdida de paquetes luego del intercalado P_{li} mediante un análisis similar al mostrado en el epígrafe anterior. Se obtienen los arreglos b y g , esta vez a partir de la secuencia de *cadenaint*. Además se obtienen las variables B_{ri} , que ahora es un arreglo que contiene el tamaño de cada ráfaga de pérdidas luego de realizado el intercalado, mediante la resta $g - b$; E_{bi} es el tamaño promedio de las ráfagas luego de ser aplicado el intercalador. La obtención de estos últimos tres parámetros puede verse en la Figura 3.4.

```

b = []; %arreglo b
g = []; %arreglo g
for i = 2 : numel(cadenaint) %Para todo paq. desde el 2do hasta el n
    if cadenaint(i-1) == 0 && cadenaint(i) == 1 % Si se recibió el paq. anterior y el actual se pierde
        b = [b i]; % se pone en "b" el # del paq. en el q hubo transic. de "0" a "1".
    elseif cadenaint(i-1) == 1 && cadenaint(i) == 0 % 0 si no se recibió el paq. anterior y el actual sí se recibe
        g = [g i]; % se pone en "g" el # del paq. en el que hubo transic. de "1" a "0".
    end %
Pli = sum(cadenaint)/numel(cadenaint); %Pli: Prob. de pérd. de paq. con intercalado
Bri = g-b; %Bri: Arreglo con el tam. de c/ráfaga de pérd. de paq. con interc.
Ebi = mean(Bri); %Ebi: Tamaño promedio de las ráfagas de pérd. con interc.

```

Figura 3.4 Obtención de los parámetros P_{li} , B_{ri} y E_{bi} .

3.3 Realización del Modelo E

La realización del Modelo E no es un reto. Existen de hecho varios calculadores para el Modelo E, entre ellos el que propone la ITU-T disponible en línea [36]. El interés de realizar el Modelo E para este trabajo consiste en integrar su código con las estructuras de arreglos antes mencionadas, emplear aproximaciones como las de [2, 33] y utilizar los parámetros

específicos para el escenario sobre el cual se aplica los intercaladores: una red LTE-A con códec AMR-WB.

Se realizaron dos variantes del Modelo E. La primera es como se puede apreciar en la Figura 3.5, en cuyos comentarios aparecen los criterios de selección para los parámetros. La selección de estos parámetros se discutió también en el acápite 2.3 de este informe. Es importante señalar otra vez que la ecuación de I_d es como la (2.6), siguiendo el criterio de la no incidencia del eco dado a que se considera que el sistema hace un manejo efectivo de este fenómeno adverso. La otra variante posible difiere sobre todo en la sustitución de la ecuación de I_d por la ecuación de aproximación (2.8).

```
function [m, Id, Ief] = mos(d, Pp1)
%MOS Calcula el MOS de acuerdo a G.107 (Modelo E)
%d: demora media de extremo a extremo
%p: razón pérdida de paquetes
%br: razón de ráfaga (1 para pérdidas aleatorias)
%bpl: factor de robustez de pérdida de paquetes
%%%Cálculo del factor de degradación de retardo%%%
Ie=1; %Para codec G.722.2
B=129; %Para WB
BurstR=1; %Rec.G.107
Bpl=13; %Para codec G.722.2 a 23.05 kbps
Id = 0;
if d > 100
    X = log2(d/100);
    Id = 25*((1+X^6)^(1/6) - 3*(1 + (X/3)^6)^(1/6) + 2);
end
%%%Cálculo del factor de degradación del equipo%%%
Ief = Ie + (B-Ie).*Pp1./(Pp1./BurstR + Bpl);
%%%Cálculo del factor R%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
R = 93.2 - Id - Ief
%Conversión del factor R a MOS
m = 1;
if R > 0
    m = 1 + 0.035*R + R*(R-60)*(100-R)*7*10^(-6);
end
```

Figura 3.5 Variante para el cálculo del MOS según el modelo E.

3.4 Procedimiento de evaluación: juntar las piezas

Se tienen ocho situaciones enunciadas en la Tabla 3.1, para distintos valores esperados de tamaño de ráfaga y su correspondiente probabilidad de pérdidas. Si la probabilidad de pérdidas es menor entonces habrá menos cantidad de ráfagas y viceversa. A estas ocho

situaciones se le aplicarán los cinco intercaladores descritos en el Capítulo 2. El procedimiento general será explicado a continuación.

Primero se pasan las entradas de q y p obtenidas en forma de semilla a la función de la Figura 3.1, para obtener la probabilidad de pérdida de paquetes con y sin PLC (Pl y Plc); el tamaño de ráfagas con y sin PLC (Eb y Ebc); el tamaño de ráfagas con y sin PLC (Br y Brc) y por último las cadenas de 1s y 0s que simulan la secuencia de paquetes con y sin PLC (*cadena* y *cadena_{plc}*). Después, la variable *cadena* se le pasa de entrada a la función de intercalado en la cual se activa uno de los cinco intercaladores. De esta forma se obtienen los mismos parámetros anteriores, pero después de aplicar el intercalador seleccionado. Por último se aplica el cálculo del Modelo E para la obtención de los valores R y MOS . Lo más significativo en este paso es que se tiene que colocar la demora correspondiente a cada intercalador, tal y como se muestra en la Tabla 2.6. Además se deben corresponder los valores de probabilidad de pérdida de paquetes con el caso para el cual se está calculando R y MOS .

La manualidad hace de este procedimiento una tarea engorrosa de toma de muestras y recopilación de resultados. Esto es algo que debe intentarse mejorar si se continúa con este tema. A continuación se exponen y se analizan los resultados según el orden de semillas seleccionadas, expuesto en la Tabla 3.1.

3.5 Análisis de los resultados para $Eb = 3$

El primero de los ocho experimentos con $Eb = 3$ es para una razón de pérdida de paquetes de 0.5% con el I-3x3. Cuando se sintetiza la cadena que simula la secuencia de paquetes, el resultado es el de la Tabla 3.2. Con la intención de entender los resultados apropiadamente, se explicará esta primera tabla como ejemplo.

Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
2999	2007	6335	1533	0.51%	0.45%	0.51%	0.24%	
Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
3.04	4.0483	1.4391	2.8147	87.37	87.92	86.02	88.53	1.1655
				4.27	4.28	4.23	4.30	0.0321

Tabla 3.2 Resultados para $Eb = 3$ y $Pl = 0.5\%$ con el intercalador I-3x3.

La simulación del modelo de síntesis de la secuencia de paquetes arroja un total de 2999 ráfagas, de las cuales 2007 son ráfagas de más de un paquete, o sea, son ráfagas de verdad.

Si solo se intercalase la secuencia original el total de secuencias de pérdida será de 6335, pero si a esto se le incorpora PLC disminuye a 1533. Este último valor es el menor de todos los valores de secuencias de pérdidas, cumpliendo el pronóstico esperado.

Por la parte del tamaño de las ráfagas, se tiene que en un inicio se mantiene cerca del valor de semilla con $E_b = 3.04$. Al aplicar PLC se eliminan todas las ráfagas de un paquete, al menos virtualmente, porque PLC realmente no recupera el paquete perdido sino que oculta su efecto negativo; lo cual a los efectos de la calidad puede tomarse como que las pérdidas de un solo paquete pueden ser eliminadas. Como tal, la media del tamaño de las ráfagas crece a 4.05. Si solo se emplease intercalado, se esparcirían las ráfagas en ráfagas más pequeñas, es por eso que $E_{bi} = 1.44$. Con el empleo conjunto de intercalado y PLC, el tamaño de ráfaga será $E_{bic} = 2.81$, lo cual es un valor entre E_{bi} y E_{bc} .

La probabilidad de pérdida de paquetes es el parámetro que menos cambia, pues con el mecanismo de intercalado solo se desagregan los paquetes para servírselos a PLC, pero la cantidad de paquetes perdidos es la misma. Se tiene la probabilidad inicial de 0.51% y después de aplicar PLC 0.45%. Con solo usar intercalado se mantiene la probabilidad inicial de 0.51% y cuando se usan conjuntamente intercalado y PLC se obtiene el valor virtualmente bajo de 0.24%.

Los valores de R y MOS son tales que solo usar intercalado solo empeora el resultado, es decir que la percepción de la calidad es menor según el Modelo E. Cuando se usa solo PLC se alcanza un R de 87.92, algo superior al 87.37; el MOS es 4.28, superior al 4.27. La mayor ganancia se obtiene con la utilización conjunta de intercalado y PLC, con lo cual se obtiene un $R_{ic} = 88.53$ para una ganancia de factor R de 1.17 ($G_{r-ric} = 1.17$). Todos los valores de R y de MOS están en este caso dentro del rango de usuarios *satisfechos*. La ganancia no es tal que se logre saltar a la categoría de *muy satisfecho*, pero es un buen indicador de impacto dado a que puede crecer el valor de R con el empleo conjunto de intercalador y PLC. Una vez que se interpretó el caso de muestra para $E_b = 3$ y $Pl = 0.5\%$ con el intercalador I-3x3, se presentarán todos los resultados de esta serie con el resto de los intercaladores.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores para el resto de los intercaladores. El comportamiento de la cantidad de ráfagas, el tamaño medio de ráfagas, la probabilidad de pérdidas y R es el mismo dentro de la tabla, es decir las tendencias de estos valores se comportan de igual

manera que con el caso de muestra explicado anteriormente, salvo los valores de Ric que no indican mejoría en QoE y por consiguiente las ganancias son negativas.

I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	2973	1969	7119	1210	0.50%	0.44%	0.50%	0.17%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0118	4.0376	1.2578	2.5165	87.46	88.01	82.20	85.29	-2.1687
					4.27	4.29	4.10	4.21	-0.0646
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3083	2029	6609	1904	0.52%	0.46%	0.52%	0.26%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0525	4.1188	1.424	2.4716	87.28	87.83	82.02	84.43	-2.8433
					4.27	4.28	4.10	4.18	-0.0867
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	2939	1935	7440	899	0.48%	0.43%	0.48%	0.12%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	2.9486	3.9597	1.1648	2.3637	87.64	88.10	77.51	80.89	-6.7466
					4.28	4.29	3.93	4.06	-0.2197
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3064	2035	6446	1755	0.50%	0.44%	0.50%	0.24%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	2.9164	3.8855	1.3863	2.4188	87.46	88.01	77.32	79.74	-7.7151
					4.27	4.29	3.92	4.01	-0.2576

Tabla 3.3 Resultados para $Eb = 3$ y $Pl = 0.5\%$ con el resto de los intercaladores.

Sobresale en resumen el comportamiento del valor de R , con la tendencia a bajar en la medida que aumenta la dimensión del intercalador, es decir que a los intercaladores del fondo de la tabla le corresponden los menores valores de R y por lo tanto las ganancias más negativas. Esto es algo esperado y se justifica por el aumento de la demora producto al funcionamiento del intercalador. La única ganancia de calidad se obtuvo con I-3x3 ($G_{r-ric} = 1.17$), por lo tanto este es el único intercalador que valdría la pena utilizar, en caso de que se justifique su empleo; pues el costo introducido debido a su realización dentro del sistema de comunicaciones puede que no justifique su necesidad en términos de esa ganancia de 1.17 ¿Qué pasaría si aumenta la probabilidad de pérdida de paquetes?

Para el caso con semilla $Pl = 1.0\%$ se tienen los resultados de la Tabla 3.4. El valor de R más alto es de 86.11, inferior al 88.53 de la Tabla 3.2. Al aumentar la probabilidad de pérdida de paquetes aumenta la probabilidad de ráfagas; al dejar el tamaño de ráfaga fijo, lo que aumenta es la ocurrencia de estas dentro de la secuencia de transmisión.

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	6021	4000	12612	3184	1.02%	0.91%	1.02%	0.50%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0478	4.0825	1.455	2.8024	82.89	83.83	82.54	86.11	3.2260
					4.13	4.16	4.12	4.23	0.1043
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	6070	4021	14382	2665	1.02%	0.91%	1.02%	0.37%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0325	4.0681	1.2799	2.5103	82.89	83.83	77.63	83.40	0.5100
					4.13	4.16	3.93	4.15	0.0174
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	6173	4046	13164	3650	1.03%	0.91%	1.03%	0.50%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0062	4.0608	1.4097	2.4775	82.80	83.83	77.55	82.20	-0.5982
					4.13	4.16	3.93	4.10	-0.0209
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	6083	4066	15604	2066	1.02%	0.91%	1.02%	0.27%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0143	4.0135	1.1751	2.3224	82.89	83.83	72.75	79.46	-3.4303
					4.13	4.16	3.72	4.00	-0.1250
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	6054	3969	12860	3586	1.00%	0.88%	1.00%	0.48%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	2.9627	3.9937	1.3947	2.4155	83.06	84.08	72.92	77.51	-5.5538
					4.13	4.17	3.73	3.93	-0.2079

Tabla 3.4 Resultados para $Eb = 3$ y $Pl = 1.0\%$ con los cinco intercaladores.

Al haber más ráfagas el impacto de los intercaladores es más positivo, es por eso que las ganancias son mayores. En este caso solo en I-3x3 se mantiene siempre el factor R dentro del rango *satisfecho*. De nuevo la mayor ganancia está en I-3x3 ($G_{r-ric} = 3.23$), superior a la ganancia de I-3x4 ($G_{r-ric} = 0.51$); con el resto de los intercaladores las ganancias son

negativas, de hecho pérdidas en la QoE. El impacto del mecanismo hace que R mejore en I-3x3 e I-3x4. Si se tratase de seleccionar el mejor candidato, de nuevo es I-3x3: tiene la mayor ganancia de todas.

Al aumentar la probabilidad de pérdidas semilla a $Pl = 2.0\%$ por supuesto que empeora la QoE en términos de R , tal y como se aprecia en la Tabla 3.5. El valor más alto es de 82.31 correspondiente al aplicar el I-3x3 con PLC, sobre un tamaño medio de ráfaga 2.76. Con respecto al caso anterior de la Tabla 3.4, el impacto positivo del uso de los intercaladores es superior y se puede ver en las ganancias G_{r-ric} .

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	12074	7962	24897	6045	1.97%	1.75%	1.97%	0.93%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	2.9435	3.9472	1.4275	2.7606	75.36	77.01	74.01	82.31	6.9531
					3.84	3.91	3.78	4.11	0.2711
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	12002	8073	28639	5180	2.01%	1.79%	2.01%	0.71%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.018	4.0001	1.2648	2.4639	75.06	76.71	69.80	80.31	5.2500
					3.82	3.89	3.59	4.04	0.2112
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	11914	7848	25358	7152	2.00%	1.77%	2.00%	0.98%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0161	4.0607	1.4171	2.4787	75.13	76.86	69.88	77.97	2.8397
					3.83	3.90	3.59	3.95	0.1176
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	12051	7962	30276	4087	1.98%	1.76%	1.98%	0.53%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	2.9636	3.972	1.1796	2.3306	75.28	76.94	65.15	77.05	1.7701
					3.83	3.90	3.36	3.91	0.0740
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	11984	8077	25728	7382	2.01%	1.79%	2.01%	0.99%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0186	3.995	1.4061	2.4152	75.06	76.71	64.92	73.01	-2.0538
					3.82	3.89	3.35	3.73	-0.0898

Tabla 3.5 Resultados para $Eb = 3$ y $Pl = 2.0\%$ con los cinco intercaladores.

Debido al empeoramiento del canal, ninguno de los casos mantiene siempre la categoría *satisfecho* con todas las variantes de R . Los dos primeros intercaladores I-3x3 e I-3x4, logran saltar de grado de satisfacción hasta *satisfecho*. La mayor ganancia continúa siendo en I-3x3 ($G_{r-ric} = 6.95$). Solo hay pérdidas en el último caso con el empleo de I-5x3, con el que introduce una demora de 180ms.

El último experimento es para el peor caso de probabilidad de pérdida de paquetes $Pl = 6.0\%$. El resultado de agravar tanto el canal es que siempre hay ganancia de R cuando se usa intercalador y PLC, con respecto a no hacer nada.

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	36196	24289	74306	19287	6.08%	5.42%	6.08%	3.02%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0227	4.0143	1.4724	2.8201	51.41	54.53	50.07	66.72	15.3130
					2.65	2.81	2.58	3.44	0.7907
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	35907	23941	83111	16497	5.99%	5.33%	5.99%	2.29%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0034	4.0047	1.2976	2.4991	54.54	54.98	46.57	67.77	13.2350
					2.81	2.84	2.40	3.49	0.6769
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	36314	24209	75996	22422	6.08%	5.41%	6.08%	3.10%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0139	4.0209	1.4402	2.4919	51.41	54.59	46.15	62.30	10.8860
					2.65	2.82	2.37	3.22	0.5690
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	36133	24154	89760	14560	6.07%	5.40%	6.07%	1.89%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0235	4.0271	1.217	2.338	51.46	54.63	41.32	65.82	14.3570
					2.65	2.82	2.13	3.40	0.7434
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	35765	23877	74821	22379	5.97%	5.31%	5.97%	3.06%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	3.0044	4.0023	1.4361	2.4581	51.92	55.08	41.78	57.68	5.7550
					2.68	2.84	2.15	2.98	0.3029

Tabla 3.6 Resultados para $Eb = 3$ y $Pl = 6\%$ con los cinco intercaladores.

El primer intercalador sigue siendo el de mejor ganancia con $G_{r-ric} = 15.31$, sin embargo el de mejor R en toda la tabla es el I-3x4 con $R = 67.77$. Con el empleo de ambos se salta de categoría en la interpretación de R desde *casi todos los usuarios insatisfechos* hasta *muchos usuarios insatisfechos*, pero gusta más el de mayor R , es decir I-3x4.

La probabilidad de pérdidas de 6.0% es una situación muy particular en la comunicación. Un proceso con $Pl = 6.0\%$ sostenido, no es tan interesante pues casi todos los usuarios estarían insatisfechos. Sin embargo, en momentos bien determinados puede darse este caso, por ejemplo cuando el usuario se encuentra en un umbral límite de degradación de la señal muy cerca del evento disparador del HO. Esto hace que realizar el experimento con $Pl = 6.0\%$ sea de interés, pues se puede desencadenar el intercalador más PLC y lograr ganancia en la QoE.

Con una probabilidad de pérdida de paquetes superior al 6.0%, la degradación es tal que ya no tiene sentido la comunicación. Por lo tanto realizar más experimentos aumentando Pl tampoco tiene sentido ¿Cuáles serían los resultados si se realizan estos mismos experimentos con un tamaño semilla de ráfaga superior, por ejemplo 5?

3.6 Análisis de los resultados para $Eb = 5$

Si se aumenta el tamaño de ráfaga insertado como semilla y se usa $Pl = 0.5\%$, disminuyen los paquetes perdidos de forma aislada con respecto al experimento con igual Pl pero con $Eb = 3$. Esto es fácilmente comprobable gracias a la comparación de los valores de Br entre las Tablas 3.7, 3.2 y 3.3.

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados del primer experimento. Es notable el hecho de que el mejor valor de $R = 8.92$ no se consigue con el empleo de intercalador, sino que se consigue con solo usar PLC. Solo existe ganancia de QoE con el I-3x3. En este sentido se mantiene que dada la baja razón de pérdidas no se justifica el empleo de intercalador. Incluso cuando existe ganancia se obtiene mejor resultado usando solamente PLC.

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	1784	1413	4417	1551	0.47%	0.45%	0.47%	0.31%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.7797	5.7721	1.9305	3.6499	87.73	87.92	86.39	87.87	0.1420
					4.28	4.28	4.24	4.28	0.0039
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	1831	1465	5501	1570	0.49%	0.47%	0.49%	0.28%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.8602	5.8246	1.6177	3.1643	87.55	87.73	82.29	84.24	-3.3100
					4.27	4.28	4.11	4.17	-0.1008
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	1811	1455	4679	2026	0.51%	0.49%	0.51%	0.36%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0221	6.0062	1.9438	3.1797	87.37	87.55	82.11	83.49	-3.8766
					4.27	4.27	4.10	4.15	-0.1204
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	1766	1426	6262	1515	0.50%	0.49%	0.50%	0.24%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.1404	6.1276	1.4497	2.8587	87.46	87.55	77.32	79.74	-7.7200
					4.27	4.27	3.92	4.01	-0.2578
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	1761	1427	4624	2158	0.50%	0.48%	0.50%	0.36%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0999	6.0596	1.9423	3.019	87.46	87.64	77.32	78.62	-8.8450
					4.27	4.28	3.92	3.97	-0.3013

Tabla 3.7 Resultados para $Eb = 5$ y $Pl = 0.5\%$ con los cinco intercaladores.

Con un aumento de $Pl = 1.0\%$ ya se obtiene el mejor valor de R usando intercalado y PLC. Se trata del $R = 84.67$ de la Tabla 3.8, correspondiente al I-3x3. No se altera el rango de o se altera el rango de R fuera de satisfecho y la ganancia es solo de 1.44, por lo que habría que ver si este resultado es suficiente para justificar el uso del intercalador. Casi seguro que no, pues con solo emplear PLC se obtiene 83.57, algo no muy distinto de usar además intercalado. El resto de los intercaladores en este experimento degradaron la QoE con respecto a la situación original.

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3577	2874	8839	3171	0.98%	0.94%	0.98%	0.66%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9284	5.8894	1.9945	3.772	83.23	83.57	81.88	84.67	1.4390
					4.14	4.15	4.09	4.19	0.0476
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3529	2817	10658	3021	0.97%	0.93%	0.97%	0.54%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9377	5.9329	1.6349	3.24	83.31	83.65	78.05	81.84	-1.4724
					4.14	4.15	3.95	4.09	-0.0512
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3515	2812	9201	3983	0.96%	0.92%	0.96%	0.67%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9209	5.9011	1.8799	3.0326	83.40	83.74	78.14	80.67	-2.7320
					4.15	4.16	3.95	4.05	-0.0968
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3596	2873	12336	3037	1.00%	0.96%	1.00%	0.49%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0273	6.0407	1.4655	2.8907	83.06	83.40	72.92	77.41	-5.6460
					4.13	4.15	3.73	3.92	-0.2116
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	3506	2813	9118	4158	0.97%	0.93%	0.97%	0.70%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9929	5.9765	1.9198	3.0171	83.31	83.65	73.18	75.52	-7.7860
					4.14	4.15	3.74	3.84	-0.2985

Tabla 3.8 Resultados para $Eb = 5$ y $Pl = 1.0\%$ con los cinco intercaladores.

Con un aumento de $Pl = 2.0\%$ se obtiene otra vez el mejor $R = 78.81$ con el empleo de I-3x3 y PLC. Como ocurren más ráfagas de pérdidas el impacto de los intercaladores es más positivo, de hecho ya hay dos intercaladores con ganancia. Al I-3x3 le corresponde el valor $G_{r-ric} = 3.60$, el más alto de todos, pero ni siquiera con este se pudo sacar la interpretación hacia el rango de *satisfecho*. Con el empleo de I-4x3, I-3x5 e I-5x3 se degrada la QoE (ver Tabla 3.9).

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	5860	17995	6424	5860	1.99%	1.91%	1.99%	1.35%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.8749	1.9913	3.7769	5.8749	75.21	75.80	73.86	78.81	3.6010
					3.83	3.86	3.77	3.98	0.1474
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	7213	5709	21765	6517	2.00%	1.92%	2.00%	1.15%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9917	6.0433	1.6543	3.1851	75.13	75.73	69.88	76.54	1.4090
					3.83	3.85	3.59	3.89	0.0593
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	7258	5784	18626	7981	1.99%	1.91%	1.99%	1.40%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9328	5.935	1.9222	3.1521	75.21	75.80	69.95	74.50	-0.7119
					3.83	3.86	3.59	3.80	-0.0306
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	7122	5712	24635	6061	2.01%	1.93%	2.01%	0.98%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0837	6.0917	1.4697	2.9091	75.06	75.65	64.92	73.09	-1.9690
					3.82	3.85	3.35	3.74	-0.0860
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	Pl	Plc	Pli	Plic	
	7168	5760	18781	8675	1.99%	1.91%	1.99%	1.43%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0018	5.98	1.909	2.968	75.21	75.80	65.07	69.38	-5.8310
					3.83	3.86	3.36	3.57	-0.2631

Tabla 3.9 Resultados para $Eb = 5$ y $Pl = 2.0\%$ con los cinco intercaladores.

Para el caso particular y extremo de $Pl = 6.0\%$ casi todos los usuarios están insatisfechos, cuando se logra la comunicación. Es esperado que la situación sea peor que con la misma probabilidad y tamaño de ráfaga igual 3 (ver Tabla 3.6). El mejor resultado es $R = 59.79$ correspondiente al I-3x4 con PLC, aunque la mayor ganancia es la de I-3x3. Excepto el intercalador I-5x3 todos dan ganancia del factor R, lo cual tiene sentido pues se trata de un caso extremo. Al igual que en la Tabla 3.6, los resultados del experimento que se exponen en la Tabla 3.10 muestran a I-3x4 como mejor candidato, aunque en el caso de $Eb = 5$ sea por bien poco.

I-3x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	21729	17345	53091	19547	6.04%	5.80%	6.04%	4.18%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0074	6.0203	2.0494	3.8503	51.60	52.71	50.25	59.71	8.1100
					2.66	2.72	2.59	3.08	0.4258
I-3x4	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	21598	17359	64521	19672	6.00%	5.76%	6.00%	3.50%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9965	5.9724	1.6725	3.2058	51.78	52.90	46.52	59.79	8.0100
					2.67	2.73	2.39	3.09	0.4205
I-4x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	21401	17095	54563	24029	5.94%	5.70%	5.94%	4.24%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	4.9937	5.9997	1.9587	3.1769	52.06	53.18	46.80	55.46	3.4020
					2.68	2.74	2.41	2.86	0.1793
I-3x5	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	21528	17159	72121	18942	6.01%	5.76%	6.01%	3.05%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0231	6.0474	1.4994	2.9014	51.73	52.90	41.60	57.74	6.0100
					2.67	2.73	2.14	2.98	0.3163
I-5x3	Br	Brc	Bri	Bric	PI	Plc	Pli	Plic	
	21725	17410	55772	26130	6.04%	5.80%	6.04%	4.40%	
	Eb	Ebc	Ebi	Ebic	R	Rc	Ri	Ric	Gr-ric
	5.0075	6.0007	1.9506	3.0289	51.60	52.71	41.46	49.70	-1.9040
					2.66	2.72	2.14	2.56	-0.1001

Tabla 3.10 Resultados para $Eb = 5$ y $Pl = 6.0\%$ con los cinco intercaladores.

3.7 Consideraciones finales del capítulo.

Los modelos basados en matrices brindan una manera práctica de obtener los resultados finales. La utilización de semillas para la generación de la secuencia de paquetes, permite asemejar esta secuencia a la realidad de un servicio de voz sobre paquetes. Resulta interesante como los resultados muestran que no siempre es útil usar intercaladores, de hecho en muchos casos estos empeoran las condiciones. De manera general el I-3x3 es que resulta útil, pero el empeoramiento de las condiciones conduce a que el intercalador siguiente I-3x4 brinda

mejores resultados. La utilización de intercaladores tiene más sentido cuando peores son las condiciones, hasta el límite posible de mantener la comunicación.

CONCLUSIONES

Como conclusiones del trabajo se tienen:

1. Dentro de los modelos estándares para la evaluación de la calidad de servicio o de la experiencia de la calidad, el Modelo E es un buen candidato debido a su naturaleza analítica, fácil realización en software y alto grado de presencia en publicaciones serias. Aunque el Modelo E no es del todo exacto, sí puede entregar un margen de justicia útil para lograr el objetivo propuesto siempre que se elijan los parámetros apropiadamente. Los autores precisan una correspondencia de hasta un 80% con pruebas subjetivas y que además, la tendencia en una correcta utilización del modelo es a dar resultados inferiores a lo real. Por otro lado, de los mecanismos para enfrentar las ráfagas de pérdidas de paquetes, los intercaladores se manifiestan en la bibliografía como un buen candidato; aunque estos no hayan sido analizados en profundidad en cuanto a cuáles usar en los diferentes escenarios de pérdidas. El orden de los intercaladores está en función de la ráfaga de pérdida de paquetes. Se analizaron cinco intercaladores en cuanto a su estructura y su papel dentro del problema. Es importante tener en cuenta que los parámetros elegidos para el Modelo E así como las demoras analizadas para cada intercalador son fundamentales para obtener resultados justos; esa es la razón de ser de este modelo analítico.
2. Para modelar la pérdida de paquetes dentro de una secuencia de transmisión se simuló la secuencia en un vector de ceros para representar los paquetes recibidos y unos para los paquetes perdidos. Con un generador pseudo-aleatorio se generó la secuencia, atendiendo a semillas que representaban el tamaño de la ráfaga esperada y la probabilidad de pérdida de paquetes. De esta forma el 2-MC de la bibliografía, determinó una secuencia de transmisión que fue utilizada para aplicar los intercaladores y obtener su correspondiente evaluación de impacto en la QoE con el Modelo E. Se aplicaron los distintos intercaladores a esta secuencia de paquetes como máscaras de matrices de esparcimiento. A cada caso se le aplicó el modelo de evaluación con los parámetros señalados en el Capítulo 2, ajustado a un caso de VoIP con códec AMR-WB. Se tuvo especial cuidado en respetar la demora introducida con cada intercalador. El Modelo E fue implementado con aproximaciones y valores por defecto, bien documentado en la Recomendación G.107 y en la bibliografía consultada.

3. Los resultados muestran que en los peores casos de pérdidas, los intercaladores justifican más su utilización pues mejoran la QoE en términos de R . Este es un resultado esperado desde el análisis bibliográfico. Se analizó el resultado de no emplear intercalado ni PLC, emplear solo PLC, emplear solo intercalado y por último emplear ambos. Esto brindaría una gama de valores de R que permiten comparar dentro de un mismo caso y entre varios casos el desempeño del mecanismo. Los mejores resultados se obtienen casi siempre con el I-3x3. Cuando la pérdida de paquetes es de baja razón, por ejemplo 0.5%, el impacto del mejor de los intercaladores no mejora significativamente R ; habría que ver si vale la pena usarlo en realidad en términos del costo de su realización ante la ganancia de tenerlo. En la medida que aumenta Pl , en I-3x3 mejora su resultado. Se obtiene una ganancia de R de hasta 6.95 con ráfagas de tamaño promedio 3 y una ganancia de 3.6 para ráfagas de tamaño promedio 5. En los casos extremos de $Pl = 6.0\%$ el mejor intercalador es I-3x4 porque, aunque tiene menor ganancia que I-3x3, alcanza mayor valor de R .

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de dar seguimiento al presente trabajo se proponen las siguientes recomendaciones.

- Mejorar los modelos de Matlab para optimizar la recolección de los resultados. Quizás a través de una interfaz gráfica de usuario que recoja todas las funciones.
- Modelar el mismo sistema de pérdidas sobre una secuencia de paquetes de audio, con el fin de utilizar modelos de referencia como PESQ, POLQA o ViSQOL.
- Obtener gráficas de alta significación con los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Lee and J. Kim, "A Handover Time Negotiation for Seamless Service in IEEE 802.16 E," in *Proc. IEEE MILCOM*, 2008, pp. 17-19.
- [2] H. J. Lee and J. H. Kim, "A Handover Mechanism Considering the Abstracted R-Factor," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, pp. 2687-2696, 2014.
- [3] A. Botta and A. Pescapé, "IP packet interleaving for UDP bursty losses," *The Journal of Systems and Software*, pp. 177-191, 2015.
- [4] M. Soloducha and A. Raake, "Speech quality of VoIP: bursty packet loss revisited," ed. Berlin, Alemania, 2014, p. 4.
- [5] ITU-T, "The E-model: a computational model for use in transmission planning. Recommendation ITU-T G.107," vol. G.107, ed. Geneva, Switzerland, 2015, p. 30.
- [6] E. Liotou, D. Tsolkas, N. Passas, and L. Merakos. (2015, Quality of experience management in mobile cellular networks: key issues and design challenges. *Communications Magazine, IEEE 53(7)*, 145-153.
- [7] R. Sanchez-Iborra, M.-D. Cano, and J. Garcia-Haro, "Revisiting VoIP QoE assessment methods: are they suitable for VoLTE?," *Network Protocols and Algorithms*, vol. 8, pp. 39-57, 2016.
- [8] S. Möller and A. Raake, *Quality of Experience: Advanced Concepts, Applications and Methods*: Springer International Publishing, 2014.
- [9] A. Mellouk and A. Cuadra-Sanchez, *Quality of Experience Engineering for Customer Added Value Services: From Evaluation to Monitoring*: Wiley, 2014.
- [10] M. Fiedler, T. Hossfeld, and P. Tran-Gia, "A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service," *IEEE Network*, vol. 24, pp. 36-41, 2010.
- [11] P. Reichl, B. Tuffin, and R. Schatz, "Logarithmic laws in service quality perception: where microeconomics meets psychophysics and quality of experience," *Telecommunication Systems*, vol. 52, pp. 587-600, 2013.
- [12] P. Reichl, S. Egger, R. Schatz, and A. D'Alconzo, "The logarithmic nature of QoE and the role of the Weber-Fechner law in QoE assessment," in *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [13] S. Baraković and L. Skorin-Kapov, "Survey and challenges of QoE management issues in wireless networks," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2013, 2013.
- [14] M. Varela and J.-P. Laulajainen, "QOE-driven mobility management—Integrating the users' quality perception into network—Level decision making," in *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2011 Third International Workshop on*, 2011, pp. 19-24.

-
- [15] K. Piamrat, C. Viho, J.-M. Bonnin, and A. Ksentini, "Quality of experience measurements for video streaming over wireless networks," in *Information Technology: New Generations, 2009. ITNG'09. Sixth International Conference on*, 2009, pp. 1184-1189.
- [16] G. Rubino, P. Tirilly, and M. Varela, "Evaluating users' satisfaction in packet networks using random neural networks," in *Artificial Neural Networks-ICANN 2006*, ed: Springer, 2006, pp. 303-312.
- [17] A. Hines, J. Skoglund, A. Kokaram, and N. Harte, "Robustness of speech quality metrics to background noise and network degradations: Comparing ViSQOL, PESQ and POLQA," in *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2013, pp. 3697-3701.
- [18] J. G. Beerends, C. Schmidmer, J. Berger, M. Obermann, R. Ullmann, J. Pomy, *et al.*, "Perceptual objective listening quality assessment (POLQA), the third generation ITU-T standard for end-to-end speech quality measurement part I—Temporal alignment," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 61, pp. 366-384, 2013.
- [19] I. Rec, "P. 863," Perceptual Objective Listening Quality Assessment (POLQA)," *International Telecommunication Union, CH-Geneva*, 2011.
- [20] S. Möller, A. Raake, N. Kitawaki, A. Takahashi, and M. Wältermann, "Impairment factor framework for wide-band speech codecs," *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1969-1976, 2006.
- [21] A. Takahashi, H. Yoshino, and N. Kitawaki, "Perceptual QoS assessment technologies for VoIP," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, pp. 28-34, 2004.
- [22] B. Web and D. Lin, "Transformation-based reconstruction for real-time voice transmissions over the Internet," *Multimedia, IEEE Transactions on*, vol. 1, pp. 342-351, 1999.
- [23] L.-J. Chen, T. Sun, M. Sanadidi, and M. Gerla, "Improving wireless link throughput via interleaved FEC," in *Computers and Communications, 2004. Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on*, 2004, pp. 539-544.
- [24] F. Liu, T. H. Luan, X. S. Shen, and C. Lin, "Dimensioning the packet loss burstiness over wireless channels: a novel metric, its analysis and application," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 14, pp. 1160-1175, 2014.
- [25] H. Cui, D. Qian, X. Zhang, Y. Wu, and L. Wang, "Network coding-based rate allocation and bursty loss protection for video streaming over wireless multi-hop networks," in *Computer and Information Technology (CIT), 2012 IEEE 12th International Conference on*, 2012, pp. 684-689.
- [26] F. Casu, J. Cabrera Quesada, F. Jaureguizar Núñez, and N. García Santos, "Low latency LDGM code for multimedia-packet stream in bursty packet loss networks," 2012.
- [27] B. Oztas, M. T. Pourazad, P. Nasiopoulos, and V. Leung, "A study on the HEVC performance over lossy networks," in *Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2012 19th IEEE International Conference on*, 2012, pp. 785-788.

-
- [28] L. Wang and E. Gelenbe, "An implementation of voice over ip in the cognitive packet network," in *Information Sciences and Systems 2014*, ed: Springer, 2014, pp. 33-40.
- [29] T. Nagano and A. Ito, "Packet loss concealment of voice-over IP packet using redundant parameter transmission under severe loss conditions," *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, vol. 5, pp. 286-295, 2014.
- [30] D. Han, A. Anand, A. Akella, and S. Seshan, "RPT: Re-architecting loss protection for content-aware networks," in *Presented as part of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 12)*, 2012, pp. 71-84.
- [31] P. M. A. Delgado, "Impacto de los mecanismos de handover en la calidad percibida por usuarios de servicios de voz en LTE," Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2015.
- [32] L. Norell, E. Parsons, and P. Synnergren, "Telephony Services over LTE end-to-end," *Ericsson Review*, pp. 34-38, 2010.
- [33] R. G. Cole and J. H. Rosenbluth, "Voice over IP performance monitoring," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 31, pp. 9-24, 2001.
- [34] ITU-T, "Transmission impairments due to speech processing. Recommendation ITU-T G.113," ed. Geneva, Switzerland, 2007, p. 18.
- [35] ITU-T, "G. 722.2: Wideband Coding of Speech at Around 16 kbit/s Using AMRWB," vol. G.722.2, ed. Geneva, Switzerland: ITU-T, 2003.
- [36] x-fabric.com. (2008, 10/06/2016). *E-model calculation tool*. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/>