

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIE**  
Facultad de  
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y  
Electrónica

Título del Trabajo: "Influencia de los mecanismos PSM en la QoS  
para usuarios de servicios telefónicos en redes LTE/LTE-A."

Autor: David Ernesto Ruiz Guirola

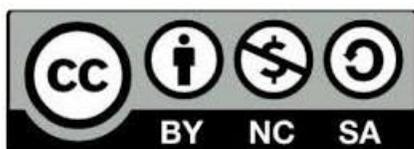
Tutor: Msc. Carlos Rodríguez López

Santa Clara, Junio de 2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

*“The two most important days in your life are the day you are born and the day you find out why”*

*Mark Twain*

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión.

A toda mi familia por su esfuerzo y ayuda en mi educación.

A mi tutor que ha sido como un padre en esta etapa tan desafiante.

A mis amigos por su contribución y por los momentos inolvidables que hemos vivido.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos los que de una manera u otra han dado su aporte a la confección de este trabajo, muchas gracias a todos.

## TAREA TÉCNICA

Para lograr los objetivos propuestos en el presente trabajo la investigación sigue una línea de trabajo definida por el siguiente grupo de tareas:

1. Revisión bibliográfica de la temática de investigación.
2. Estudio de modelos utilizados para medir la QoE y elección de un modelo definitivo.
3. Estudio de parámetros que se afectan durante la aplicación del mecanismo PSM y su relación con el modelo elegido para la evaluación de la QoE.
4. Definición de un escenario idóneo para evaluar, mediante simulación, la efectividad de diferentes algoritmos PSM.
5. Programación de algoritmos y realización de experimentos.
6. Análisis y discusión de resultados.
7. Conformación del informe.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

El aumento de la gama de servicios de banda ancha a los usuarios móviles ha producido un lógico incremento del consumo de energía por parte de los dispositivos móviles, afectando la autonomía de las baterías y por tanto la disponibilidad de los terminales. Una solución efectiva para el ahorro de energía es implementar un modo de ahorro de potencia (Power Saving Mode, PSM). No obstante, el verdadero reto es lograr sustentar un deseado nivel de calidad de la experiencia (QoE, Quality of Experience) en servicios de voz sobre IP (VoIP) mientras, simultáneamente, se consigue ahorrar energía. En este proyecto se realiza un análisis del rendimiento de dos esquemas PSM, uno que utiliza un mecanismo con mezcla de ciclos cortos y largos y otro que utiliza un mecanismo multiciclo. Basado en este análisis, se propone un mecanismo PSM que asegura una mejora en cuanto al ahorro de energía y al mismo tiempo mantiene los niveles de QoE en un rango permisible, además de tener en cuenta el efecto de las pérdidas en ráfagas para la percepción de la calidad. Se modela un canal de comunicación para validar la efectividad del mecanismo propuesto y los resultados obtenidos certifican la eficacia de este, permitiendo un ahorro de hasta el 50% en comparación con los demás esquemas mientras asegura un deseado nivel de QoE.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
1.1 Relación QoE-PSM.....	5
1.1.1 QoE .....	7
1.1.2 Modo de Ahorro de Potencia (PSM) .....	8
1.1.3 Modo de Ahorro de Potencia para servicios de VoIP.....	10
1.2 Tráfico de VoIP.....	10
1.2.1 Deterioro de la calidad en VoIP.....	12
1.2.2 Sesión VoIP .....	13
1.2.3 Mecanismos de estimación de la calidad .....	14
1.3 Cadena de Markov .....	19
1.3.1 Cadena de Markov con recompensa .....	19
<b>CAPÍTULO 2. MODO DE AHORRO DE POTENCIA PARA SERVICIOS DE VoIP 24</b>	
2.1 Modelo del sistema .....	24
2.1.1 Modelo PSM .....	25
2.1.2 Modelo de enlace y de sesión VoIP.....	25
2.1.3 Modelo de evaluación de la calidad.....	26

2.1.4	Modelo de consumo de energía .....	30
2.2	Evaluación del comportamiento.....	30
2.2.1	Análisis del retardo promedio.....	31
2.2.2	Análisis de la PLR percibida (PLR <sub>p</sub> ).....	32
2.2.3	Análisis del consumo de potencia.....	32
2.2.4	Análisis del MOS.....	33
2.3	Algoritmos PSM.....	33
2.3.1	Mecanismo PSM usando DRX con mezcla de ciclos cortos y largos. ....	33
2.3.2	Mecanismo PSM usando DRX multiciclo.....	35
2.3.3	Mecanismo PSM propuesto.....	39
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		41
3.1	Generalidades de los experimentos.....	41
3.1.1	Mecanismo PSM usando DRX con mezcla de ciclos cortos y largos .....	42
3.1.2	Mecanismo PSM usando DRX multiciclo.....	43
3.1.3	Mecanismo PSM propuesto.....	44
3.2	Desarrollo de los experimentos.....	44
3.2.1	Experimento 1.....	44
3.2.2	Experimento 2.....	54
3.3	Consideraciones del capítulo.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		61
Conclusiones.....		61
Recomendaciones .....		62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		63

## INTRODUCCIÓN

Según [1] el número de suscripciones a las comunicaciones móviles supera los 7500 millones, de esa cantidad, más del 40% son internautas. Esta estadística refleja la masividad en el uso de las comunicaciones móviles. El crecimiento de los últimos años ha sido además cualitativo, la gama de servicios ha experimentado un notable avance. Sin embargo, también se ha producido un lógico incremento en el consumo de energía en los terminales móviles. Este aumento del consumo de energía reduce la autonomía de las baterías y por tanto la disponibilidad del terminal. Como consecuencia, el uso de mecanismos para reducir el consumo de energía se ha convertido en un propósito fundamental para extender el tiempo de servicio de los terminales móviles.

Una técnica efectiva para reducir el consumo es el *modo de ahorro de energía* (Power saving mode, PSM), que consiste en apagar la interface de radio del terminal móvil a intervalos regulares. Durante el tiempo en que la interface de radio está apagada, la información con destino al móvil (canal de bajada) debe ser almacenada en la estación base. Por otra parte, la información que se genera en el propio terminal debe quedar almacenada hasta tanto se restablezca la conexión de radio y pueda ser transmitida por el canal de subida. Es evidente que mientras mayor sea el tiempo en que la interface de radio permanece apagada, mayor será el ahorro de potencia. Sin embargo, el tiempo de apagado no puede ser extendido arbitrariamente. Aumentar el tiempo de apagado introduce demoras en la información que se transmite o recibe. Existen servicios en tiempo real que no toleran altas demoras, para estos servicios aparece una relación de compromiso entre el ahorro de energía y el deterioro en la calidad de la experiencia de los usuarios que resulta del aumento en la demora de la información que se transmite.

En años recientes la noción de *calidad de experiencia* (Quality of experience, QoE) se ha convertido en un tema de investigación fundamental dentro de la comunidad de las telecomunicaciones. La QoE es una evaluación de la experiencia humana cuando interactúa con la tecnología en un contexto determinado [2]. Por otra parte, el ahorro de energía y la protección del medio ambiente se han convertido en una demanda global y en una tendencia inevitable por lo que es necesario desplazar el enfoque a diseños orientados a la eficiencia energética [3]. En esta investigación se enfrenta el desafío de evaluar algoritmos para ahorrar energía en los terminales móviles y, simultáneamente, garantizar niveles adecuados de calidad de la experiencia en usuarios de servicios de VoIP (Voz sobre IP) en redes 4G.

La búsqueda de terminales manuales y con diversas funciones es el objetivo de los diseños de los teléfonos inteligentes de hoy en día. Estos proveen una alta eficiencia espectral, altas velocidades de conexión y servicios multimedia de gran contenido, pero el alto consumo de potencia es todavía la mayor preocupación. Cuando se despliegan tecnologías de evolución a largo plazo (*Long Term Evolution, LTE*)/ LTE-Avanzado (LTE-A), la experiencia del usuario depende también de su capacidad para ahorrar potencia. Mecanismos como el PSM usan Recepción discontinua (*Discontinuous Reception, DRX*) en LTE/LTE-A para permitir a los equipos de los usuarios (*User Equipment, UE*) que no están recibiendo datos del nodo, entrar a un modo de ahorro de potencia para extender la vida de su batería [4]. En la mayoría de las aplicaciones que no son en tiempo real, tales como navegación web y mensajería instantánea, hay un periodo de tiempo en el cual el UE no necesita observar continuamente el canal de descarga de datos. Para tales servicios no sensibles al retardo, el ciclo DRX puede ser puesto más largo para un mayor ahorro de potencia. Sin embargo, servicios en tiempo real tal como aplicaciones de VoIP son sensibles al retardo [5]. Por tanto, para estos servicios, el retardo debe ser un aspecto prioritario sobre el ahorro de potencia. Por lo que es importante investigar conjuntamente el retardo y el ahorro de potencia del mecanismo DRX [6].

Con el mecanismo DRX, los UEs permiten apagar sus transceptores por un periodo o ciclo para reducir el consumo de potencia cuando no hay entrega o recepción de paquetes de datos. Los ciclos pueden ser clasificados en ciclos cortos y ciclos largos. En general, adoptar un ciclo DRX corto puede tener mejor calidad de servicio (QoS) pero una eficiencia de ahorro de potencia menor. Por el contrario, adoptar un ciclo mayor puede llevar a una mejor eficiencia de ahorro de potencia, pero es difícil alcanzar una QoE deseada generalmente.

Varios esfuerzos [6]–[15] se han realizado para tratar de resolver el problema de ahorro de potencia mientras se adaptan a las restricciones de retardo en los servicios de VoIP. Los autores de [9]–[12] se centran en estudiar el impacto de este fenómeno en redes WLAN, mientras que en [8], [13]–[15] se enfocan en su comportamiento para redes WiMAX. En estas técnicas el máximo tiempo de reposo es determinado de forma tal que el retardo, y consecuentemente la razón de pérdidas de paquetes (*Packet Loss Rate*, PLR), sea menor que un determinado valor aceptable. Aunque, estos modelos aseguran un determinado valor de QoS, no necesariamente aseguran un nivel de QoE requerido.

Los autores de [6] presentan un análisis detallado de la demora y consumo de potencia promedios que resultan de aplicar el mecanismo DRX usando una mezcla de ciclos cortos y largos, en [7] se presenta un esquema DRX multiciclo para redes LTE. La elección de la duración de los ciclos se realiza dinámicamente atendiendo a la intensidad del tráfico y a parámetros de QoS como la pérdida de paquetes. Aunque la QoE se determina basado en la QoS, una excelente QoS no siempre se traduce en una QoE de primera [16]. Por lo tanto, [6] y [7] no controlan el funcionamiento del mecanismo PSM atendiendo a la QoE. En general se puede decir que el control de los mecanismos PSM basados en la QoE para servicios de VoIP ha sido poco estudiado en redes LTE.

Por lo antes expuesto se arriba al siguiente problema científico, ¿Cómo contribuir al desarrollo de mecanismos PSM para redes LTE/LTE-A que tomen en cuenta la QoE en el proceso de ajuste de ciclos DRX cuando se ofrecen servicios de VoIP?

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

- ¿Cuál es la situación actual que presenta el desarrollo de mecanismos PSM para usuarios de redes LTE?
- ¿Cuál es el modelo adecuado para medir la QoE de usuarios de VoIP en redes LTE?
- ¿Qué parámetros representativos de la QoE se ven afectados por el mecanismo PSM?  
¿Cuál es la relación exacta entre dichos parámetros y el modelo?
- ¿Cuál es el escenario más idóneo para evaluar, mediante simulación, la efectividad de diferentes algoritmos PSM?

Para dar respuesta a las interrogantes anteriores se plantea como objetivo general de la investigación: determinar la influencia de los mecanismos PSM en la QoE para usuarios de servicios telefónicos en redes LTE/LTE-A. Para darle cumplimiento se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar un modelo para evaluar la QoE de usuarios de servicios de VoIP en redes LTE.
- Identificar los parámetros que se ven afectados por el mecanismo PSM y su influencia en el modelo de calidad propuesto.
- Diseñar un esquema para la evaluación, mediante simulación, de diferentes algoritmos PSM.

El informe de la investigación se estructurará en introducción, capitulario, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

En la Introducción se dejará definida la importancia, actualidad y necesidad de los mecanismos PSM y se dejarán explícitos los elementos del diseño teórico.

**CAPÍTULO I:** Se dedicará a la revisión bibliográfica y caracterización de los mecanismos PSM más relevantes de los propuestos hasta la fecha así como los métodos para la evaluación de la efectividad de los mismos.

**CAPÍTULO II:** Se utilizará para expresar el diseño metodológico de la investigación, se presenta el modelo del sistema que se va a utilizar, la evaluación de cada pauta a investigar y se presentan los distintos algoritmos a evaluar.

**CAPÍTULO III:** Se dedicará al análisis de los resultados obtenidos de la experimentación mediante simulación de los distintos mecanismos PSM bajo diferentes condiciones.

## CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La demanda de redes de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) se ha incrementado exponencialmente con el tráfico creciente de aplicaciones inalámbricas como servicios de *streaming* de video, Voz sobre Internet, juegos on-line en tiempo real, entre otros. Las tecnologías LTE desarrolladas por el grupo de Proyecto de Cooperación de Tercera Generación (3GPP) [17]–[19] son soluciones BWA prometedoras que usan técnicas avanzadas de acceso inalámbrico para dar soporte a una gran variedad de aplicaciones. Con el increíble crecimiento del tráfico de aplicaciones inalámbricas y dispositivos móviles como los Smartphones (teléfonos inteligentes), computadoras portátiles y tabletas, el problema de ahorro de potencia se convierte en un asunto cada vez más importante y desafiante en redes LTE.

En el presente capítulo se presentan conceptos importantes relacionados con este tema, comenzando por un análisis de la Calidad de la Experiencia en los servicios de voz y su relación con los mecanismos de ahorro de potencia, luego se hace un análisis de cómo se comporta el tráfico de VoIP sobre todo en redes LTE, culminando con los distintos mecanismos que se utilizan para estimar la calidad de voz en aplicaciones de VoIP.

### 1.1 Relación QoE-PSM

El tráfico de datos móviles a nivel mundial se incrementó a una razón anual del 131% entre 2009 y 2014, y se espera que al finalizar el 2018 se incremente un 11% por encima del incremento que se produjo en 2013 [20]. Sin embargo, este incremento del tráfico de datos móviles no está acompañado por avances equivalentes en tecnologías de la información y las telecomunicaciones, donde la razón de datos máxima entregada por las tecnologías de comunicación inalámbricas solo se incrementan a una razón anual del 55% [21]. Por tanto

son necesarias más estaciones base (Base Stations, BSs) para compensar el desfase entre las razones en crecimiento del tráfico de datos móviles y las tecnologías de comunicación inalámbricas. La instalación de más BSs incrementa la demanda de potencia de la red, incrementando sustancialmente la interferencia entre celdas lo que conlleva a la degradación de la calidad. Moderar este incremento de la interferencia requiere la utilización de algoritmos de procesamiento de señales más sofisticados y, consecuentemente, incrementa el consumo de potencia. Por tanto, se espera que los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos reduzcan el consumo de potencia mientras soportan razones de datos mayores comparadas con las que cuentan actualmente [22].

El consumo de potencia en redes inalámbricas puede ser reducido en diferentes capas de la pila del protocolo de comunicación. En la capa física (PHY), las técnicas de ahorro de potencia principalmente se orientan en reducir la potencia de transmisión que se necesita para soportar la misma fiabilidad de enlace deseada [21]. En la capa MAC, por otra parte, los mecanismos eficientes en cuanto a energía se enfocan en la utilización eficiente de los recursos de la red inalámbrica, tales como tiempos de transmisión y bandas de frecuencia, mientras mantienen el mismo nivel de QoS [23]–[25].

Tradicionalmente, cada capa en la pila del protocolo OSI despliega su propia técnica para maximizar el ahorro de energía. Recientemente, técnicas de optimización de entrelazado de capas que explotan la interacción entre las distintas capas han emergido como estrategias efectivas para maximizar la eficiencia energética mientras soportan los niveles de QoS requeridos [26]. Por ejemplo, en [27] se ha tratado de establecer un mecanismo de programación (mecanismo de la capa MAC) para organizar las ranuras de tiempo de transmisión no solo basándose en la ganancia del canal (información de la capa física), sino también en el patrón de arribo de paquetes (capa de aplicación).

Entre los distintos proyectos encaminados a desarrollar comunicaciones inalámbricas eficientes en cuanto al uso de la energía se encuentra el proyecto de Tecnologías de Red y Radio Conscientes de la Energía (EARTH) [28], el proyecto GreenRadio [29] y el consorcio GreenTouch [30].

Entre todas las técnicas de comunicaciones verdes, las técnicas de comunicaciones basadas en el entrelazado de las capas han resultado las más efectivas [26]. Esta investigación se centra en una técnica basada en el entrelazado de las capas llamada PSM.

### 1.1.1 QoE

Aunque la QoS es un modelo que permite una mejor medida de la calidad y se caracteriza por ser más objetivo, mientras que la QoE se ve como una medida subjetiva de la calidad, la QoE brinda una mejor dimensión de la satisfacción del cliente con el servicio. La diferencia sustancial entre la QoS y la QoE está en cómo pueden ser medidas, la QoS está medida en base a los siguientes criterios: Velocidad de transmisión, Ancho de banda, Latencia y *Jitter*. Estas métricas son especificadas por la aplicación y no por el usuario, la aplicación determina cuál es la cantidad de cada característica para tener un funcionamiento aceptable [31].

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 [32].

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. Este 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 [32].

Algunos nuevos esquemas propuestos de la QoE son:

- 1 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 [32].

- 2 Mejora de 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 [32].
- 3 Explotar el conocimiento de la QoE como vía para salvar potencialmente recursos de red sin comprometer la experiencia del usuario, 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 la QoS y la QoE [33]–[35].

La Calidad de la Experiencia (QoE) es definida por la ITU-T como: “La aceptabilidad de una aplicación o servicio, percibido subjetivamente por el usuario final” .Visto de otra forma, describe el grado de “deleite o molestia” que experimenta el usuario final cuando usa un producto o servicio. Intrínsecamente, QoE es un concepto amplio y genérico, y como tal, él incorpora cualquier aspecto consciente o inconsciente que afecte la satisfacción en general del usuario [32].

### **1.1.2 Modo de Ahorro de Potencia (PSM)**

Por lo general, la WNIC opera en cinco estados relacionados con el manejo de la potencia [23]: los estados de transmisión, recepción, ocioso, reposo y apagado. La WNIC consume la mayor cantidad de energía durante los estados de transmisión y recepción. En el estado ocioso, aunque no transmite ni recibe, consume una cantidad de potencia bastante significativa. Los tres estados anteriores generalmente se refieren a estados activos. El estado de reposo es introducido básicamente para reducir el consumo de potencia. Durante el estado de reposo todos los circuitos de la WNIC se apagan excepto el contador, necesario para la sincronización. Finalmente el estado de apagado no consume potencia pues no opera en absoluto.

PSM es un aprovechamiento basado en la capa MAC para reducir el consumo de energía de la WNIC por medio de programar conmutaciones regulares hacia el estado de reposo [23], [36], [37]. Cada tecnología realiza el PSM a su manera, pero todas comparten atributos comunes. Primeramente, cuando la WNIC conmuta al estado de reposo, todos los paquetes del canal de subida y del de bajada son almacenados en el buffer de la estación móvil (MS, mobile station) y la BS, respectivamente. Cuando la WNIC sale del estado de reposo, la MS intercambia los paquetes almacenados con la BS [22].

En el PSM basado en IEEE 802.11 [23], antes de que la WNIC vaya al estado de reposo, esta notifica al Punto de Acceso (AP, la BS se refiere como AP en el estándar IEEE 802.11) usando un bit de ahorro de potencia en la trama de datos.

En las redes LTE, se adopta un modo DRX para conservar la energía de la WNIC en ambos estados conectado y ocioso [37]. En el estado ocioso, la conexión inalámbrica entre el UE (en LTE, la MS se conoce como UE) y su nodo enriquecido de servicio (BS) es liberada, pero el contexto del UE se mantiene activo. En el estado de conexión, ambos el canal inalámbrico y el contexto del UE están activos.

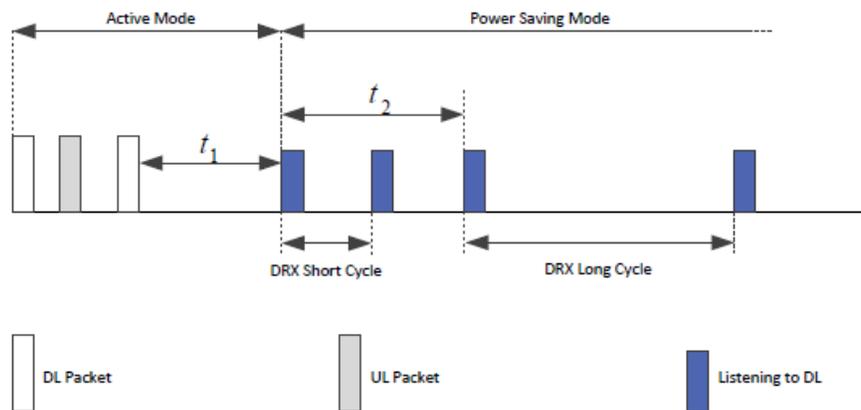


Figura 1.1. Modo DRX [22].

En el estado de conexión, el modo DRX se activa si no ocurre intercambio de paquetes por un periodo de tiempo  $t_1$ , como se muestra en la figura 1.1. Luego de que se activa el modo DRX, la WNIC conmuta al estado de reposo por una duración conocida como ciclo corto DRX. Al final del ciclo corto DRX, la WNIC despierta para comprobar si algún paquete de los canales de bajada/subida fue recibido/transmitido. Si no hay paquetes para intercambiar, la WNIC conmuta de vuelta al estado de reposo por otro ciclo corto DRX. Si no ocurre intercambio de paquetes por un periodo de tiempo  $t_2$  desde el momento en que el UE entró en el modo de ciclo corto DRX, el UE entra en el modo de ciclo largo DRX, como se muestra en la figura 1.1.

En PSM, mientras mayor sea el tiempo de reposo, más energía se ahorra, pero los paquetes del canal de subida/bajada encuentran un mayor retardo. Se puede alternar el uso de varias

WNIC de baja y alta potencia en una misma MS para disminuir el consumo de potencia [22]. Además de explotar el patrón de tráfico para lograr una mayor reducción del consumo.

Generalmente, explotar el patrón de tráfico o rediseñar el patrón de tráfico son estrategias efectivas para mejorar el ahorro de energía del PSM. Sin embargo, al utilizar estas técnicas con servicios multimedia interactivos como VoIP, requiere especial atención la relación de compromiso entre el ahorro de potencia alcanzado y el retardo adicional que se impone [22].

### **1.1.3 Modo de Ahorro de Potencia para servicios de VoIP**

Como mismo sucede con el tráfico en aplicaciones que no son en tiempo real, el patrón de tráfico en los servicio de VoIP puede ser tenido en cuenta para aumentar el ahorro del PSM. La sesión de VoIP alterna entre periodos de habla y periodos de silencio, por tanto los periodos de silencio pueden explotarse para incrementar el tiempo de reposo, lo que conlleva a una reducción del consumo de energía sin que la calidad de la sesión se vea afectada [22].

Varios esfuerzos [24], [38]–[46] se han propuesto para mejorar el problema del ahorro de energía del mecanismo PSM mientras garantizan un determinado nivel de QoS. En estos, el tiempo de reposo se determina de manera que el retardo y/o la razón de pérdida de paquetes (PLR, Packet Loss Rate) están dentro de los valores aceptables. A pesar que estas técnicas aseguran la obtención de un nivel de QoS deseado, no aseguran necesariamente un deseado nivel de QoE, La degradación de la calidad de la voz causada por pérdidas consecutivas es percibida de peor manera que la percibida con pérdidas dispersas con la misma PLR [47]. O sea, si se quiere garantizar un verdadero nivel de QoE, es necesario tener en cuenta el efecto que puede causar la pérdida de paquetes en ráfaga en el momento de decidir el tiempo de reposo.

## **1.2 Tráfico de VoIP**

El protocolo VoIP es un mecanismo que permite entregar señales de voz a través de Internet (red de conmutación de paquetes) en deterioro de la red telefónica conmutada pública (PSTN, Public Switched Telephone Network) [48].

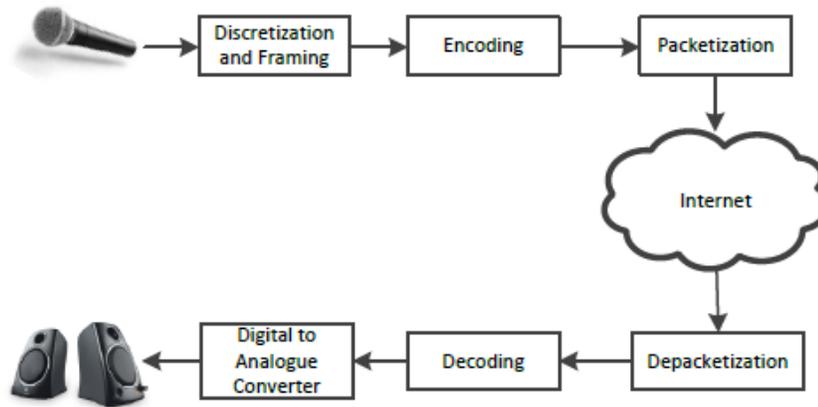


Figura 1.2. Diagrama en bloque para el procesamiento de voz en VoIP [22].

La figura 1.2 muestra un diagrama en bloques para el procesamiento de voz en una aplicación VoIP. En el lado del envío, la señal analógica es discretizada y ensamblada en tramas. Luego estas tramas se codifican en bits digitales. Finalmente, los bits digitales son atados a paquetes y enviados al receptor sobre la Internet. En el lado del receptor, ocurre el procedimiento contrario para lograr obtener la señal de voz analógica de los bits digitales. Originalmente, la VoIP se usaba como un desvío de baja calidad a las redes de conmutación de circuitos tradicionales para lograr establecer llamadas de voz a largas distancias sin casi ningún costo. Primero, estas llamadas fueron transmitidas sobre redes alambradas (Ethernet). Luego, comenzaron a ser transportadas sobre redes inalámbricas (WLAN, Wireless Local Area Network) y, posteriormente, sobre redes de datos celulares de alta velocidad, permitiendo flexibilidad mediante la movilidad de amplio rango. Recientemente, los operadores de redes inalámbricas han empezado a emplear VoLTE como su tecnología principal para realizar llamadas de voz. Utilizando la baja latencia y los rasgos mejorados de corrección de errores para LTE, VoLTE es capaz de soportar llamadas de voz con una calidad comparable a la de la PSTN, incluso superior [22].

El servicio LTE se basa en la red All-IP, este servicio fue adoptado por los proveedores de servicios móviles con el fin de proporcionar un servicio de voz de alta calidad, tal como el servicio VoLTE. VoLTE opera en una red LTE basada en IP. El tráfico LTE se envía desde el UE a Internet a través de eNodeB, Serving Gateway (S-GW) y Packet Gateway (P-GW); tal como muestra la representación de la arquitectura de la red LTE en la Figura 1.3 [49].

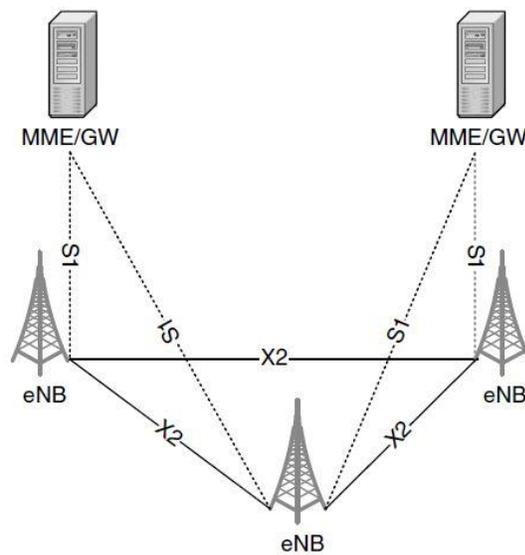


Figura 1.3. Arquitectura de la red LTE [49].

### 1.2.1 Deterioro de la calidad en VoIP

Los distintos factores que afectan la calidad en aplicaciones VoIP se pueden dividir en los factores relativos al códec de voz y los factores relativos al transporte [48], [50]. El códec es la unidad que se encarga de convertir las señales de voz analógicas en un flujo de bits digitales. Generalmente, mientras mayor sea la razón de bits a la salida del códec, mejor será la calidad de voz entregada por el códec. Por otra parte, los deterioros en la calidad de la voz causados por la red de transporte se atribuyen básicamente al retardo de paquetes y a la PLR. El retardo de los paquetes es el tiempo que le toma a los paquetes alcanzar su destino. Aquí se incluye el retardo de codificación/decodificación, el retardo del buffer de jitter, el retardo de transmisión, el retardo de propagación, y el retardo de enfilamiento (queueing). Cuando el retardo de paquetes se acerca al valor máximo permisible, a medida que este retardo sea mayor, entonces menor es la calidad de la voz. Por otra parte, la PLR se puede expresar como la frecuencia a la cual se descartan los paquetes VoIP, incluyendo aquellos paquetes descartados por los nodos intermedios y los paquetes descartados debido a la demora excesiva [22].

### 1.2.2 Sesión VoIP

Tradicionalmente, las conversaciones de voz se modelan como cadenas de Markov de tiempo continuo (Continuous Time Markov Chains, CTMCs). Brady [51] modeló la conversación por teléfono como una CTMC de 6 estados. La sección de telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) simplificó en [52] el modelo de Brady en una CTMC de 4 estados. En aplicaciones de VoIP, se empaquetan las señales de audio que resultan de las conversaciones de voz y se envían sobre redes IP, por tanto es más preciso usar modelos discretos para modelar las características de tales sesiones [22].

En [53] se propone una versión discreta del modelo presentado en [52], donde la sesión VoIP se modela como una cadena de Markov de tiempo discreto de 4 estados (Discrete Time Markov Chain, DTMC) como se muestra en la figura 1.4. Donde el parámetro  $\gamma_{m,n}$  representa la probabilidad de transición de un estado  $m$  a un estado  $n$ .

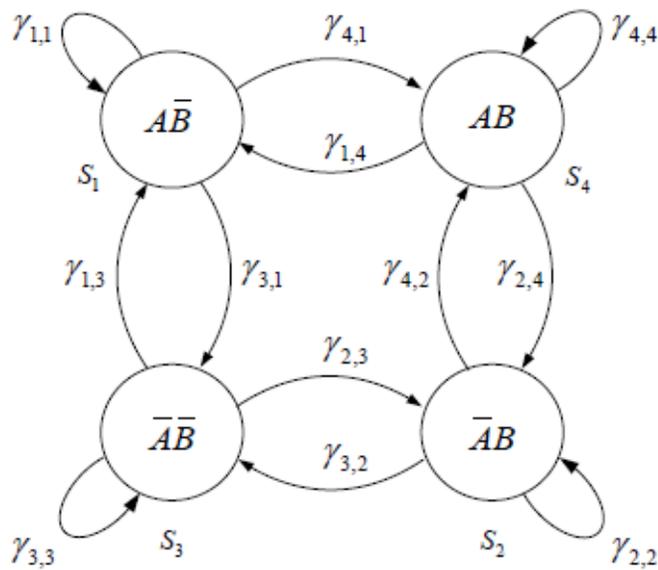


Figura 1.4. Modelo sesión VoIP con DTMC de 4 estados [53].

Asumiendo que A (MS) está llamando a B, nodo correspondiente (CN, corresponding node), el estado 1 representa a hablando y a B escuchando, mientras el estado 2 representa a B hablando y A en silencio. En el estado 3 ambos están en silencio, y en el estado 4 ambos están hablando. En cada momento que la DTMC visita un estado se generan paquetes VoIP, donde el tiempo de transición depende del intervalo de empaquetado del códec usado por la

aplicación de VoIP. Si se utiliza un códec de Transmisión Discontinua (Discontinuous Transmission, DTX), no se generan paquetes durante los periodos de silencio del hablante. En vez de esto, paquetes intermitentes del descriptor de inserción de silencio (Silence Insertion Descriptor, SID) se generan para transmitir la información de ruido de fondo al otro lado de la conversación [22]. Denotando la matriz de probabilidad de transición  $4 \times 4$  como  $\Gamma$ , el vector de probabilidad del estado fijo,  $\Psi$ , es calculado resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\Gamma\Psi = \Psi, \mathbf{1}^T\Psi = 1 \quad (1.1)$$

Donde  $\mathbf{1}$  es un vector de unos y  $[\ ]^T$  es el operador de la matriz traspuesta.

Este trabajo se centra en el modelo de 2 estados de [54] como se muestra en la figura 1.5, el cual es una simplificación del modelo de 4 estados, en el cual solo se tiene en cuenta una dirección del enlace, o sea, el canal de bajada.

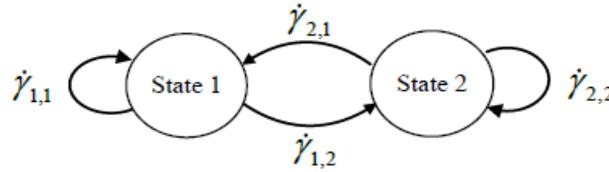


Figura 1.5. Modelo de sesión VoIP de 2 estados [54].

En el modelo expuesto anteriormente, el estado 1 representa el tiempo en el cual B está en silencio (no hay paquetes en el canal de bajada), mientras el estado 2 ilustra los periodos en donde B está hablando (se generan paquetes en el canal de bajada). Al igual que en el otro modelo el parámetro  $\gamma_{m,n}$  representa la probabilidad de transición de un estado  $m$  a un estado  $n$ .

### 1.2.3 Mecanismos de estimación de la calidad

De acuerdo con [32], la Calidad de Experiencia o QoE (*Quality of Experience*) 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 sistema 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 o QoS (*Quality of Service*), el Grado de Servicio o GoS (*Grade of Service*) y la Calidad de Resiliencia o QoR (*Quality of Resilience*). 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 [32].

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.

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 [32].

Hay varios modelos que se utilizan en la actualidad para estimar una evaluación de la calidad de la experiencia, basados en el MOS (*Mean Opinion Score*). Estos modelos se aproximan con bastante exactitud a la percepción del usuario de la calidad de un determinado servicio, o lo que es lo mismo, a la QoE.

Los algoritmos de estimación de la calidad de la voz (Speech quality assessment algorithms, SQAs) son categorizados en métodos subjetivos y objetivos. En los SQAs subjetivos recae en las personas evaluar la calidad percibida de la conversación. Mientras que en los SQAs objetivos la responsabilidad solamente recae en mediciones cuantitativas de los deterioros encontrados en la conversación. Los SQAs pueden clasificarse también en algoritmos intrusivos y no intrusivos. En los intrusivos se evalúa la calidad de una muestra final

deteriorada de la conversación comparándola con una muestra original no distorsionada. Por el contrario, los SQAs no intrusivos evalúan la calidad percibida de una muestra final del diálogo sin necesidad de tener acceso a una no distorsionada [22].

Tradicionalmente, la métrica Puntuación de Opinión Media (Mean Opinion Score, MOS), definida por la UIT-T, se usa para cuantificar la calidad de una conversación de forma subjetiva [55]. Esta acota la calidad percibida en una escala de valores numéricos que van de 5 a 1, donde 5 es la mejor calidad que se puede alcanzar y 1 representa la peor. Sin embargo, esto presupone un procedimiento bastante tedioso, muy costoso, prolongado y bastante difícil de repetir con las condiciones exactas, por lo que solo se usa comúnmente para calibrar otros SQAs. Un SQA usado usualmente para predecir el rango MOS es el de Evaluación Perceptual de la calidad del dialogo (Perceptual Evaluation of Speech Quality, PESQ) [56], el cual evalúa la calidad percibida analizando las diferencias entre las muestras distorsionadas y no distorsionadas. A pesar de que PESQ ha resuelto el inconveniente del método MOS, todavía no se puede usar para estimar la calidad de aplicaciones en tiempo real debido a que requiere de la señal original en el proceso de evaluación. Por esto se usan generalmente SQAs objetivos.

Actualmente el servicio de telefonía se realiza, fundamentalmente, usando tecnologías de VoIP. Sin embargo, VoIP es susceptible a múltiples tipos de retardos e interferencias. Un Sistema de medición de calidad desempeña un papel esencial en mantener el Sistema de VoIP conectado y corriendo, así como en mantener una calidad de voz de primera [57]–[59]. Numerosos estudios han desarrollado test para medir el efecto de deterioros específicos en la calidad de la voz. En la segunda mitad de la década de 1990, el Sector de Estandarización de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) introduce el Modelo-E como una vía para estimar la calidad de voz esperada en una red de [60], [61], [50] y es considerado el SQA objetivo no intrusivo más popular. El factor-R es un factor psicoacústico del Modelo-E el cual es llevado a un valor de Puntuación de Opinión Media (MOS), para dar a entender el rendimiento de la red. En una escala de 0 a 100, el factor-R en el Modelo-E es definido por la ecuación siguiente:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A \quad (1.2)$$

Donde:

- R: escala de calidad de una llamada simple (Factor-R).
- $R_0$ : Factor de relación Señal a Ruido.
- $I_s$ : Deterioro que ocurre simultáneamente con el procesamiento de la señal.
- $I_d$ : Factor de deterioro debido al retardo.
- $I_e$ : Factor de deterioro de equipo, causado por el códec de voz y la pérdida de paquetes.
- A: Factor de Ventaja (movilidad).

La fórmula empírica con la cual se calcula el factor deterioro de equipo efectivo  $I_{e-eff}$  se muestra a continuación [47], [62]:

$$I_{e-eff} = I_e + (R_0 - I_e) \times \frac{P_{pl}}{P_{pl} + B_{pl}} \quad (1.3)$$

Donde  $P_{pl}$  es la PLR,  $B_{pl}$  es el factor de robustez de pérdida de paquetes, tanto  $B_{pl}$  como  $I_e$  son especificados por el códec AMR-WB [61], [63].

Sin embargo, el efecto de las pérdidas en ráfagas no está suficientemente representado en el Modelo-E. El estándar del Modelo-E introduce el parámetro  $BurstR$  para tratar de reflejar el impacto de las pérdidas en ráfagas pero la realidad es que resulta poco efectivo en ese propósito. Un modelo sistemático debe ser incorporado al Modelo-E para una estimación exacta de la calidad de la llamada [64]–[66].

Prácticamente, la PLR varía con el tiempo y, por tanto, la calidad de voz debe también variar [65]. En [65] el autor diferencia dos condiciones de red: una condición de PLR baja, denotada como fisura (gap), y una condición de PLR alta, conocida como ráfaga (Burst). La fisura representa el caso en que las pérdidas son aisladas (o sea cuando la distancia entre 2 paquetes descartados es mayor o igual a un parámetro  $g_{min}$ , el cual es típicamente igual a 16 paquetes). Por otra parte, se considera ráfaga cuando pérdidas de paquetes sucesivas están cerca unas de otras. Cuando las condiciones de la red cambian de fisura a ráfaga, o en el sentido inverso, la calidad instantánea no varía abruptamente, más bien varía exponencialmente como se muestra en la figura 1.6, a este fenómeno se le llama efecto novedad.

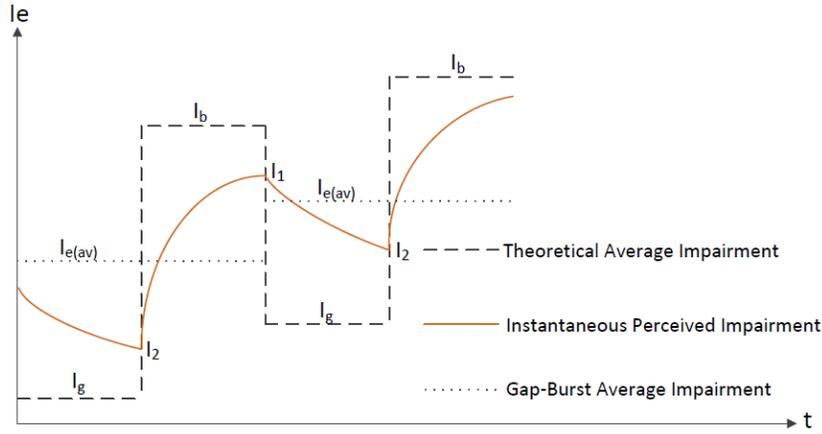


Figura 1.6. Representación del efecto novedad [22].

Para tener en cuenta el efecto del patrón de pérdida de paquetes en la calidad de voz percibida, los autores de [47] proponen un algoritmo basado en ventanas para delinear la PLR en ráfaga dentro de una PLR aleatoria equivalente, como se muestra en la figura 1.6. La PLR aleatoria que es perceptualmente equivalente a la PLR en ráfaga se calcula de acuerdo a la expresión (1.4):

$$P_{pl-eq} = P_{pl} + \sum_{n=1}^N a_n B_n \quad (1.4)$$

Donde  $P_{pl}$  es la PLR sin considerar el efecto de error de ráfaga,  $N$  es el número total de paquetes VoIP,  $B_n$  es el factor de cuenta para el efecto de error en ráfaga y  $a_n$  cuenta el grado de error en ráfaga.  $B_n$  se calcula usando una ventana deslizable como se muestra en la expresión (1.5):

$$B_n = \sum_{i=1}^{g_{min}} \frac{l_{n-i}}{2^{i-1}} \quad (1.5)$$

Donde  $g_{min}$  es la longitud de la ventana deslizable y  $l_{n-i}$  es igual a 1 si el paquete  $n - i$  se pierde o igual a 0 de lo contrario.

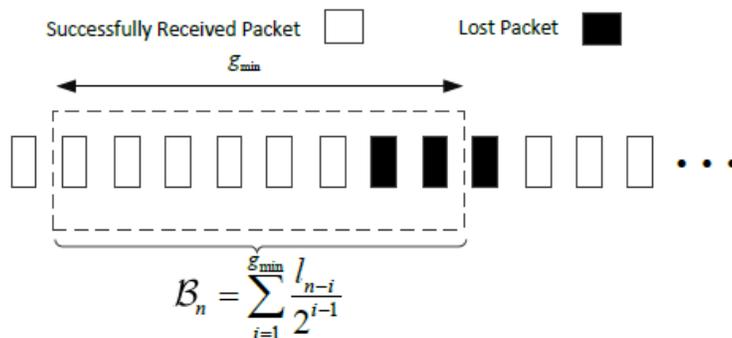


Figura 1.7. Modelo para el efecto de pérdidas en ráfagas [47].

### 1.3 Cadena de Markov

Una cadena de Markov, la cual recibe su nombre del matemático ruso Andrei Markov, es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. En efecto, las cadenas de este tipo tienen memoria, es decir, "recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros [67]. Esta dependencia del evento anterior distingue a las cadenas de Markov de las series de eventos independientes, como tirar una moneda al aire o un dado. Este tipo de proceso, introducido por Markov en un artículo publicado en 1907 [67], presenta una forma de dependencia simple, pero muy útil en muchos modelos, entre las variables aleatorias que forman un proceso estocástico.

#### 1.3.1 Cadena de Markov con recompensa

Un proceso de decisión de Markov (MDP, Markov Decision Process) es mejor descrito como una secuencia de decisiones. Para cada decisión, se produce una secuencia de cadenas de Markov con beneficio.

Una CTMC de  $N$  estados con recompensa (CTMCR, CTMC with rewards) se define como una CTMC de  $N$  estados con recompensa por unidad de tiempo gastado en cada estado y una recompensa instantánea para cada transición desde un estado hacia otro. La figura 1.8 muestra un ejemplo de un CTMCR con 3 estados.

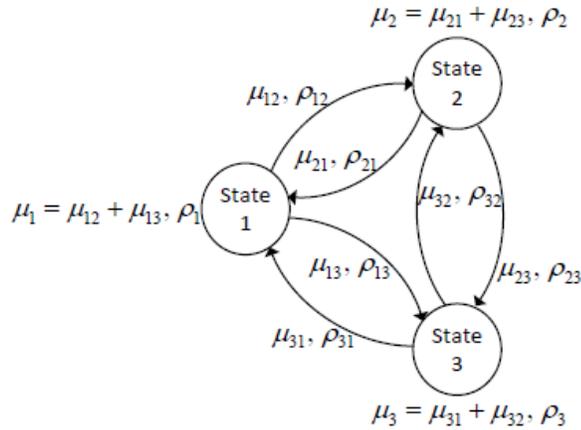


Figura 1.8. CTMCR de 3 estados [22].

Generalmente, una CTMCR se describe con los siguientes parámetros [22]:

- $\mu_{ij}$  representa la razón de transición de un estado  $i$  a un estado  $j$ , donde  $i, j = 1, \dots, N$ .

$$\mu_i = \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \quad (1.6)$$

- Representa la razón de transición de salida del estado  $i$ , donde  $\frac{1}{\mu_i}$  es el tiempo de estancia medio del estado  $i$ .
- $\rho_i$  representa el premio por unidad de tiempo incurrido en el estado  $i$ .
- $\rho_{ij}$  representa bonificación instantánea incurrida cuando se produce una transición del estado  $i$  al estado  $j$ .

Por otro lado, una cadena de Markov de tiempo discreto de  $N$  estados con bonificación (DTMCR) se define como una DTMC con estímulos por cada transición de un estado a otro. En la figura 1.9 se muestra un DTMCR de 3 estados.

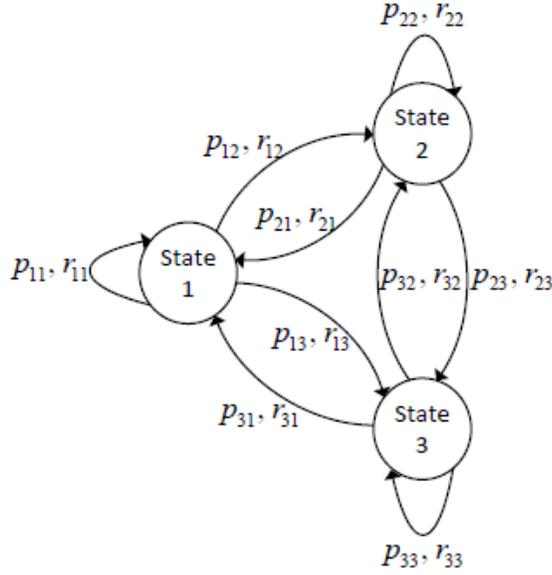


Figura 1.9. DTMC de 3 estados [22].

Una CTMC puede convertirse en una DTMC usando una técnica de uniformidad [68] o cualquier técnica de discretización, como las de [53]. DTMC generalmente se describe por los parámetros siguientes parecido a una CTMC:

- $p_{ij}$  representa la probabilidad de transición del estado  $i$  al estado  $j$ , donde  $i, j = 1, \dots, N$
- $r_{ij}$  representa bonificación de transición cuando se produce una transición del estado  $i$  al estado  $j$ .

Para una DTMC de  $N$  estados, la bonificación total esperada luego de  $n$  transiciones se calcula de la siguiente forma [69]:

$$c(n) = \sum_{k=0}^{n-1} P^k r = r + P c(n-1) \quad (1.7)$$

Donde  $c(n) = [c(n)_1 \dots c(n)_N]^T$  es el vector de bonificación total esperada, y  $c(n)_i$  es la bonificación total esperada luego de  $n$  transiciones empezando en el estado  $i$ .  $r = [r_1 \dots r_N]^T$  es el vector de bonificación, donde

$$r_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} r_{ij} \quad (1.8)$$

Representa la bonificación por visita al estado  $i$ , y  $P$  es la matriz de probabilidad de transición  $N \times N$ .

La ganancia promedio esperada se calcula a continuación [70]:

$$g1 = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-1}c(n) = \Pi r \quad (1.9)$$

Donde  $\Pi = \lim_{n \rightarrow \infty} P^n$  es la matriz de límite de probabilidad. La ganancia también se puede determinar resolviendo un grupo de ecuaciones lineales, llamadas ecuaciones de determinación de valor (value determination equations, VDEs) [70], como se muestra:

$$g1 + h = c + Ph \quad (1.10)$$

$$1^T h = 0 \quad (1.11)$$

De tal forma que

$$c(n) = ng1 + h - P^n h \quad (1.12)$$

Cuando una DTMC tiene un grupo de estados recurrentes y uno de estados transitorios (DTMC reducible) el valor de la bonificación promedio esperada de corrida larga  $g$  depende solamente de la bonificación de estado recurrente. En la figura 1.10 se muestra un ejemplo de un DTMC de 3 estados con el estado 3 como estado absorbente.

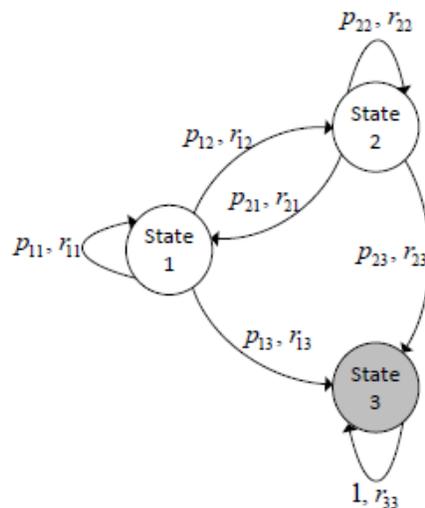


Figura 1.10. DTMC de 3 estados con un estado absorbente [22].

La matriz de probabilidad de transición  $P$  y el vector de bonificación  $r$  para un DTMC reducible se pueden escribir en sus formas canónicas respectivas como se muestra a continuación:

$$P = \begin{matrix} S & 0 \\ D & Q \end{matrix}, r = \begin{matrix} r_R \\ r_T \end{matrix} \quad (1.13)$$

Donde  $S$  es la matriz de probabilidad de transición para estados recurrentes,  $Q$  es la matriz de probabilidad de transición para estados transitorios,  $D$  es la matriz de probabilidad de transición de estados transitorios a estados recurrentes,  $r_R$  y  $r_T$  son vectores de recompensa de los estados recurrentes y transitorios, respectivamente.

La recompensa total esperada antes de pasar al conjunto cerrado se calcula resolviendo la siguiente ecuación general [70]:

$$c_T = r_T + Q c_T \quad (1.14)$$

## **CAPÍTULO 2. MODO DE AHORRO DE POTENCIA PARA SERVICIOS DE VoIP**

En este capítulo se presenta un mecanismo que evalúa el comportamiento en servicios de VoLTE y conjuntamente evalúa el consumo de potencia, la PLR percibida, el retardo promedio de paquetes y la QoE alcanzada por mecanismos PSM basados en tiempos de reposo fijos.

Se utilizan sistemas de ecuaciones lineales para la evaluación del consumo de energía y la QoE permitiendo facilidades a la hora de lograr una relación de compromiso QoE/energía en el PSM.

A continuación se presenta el modelo a evaluar, luego se analizan analíticamente los cálculos de la QoE y el consumo de potencia, para luego analizar los mecanismos PSM a evaluar [6], [7] así como el mecanismo propuesto en este trabajo.

### **2.1 Modelo del sistema**

Básicamente, el mecanismo PSM ahorra el consumo de energía de la WNIC permitiéndole conmutar a un estado de reposo a intervalos regulares [23], [36], [71]. Cuando la WNIC se encuentra en estado de reposo, no puede ni recibir ni transmitir ningún paquete. En cambio, los paquetes del canal de bajada y de subida son almacenados respectivamente en los buffers de la BS y de la MS mientras la WNIC pasa al estado de reposo. Cuando la WNIC pasa al estado activo, intercambia los paquetes que se encontraban almacenados en ambas partes. Como se puede inferir a medida que la WNIC permanezca más tiempo apagada, el consumo de potencia disminuirá pero a costa de un mayor retardo de los paquetes en ambos sentidos. Esto puede no ser de mucha importancia cuando se trata con aplicaciones como navegación

web u otras que no son en tiempo real, pero como se trabaja con aplicaciones VoIP este aumento del retardo puede no ser del todo tolerable [38].

Varios esquemas [24], [38]–[43], [72], [73] se han propuesto para mejorar el comportamiento de mecanismos PSM para sesiones de VoIP.

Aunque las DTMCs se han usado en trabajos previos para modelar las transiciones entre los estados de un PSM [71], en este trabajo se tiene en cuenta la QoE para manejar las transiciones entre los estados de la DTMC mientras se emplean mecanismos PSM.

### 2.1.1 Modelo PSM

En los algoritmos estudiados, la WNIC alterna entre un estado de reposo y uno activo, al estar en el estado de reposo se van almacenando los paquetes de los canales de subida y bajada, luego al inicio de cada ciclo de reposo/activo,  $t_c$ , la WNIC despierta por una duración  $t_a$  para intercambiar los paquetes almacenados con la BS [22], para luego volver al estado de reposo por un tiempo  $t_s$ , como se muestra en la figura 2.1. La duración del ciclo,  $t_c$ , puede ser fijada dinámicamente en dependencia del algoritmo utilizado basándose en parámetros como el tráfico y el estado de la sesión VoIP.

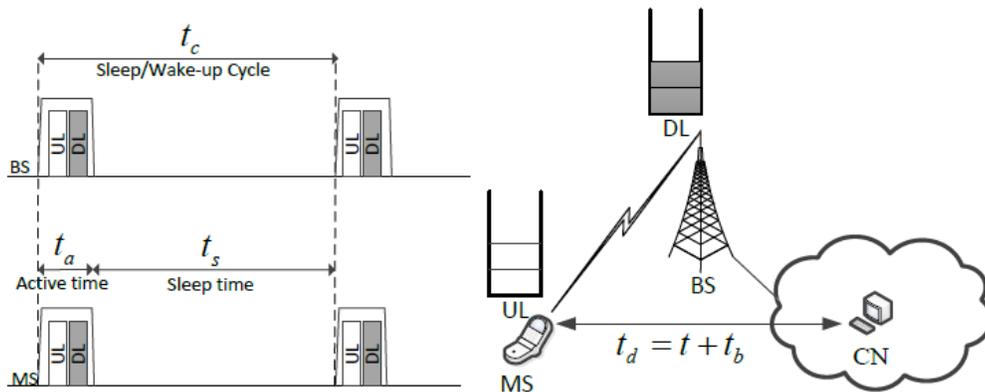


Figura 2.1. Modelo de enlace [22].

### 2.1.2 Modelo de enlace y de sesión VoIP

Para los experimentos se asume que los paquetes VoIP son transmitidos sobre un enlace inalámbrico entre la MS y su correspondiente BS de servicio, mientras que se supone un enlace alambrado entre la BS y su nodo correspondiente como se muestra en la figura 2.1.

En la práctica los paquetes que se pierden en el enlace inalámbrico son reenviados usando un mecanismo de petición de repetición automática (ARQ, automatic repeat request) [22], lo que incrementa, por supuesto, el retardo que sufren los paquetes. Para simplificar el análisis y enfocarse solo en el mecanismo PSM, se asume que no ocurren pérdidas sobre el enlace inalámbrico, o sea, solo ocurrirán pérdidas producto del retardo excesivo de los paquetes.

Cuando se usa un mecanismo PSM, los paquetes VoIP encuentran dos tipos de retardo, un retardo de enlace en los enlaces cableado e inalámbrico, y un retardo debido al buffer donde se almacenan los paquetes en la BS mientras la WNIC está en reposo. Si se denota el retardo de enlace como  $t$  (retardos combinados del enlace inalámbrico y alámbrico) y el retardo debido al buffer como  $t_b$ , entonces el retardo total que encuentran los paquetes VoIP se puede calcular como  $t_d = t + t_b$ . En este modelo de sistema se asume, sin perder la generalidad, que el retardo debido al enlace,  $t$ , puede ser amortiguado asumiendo un tamaño de buffer lo suficientemente grande como para que todos los paquetes se intercambien con un retardo de enlace constante, lo cual simplifica considerablemente el análisis matemático de retardo de enlace. Por lo tanto  $t_d$  estará constituido por dos componentes: una constante ( $t$ ) y otra variable ( $t_b$ ).

El modelo de sesión de VoIP que se utiliza es el modelo de 2 estados [54] como se explica previamente en la sección 1.2.2.

### 2.1.3 Modelo de evaluación de la calidad

En este trabajo se utiliza un SQA objetivo, el Modelo E de la UIT-T [62] con las modificaciones de [47], para estimar la QoE de la sesión VoIP. Para ello, la calidad de la voz es valorada usando un factor psicoacústico acotado entre 0 y 100. La fórmula usada es tomada de [62] y evaluada para valores de banda ancha (WB, wide band):

$$R = R_{0,wb} - I_{s,wb} - I_{d,wb} - I_{e-eff,wb} + A \quad (2.1)$$

Donde:

- $R_{0,wb}$ : Representa en principio la relación señal/ruido básica, incluido el ruido del circuito y el ruido de la habitación.

- $I_{s,wb}$ : Es una combinación de todos los impedimentos que se producen más o menos simultáneamente con la señal de voz, la suma de todos ellos. Este aspecto no ha sido analizado en WB hasta el momento, por tanto  $I_{s,wb} = 0$ .
- $I_{d,wb}$ : Factor de deterioro de retardo. Representa los impedimentos causados por la demora end-to-end.
- $I_{e-eff,wb}$ : Factor de deterioro efectivo del equipo. Representa las degradaciones causadas por códecs de baja velocidad binaria y el deterioro debido a las pérdidas de paquetes.
- $A$ : El factor de ventaja, permite compensar los factores de deterioro cuando el usuario se beneficia de otros tipos de acceso. Como este efecto aún no se ha estudiado para el caso de WB, se recomienda  $A = 0$ .

Para esta investigación se toma  $R_{o,wb} = 129$  según [74]. Luego la expresión quedaría de esta forma:

$$R_{wb} = 129 - I_{d,wb} - I_{e-eff,wb} \quad (2.2)$$

Para calcular el deterioro por retardo,  $I_{d,wb}$ , se utiliza la siguiente [74]:

$$I_{d,wb} = 0.0024 + D_{e2e} + 0.11 \times (D_{e2e} - 177.3) \times H(D_{e2e} - 177.3) \quad (2.3)$$

Donde  $H(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < 0 \\ 1, & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$ , y  $D_{e2e}$  es el retardo promedio que encuentran los paquetes del canal de bajada. La fórmula empírica para calcular el factor de deterioro efectivo del equipo,  $I_{e-eff,wb}$ , es la siguiente:

$$I_{e-eff} = I_e + (129 - I_e) \times \frac{P_{pl-eq}}{P_{pl-eq} + B_{pl}} \quad (2.4)$$

Donde  $I_e$  es el factor de deterioro del equipo,  $P_{pl-eq}$  es la PLR percibida, y  $B_{pl}$  es el factor de robustez de pérdida, o sea, la capacidad del códec de recuperar los paquetes perdidos.  $P_{pl-eq}$  depende del grado de ráfaga de las pérdidas.

Para tener en cuenta las ráfagas dentro de la PLR se utiliza el algoritmo usado en [47] y explicado anteriormente.

$$P_{pl-eq} = P_{pl} + \sum_{n=0}^{N-1} a_n B_n \quad (2.5)$$

Acorde con [47] el factor  $a_n$  se define como

$$a_n = \begin{cases} 1 & \text{si } P_{pl,n} \leq 4\% \\ -\frac{1}{2} & \text{si } P_{pl,n} > 4\% \end{cases} \quad (2.6)$$

Donde  $P_{pl,n}$  ( $P_{pl,n} = \frac{\sum_i l_i}{i}$ ,  $l_i$  es un indicador variable igual a 1 cuando el paquete  $i^{\text{th}}$  se pierde o igual a cero de otro modo) se refiere a la PLR actual acumulativa contada para el paquete  $n$ . Aquí se hace una decisión brusca siempre y cuando la PLR actual alcance el 4%. Por otro lado  $B_n$  se obtiene según el modelo de dependencia exponencial de las ráfagas en la distancia entre las pérdidas de paquetes [47].

$$B_n = \sum_{i=1}^{N_{max}} \frac{l_i}{2^{i-1}} \quad (2.7)$$

Donde  $N_{max}$  es el máximo tamaño de la ventana, en este trabajo se toma  $N_{max} = 8$ .

Finalmente, se calcula el correspondiente valor de MOS, (*Mean Opinion Score*), este proporciona una medida subjetiva que cuantifica el impacto que tiene en el usuario la presencia de fallas en el servicio, estas fallas pueden ser determinadas por otras métricas de QoE como la duración de las fallas en el servicio, errores por segundo, y segundos sin disponibilidad del servicio. El MOS es la métrica más popular de la QoE. Aunque el MOS evalúa la opinión de los usuarios, toma en cuenta además parámetros de la QoS tales como el retardo y la pérdida de paquetes. El MOS toma valores entre 1 y 5, siendo 1 la calidad más baja y 5 la más alta percibida.

Para el modelo usado en este estudio, el Modelo E-WB, el *MOS* se puede obtener a partir del factor  $R$  que se obtiene como resultado de la aplicación del modelo a un sistema o un servicio perteneciente a un sistema. La forma de calcular el *MOS* a partir del factor  $R$  es la siguiente [74], primero se normaliza el factor  $R$  a un valor de 100:  $R_x = \frac{R_{wb}}{1.29}$ , y luego se calcula el *MOS*:

$$MOS = \begin{cases} 1 & R_x \leq 0 \\ 1 + 0.035R_x + 7 \times 10^{-6}R_x(R_x - 60)(100 - R_x) & 0 < R_x < 100 \\ 4.5 & R_x > 100 \end{cases} \quad (2.8)$$

Estos valores cuantitativos del *MOS* se pueden expresar mediante una descripción cualitativa en función de la opinión de los usuarios finales y la percepción de la degradación de la señal. La tabla 2.1, tomada de [75], [76], muestra estas correspondencias.

Tabla 2.1: Relación cuantitativa y cualitativa del MOS y valoración cualitativa de la degradación

<b>MOS</b>	<b>Descripción de Calidad</b>	<b>Degradación</b>
5	Excelente	Imperceptible
4	Bueno	Perceptible
3	Aceptable	Ligeramente molesto
2	Pobre	Molesto
1	Mala	Muy molesto

Para los efectos de este estudio se va a tener en cuenta además los niveles de satisfacción de los usuarios, que están determinados por rangos de niveles de MOS. La Tabla 2.2, tomada de [77], [78] relaciona estos rangos.

Tabla 2.2: Nivel de satisfacción de los usuarios para diferentes rangos de MOS

<b>Rango de MOS</b>	<b>Grado de satisfacción de los usuarios</b>
4.34-4.50	Muy satisfecho (Excellent)
4.03-4,34	Satisfecho (Good)
3.60-4.03	Muchos usuarios satisfechos (Fair)
3.10-3.60	Muchos usuarios insatisfechos (Poor)

2.58-3.10	Casi todos insatisfechos (Bad)
menor que 2.58	No recomendado (NP)

El MOS como medida de QoE se puede utilizar, como en servicio de voz, en servicios que incluyan video en tiempo real o video bajo demanda como aplicaciones de IPTV.

#### 2.1.4 Modelo de consumo de energía

Durante el mecanismo PSM, la WNIC consume la mayor cantidad de energía en el estado activo durante el cual la WNIC está transmitiendo o recibiendo paquetes. En el estado de reposo, por otro lado, todos los circuitos de la WNIC excepto el circuito contador necesitado para la sincronización se apagan para reducir el consumo de energía.

Para contar el consumo de energía se utiliza un conteo del tiempo que la WNIC está en estado activo para ver el porcentaje del tiempo de la comunicación que la WNIC se encuentra encendida. El Consumo de Potencia Media (PCM, power consumption mean) se calcula:

$$T_a = \sum_{i=1}^{C_{ciclos}} t_a \quad (2.9)$$

Donde  $T_a$  es el tiempo de encendido total,  $t_a$  es tiempo de encendido por ciclo, y  $C_{ciclos}$  son la cantidad de ciclos. Luego  $PCM = \frac{T_a}{\text{tiempo del enlace}}$ .

## 2.2 Evaluación del comportamiento.

Para simplificar el análisis matemático de la relación de compromiso QoE/consumo de energía, ambos el consumo de energía y la QoE son evaluados usando un DTMC con recompensa [69], de esta manera pueden ser evaluados resolviendo un sistema de ecuaciones lineales. Para este análisis se tiene en cuenta un valor de retardo máximo igual a 60 milisegundos (ms), los paquetes que tengan un retardo debido a la componente de la demora específicamente adicionada para compensar los retardos del mecanismo PSM ( $t_b > 60\text{ms}$ ) se descartan. A continuación se analizan los cálculos de retardo promedio, el consumo promedio de potencia y la PLR percibida por ciclo para luego, siguiendo una matriz de probabilidad de transición entre los estados de un PSM, calcular los valores anteriores durante todo el enlace.

### 2.2.1 Análisis del retardo promedio

Para calcular el retardo promedio se utiliza la siguiente ecuación [6], donde se tienen en cuenta todas las combinaciones posibles de paquetes con llegada dentro del tiempo de retardo máximo permitido para que el paquete no se considere perdido.

Según lo expuesto en [7] cuando el grado de multiplexación del enlace es alto, el proceso de arribo de paquetes se puede modelar como un proceso de Poisson. Se asume que el arribo de paquetes sigue una distribución de Poisson con razón media  $\lambda$ , y acorde a esto el intervalo entre paquetes tiene una distribución exponencial. Con una distribución de Poisson, la probabilidad de que  $N$  paquetes arriben en  $t$  unidades de tiempo,  $P_N(t)$  se puede obtener [6]:

$$P_N(t) = \frac{(\lambda t)^N}{N!} \times e^{-\lambda t}, \text{ para } N = 0, 1, 2, \dots \infty. \quad (2.10)$$

Donde  $t$  se sustituye por la duración de un ciclo DRX para cada estado del modelo de Markov. Según [6] el retardo promedio de un paquete en un ciclo donde el tiempo en reposo es igual a  $t-t_0$  es:

$$D(1) = \frac{1}{(t-t_0)} \sum_{d_1=1}^{t-t_0} d_1 \quad (2.11)$$

Mientras que el retardo promedio de  $X$  ( $X > 1$ ) paquetes en un ciclo donde el tiempo en reposo es igual a  $t-t_0$ , se deriva de la siguiente forma:

$$D(X) = \frac{1}{(t-t_0) - (X-1)} \sum_{d_1=X}^{t-t_0} F(X), \quad (2.12)$$

Donde:

$$F(X) = \sum_{d_2=X-1}^{d_1-1} \dots \sum_{d_X=1}^{d_{X-1}-1} \frac{\sum_{i=1}^X d_i}{\prod_{i=1}^{X-1} (d_i - (X-i))} \quad (2.13)$$

Por tanto el retardo  $D(k)$  de un estado  $k$  se puede obtener como la probabilidad de que lleguen  $X$  paquetes por el retardo que involucran estos  $X$  paquetes, o sea:

$$D(k) = \sum_{N=1}^{t-t_0} P_N(d_k) \times D(N) \quad (2.14)$$

Donde  $N$  es la cantidad máxima de paquetes que arriban en el ciclo, como se asume que los paquetes que sobrepasen un retardo de tiempo  $T$  se consideran perdidos, estos no influyen dentro del cálculo del retardo, si se asume que  $T=240ms$ , con  $t=180ms$ , entonces el máximo retardo debido al mecanismo PSM ( $t_b$ ) que puede sufrir un paquete sin perderse es de 60ms. Por tanto,  $N$  será igual a  $t - t_0$  para los ciclos con duración  $d_k \leq 60ms$ , mientras para ciclos con duración  $d_k > 60ms$ , entonces  $N=60$ .

Si denotamos como  $r_k$  la probabilidad de estar en un estado estable  $k$ . Entonces, el retardo promedio de un mecanismo DRX con  $K$  duraciones de ciclo,  $E(D)$  es igual a:

$$E(D) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} r_k \times D(k)}{\sum_{k=0}^{K-1} (r_k \sum_{i=1}^N i \times P_N(d_k))} \quad (2.15)$$

### 2.2.2 Análisis de la PLR percibida (PLR<sub>p</sub>)

La PLR percibida en que se enfoca este análisis es la causada solo por el efecto que tiene el mecanismo DRX, considerando una restricción de retardo máximo  $T$ , y se asume que los paquetes que sufran un retardo mayor a este valor serán descartados.

La PLR esperada en un PSM con  $K$  duraciones de ciclos se puede calcular de la siguiente forma:

$$PLR = \sum_{k \in K} r_k \times \frac{d_k - (t - t_0)}{d_k}, \text{ para } d_k > T \quad (2.16)$$

Luego, para obtener la PLR<sub>p</sub> se inserta en la PLR el efecto que pueden tener las pérdidas en ráfagas [47]. Para minimizar la dificultad desde el punto de vista matemático el análisis de las pérdidas en ráfagas no se toma en cuenta para el análisis teórico de los resultados, pero si se tendrá en cuenta para las simulaciones de los experimentos.

### 2.2.3 Análisis del consumo de potencia

El consumo de potencia se considera como el porcentaje del tiempo gastado por el UE en el periodo de encendido sobre el tiempo gastado en todos los ciclos, evitando la dependencia de cualquier modelo de consumo de potencia particular [7]. El consumo de potencia respecto a una duración DRX  $d_k$  se puede obtener como:

$$pc_k = \frac{\text{duracion de encendido}_k}{d_k}, \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots, K - 1. \quad (2.17)$$

Donde  $duracion\ de\ encendido_k$  corresponde al tiempo del ciclo que la WNIC está encendida intercambiando paquetes. Luego, el consumo de potencia es normalizado por la duración DRX. Por lo tanto, el consumo de potencia esperado se puede calcular como:

$$pcm = \sum_{k=0}^{K-1} r_k \times pc_k. \quad (2.18)$$

Donde  $r_k$  es la probabilidad de estar en un estado estable  $k$ .

#### 2.2.4 Análisis del MOS

Para analizar el MOS de los algoritmos en cuestión se utiliza el factor R obtenido del Modelo E analizado anteriormente. Para ello se utilizan los valores obtenidos del retardo y la PLR, mientras que se pretende utilizar el códec AMR-WB (722.2) para el cálculo.

### 2.3 Algoritmos PSM

En la literatura se han descrito varios algoritmos PSM, esta investigación se centra en los descritos en [6], [7], pues son algoritmos diseñados específicamente para redes LTE y ambos basan su funcionamiento en la QoS a la hora de decidir la longitud de los ciclos de trabajo. A continuación se describe el funcionamiento general de los mecanismos definidos en [6], [7] y se realizan los cálculos teóricos para la determinación del consumo, la PLR, el retardo promedio y el MOS. Posteriormente se proponen modificaciones al algoritmo descrito en [7] para permitirle un funcionamiento consciente de la QoE, pues aunque los dos algoritmos anteriores son PSMs conscientes de la QoS, como se ha expuesto anteriormente, no siempre una buena QoS implica una adecuada QoE.

#### 2.3.1 Mecanismo PSM usando DRX con mezcla de ciclos cortos y largos.

Este mecanismo consta de dos tipos de ciclo DRX, un ciclo corto (con valor de 16, 20, 32, 40 o 64 ms) y un ciclo largo (con valor de 40, 64, 80, 128 o 160 ms), el esquema es capaz de mejorar la eficiencia en cuanto a ahorro de energía mientras que simultáneamente tiene en cuenta requerimientos específicos de QoS para dinámicamente cambiar los parámetros DRX acorde a la intensidad del tráfico. La duración DRX es luego determinada monitoreando el número de ciclos DRX activos y en silencio.

Como se vio anteriormente el proceso de arribo de paquetes se puede modelar siguiendo una distribución de Poisson, donde para  $n$  arribos de paquetes en un intervalo de tiempo  $t$  se tiene la siguiente probabilidad de arribo:

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \times e^{-\lambda t}, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (2.19)$$

Donde  $\lambda$  representa la razón media de arribos de paquetes, como solo tenemos dos diferentes ciclos DRX en consideración, el intervalo de tiempo  $t$  puede tener los siguientes valores:

$$t = \begin{cases} t_s, & \text{para ciclos cortos DRX} \\ t_l, & \text{para ciclos largos DRX} \end{cases} \quad (2.20)$$

Se toman  $p_s$  y  $p_l$  como las probabilidades de que no arriben paquetes estando en un ciclo corto DRX y un ciclo largo DRX, respectivamente. Basado en las ecuaciones (2.19) y (2.20) se puede arribar a las expresiones (2.21) y (2.22):

$$p_s = P_0(t_s) = e^{-\lambda t_s} \quad (2.21)$$

$$p_l = P_0(t_l) = e^{-\lambda t_l} \quad (2.22)$$

Las transiciones entre los ciclos DRX corto y largo se pueden modelar con un modelo de Markov como el de la figura 2.2, donde el estado ciclo corto DRX  $i$ th significa que la MS ha experimentado  $i$  ciclos cortos DRX consecutivos, y  $P_i$  es la probabilidad de estar en este estado. En este mecanismo DRX, cuando el UE se encuentra en el estado ciclo corto DRX  $i$ th, este pasa al estado ciclo corto DRX  $(i+1)$  th con una probabilidad  $p_s$  (no arriban paquetes en un ciclo corto DRX). Así, cuando no se reciben paquetes durante  $Y$  ciclos cortos DRX consecutivos, el UE en cuestión pasa al estado de ciclo largo DRX, donde permanecerá con una probabilidad  $p_l$  (no arriban paquetes en un ciclo largo DRX). Sin embargo, cuando arribe un paquete, ya sea en un ciclo corto DRX o en un ciclo largo DRX, el UE regresa al estado de ciclo corto DRX inicial (primero) con una probabilidad de  $(1 - p_s)$  o  $(1 - p_l)$ , respectivamente.

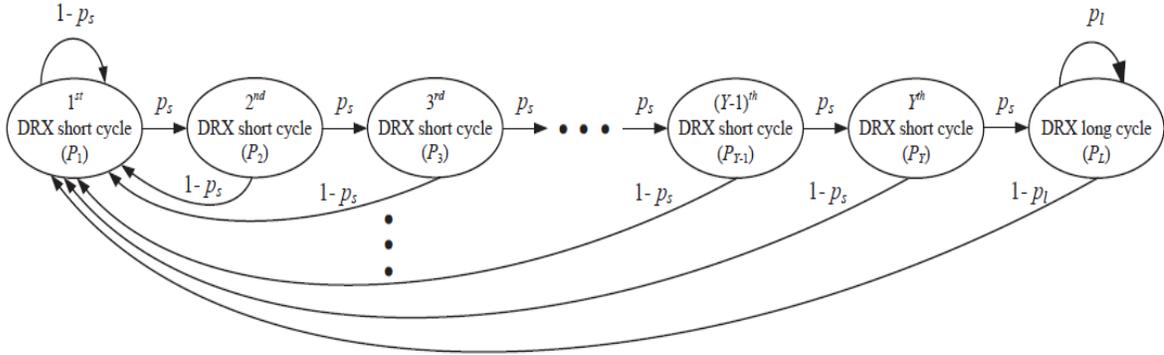


Figura 2.2. Modelo de cadena de Markov para las transiciones de estados [6].

Si se considera que  $P_y, y = 1, 2, \dots, Y$ , la probabilidad de estado de que el UE se encuentre en el  $y$ th ciclo corto DRX, y  $P_l$  la probabilidad de estado de estar en un ciclo largo DRX. Se tiene normalizado que:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_Y + P_l = 1 \tag{2.23}$$

Obteniendo que la probabilidad de estar en un estado de ciclo corto DRX es:

$$P_i = P_1 \times p_s^{(i-1)}, \text{ para } i = 2, 3, \dots, Y \tag{2.24}$$

Y la probabilidad de estar en un ciclo largo DRX se obtiene como:

$$P_L = \frac{P_1 \times p_s^Y}{(1 - p_l)} \tag{2.25}$$

Finalmente, se tiene que la probabilidad de estar en un ciclo corto ( $P_{SC}$ ) es:

$$P_{SC} = P_1 + P_2 + \dots + P_Y = 1 - P_L \tag{2.26}$$

### 2.3.2 Mecanismo PSM usando DRX multiciclo.

En este esquema se emplea un mecanismo multiciclo (8 ciclos para ser precisos) para redes LTE/LTE-A. El diseño propuesto es capaz de mejorar la eficiencia en cuanto a ahorro de energía mientras que simultáneamente tiene en cuenta requerimientos específicos de QoS para dinámicamente cambiar los parámetros DRX acorde a la intensidad del tráfico. Este es un método manejado por tablas, el cual preestablece off-line (desconectado de la red) los parámetros DRX óptimos correspondientes a las intensidades del tráfico y diferentes requerimientos de QoS, tales como retardo de los paquetes y PLR basándose en un método

de análisis teórico. En tiempo real, los parámetros DRX de cada UE pueden ser determinados óptimamente con una simple mirada a la tabla sin malgastar muchos recursos y tiempo computacional.

Con este mecanismo multiciclo DRX, las duraciones DRX se configuran como  $K$  ( $K > 2$ ) diferentes valores en vez de solo dos valores (corto y largo). La duración DRX es luego determinada monitoreando el número de ciclos DRX activos y en silencio. Si  $m$  ciclos DRX activos ocurren consecutivamente (ciclos recibiendo paquetes del canal de bajada), el algoritmo propuesto decrece la actual duración del ciclo DRX al nivel inmediato inferior. Cuando el número de ciclos consecutivos DRX en silencio (no se reciben paquetes del canal de bajada) alcanza el valor de  $n$ , la duración DRX actual se incrementara al nivel inmediato superior.

Las  $K$  duraciones DRX se denotan como  $(d_0, d_1, d_2, \dots, d_{k-1})$ , donde  $d_0 < d_1 < d_2 < \dots < d_{k-1}$ . En la figura 2.3 se muestra un modelo de cadena de Markov de  $K$  estados para modelar las transiciones entre estados.

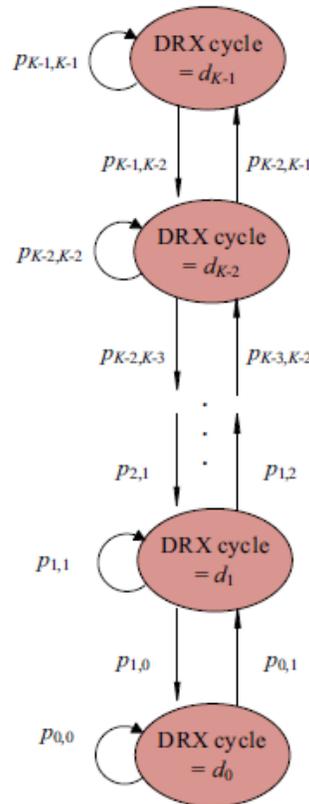


Figura 2.3: Diagrama de transición entre estados del esquema DRX multiciclo [7].

En la figura 2.3 se puede ver que se denota  $p_{k,k+1}$  como la probabilidad de transición de pasar de un estado  $k$  (duración DRX  $d_k$ ) a un estado  $k+1$  (duración DRX  $d_{k+1}$ ), para  $k = 0, 1, 2, \dots, K-2$ , y similarmente  $p_{k,k-1}$  representa la probabilidad de transición de pasar de un estado  $k$  (duración DRX  $d_k$ ) a un estado  $k-1$  (duración DRX  $d_{k-1}$ ), para  $k = 1, 2, \dots, K-1$ . Según lo expuesto en [7] cuando el grado de multiplexación del enlace es alto, el proceso de arribo de paquetes se puede modelar como un proceso de Poisson. Se asume que el arribo de paquetes sigue una distribución de Poisson con razón media  $\lambda$ , y acorde a esto el intervalo entre paquetes tiene una distribución exponencial. Con una distribución de Poisson, la probabilidad de que  $x$  paquetes arriben en  $t$  unidades de tiempo,  $P_x(t)$  se puede obtener [7]:

$$P_x(t) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} \times e^{-\lambda t}, \text{ para } x = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (2.27)$$

Por lo que, la probabilidad de que no arriben paquetes dentro del intervalo de tiempo  $t$  será:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.28)$$

Obteniendo las siguientes probabilidades de transición:

$$p_{k,k+1} = (e^{-\lambda d_k})^n, \text{ para } k = 0, 1, \dots, K-2. \quad (2.29)$$

$$p_{k,k-1} = (1 - e^{-\lambda d_k})^m, \text{ para } k = 1, 2, \dots, K-1. \quad (2.30)$$

$$p_{k,k} = \begin{cases} 1 - p_{k,k+1} - p_{k,k-1}, & \text{para } k = 1, 2, \dots, K-2. \\ 1 - p_{k,k+1}, & \text{para } k = 0 \\ 1 - p_{k,k-1}, & \text{para } k = K-1 \end{cases} \quad (2.31)$$

O sea la ecuación (2.29) denota que el estado  $k$  transitará al estado  $k+1$  cuando  $n$  ciclos DRX en silencio ocurran consecutivamente con una probabilidad de  $(e^{-\lambda d_k})^n$ . Mientras la ecuación (2.30) denota que el estado  $k$  transitará al estado  $k-1$  cuando  $m$  ciclos DRX activos ocurran consecutivamente con una probabilidad de  $(1 - e^{-\lambda d_k})^m$ . Finalmente la ecuación (2.31) calcula la probabilidad de que permanezca en este estado  $k$  sin pasar a ningún otro estado.

Si se considera que  $r_k$  es la probabilidad de estado estable de estar en un estado  $k$ . Se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$r_0 \times p_{0,1} = r_1 \times p_{1,0} \quad (2.32)$$

$$r_{K-2} \times p_{K-2,K-1} = r_{K-1} \times p_{K-1,K-2} \quad (2.33)$$

$$r_k \times (p_{k,k-1} + p_{k,k+1}) = r_{k-1} \times p_{k-1,k} + r_{k+1} \times p_{k+1,k}, \text{ para } k = 1, \dots, K-2. \quad (2.34)$$

Las ecuaciones anteriores se derivan del hecho de que para un estado estable, la razón de arribo es igual a la razón de partida. Por ejemplo, para un estado 0, la razón de arribo  $r_1 \times p_{1,0}$  (de un estado 1 al estado 0) es igual a la razón de salida  $r_0 \times p_{0,1}$  (del estado 0 al estado 1). Así mismo, ocurre para un estado  $K-1$ , mientras para los estados intermedios la probabilidad de salida de este estado  $k$  ya sea hacia el inmediato superior o el inferior es igual a la probabilidad de arribo de un estado  $k+1$  y uno  $k-1$  al estado  $k$ . Con la siguiente condición de normalización impuesta se puede obtener la probabilidad de distribución de estado estable de estar en un estado  $k$ .

$$\sum_{k=0}^{K-1} r_k = 1 \quad (2.35)$$

De las ecuaciones anteriores se pueden deducir las probabilidades de estado de cada duración DRX, mediante una matriz de transición  $[P]$  y siguiendo el modelo de Markov para las transiciones entre estados, de esta manera se obtiene que:

$$P = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & p_{0,K-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,K-1} \\ p_{2,0} & p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,K-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{K-1,0} & p_{K-1,1} & p_{K-1,2} & \cdots & p_{K-1,K-1} \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{K-1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Donde se tiene que  $[P] \times [R] = [C]$ , siendo  $[C]$  una matriz columna con  $K+1$  valores y todos ellos igual a cero excepto el último que es igual a 1, debido a lo expuesto en la ecuación (2.35):

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones se obtiene la matriz  $[R]$  la cual consta de las probabilidades de estar en cada uno de los estados.

Las  $K$  duraciones DRX en [7] se evalúan de la siguiente forma (4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512ms), mientras que los valores de  $m$  y  $n$  se calculan siguiendo la siguiente formulación de optimización:

$$(m, n) = \arg \min_{m, n} \Gamma \quad (2.38)$$

Donde:

$$\Gamma = f_{pc}(pc) + f_{pd}(pd) + f_{plr}(plr) \quad (2.39)$$

Donde  $f_{pc}(x)$ ,  $f_{pd}(x)$  y  $f_{plr}(plr)$  representan las funciones de costo-recompensa [7], o sea el costo percibido en el UE correspondiente a consumo de potencia, el retardo de paquetes y la PLR, respectivamente.

### 2.3.3 Mecanismo PSM propuesto

Después de realizar experimentos (ver sección 3.2.1) para evaluar los dos algoritmos presentados anteriormente, se pudo apreciar una mejora considerable en cuanto a ahorro de potencia en el mecanismo PSM de 8 ciclos. Sin embargo, el análisis en cuanto a la QoE no le favorece. A pesar del inconveniente que representa el deterioro de la calidad, el ahorro de potencia motivó tomar como base el algoritmo de 8 ciclos para desarrollar un nuevo algoritmo. La idea básica en torno al nuevo algoritmo consiste en modificar la estrategia de migración entre estados de forma que se garanticen niveles adecuados de QoE.

El método se basa en [7] para, mediante el manejo de tablas, preestablecer off-line los parámetros óptimos DRX correspondientes a las distintas intensidades de tráfico. Sin embargo, introduce la novedad de gobernar el proceso de migración de forma que cumpla con los requerimientos de QoE, en función del retardo de paquetes y PLR, mientras que utiliza el procedimiento propuesto por [47] para evaluar el efecto de las pérdidas en ráfagas.

Con este mecanismo multiciclo DRX, las duraciones DRX se configuran como 8 diferentes valores, y la variación de la duración DRX se realiza monitoreando los periodos DRX activos y en silencio al igual que [7], basándose en los valores preestablecidos de  $n$ .

Por otra parte el algoritmo puede variar los parámetros DRX en dependencia de la evaluación de la QoE que hace a intervalos periódicos de la conversación. Se establece como nivel de umbral para pasar a un estado de duración inmediato inferior un MOS de 3.6 (el cual se

analizó anteriormente como umbral para la insatisfacción de la mayoría de los usuarios), si en un intervalo determinado el valor del MOS se encuentra por debajo de este umbral, el algoritmo decrece la duración actual DRX al nivel inmediato inferior, mientras que si el valor del MOS se encuentra por encima de 4.34, valor donde la degradación es imperceptible, el algoritmo aumenta la duración actual DRX al nivel inmediato superior.

Para modelar la transición entre estados se sigue el algoritmo descrito mediante pseudocódigo en la figura 2.4.

```

Parámetros previos
  Determinar los valores de  $m$ ,  $PLR$  y  $E(D)$  que corresponden a los valores
  umbrales de MOS.
  Salvar los valores en tablas.
Inicio
  Poner la historia de pérdidas a cero.
   $D_k = D_{k \min}$ .
  While sesión VoIP on do:
    Generar paquetes VoIP.
    If WNIC is off:
      Añadir el tiempo de reposo al retardo.
    Else
      Transmitir paquetes.
    End if
    Determinar la  $PLR_p$ .
    Comparar con los valores de la tabla.
    If  $m = m_{\max}$ 
       $D_k = D_{k+1}$ 
    Else
      If  $PLR_p < PLR$  (MOS = 4.34)
         $D_k = D_{k+1}$ 
      elseif  $PLR_p > PLR$  (MOS = 3.6)
         $D_k = D_{k-1}$ 
      end if
    end if
  end
end

```

Figura 2.4: Pseudocódigo del algoritmo propuesto.

Con el objetivo de validar los resultados teóricos, en el siguiente capítulo se discuten los resultados obtenidos mediante simulación de este algoritmo. El estudio también incluye a los algoritmos previos con fines de comparación.

## CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los experimentos realizados a los mecanismos PSM mediante la simulación en la plataforma de programación Matlab para verificar el comportamiento de las ecuaciones derivadas en el capítulo 2 y demostrar la efectividad del mecanismo propuesto basado tanto en el modelo analítico como en las simulaciones. También se describe el modelo utilizado para la generación de paquetes, además se analizan los resultados y se comparan los valores que se obtienen para los diferentes mecanismos PSM con respecto a su comportamiento en cuanto a los distintos parámetros que tienen influencia en la relación de compromiso QoE/ahorro de potencia.

### 3.1 Generalidades de los experimentos

Los paquetes de audio del canal de bajada son generados siguiendo una distribución de Poisson, como se vió en la sección 2.3. Se utiliza para el análisis de la calidad percibida el Modelo E modificado para tener en cuenta el efecto de las pérdidas en ráfagas [47]. El proceso de transición entre estados en el móvil se modela mediante una cadena de Markov [70].

Para todos los experimentos, se generan valores que simulan el proceso de arribo de los paquetes, un evento ‘0’ indica ausencia de paquetes y un evento ‘1’ indica el instante de arribo del paquete a la estación base. Los eventos son generados cada 1 milisegundo (ms), que es el valor del intervalo de tiempo de transmisión (TTI, Transmission Time Interval) en redes LTE/LTE-A, o sea, la duración de una unidad de datos de transmisión en enlaces de radio para tecnología LTE/LTE-A. Entonces, cada 1 ms, se produce un evento ‘0’ si no llegan paquetes a la estación base o un evento ‘1’ si arriban paquetes. El tiempo de arribo queda registrado en una variable “event” y se utiliza en el cálculo posterior de la demora. El

parámetro lambda toma los valores de 33 y 50 paquetes por segundo, simulando una media entre paquetes de 30 y 20 milisegundos, respectivamente.

### 3.1.1 Mecanismo PSM usando DRX con mezcla de ciclos cortos y largos

Para la simulación de este mecanismo con mezcla de ciclos cortos y largos, se toman dos valores de duraciones de ciclos DRX,  $t_s = 32ms$  y  $t_l = 128ms$ , como se sugiere en [7], correspondientes a la duración de un ciclo corto y uno largo respectivamente. Para el intercambio de paquetes la WNIC se enciende durante 2 ms, o sea, del tiempo que dura el ciclo DRX la WNIC se encuentra 2 ms encendida al inicio del ciclo y luego el resto del tiempo está en reposo. Mientras se encuentre en reposo no se realiza intercambio de paquetes, estos se van almacenando en el buffer de la BS, entonces, en esa ventana de 2 ms por ciclo, se realiza el intercambio de paquetes de arribar alguno durante el tiempo que estuvo en reposo. Inicialmente el mecanismo comienza en un ciclo corto DRX.

Cada ciclo consta de un tiempo de inicio ( $t_i$ ) y un tiempo final ( $t_f$ ), donde  $t_f = t_i + d_k$ , y  $d_k$  representa la duración del ciclo DRX en que se encuentra. Luego, el próximo ciclo tiene, consecuentemente, un  $t_i$  y un  $t_f$  donde  $t_i$  es igual al  $t_f$  del ciclo anterior, esto se aplica para los demás mecanismos también. Durante los 2 ms que la WNIC está activa, se analiza si llegaron paquetes durante el tiempo  $d_k$  que dura el ciclo, de no haber paquetes se pasa al siguiente ciclo con la misma duración DRX aumentando el contador de ciclos consecutivos sin recibir paquetes, si el contador arriba a un valor  $Y$ , establecido con anterioridad como la cantidad de ciclos cortos DRX consecutivos sin recibir paquetes para pasar a un ciclo largo DRX, entonces la duración del ciclo DRX será  $t_l$ . De llegar algún paquete durante un ciclo DRX el valor de  $Y$  se reinicia a cero y se pasa nuevamente al estado inicial con ciclo corto DRX.

Si durante el ciclo arriban paquetes se calcula el retardo de estos como el tiempo en que se encendió la WNIC menos el tiempo en que arribaron los paquetes, de exceder algún paquete el retardo máximo  $T$  este se considera perdido, aumentando el contador de paquetes perdidos  $PL$  (Packet Loss) y siguiendo [47] se calcula el efecto de cada paquete perdido para la PLR percibida a causa de las pérdidas en ráfagas, si el retardo no excede el valor máximo, el paquete se considera entregado a la MS y se acumula el retardo de este en el contador de retardo  $PD$  (Packet Delay), además en cada ciclo, independientemente de si llegan o no

paquetes, se aumenta en 2 el contador de consumo  $PC$  (Power Consumption). Esta operación se repite durante cada ciclo hasta el final de la conversación.

Para evaluar la QoE del mecanismo se calcula el MOS a intervalos regulares para tener una relación más detallada del comportamiento del MOS, pues puede ocurrir que, aunque el MOS calculado para toda la conversación cumpla con los requerimientos establecidos, durante periodos de tiempo perceptibles los usuarios se sientan insatisfechos, mientras que durante otros intervalos la percepción de los usuarios sea sobresaliente, influyendo lógicamente en la percepción general y enmascarando resultados adversos en la calidad. Es preferible mantener un nivel de MOS aceptable durante todo el enlace aunque no sea excelente, que ocurra lo expuesto anteriormente. Para el cálculo del MOS se utiliza el Modelo E modificado según [47], con los valores de los contadores  $PL$  y  $PD$  para ese intervalo de tiempo. Al final la PLR se calcula como la relación entre  $PL$  y la cantidad de paquetes que arribaron, el retardo medio se calcula como la relación  $PD$  y la cantidad de paquetes que arribaron sin perderse, mientras el consumo promedio se calcula como el porcentaje del tiempo que la WNIC estuvo encendida, (la relación  $PC$  y el tiempo total del enlace). Además se calcula el MOS general al final de la llamada a partir de  $PL$  y  $PD$ .

### 3.1.2 Mecanismo PSM usando DRX multiciclo

En este mecanismo la WNIC también se considera encendida durante 2 ms, y el resto del tiempo del ciclo en reposo. La gran diferencia es que consta de 8 duraciones de ciclo DRX con valores de (4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 y 512 ms), las transiciones son hacia ciclos adyacentes, o sea, de un ciclo DRX de 8 ms solo puede pasar a un ciclo de 4 ms o a uno de 16 ms, o mantenerse en el de 8 ms. Para las transiciones se cuenta con dos contadores,  $n$  es el contador de ciclo DRX consecutivos sin recibir paquetes y  $m$  es el contador de ciclos DRX consecutivos recibiendo paquetes. Si  $n$  alcanza el valor tope para el tránsito el ciclo pasa a una duración superior, de lo contrario si  $m$  llega al valor tope entonces se pasa a un ciclo de duración inferior, y si ni  $m$  ni  $n$  alcanzan su valor tope se mantiene la duración DRX. Si se reciben paquetes durante un ciclo  $n$  se reinicia y si no se obtienen entonces es  $m$  la que se reinicia a cero. Los cálculos de  $PL$ ,  $PD$ ,  $PC$  y de los MOS instantáneos y general se realizan igual que para el mecanismo anterior.

### 3.1.3 Mecanismo PSM propuesto

El mecanismo propuesto también mantiene la WNIC encendida durante 2 ms en cada ciclo y utiliza 8 ciclos, con duraciones desde 32 ms hasta 320 ms, al migrar en periodos donde no se reciben paquetes utiliza el análisis de los mecanismos anteriores, o sea, si el contador de ciclos DRX sin recibir paquetes llega a su valor tope se pasa al ciclo con duración superior inmediato.

Ahora, el mecanismo también calcula  $PL$ ,  $PD$  y  $PC$  en cada intervalo, pero a la hora de tomar la decisión de migrar de ciclo en los periodos en que se recibieron paquetes lo hace según el MOS calculado a estos intervalos periódicos como se explicó en la sección 3.1.2, o sea, la decisión de migrar la toma al final de estos intervalos, si en estos intervalos el valor del MOS calculado está por debajo de 3.6, *muchos usuarios insatisfechos*, se migra a un ciclo con duración inferior donde hay menos probabilidad de pérdida de paquetes, y si por el contrario el valor del MOS calculado en estos intervalos sobrepasa 4.34, donde la degradación es imperceptible y la calidad excelente, se pasa a un ciclo con duración superior.

## 3.2 Desarrollo de los experimentos

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos realizados para evaluar el comportamiento de los distintos mecanismos PSM. Para ello se establece un retardo máximo debido al mecanismo PSM de 60 ms, el tiempo activo por ciclo es  $t_a = 2$  ms y el tamaño de la ventana del patrón de pérdida,  $g_{min} = 8$  paquetes [47].

El MOS se calcula según el Modelo E [62], donde la PLR percibida se calcula según [47]. Acorde al códec utilizado, AMR-WB [74],  $R_0$  es evaluado en 129,  $I_s$  es puesto a cero, al igual que  $A$ ,  $I_e = 7$  y  $B_{pl} = 13.1$ . Los resultados de las simulaciones son promediados sobre 10 generaciones de paquetes con duraciones de 6 minutos cada una.

### 3.2.1 Experimento 1

En este experimento se evalúan los 2 mecanismos PSM, el multiciclos y el de ciclos cortos y largos. Primeramente, se generan paquetes con una media de 33 paquete por segundo (pkt/s), y luego se generan con una media de 50 paquetes por segundo, se hace una comparación en cuanto al retardo promedio, la PLR, el consumo de potencia y el MOS, así como también se

evalúa el comportamiento del MOS a intervalos regulares para toda la conversación (MOS instantáneo), los intervalos de tiempo se componen de ventanas de 5 segundos.

Para este análisis se utilizan valores de  $Y$  de 2, 4, 6 y 8 ciclos DRX cortos. Para una generación de 33 pkt/s se utilizan valores topes de  $m=20$  y  $n=2$ , mientras que para 50 pkt/s se utiliza  $m=20$  y  $n=1$ .

En las figuras 3.1-3.9 se analizan los resultados para  $\lambda = 33$  pkt/s, los intervalos en cada punto se corresponden con un nivel de confianza de 95%. En la figura 3.1 se muestra el retardo medio de paquetes de los dos algoritmos bajo las condiciones anteriormente expuestas. Como se observa, el retardo medio para el mecanismo PSM multiciclo (8 ciclos) es unos 10 ms mayor aproximadamente que para los mecanismos de ciclos cortos y largos, con una media entre 202 y 206 ms.

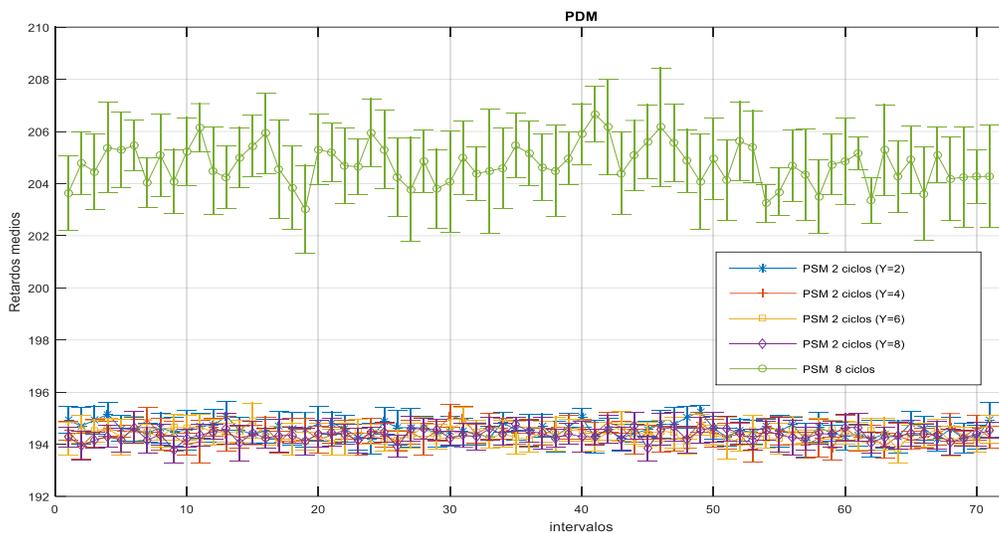


Figura 3.1. Retardo medio de paquetes para  $\lambda=33$  pkt/s.

En la figura 3.2 se puede observar la excesiva PLR que presenta el mecanismo PSM de 2 ciclos (corto y largo) cuando  $Y=2$ . Por otra parte, los valores para el mecanismo PSM multiciclo sobrepasa el 5% de PLR en la mayoría de los intervalos calculados, lo cual aunque presenta mejoras con respecto al anterior, no se puede decir que establezca una adecuada QoE. Mientras, para los demás mecanismos con  $Y=4, 6$  y  $8$  la PLR se mantiene en valores por debajo del 5%.

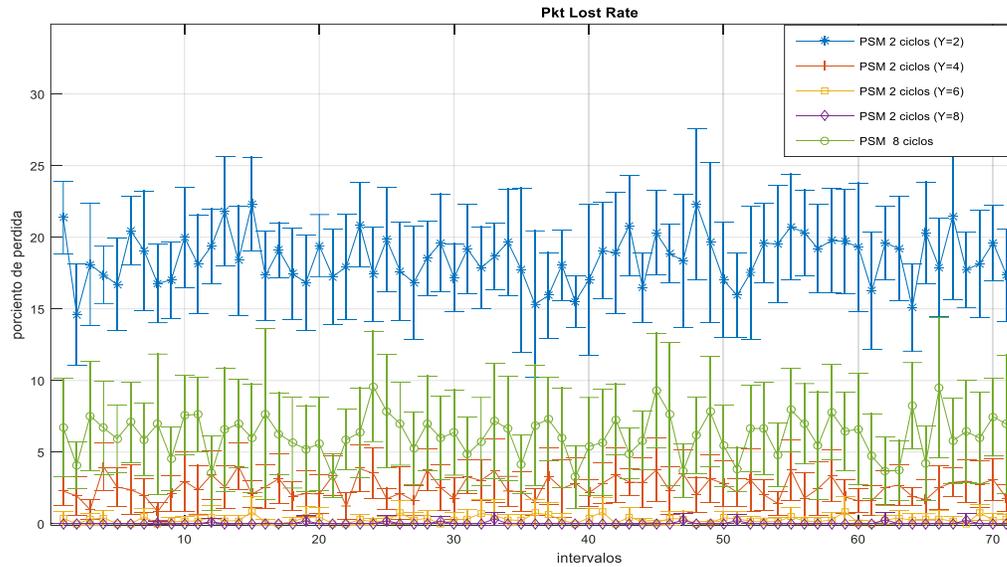


Figura 3.2. Análisis de la PLR para  $\lambda=33$  pkt/s

En la figura 3.3 se analizan los valores del MOS para cada esquema PSM, dando una medida de la calidad percibida por los usuarios. Se puede apreciar la pobre calidad del PSM de 2 ciclos con  $Y=2$  (*consecuencia de su excesiva PLR*) y valores notorios para los demás PSMs de 2 ciclos, donde una proporción alta del tiempo se corresponde con indicadores de calidad altos (*la mayoría de los usuarios están satisfechos*), mientras que el mecanismo multiciclo oscila entre valores de calidad baja y media.

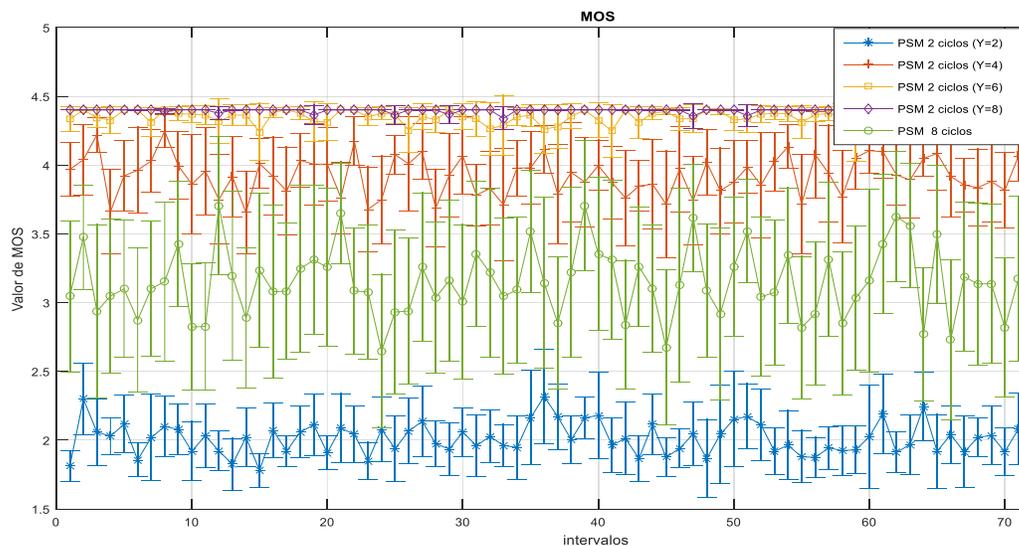


Figura 3.3. Análisis del MOS para  $\lambda=33$  pkt/s.

La figura 3.4 muestra el consumo de potencia promedio de cada esquema, donde se puede apreciar que los mecanismos con más ahorro de potencia son el de 8 ciclos y el de 2 ciclos con  $Y=2$ .

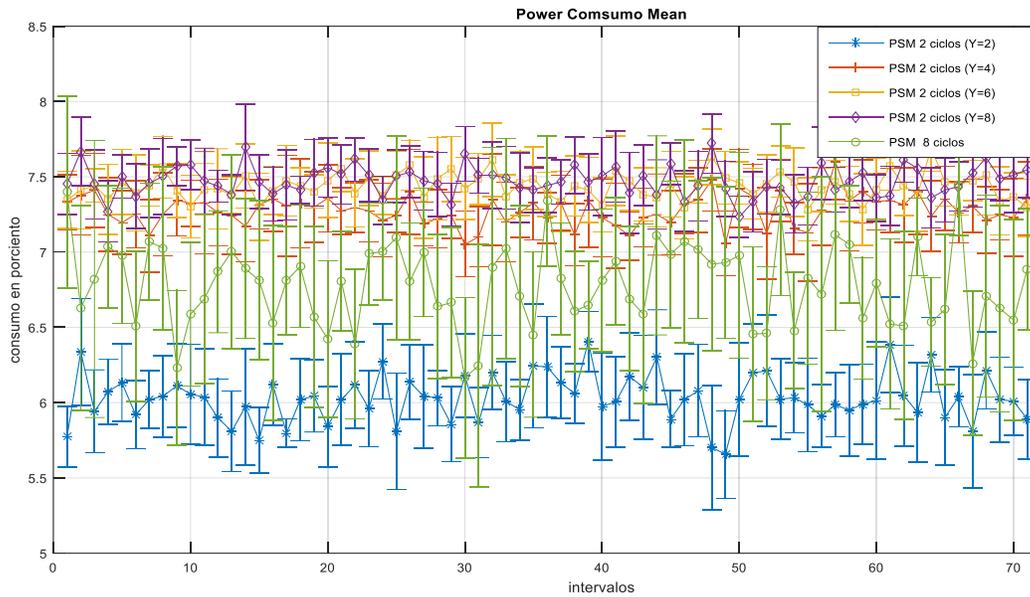


Figura 3.4. Análisis del consumo promedio para  $\lambda=33$  pkt/s.

A continuación se muestran los intervalos de tiempo, en que el MOS se encuentra dentro de los distintos rangos enunciados en la sección 2.1.4, en las figuras 3.5 - 3.9 se muestran los valores para el PSM de 2 estados ( $Y=2, 4, 6$  y  $8$ ) y el PSM multiciclos. Para facilitar la lectura de estos resultados se utilizan gráficos de pastel.

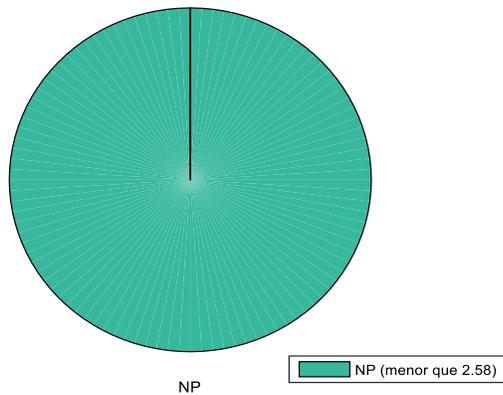


Figura 3.5. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos  $Y=2$ .

En la figura 3.5 se observa la baja calidad del PSM de 2 ciclos con  $Y=2$ , donde la totalidad del tiempo se encuentra en valores no permitidos (NP), por lo cual, a pesar de lograr el menor consumo de energía (6% aproximadamente), no resulta práctica su utilización.

En las figuras 3.6-3.8 se muestra la efectividad en cuanto a la calidad de los PSM de 2 ciclos con  $Y = 4, 6$  y  $8$ . En estos esquemas el MOS se encuentra por encima de 3.6 todo el tiempo, aportando una QoE notable, sin embargo, el consumo alcanza valores por encima del 7%.

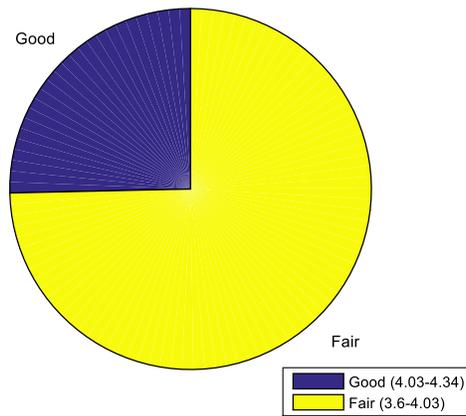


Figura 3.6. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos  $Y=4$ .

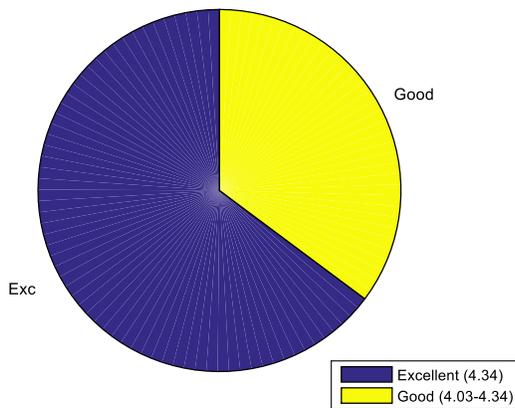


Figura 3.7. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos  $Y=6$ .

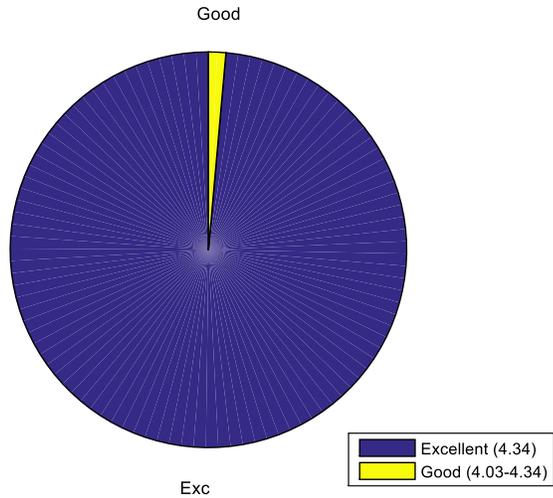


Figura 3.8. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos Y=8.

En la figura 3.9 se muestra cómo los intervalos de calidad para el PSM de 8 ciclos se mantienen en niveles medios y solo un 2% se encuentra por debajo de 2.58 (NP), mientras se logra un menor consumo con respecto a los PSM de 2 ciclos con Y = 4, 6 y 8.

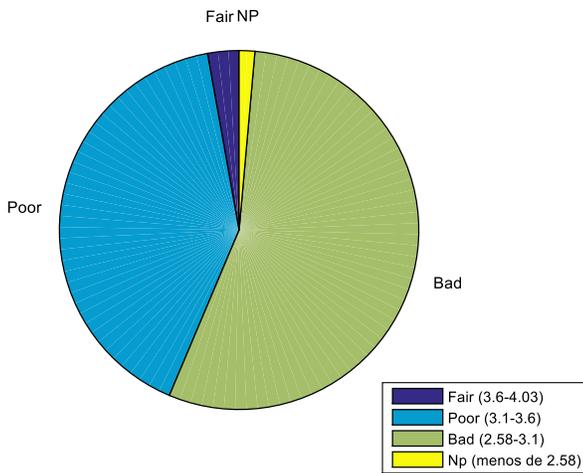


Figura 3.9. MOS por intervalos para el PSM de 8 ciclos.

Ahora se pasa a realizar el mismo análisis para  $\lambda=50$  pkt/s. En las figuras 3.10 - 3.13 se observa como el retardo se mantiene en valores cercanos a los obtenidos para  $\lambda=33$  pkt/s, mientras que en los demás aspectos se observa una mejora por parte del mecanismo PSM de 2 ciclos con Y=2. Los demás esquemas de 2 ciclos mejoran con respecto a la PLR y consecuentemente al MOS, pero sufren un deterioro en el ahorro de potencia, y aunque el

mecanismo PSM de 8 ciclos ve deteriorado su MOS, el ahorro de potencia se mantiene en valores cercanos a los resultados para  $\lambda=33$  pkt/s.

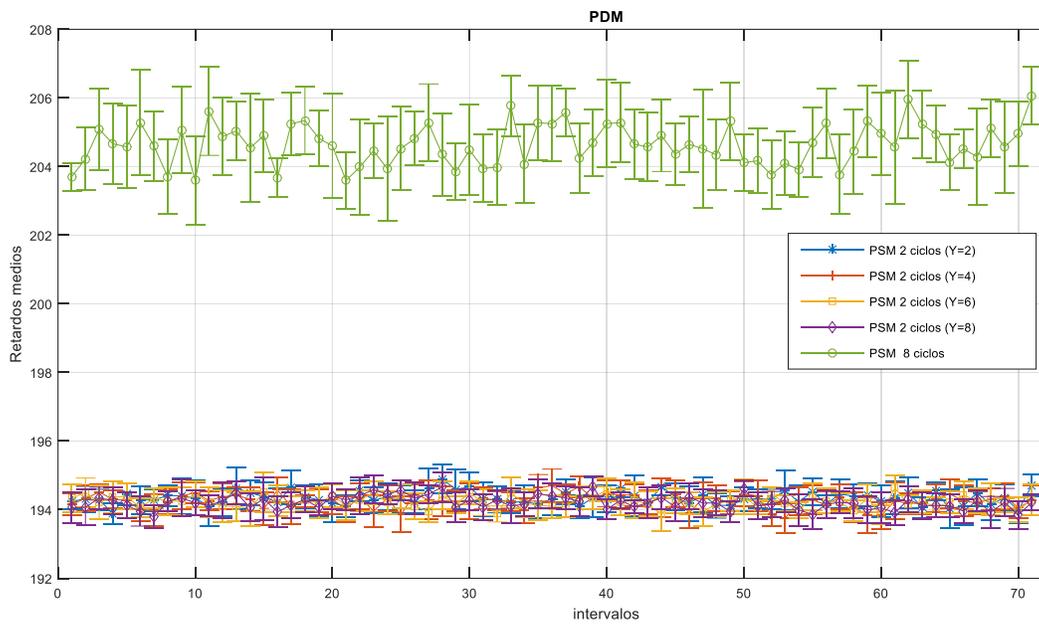


Figura 3.10. Retardo medio por intervalos para  $\lambda=50$  pkt/s.

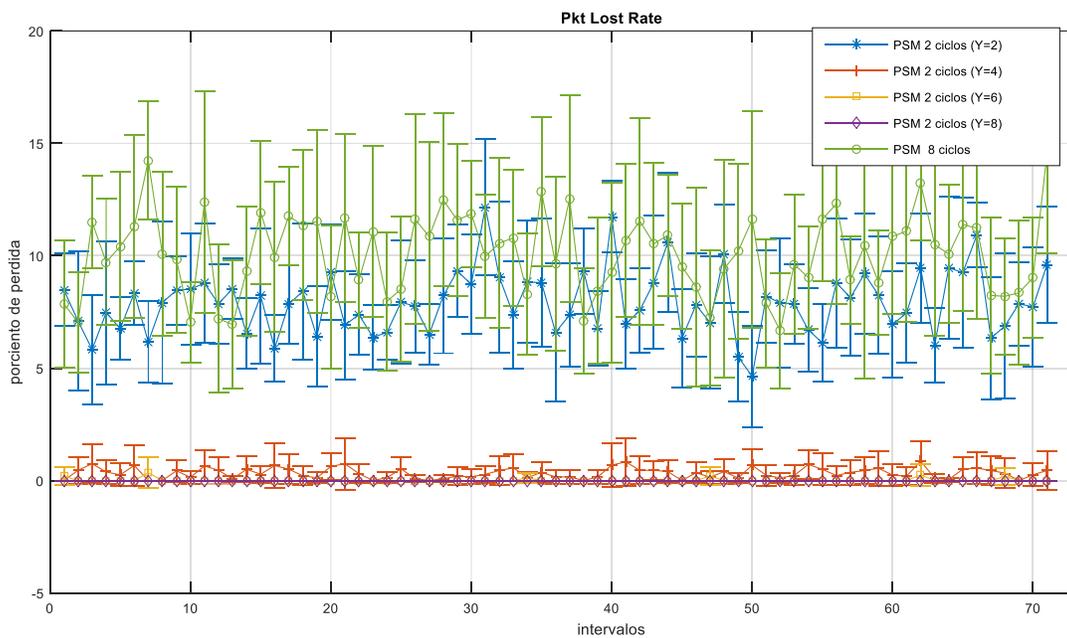


Figura 3.11. Análisis de la PLR por intervalos para  $\lambda=50$  pkt/s.

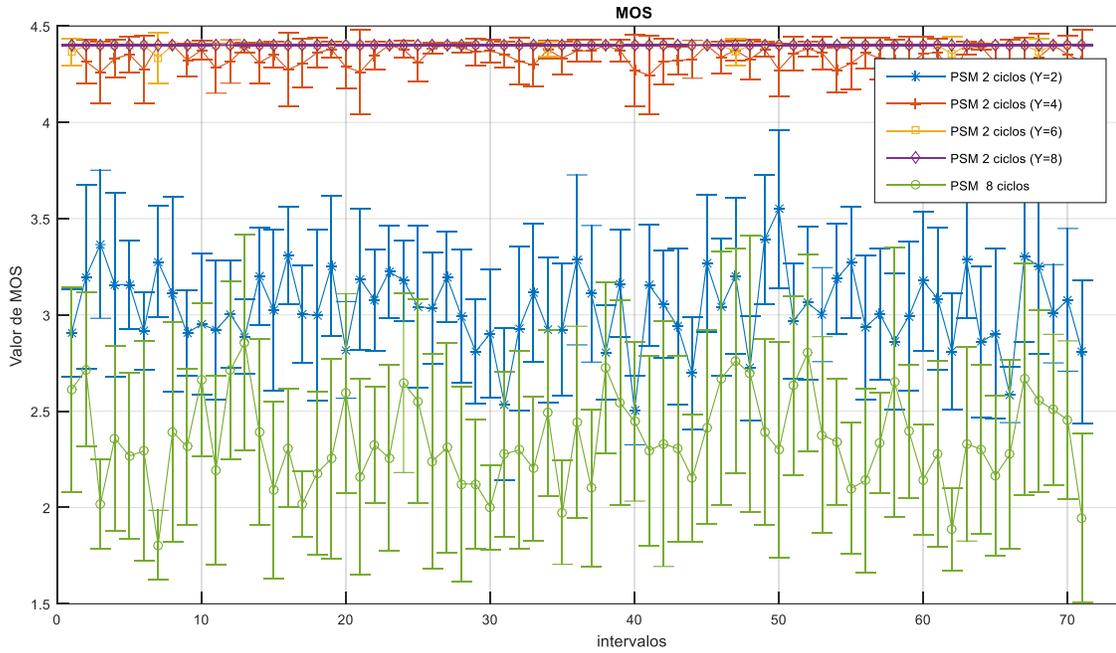


Figura 3.12. Análisis del MOS por intervalos para  $\lambda=50$  pkt/s.

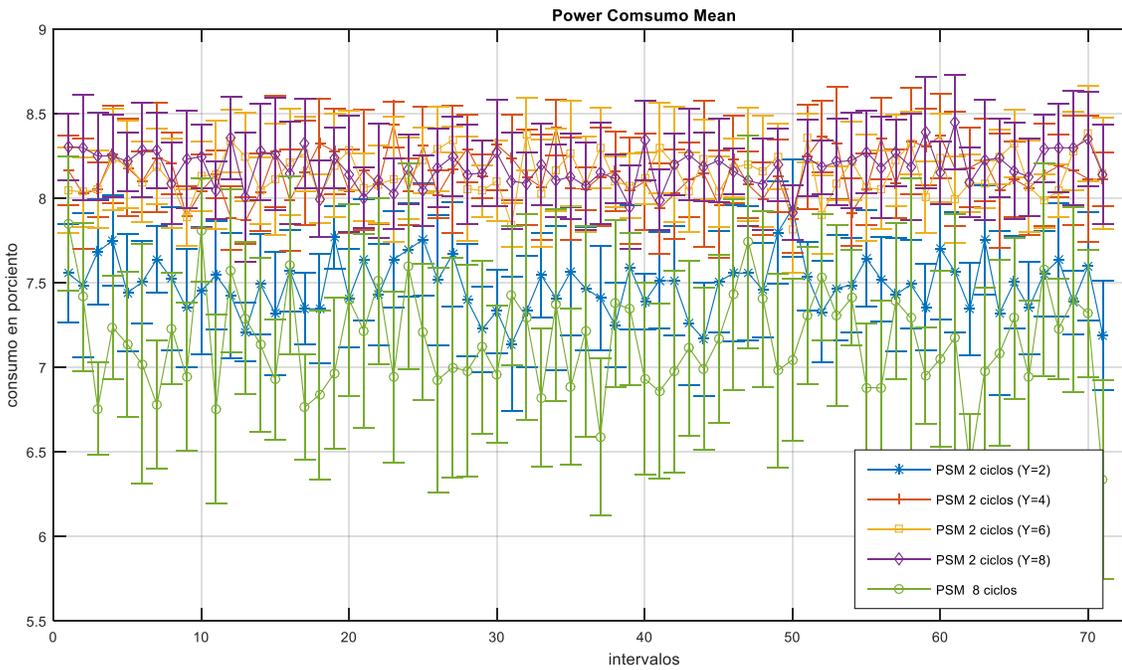


Figura 3.13. Análisis del consumo promedio por intervalos para  $\lambda=50$  pkt/s.

En la figura 3.14 se nota la mejora en cuanto a la calidad del PSM de 2 ciclos con  $Y=2$ , con todo el tiempo en valores por encima de los no recomendados (NP), pero su consumo aumenta considerablemente con valores por encima del 7%.

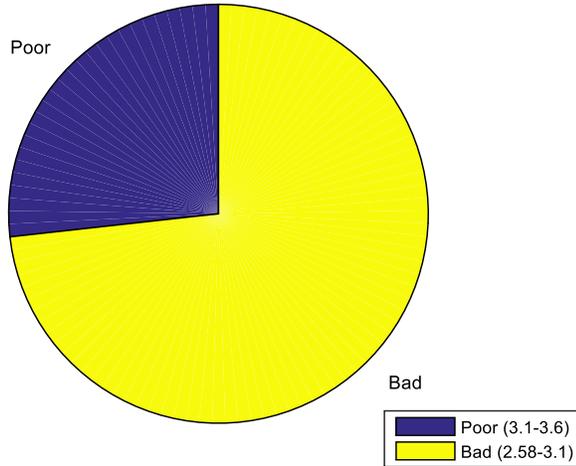


Figura 3.14. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos,  $Y=2$ .

Para los PSM con  $Y = 4, 6$  y  $8$  se mantienen los buenos niveles de calidad con un aumento del consumo de alrededor de un 1%.

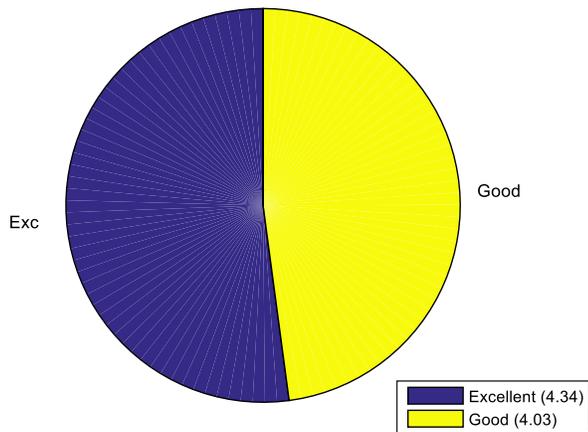


Figura 3.15. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos,  $Y=4$ .

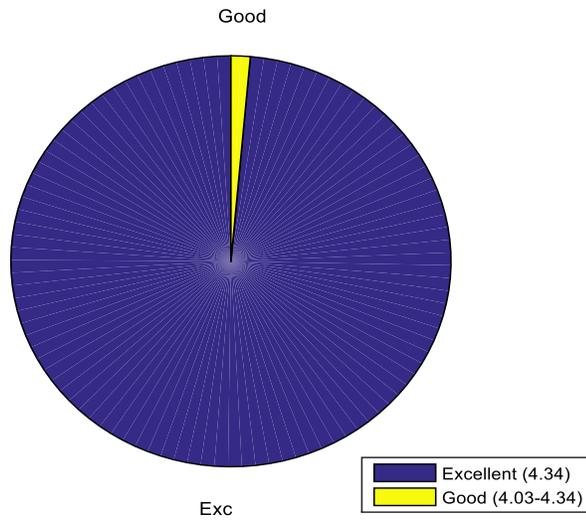


Figura 3.16. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos  $Y=6$ .

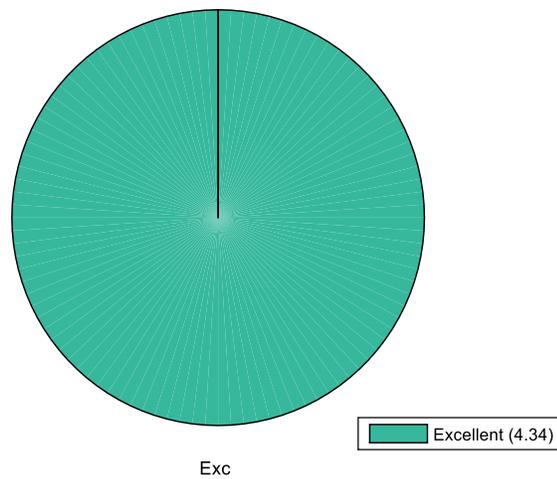


Figura 3.17. MOS por intervalos para el PSM de 2 ciclos  $Y=8$ .

En la figura 3.18 se muestra el deterioro en cuanto a la calidad del mecanismo PSM de 8 ciclos, donde los periodos con MOS por debajo de 2.58 alcanzan el 50%.

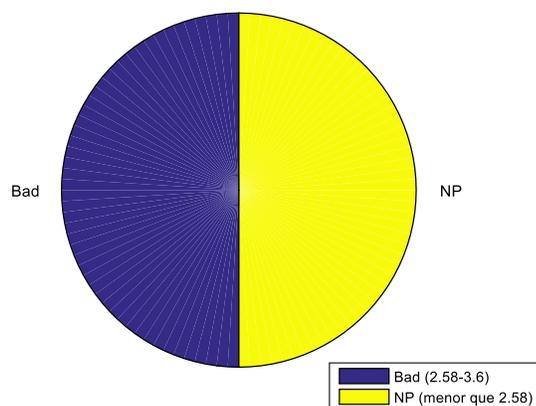


Figura 3.18. MOS por intervalos para el PSM de 8 ciclos.

Si se analizan los gráficos anteriores se puede ver que se logra un mayor ahorro de potencia con el mecanismo de 8 ciclos. Sin embargo, los valores de MOS no son buenos. Resulta válido comprobar si es posible mejorar la QoE en el mecanismo de 8 ciclos reteniendo la ventaja de ofrecer un elevado ahorro de potencia. Presumiblemente, es posible lograr esto si se modifica el mecanismo de migración entre estados de tal forma que tenga en cuenta el efecto que produce en la calidad cada transición posible. Esta investigación asume ese reto y propone un nuevo algoritmo PSM sensible a la QoE.

### 3.2.2 Experimento 2

En esta sección se compara el comportamiento del mecanismo propuesto con respecto a los mecanismos analizados anteriormente. Para ello se utilizan duraciones de los ciclos del mecanismo propuesto de 32, 50, 64, 80, 128, 160, 256 y 320 ms. Se generan paquetes con razones de 33 y 50 pkt/s, y se analiza la demora media, la PLR, el MOS y el consumo promedio del mecanismo propuesto con respecto a los anteriores con un 95% de intervalo de confianza.

En la figura 3.19 se puede apreciar como el comportamiento del retardo promedio sigue el mismo comportamiento que el mecanismo PSM de 8 ciclos, mientras en las figuras 3.20 Y 3.21 se observa la efectividad del mecanismo propuesto en cuanto a la PLR, con valores por debajo del 5%, y en cuanto a la percepción de la calidad (MOS) con valores donde la degradación es prácticamente imperceptible.

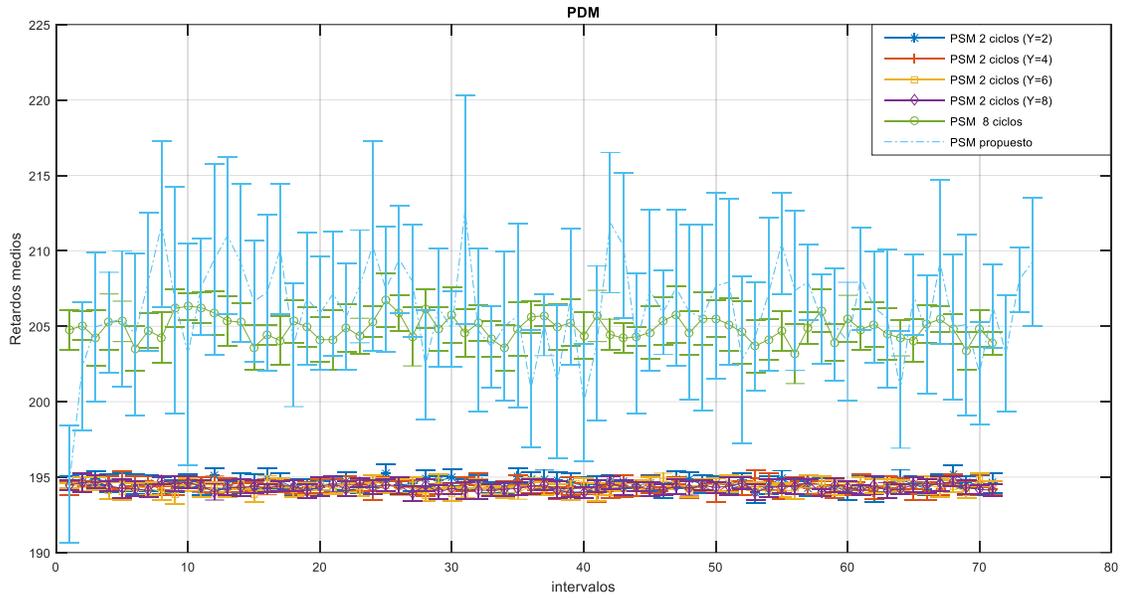


Figura 3.19. Retardo medio de los distintos mecanismos,  $\lambda=33$  pkt/s.

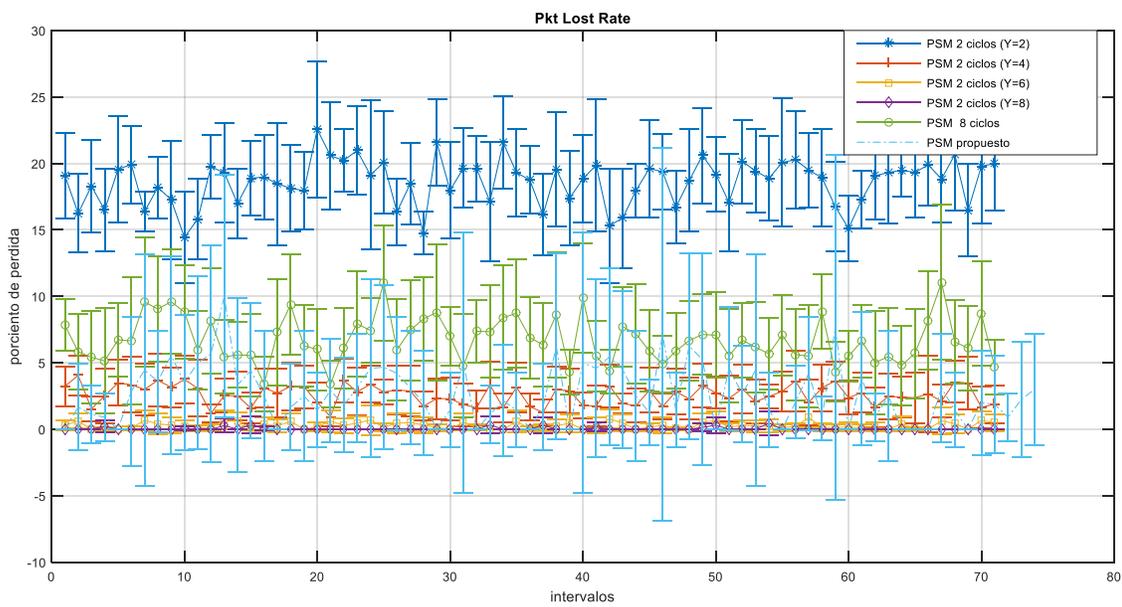


Figura 3.20. Análisis de la PLR para los distintos mecanismos,  $\lambda=33$  pkt/s.

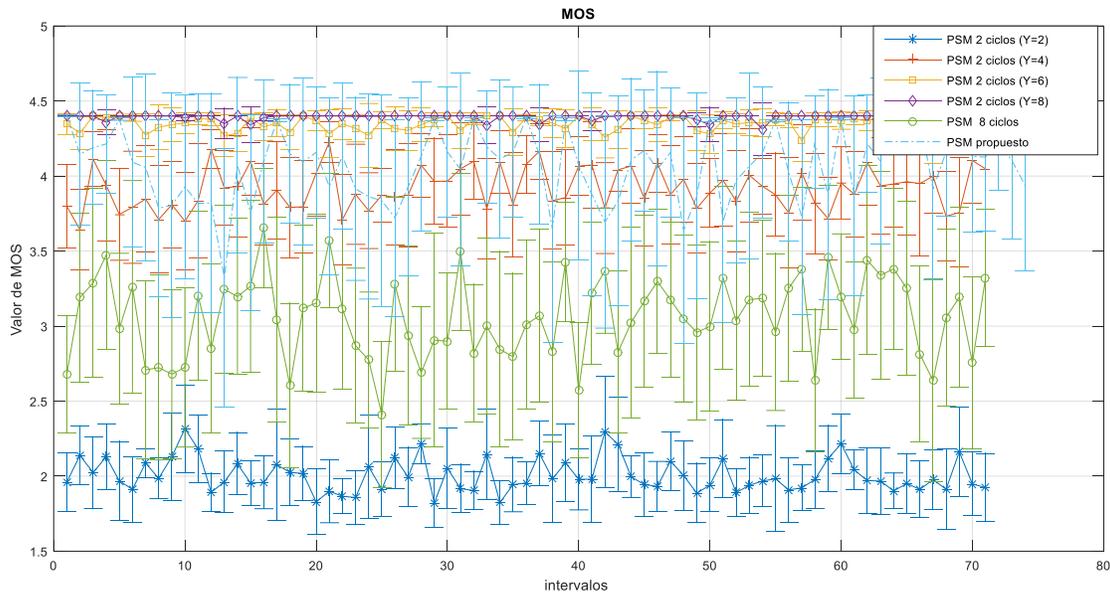


Figura 3.21. Análisis del MOS para los distintos mecanismos,  $\lambda=33$  pkt/s

Luego, en la figura 3.22 se aprecia la efectividad del mecanismo en cuanto al ahorro de potencia, disminuyendo el consumo en aproximadamente un 50% y en la figura 3.23 se plantea de forma más gráfica la parte del tiempo en que el enlace se encuentra en los determinados rangos del MOS.

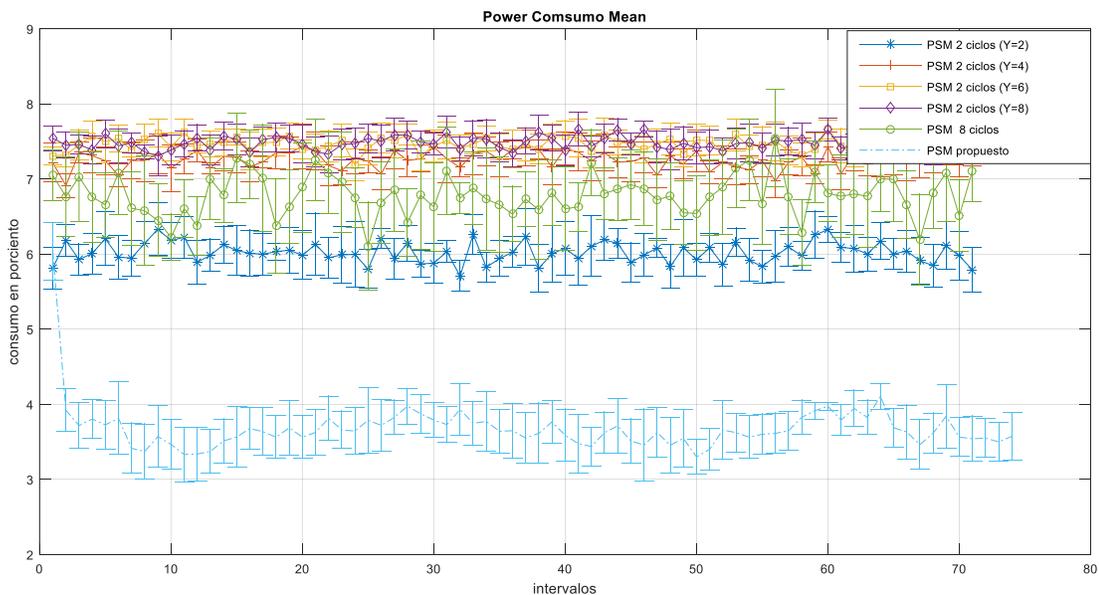


Figura 3.22. Análisis del consumo promedio para los distintos mecanismos,  $\lambda=33$  pkt/s.

En la figura 3.23 se muestra que el mecanismo propuesto cumple con lo esperado y los valores de MOS se encuentran por encima de 3.6 en el 99% del tiempo cuando lambda es igual a 33 pkt/s. Para  $\lambda=50$  pkt/s la condición del MOS se cumple el 100% del tiempo.

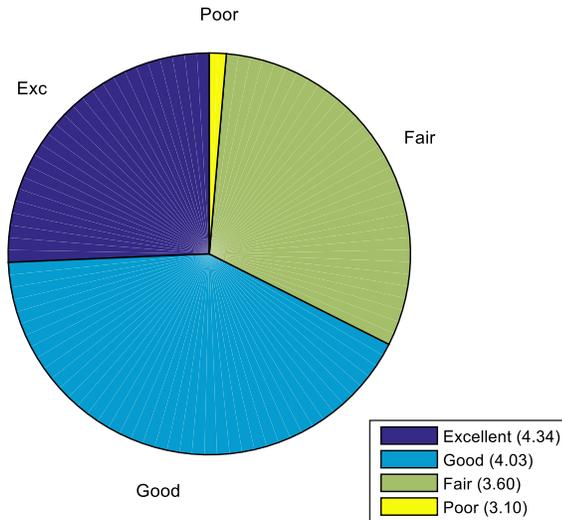


Figura 3.23. MOS por intervalos para el mecanismo PSM propuesto para  $\lambda=33$  pkt/s.

Mientras, en las figuras 3.24 – 3.28 se aprecia también la precisión del esquema propuesto para una razón de paquetes mayor (50pkt/s), demostrando la efectividad del algoritmo respecto a las variaciones de tráfico.

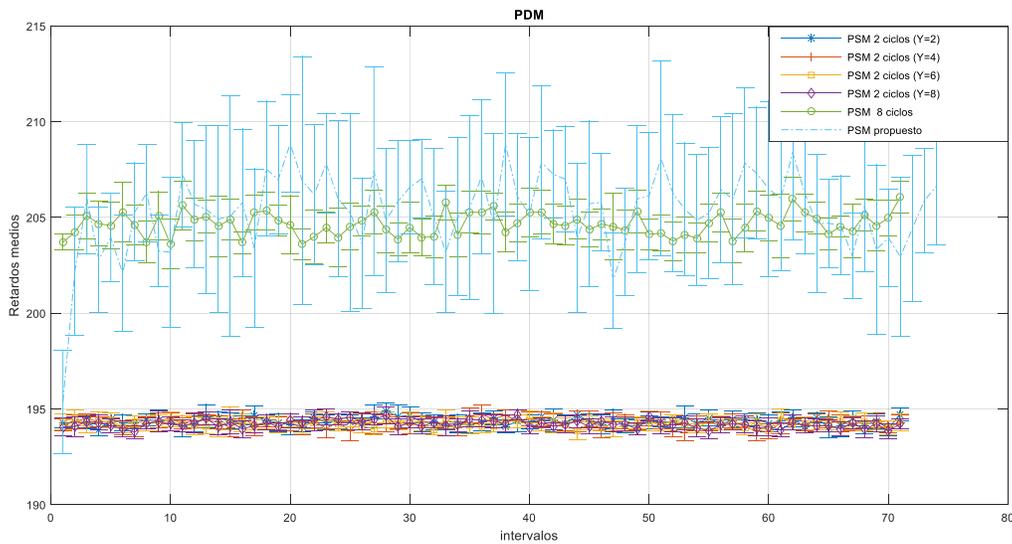


Figura 3.24. Retardo medio de los distintos mecanismos para  $\lambda=50$  pkt/s.

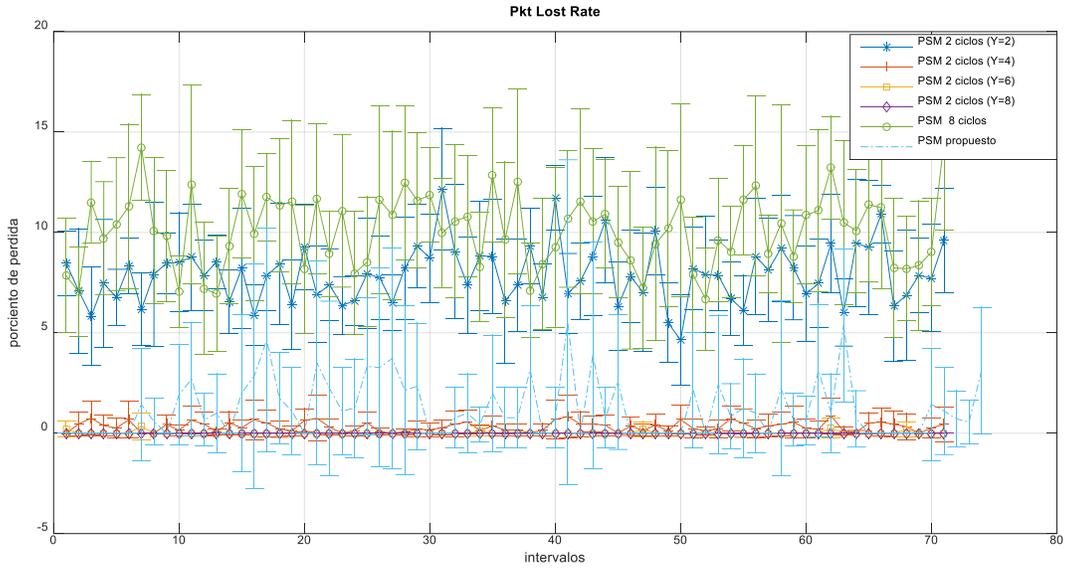


Figura 3.25. Análisis de la PLR para los distintos mecanismos para  $\lambda=50$  pkt/s.

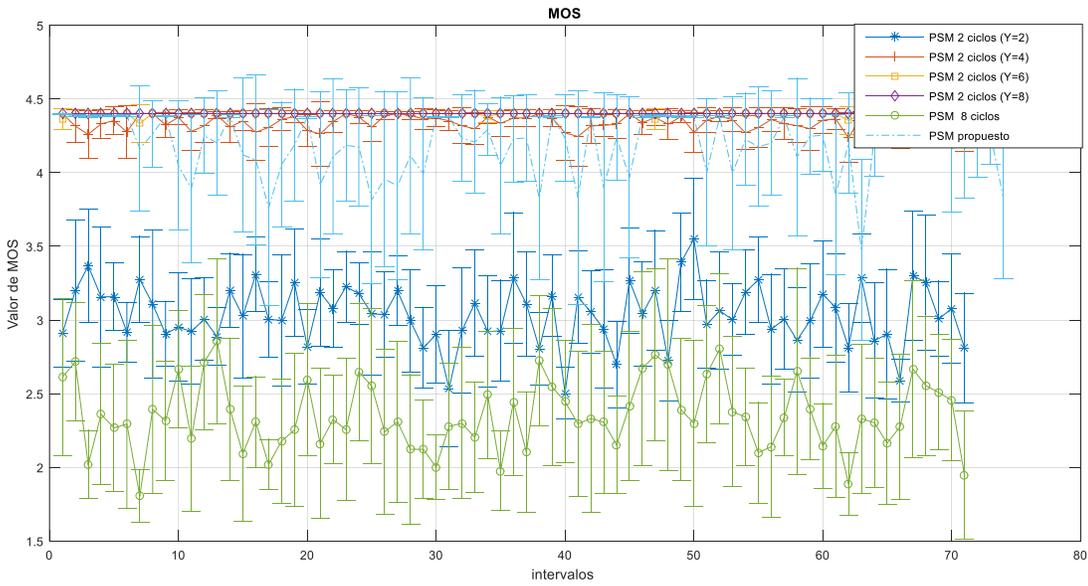


Figura 3.26. Análisis del MOS para los distintos mecanismos para  $\lambda=50$  pkt/s.

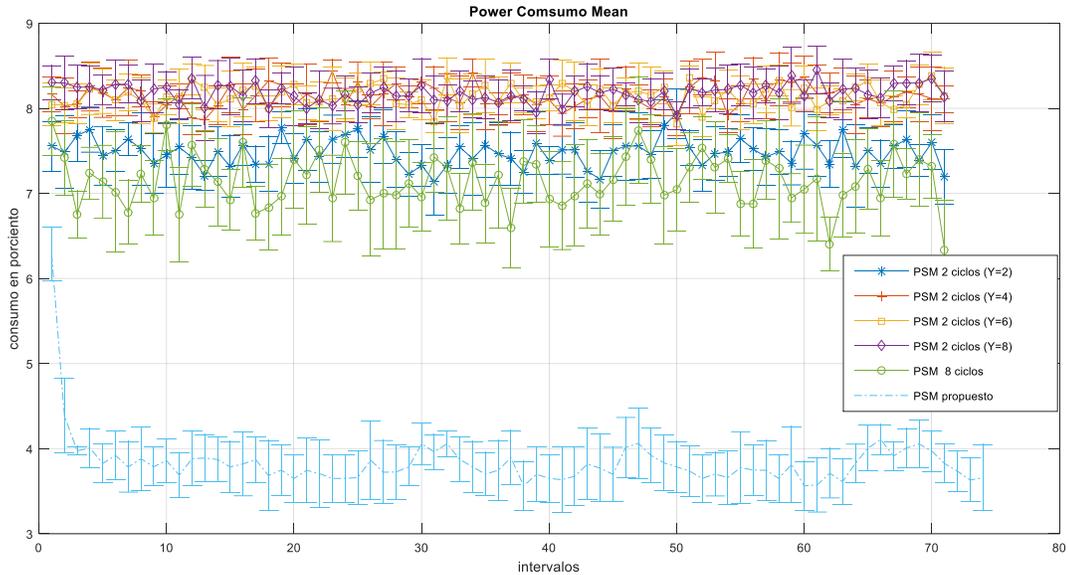


Figura 3.27. Análisis del consumo promedio para los distintos mecanismos,  $\lambda=50$  pkt/s.

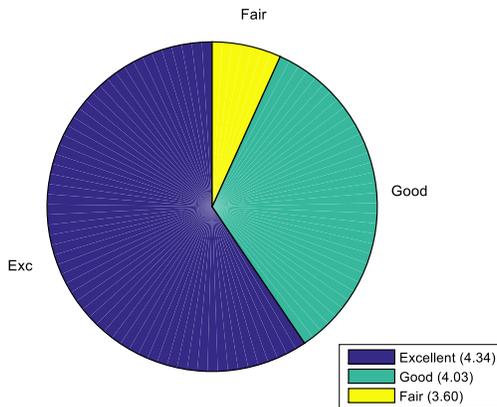


Figura 3.28. MOS por intervalos para el mecanismo PSM propuesto para  $\lambda=50$  pkt/s.

### 3.3 Consideraciones del capítulo

Luego del análisis de los algoritmos precedentes mediante simulación se puede concluir que, mientras los algoritmos de 2 ciclos logran un nivel de QoE bastante aceptable, su nivel de ahorro de potencia no es tan certero como el del PSM multiciclo, aunque el multiciclo tiene un rendimiento menor en cuanto a la calidad. Al incluir el análisis de la QoE como parámetro a tener en cuenta para la migración entre estados y modificar la duración de los ciclos al

---

algoritmo de múltiples estados se permite diseñar un nuevo algoritmo que logra mejorar el ahorro de potencia en un 50% reteniendo un nivel de calidad aceptable.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Luego de todo lo expuesto se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- 1 Dentro de los modelos de estimación de la calidad el Modelo E modificado que se presenta en [47] resulta el más idóneo para analizar el comportamiento de los mecanismos PSM en aplicaciones de VoIP en redes LTE/LTE-A, pues no necesita de la señal de voz original para estimar la calidad del servicio, o sea no es intrusivo, a la par que tiene en cuenta el efecto de las pérdidas en ráfagas para la percepción de la calidad.
- 2 Una vez elegido el modelo de estimación de calidad, se determinó que los parámetros que relacionan el mecanismo PSM con la QoE son la PLR, el retardo promedio y el MOS.
- 3 En esta investigación al igual que en [7] se modela el tiempo entre arribo de paquetes como un proceso de Poisson y la transición entre estados como un modelo de Markov.
- 4 Aunque no se recoge en el contenido del informe, la pertinencia del uso de un modelo de Poisson para modelar el tiempo entre arribo de paquetes fue contrastada con trazas reales medidas en una red 4G.
- 5 Luego del análisis de los algoritmos mediante simulación se puede concluir que, mientras los algoritmos de dos ciclos logran un nivel de QoE bastante aceptable, su nivel de ahorro de potencia no es tan certero como el del PSM multiciclo, aunque el multiciclo tiene un rendimiento menor en cuanto a la calidad.

- 6 Incluir el análisis de la QoE y modificar la duración de los ciclos al algoritmo de múltiples estados permite diseñar un nuevo algoritmo que logra mejorar el ahorro de potencia en un 50% reteniendo un nivel de calidad aceptable.

### **Recomendaciones**

Para continuar con el análisis del comportamiento los distintos mecanismos PSM y dar continuidad al trabajo se proponen las siguientes recomendaciones:

- 1 Tener en cuenta las características de encendido y apagado de una sesión de VoIP para la migración entre estados, o sea, explotar los periodos de silencio dentro de una conversación.
- 2 Evaluar el comportamiento de los distintos mecanismos PSM frente a tramas reales de una conversación mediante aplicaciones de VoIP en redes LTE/LTE-A.
- 3 Utilizar una cadena de Markov de cuatro estados para modelar la sesión VoIP, en la cual se tenga en cuenta tanto el canal de bajada como el canal de subida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «Statistics», 08-jun-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>. [Accedido: 08-jun-2018].
- [2] K. U. R. Laghari y K. Connelly, «Toward total quality of experience: A QoE model in a communication ecosystem», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, n.º 4, 2012.
- [3] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, y G. Y. Li, «Fundamental trade-offs on green wireless networks», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, n.º 6, 2011.
- [4] E. Standard, «Methods for Testing and Specification (MTS); The Testing and Test Control Notation version 3; Part 6: TTCN-3 Control Interface (TCI)», 2005.
- [5] H. Bo, T. Hui, C. Lan, y Z. Jianchi, «DRX-aware scheduling method for delay-sensitive traffic», *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, n.º 12, pp. 1113-1115, 2010.
- [6] C.-C. Tseng, H.-C. Wang, F.-C. Kuo, K.-C. Ting, H.-H. Chen, y G.-Y. Chen, «Delay and power consumption in LTE/LTE-A DRX mechanism with mixed short and long cycles», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, n.º 3, pp. 1721-1734, 2016.
- [7] C. Wang, C.-M. Li, y K.-C. Ting, «Energy-efficient and QoS-aware discontinuous reception using a multi-cycle mechanism in 3GPP LTE/LTE-advanced», *Telecommun. Syst.*, vol. 64, n.º 4, pp. 599-615, 2017.
- [8] J. Lee y D. Cho, «An optimal power-saving class II for VoIP traffic and its performance evaluations in IEEE 802.16 e», *Comput. Commun.*, vol. 31, n.º 14, pp. 3204-3208, 2008.
- [9] Y. Chen, N. Smavatkul, y S. Emeott, «Power management for VoIP over IEEE 802.11 WLAN», en *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, 2004, vol. 3, pp. 1648-1653.

- [10] V. Namboodiri y L. Gao, «Energy-efficient VoIP over wireless LANs», *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 9, n.º 4, pp. 566-581, 2010.
- [11] L. Liu, X. Cao, Y. Cheng, y Z. Niu, «Energy-efficient sleep scheduling for delay-constrained applications over WLANs», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, n.º 5, pp. 2048-2058, 2014.
- [12] A. J. Pyles, Z. Ren, G. Zhou, y X. Liu, «Sifi: exploiting voip silence for wifi energy savings insmart phones», en *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, 2011, pp. 325-334.
- [13] H.-H. Choi y D.-H. Cho, «Hybrid energy-saving algorithm considering silent periods of VoIP traffic for mobile WiMAX», en *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 5951-5956.
- [14] X.-H. Lin, L. Liu, H. Wang, y Y.-K. Kwok, «On exploiting the on-off characteristics of human speech to conserve energy for the downlink VoIP in WiMAX systems», en *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, 2011, pp. 337-342.
- [15] T. Z. Emara, A. I. Saleh, y H. Arafat, «Power saving mechanism for VoIP services over WiMAX systems», *Wirel. Netw.*, vol. 20, n.º 5, pp. 975-985, 2014.
- [16] V. Mohanan y I. Aldmour, «Network Selection Problems-QoE vs QoS. Who is the Winner?», *Comput. Eng. Appl. J.*, vol. 4, n.º 1, p. 1, 2015.
- [17] «3GPP», 11-jun-2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/>. [Accedido: 11-jun-2018].
- [18] «Physical Layer Procedures(3GPP TS 36.213v110700p) | 3 Gpp | Radio», *Scribd*, 11-jun-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/287073566/Physical-Layer-Procedures-3GPP-TS-36-213v110700p>. [Accedido: 11-jun-2018].
- [19] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2012.

- [20] «Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014–2019 (Cisco)», *InformeTICfacil.com*, 31-may-2015. .
- [21] R. Q. Hu y. Qian, «An energy efficient and spectrum efficient wireless heterogeneous network framework for 5G systems», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, n.º 5, pp. 94-101, 2014.
- [22] M. A. Al Masri, «Quality of Experience and Mobility-Aware Green Inter-Radio Access Technology Traffic Offloading», University of Calgary, 2016.
- [23] «IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications», *IEEE Std 80211-2012 Revis. IEEE Std 80211-2007*, pp. 1-2793, mar. 2012.
- [24] V. Namboodiri y L. Gao, «Energy-efficient VoIP over wireless LANs», *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 9, n.º 4, pp. 566-581, 2010.
- [25] R. Krashinsky y H. Balakrishnan, «Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown», *Wirel. Netw.*, vol. 11, n.º 1-2, pp. 135-148, 2005.
- [26] E. Hossain, V. K. Bhargava, y G. P. Fettweis, *Green radio communication networks*. Cambridge University Press, 2012.
- [27] X. Chen, S. Jin, y D. Qiao, «M-PSM: Mobility-aware power save mode for IEEE 802.11 WLANs», en *Distributed Computing Systems (ICDCS), 2011 31st International Conference on*, 2011, pp. 77-86.
- [28] O. Blume, A. Ambrosy, J. Alonso-Rubio, P. Frenger, H. Holtkamp, y L. Scalia, «Most promising tracks of green network technologies», *EARTH Proj. Rep. Deliv. D*, vol. 3, 2011.
- [29] P. Grant, *MCVE Core 5 Programme, Green radio-the case for more efficient cellular basestations*. MCVE, 2010.
- [30] C. Dorize, W. Van Heddeghem, F. Smyth, E. Le Rouzic, y B. Arzur, «Greentouch draft report on baseline power consumption», *USA Greentouch Consort. Version*, 2011.
- [31] F. Agboma y A. Liotta, «QoE-aware QoS management», en *Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*, 2008, pp. 111-116.

- [32] E. Liotou, D. Tsoikas, N. Passas, y L. Merakos, «Quality of experience management in mobile cellular networks: key issues and design challenges», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, n.º 7, pp. 145-153, 2015.
- [33] S. Möller y A. Raake, *Quality of experience: advanced concepts, applications and methods*. Springer, 2014.
- [34] A. Mellouk y A. Cuadra-Sanchez, *Quality of experience engineering for customer added value services: from evaluation to monitoring*. John Wiley & Sons, 2014.
- [35] M. Fiedler, T. Hossfeld, y P. Tran-Gia, «A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service», *IEEE Netw.*, vol. 24, n.º 2, 2010.
- [36] L. Kong y D. H. Tsang, «Performance study of power saving classes of type I and II in IEEE 802.16 e», en *Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on*, 2006, pp. 20-27.
- [37] C. S. Bontu y E. Illidge, «DRX mechanism for power saving in LTE», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, n.º 6, 2009.
- [38] J. Lee y D. Cho, «An optimal power-saving class II for VoIP traffic and its performance evaluations in IEEE 802.16 e», *Comput. Commun.*, vol. 31, n.º 14, pp. 3204-3208, 2008.
- [39] Y. Chen, N. Smavatkul, y S. Emeott, «Power management for VoIP over IEEE 802.11 WLAN», en *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, 2004, vol. 3, pp. 1648-1653.
- [40] A. J. Pyles, Z. Ren, G. Zhou, y X. Liu, «Sifi: exploiting voip silence for wifi energy savings insmart phones», en *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, 2011, pp. 325-334.
- [41] H.-H. Choi y D.-H. Cho, «Hybrid energy-saving algorithm considering silent periods of VoIP traffic for mobile WiMAX», en *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 5951-5956.
- [42] X.-H. Lin, L. Liu, H. Wang, y Y.-K. Kwok, «On exploiting the on-off characteristics of human speech to conserve energy for the downlink VoIP in WiMAX systems», en

---

*Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, 2011, pp. 337-342.

[43] T. Z. Emara, A. I. Saleh, y H. Arafat, «Power saving mechanism for VoIP services over WiMAX systems», *Wirel. Netw.*, vol. 20, n.º 5, pp. 975-985, 2014.

[44] B. Gleeson, D. Picovici, R. Skehill, y J. Nelson, «Exploring power saving in 802.11 VoIP wireless links», en *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, 2006, pp. 779-784.

[45] C. Zhu, H. Yu, X. Wang, y H.-H. Chen, «Improvement of capacity and energy saving of VoIP over IEEE 802.11 WLANs by a dynamic sleep strategy», en *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*, 2009, pp. 1-5.

[46] D. Vinella y M. Polignano, «Discontinuous reception and transmission (DRX/DTX) strategies in long term evolution (LTE) for Voice-Over-IP (VOIP) traffic under both full-dynamic and semi-persistent packet scheduling policies», *Thesis Rep. Aalb. Univ.*, 2009.

[47] H. Zhang, L. Xie, J. Byun, P. Flynn, y C. Shim, «Packet loss burstiness and enhancement to the E-Model», en *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, 2005 and First ACIS International Workshop on Self-Assembling Wireless Networks. SNPD/SAWN 2005. Sixth International Conference on*, 2005, pp. 214-219.

[48] U. Black, *Voice over IP*. Prentice-Hall, Inc., 1999.

[49] J. Hyun, J. Li, C. Im, J.-H. Yoo, y J. W.-K. Hong, «A VoLTE traffic classification method in LTE network», en *Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2014 16th Asia-Pacific*, 2014, pp. 1-6.

[50] I. ITU-T, «Recommendation G. 114», *One-Way Transm. Time Stand. G*, vol. 114, 2003.

[51] P. T. Brady, «A Model for Generating On-Off Speech Patterns in Two-Way Conversation», *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, n.º 7, pp. 2445-2472, sep. 1969.

[52] ITU-T, «Recommendation P. 59», *Conversational Speech*, mar. 1993.

- [53] L. Ji, X. Shi, y Z. Wang, «Conversational model based VoIP traffic generation», en *Networking and Services, 2007. ICNS. Third International Conference on*, 2007, pp. 14-14.
- [54] M. A. Al Masri, A. B. Sesay, y A. O. Fapojuwo, «Session state aware handover procedure for VoIP sessions in heterogeneous wireless networks», en *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, 2014, pp. 3011-3016.
- [55] ITU-T, «Recommendation P.800», *Methods Subj. Determ. Transm. Qual.*, ago. 1996.
- [56] ITU-T, «Recommendation P.862», *Percept. Eval. Speech Qual. PESQ Object. Method End--End Speech Qual. Assess. Narrow-Band Teleph. Netw. Speech Codecs*, feb. 2001.
- [57] R. G. Cole y J. H. Rosenbluth, «Voice over IP performance monitoring», *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 31, n.º 2, pp. 9-24, 2001.
- [58] B. Duysburgh, S. Vanhastel, B. De Vreese, C. Petrisor, y P. Demeester, «On the influence of best-effort network conditions on the perceived speech quality of VoIP connections», en *Computer Communications and Networks, 2001. Proceedings. Tenth International Conference on*, 2001, pp. 334-339.
- [59] C. Hoene, H. Karl, y A. Wolisz, «A perceptual quality model for adaptive VoIP applications», en *Proceedings of SPECTS*, 2004, vol. 4.
- [60] T. ITU, «Recommendation G. 107 The E-model, a computational model for use in transmission planning», 2003.
- [61] R. G. ITU-T, «113: Appendix I: Provisional planning values for the equipment impairment factor  $I_e$  and packet-loss robustness factor  $B_{pl}$ », *Int. Telecommun. Union-Telecommun. Stand. Sect. ITU-T*, 2002.
- [62] T. ITU, «Recommendation G. 107 The E-model, a computational model for use in transmission planning», 2012.
- [63] L. Pang y L. Böszörményi, «Adaptive jitter buffer based on quality optimization under bursty packet loss», *Int. J. Adv. Telecommun. Vol. 5 Number 1 2 2012*, 2012.
- [64] W. Jiang y H. Schulzrinne, «Comparison and optimization of packet loss repair methods on VoIP perceived quality under bursty loss», en *Proceedings of the 12th*

*international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*, 2002, pp. 73-81.

[65] A. D. Clark, P. D. F. Iee, y M. Ieee, «Modeling the effects of burst packet loss and recency on subjective voice quality», 2001.

[66] M. Yajnik, S. Moon, J. Kurose, y D. Towsley, «Measurement and modelling of the temporal dependence in packet loss», en *INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 1999, vol. 1, pp. 345-352.

[67] G. P. Basharin, A. N. Langville, y V. A. Naumov, «The life and work of AA Markov», *Linear Algebra Its Appl.*, vol. 386, pp. 3-26, 2004.

[68] S. M. Ross, *Introduction to probability models*. Academic press, 2014.

[69] V. G. Kulkarni, «Discrete-Time Markov Models», en *Introduction to Modeling and Analysis of Stochastic Systems*, Springer, 2011, pp. 5-58.

[70] T. J. Sheskin, *Markov chains and decision processes for engineers and managers*. CRC Press, 2016.

[71] S. Fowler, R. S. Bhamber, y A. Mellouk, «Analysis of adjustable and fixed DRX mechanism for power saving in LTE/LTE-Advanced», en *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1964-1969.

[72] L. Liu, X. Cao, Y. Cheng, y Z. Niu, «Energy-efficient sleep scheduling for delay-constrained applications over WLANs», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, n.º 5, pp. 2048-2058, 2014.

[73] A. Ksentini y Y. Hadjadj-Aoul, «QoE-based energy conservation for VoIP over WLAN», en *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1692-1697.

[74] S. Moller, A. Raake, N. Kitawaki, A. Takahashi, y M. Waltermann, «Impairment factor framework for wide-band speech codecs», *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, vol. 14, n.º 6, pp. 1969-1976, 2006.

- 
- [75] S. P. Mehta, «Comparative Study of Techniques to minimize packet loss in VoIP», en *21st Computer Science Seminar SB3-T2-1*, 2005.
- [76] A. E. I. Pastrav, A. Bara, T. Palade, y E. Puschita, «Assessing VoLTE performances for fundamental E-UTRAN technologies», en *Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2015 38th International Conference on*, 2015, pp. 1-6.
- [77] J. Matta, C. Pépin, K. Lashkari, y R. Jain, «A source and channel rate adaptation algorithm for AMR in VoIP using the Emodel», en *Proceedings of the 13th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*, 2003, pp. 92-99.
- [78] O. Kadatskaya y S. Saburova, «Research of Requirements to QoS for Voice over LTE», en *Problems of Infocommunications Science and Technology, 2014 First International Scientific-Practical Conference*, 2014, pp. 135-138.