

## INFLUENCIA DE LOS MECANISMOS PSM EN LA QoE PARA USUARIOS DE SERVICIOS TELEFÓNICOS EN REDES LTE/LTE-A

David Ernesto Ruiz Guirola<sup>1</sup>, Lesbiel Pineda Sánchez<sup>1</sup>, Carlos A. Rodríguez López<sup>2</sup>

Universidad Central de Las Villas, Carretera a Camajuaní km 5<sup>1</sup>,  
e-mail: {drguirola, lpineda}@uclv.cu<sup>1</sup>, crodriguez@uclv.edu.cu<sup>2</sup>:

### 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 dos ciclos y otro que utiliza un mecanismo multi-ciclo. 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 requerido nivel de QoE.

**PALABRAS CLAVES:** *PSM, QoE, VoLTE.*

## INFLUENCE OF PSM MECHANISMS IN THE QoE FOR USERS OF TELEPHONE SERVICES IN LTE NETWORKS

### ABSTRACT

The increasing range of broadband services to mobile users has led to a logical increase in the consumption of energy by mobile devices, affecting the autonomy of batteries and therefore availability of terminals. An effective solution for saving energy is to implement a power saving mode (Power Saving Mode, PSM). However, the real challenge is to sustain a satisfactory level of quality of experience (QoE, Quality of Experience) in voice over IP (VoIP) services while simultaneously saving energy. This project carries out an analysis of performance of two PSM schemes: one that uses a mechanism with a mixture of short and long cycles, and another that uses a multi-cycle mechanism. Based on this analysis, current

paper proposes a PSM mechanism that ensures an improvement in energy saving regard while maintaining the QoE levels in a permissible range, as well as taking into account the effect of burst losses for the perception of the quality. A communication channel is modeled to validate the effectiveness of the proposed mechanism and results obtained certify the effectiveness of this, allowing savings of up to 50% compared to other schemes while ensuring a desired level of QoE.

**KEY WORDS:** *PSM, QoE, VoLTE.*

## 1. 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), la cual consiste en apagar la interfaz de radio del terminal móvil a intervalos regulares. Durante el tiempo en que la interfaz 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].

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 autonomía 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 implica una mejor calidad de servicio (QoS) pero una eficiencia de ahorro de potencia menor. Por el contrario, adoptar un ciclo mayor involucra una mejor eficiencia de ahorro de potencia, pero es difícil alcanzar una QoE esperada 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 multi-ciclo 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.

Varios esfuerzos [17]–[26] 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 [27]. 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.

En esta investigación se enfrenta el desafío de presentar un modelo de evaluación del comportamiento que evalúa conjuntamente el consumo de potencia, la razón de pérdidas de paquetes percibida, el retardo de paquetes promedio y la QoE alcanzada. Además, se diseña un algoritmo 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. Esto teniendo en cuenta el efecto de las pérdidas en ráfagas para la calidad percibida. En la sección 2 se presenta el modelo del sistema, en la sección 3 se procede a derivar el modelo de evaluación del comportamiento propuesto. En la sección 4 se presenta el mecanismo PSM propuesto, mientras que en la sección 5 se valida el mecanismo PSM mediante simulación, para establecer las conclusiones finalmente en la sección 6.

## MODELO DEL SISTEMA

A continuación, se presenta el modelo a evaluar. Varios esquemas [17]–[23], [28], [29] se han propuesto para mejorar el comportamiento de mecanismos PSM para sesiones de VoIP. Aunque las DTMCs (cadenas de Markov de tiempo discreto con recompensa) se han usado en trabajos previos para modelar las transiciones entre los estados de un PSM [30]. En este trabajo se tiene en cuenta la QoE para manejar las transiciones entre los estados de la DTMC mientras se emplean mecanismos PSM.

### Modelo PSM

En los algoritmos estudiados, la WNIC alterna entre un estado de reposo y uno activo. 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 [31]. Por último se retorna al estado de reposo por un tiempo  $t_s$ , como se muestra en la figura 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 1: Modelo PSM.

### Modelo de enlace

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. 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. 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. Esto simplifica considerablemente el análisis matemático de retardo de enlace. Si se denota el retardo de enlace como  $t$  (retardos combinados del enlace inalámbrico y alámbrado) y el retardo debido al propio comportamiento del mecanismo PSM como  $t_b$ , entonces el retardo total que encuentran los paquetes VoIP se puede calcular como  $t_d = t + t_b$ . Por lo tanto  $t_d$  estará constituido por dos componentes: una constante ( $t$ ) y otra variable ( $t_b$ ).

#### Modelo de evaluación de la calidad

En este trabajo se utiliza un modelo de evaluación de la calidad objetivo, el Modelo E de la UIT-T [32] con las modificaciones de [27], para estimar la QoE de la sesión VoIP. Para ello, la calidad de la voz es valorada usando un factor psico-acústico acotado entre 0 y 100. La fórmula usada en (1) es tomada de [32] y evaluada para valores de banda ancha (WB, wide band):

$$R = R_{(0,wb)} - I_{(s,wb)} - I_{(d,wb)} - I_{(e-eff,wb)} + A \quad (1)$$

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  $R_{0,wb} = 129$  según [33]. Luego la expresión quedaría como en (2):

$$R_{wb} = 129 - I_{(d,wb)} - I_{(e-ef,wb)} \quad (2)$$

Para calcular el deterioro por retardo,  $I_{d,wb}$ , se utiliza (4) [33]:

$$I_{(d,wb)} = 0.0024 + D_e 2e + 0.11 \times (D_e 2e - 177.3) \times H(D_e 2e - 177.3) \quad (3)$$

Donde  $H(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < 0 \\ 1, & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$ , y  $De_{2e}$  es el retardo promedio que encuentran los paquetes del canal de bajada. La fórmula empírica en (4) para calcular el factor de deterioro efectivo del equipo,  $I_{e-eff,wb}$ :

$$(4) \quad I_{e-eff} = I_e + ((129 - I_e) \times P_{(pl-eq)} / (P_{(pl-eq)} + B_{pl}))$$

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. En esta relación  $P_{pl}$  depende del grado de ráfaga de las pérdidas. Para tener en cuenta las ráfagas dentro de la PLR se utiliza el algoritmo usado en [27] con el modelo de dependencia exponencial de las ráfagas en la distancia entre las pérdidas de paquetes.

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 [33], primero se normaliza el factor  $R$  a un valor de 100:  $R_x = R_{wb} / 1.29$ , y luego se calcula el MOS en (5):

$$(5) \quad MOS = \begin{cases} 4.5 & R_x \leq 0 \\ 1 + 0.035 R_x + 7 \times 10^{-6} R_x^2 & 0 < R_x < 100 \\ 4.5 & R_x > 100 \end{cases}$$

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

En esta sección 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.

Para este análisis se tiene en cuenta un valor de retardo máximo debido al mecanismo PSM 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 ( $t_b > 60ms$ ) 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.

### Análisis del retardo promedio

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 en (6) [6]:

$$P_N(t) = \frac{[(\lambda t)]^N}{N!} \times e^{-(\lambda t)}, \text{ para } N=0,1,2,\dots \infty. \quad (6)$$

Donde  $t$  se sustituye por la duración de un ciclo DRX para cada estado del modelo de Markov. Para calcular el retardo promedio se utiliza (7), 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 [6] el retardo promedio de  $X$  paquetes en un ciclo donde el tiempo en reposo es igual a  $t-t_0$  se calcula en (7):

$$D(X) = \frac{1}{(t-t_0)^{-(X-1)}} \sum_{d_1=X}^{t-t_0} F(X), \quad (7)$$

Donde:

$$F(X) = \frac{\sum_{d_2=X-1}^{d_1-1} \dots \sum_{d_X=1}^{d_{(X-1)}-1} (\sum_{i=1}^X d_i) / (\prod_{i=1}^{(X-1)} (d_i - (X-i)))}{(8)}$$

Por tanto, el retardo  $D(k)$  de un estado  $k$  se puede obtener en (9) como la probabilidad de que lleguen  $X$  paquetes por el retardo que involucran estos  $X$  paquetes, o sea:

$$D(k) = \sum_{N=1}^{t-t_0} P_N(d_k) \times D(N) \quad (9)$$

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  $T=240\text{ms}$ , con  $t=180\text{ms}$ , entonces el máximo retardo debido al mecanismo PSM ( $t_b$ ) que puede sufrir un paquete sin perderse es de  $60\text{ms}$ . Por tanto,  $N$  será igual a  $t-t_0$  para los ciclos con duración  $dk < 60\text{ms}$ , mientras para ciclos con duración  $dk > 60\text{ms}$ , entonces  $N=60$ .

Si denotamos como  $r_k$  la probabilidad de estar en un estado estable  $k$  calculada según [34], entonces el retardo promedio de un mecanismo DRX con  $K$  duraciones de ciclo,  $E(D)$  según (10) es igual a:

$$E(D) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} r_k \times D(k)}{\sum_{k=0}^{K-1} r_k \times \sum_{i=1}^N (i \times P_N(d_k))} \quad (10)$$

### Análisis de la PLR percibida (PLRp)

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:

$$PLR = \sum_{k \in K} r_k \times (d_k - (t - t_0)) / d_k, \text{ para } d_k > T \quad (11)$$

Luego, para obtener la PLRp se inserta en la PLR el efecto que pueden tener las pérdidas en ráfagas [27]. 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.

### 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 dk se puede obtener como:

$$[pc]_k = [duracion \text{ de encendido}]_k / d_k, \text{ para } k=0,1,2,\dots,K-1. \quad (12)$$

Donde el término (duración 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:

$$pcm = \sum_{k=0}^{K-1} r_k \times [pc]_k \quad (13)$$

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

### 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.

### MECANISMO PSM PROPUESTO

Después de realizar experimentos [34] para evaluar los algoritmos PSM, se pudo apreciar una mejora considerable en cuanto a ahorro de potencia en un 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.

Figura 2: Pseudocódigo del algoritmo propuesto.

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 [27] para evaluar el efecto de las pérdidas en ráfagas. Con este mecanismo multi-ciclo DRX, las duraciones DRX se configuran como 8 diferentes valores con duraciones desde 32 ms hasta 320 ms, 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. Este valor es donde la degradación es imperceptible, en este caso 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 4.

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

## SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los paquetes de audio del canal de bajada son generados siguiendo una distribución de Poisson, como se mostró en la sección 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 [27]. El

proceso de transición entre estados en el móvil se modela mediante una cadena de Markov [35].

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 el valor de 50 paquetes por segundo, simulando una media entre paquetes de 20 milisegundos, en [34] además se toman valores de lambda igual a 33 paquetes por segundo para demostrar la efectividad del mecanismo en cuanto a variaciones de tráfico.

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.

Para la simulación del mecanismo con mezcla de ciclos cortos y largos [6], se toman dos valores de duraciones de ciclos DRX,  $t_s=32\text{ms}$  y  $t_l=128\text{ms}$ , como se sugiere en [7]. Correspondientes a la duración de un ciclo corto y uno largo respectivamente, se toman valores de Y (ciclos cortos DRX consecutivos sin recibir paquetes para pasar a un ciclo largo DRX) igual a 2, 4, 6 y 8. Inicialmente el mecanismo comienza en un ciclo corto DRX. Por otra parte, el mecanismo multi-ciclos se maneja según [7].

Figura 3: Retardo medio de los mecanismos PSM.

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 [27].

Figura 4: Análisis de la PLR para los distintos mecanismos PSM.

## Validación del mecanismo propuesto

En esta sección se compara el comportamiento del mecanismo propuesto. Para ello se utilizan duraciones de los ciclos del mecanismo propuesto de 32, 50, 64, 80, 128, 160, 256 y 320 ms. 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. 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 [27].

Figura 5: Análisis del MOS para los distintos mecanismos PSM.

El MOS se calcula según el Modelo E [32], donde la PLR percibida se calcula según [27]. Acorde al códec utilizado, AMR-WB [33],  $R_0$  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.

En la figura 3 se puede apreciar como el comportamiento del retardo promedio sigue el mismo comportamiento que el mecanismo PSM de 8 ciclos, mientras en las figuras 4 y 5 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.

Luego, en la figura 6 se aprecia la efectividad del mecanismo en cuanto al ahorro de potencia, disminuyendo el consumo en aproximadamente un 50%.

Figura 6: Análisis del consumo promedio para los distintos mecanismos PSM.

## CONCLUSIONES

Luego de todo lo expuesto se puede concluir que dentro de los modelos de estimación de la calidad el Modelo E modificado que se presenta en [27] resulta el más idóneo para analizar el comportamiento de los mecanismos PSM en aplicaciones de VoIP en redes LTE/LTE-A. Esto es debido a que no necesita 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. 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.

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. 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. 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. 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.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todos los que de una forma u otra aportaron su granito a la realización de este trabajo, muchas gracias por todo.

## REFERENCIAS

- [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-QoS vs QoS. Who is the Winner?», *Comput. Eng. Appl. J.*, vol. 4, n.º 1, p. 1, 2015.
- [17] V. Namboodiri y L. Gao, «Energy-efficient VoIP over wireless LANs», *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 9, n.º 4, pp. 566-581, 2010.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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. SNP/SAWN 2005. Sixth International Conference on*, 2005, pp. 214-219.
- [28] 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.
- [29] A. Ksentini y Hadjadj-Aoul, «QoS-based energy conservation for VoIP over WLAN», en *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1692-1697.
- [30] 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.
- [31] M. A. Al Masri, «Quality of Experience and Mobility-Aware Green Inter-Radio Access Technology Traffic Offloading», University of Calgary, 2016.
- [32] T. ITU, «Recommendation G. 107 The E-model, a computational model for use in transmission planning», 2012.
- [33] 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.

- [34] D. E. Ruiz Guirola, «Influencia de los mecanismos PSM en la QoE para usuarios de servicios telefónicos en redes LTE/LTE-A», Universidad Central de Las Villas, 2018.
- [35] T. J. Sheskin, *Markov chains and decision processes for engineers and managers*. CRC Press, 2016.

#### **SOBRE LOS AUTORES**

David Ernesto Ruiz Guirola, Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Central de Las Villas (UCLV) en 2018.

Lesbiel Pineda Sánchez, Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Central de Las Villas (UCLV) en 2018.

Carlos A. Rodríguez López, Graduado de Ingeniero en Equipos y Componentes Electrónicos en la Universidad Central de las Villas (UCLV) en 1990. Recibió el grado de Master en Ciencias (Mención Sistema de Telecomunicaciones) en esta misma universidad en el año 2000. Desde 1993 y hasta la fecha se desempeña como profesor del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones (DET) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Ha trabajado como profesor invitado en varias Universidades Latinoamericanas: Universidad de Antioquia, Colombia 1997; Corporación Universitaria de Ibagué, Colombia 1998. Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia en el período 1999 - 2014; Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Nicaragua en 2005. Becario CAPES en la Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Brasil, 2010. Ha participado en varios eventos científicos de carácter nacional e internacional y publicado en áreas como señalización, conmutación, fraude en redes de telecomunicaciones y Calidad de Servicio en Redes IP. Sus principales intereses de investigación están relacionados con las mediciones, el modelado y la evaluación de la calidad de servicios multimedia en redes IP.