TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

# ADAPTACIÓN DE LA CODIFICACIÓN CONJUNTA FUENTE-CANAL PARA OPTIMIZAR EL ANCHO DE BANDA DE TRASMISIÓN DE VOZ SOBRE LA RED LTE

**Giovany Almeida Serra[1], Carlos Alberto Rodríguez López[2]**
[1,2] Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, UCLV
[1]e-mail: gialmeida@uclv.cu
[2]e-mail: crodrigz@uclv.edu.cu

**RESUMEN**

En las comunicaciones móviles LTE los paquetes de voz son trasmitidos sobre canales ruidosos que afectan negativamente la probabilidad de pérdidas. Un mecanismo importante para combatir la pérdida de paquetes es la codificación de canal. La codificación de canal agrega a los paquetes de información bits de redundancia con el objetivo de detectar y corregir errores en el proceso de detección. Esto es lo contrario a la codificación de fuente que se encarga de eliminar la redundancia con el objetivo de minimizar la razón de transmisión. Existe una relación de compromiso entre la codificación de fuente y de canal que influye en la calidad que experimentan los usuarios. En esta investigación se implementó y evaluó un mecanismo de optimización de la razón de transmisión requerida en aplicaciones de voz sobre LTE a partir de encontrar una relación adecuada en la codificación conjunta fuente-canal. El algoritmo para la selección de la codificación no es original, pero ha sido modificado de forma que tome en cuenta los rangos de evaluación cualitativa. Los cambios propuestos han permitido una reducción apreciable de la razón de transmisión requerida para una conexión de VoLTE con respecto al algoritmo original sin cambiar el nivel en la escala cualitativa de evaluación de la calidad.

**PALABRAS CLAVES:** Calidad de la experiencia (QoE), Modelo-E, Voz sobre LTE, algoritmo adaptativo.

# ADAPTATION OF JOINT SOURCE-CHANNEL CODING TO OPTIMIZE THE BANDWIDTH TRANSMISSION VOICE OVER LTE NETWORK

**ABSTRACT**

In mobile communication systems over LTE, voice packets are transmitted over noisy channels that negatively affect the probability of losses. An important mechanism to combat packet loss is channel coding. The channel coding adds redundancy bits to the information packets to detect and correct errors in the detection process. This is the opposite of source coding that is responsible for eliminating re-abundance to minimize the rate of transmission. There is a compromise relationship between source and channel coding that influences the quality that users experience. In this research paper, a mechanism for optimizing the transmission ratio required in voice applications over LTE was implemented and evaluated based on finding an adequate relationship in the joint source-channel coding. The algorithm for coding selection is not original but has been modified so that it takes into account the qualitative evaluation ranges. The proposed changes have allowed an appreciable reduction in the transmission ratio required for a VoLTE connection concerning the original algorithm without changing the level in the qualitative scale of quality assessment.

**KEY WORDS:** Quality of experience, E-Model, Voice over LTE, adaptive algorithm.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los pilares de las empresas que brindan servicio de telefonía son las comunicaciones móviles. Dada la aceptación de este servicio, en las últimas décadas ha tenido lugar un crecimiento vertiginoso de los usuarios móviles. Esto ha desencadenado un desarrollo de los servicios móviles que va desde las redes móviles analógicas de Primera Generación (1G) hasta la recién lanzada Quinta Generación (5G). Uno de sus últimas tecnologías desarrolladas es la Cuarta Generación (4G) o LTE (*Long-Term Evolution*), ampliamente desplegadas por los operadores de telecomunicaciones en el mundo por sus ventajas y prestaciones en cuanto a Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*) y Calidad de la Experiencia (*Quality of Experience, QoE*). Las redes 4G y 5G funcionan según el modelo "todo sobre IP (*All IP*)" y basan su funcionamiento en la conmutación de paquetes [1]. Con el fin de mejorar el servicio de voz brindado, la red LTE incorpora tecnología adicional de control de QoS proporcionado por el operador de la red, de modo que VoLTE es un protocolo de señalización que permite el transporte de paquetes de voz.

En LTE los paquetes de voz trasmitidos son entregados a canales ruidosos que tienen un impacto negativo en la calidad. Dependiendo de las características del canal se afecta negativamente el retardo de extremo a extremo y la probabilidad de pérdida de paquetes en la ruta. Con el fin de contrarrestar este efecto es que se usan técnicas de codificación de canal para proteger la información, de aquí que la codificación FEC (*Forward Error Correction*) sea ampliamente usada en la red LTE. La codificación de canal agrega a los paquetes de información bits de redundancia con el objetivo de detectar y corregir errores en el proceso de detección. Esto es lo contrario a la codificación de fuente que se encarga de eliminar la redundancia con el objetivo de minimizar la razón de trasmisión, acercando el número de bits promedio por símbolos al valor de entropía de la fuente. De aquí que exista una relación de compromiso entre la codificación de fuente y de canal con la QoS, y a su vez se establece una relación entre la razón de transmisión y la QoE.

Investigaciones precedentes, [2], [3], [4] y [5], se refieren a la manipulación de las razones de codificación fuente-canal y su relación con la QoS para obtener un beneficio en alguno de los parámetros de la comunicación. En [2] se presenta un algoritmo de adaptación dinámica de la codificación de fuente-canal que optimiza la QoS para valores permitidos de ancho de banda.

En [5] se presenta un algoritmo de adaptación dinámica de la codificación conjunta fuente-canal para minimizar el número de bits redundantes de la codificación de canal. Para esto, se permite la máxima demora de extremo a extremo y la máxima pérdida de paquetes posibles para que el MOS (*Mean Opinion Score*) no se deteriore significativamente. La ganancia en ancho de banda es significativa y la reducción del MOS es baja.

Se han realizado diferentes investigaciones orientadas a optimizar la codificación fuente canal conjunta para obtener ganancias en diferentes parámetros. Sin embargo, haciendo ligeras modificaciones en los parámetros propuestos en [5], es posible obtener mayor reducción de los bits redundantes de la codificación de canal. En todo momento el MOS se mantendrá dentro del nivel en la escala cualitativa de evaluación de la calidad.

## 2. CONTENIDO

### Codificación de fuente y canal

Para la transmisión de voz en LTE se utiliza el AMR-WB para la codificación de fuente. El códec AMR-WB es un códec de voz desarrollado por ETSI (European Telecommunications Standards Institute) y adoptado por la 3GPP. El esquema de codificación es ACELP (*algebraic code excited linear prediction*). Este códec utiliza una frecuencia de muestreo de 16 kHz, que cubre el ancho de banda de audio de 50-7000 Hz. La introducción de un ancho de banda de audio más amplio de 50-7000 Hz proporciona una calidad de voz y una naturalidad sustancialmente mejoradas y esto contribuye positivamente a la inteligibilidad de la comunicación [6]. El códec tiene nueve modos de codificación correspondientes a ocho velocidades binarias que van desde 6.6 kbps hasta 23.85 kbps como muestra la Tabla 1. El códec es adaptativo, cada modo codifica una trama de voz de 20 ms y puede cambiar su velocidad de bits cada 20 ms según las condiciones del canal y la red. El protocolo de transporte en tiempo real (RTP) se utiliza sobre UDP e IP [2].

Para la codificación de canal, dentro de los códigos FEC se usan los *Reed-Solomon*. Estos son una clase especial de códigos de bloque lineal no binario. La popularidad de los códigos RS se basa en dos hechos: ofrecen muy buena protección contra el borrado y, los algoritmos de decodificación eficientes pero simples permiten implementar códigos relativamente largos en muchas aplicaciones prácticas. Un código RS $(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{k})$ definido sobre un campo finito (GF) $(\boldsymbol{2^q})$ es descrito por los siguientes parámetros:

TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

Tabla 1: Modos y velocidad de AMR-WB

| Modo | Bits rates (Kbps) | # Total de bits |
|---|---|---|
| 0 | 6.60 | 132 |
| 1 | 8.85 | 177 |
| 2 | 12.65 | 253 |
| 3 | 14.25 | 285 |
| 4 | 15.85 | 317 |
| 5 | 18.25 | 365 |
| 6 | 19.85 | 397 |
| 7 | 23.05 | 461 |
| 8 | 23.85 | 477 |

La longitud del bloque $n$ es igual a $2^q - 1$, el número de símbolos de información codificados en un bloque de $n$ símbolos es $k = 1,2,\ldots,n-1$, y la razón de código es $k/n$. El código garantiza la corrección hasta $n-k$ borrados. Un código de bloque sistemático $(n,k)$ consta de $k$ símbolos de información seguidos de $(n-k)$ símbolos redundantes.

Lo preocupante es la pérdida de paquetes completos, por tanto, la redundancia se extiende a través de los paquetes como se muestra en la Fig. 1. Cada paquete de media puede verse constituido por varios símbolos, cada símbolo es un elemento de GF. Se utiliza un grupo de $k$ símbolos de $k$ paquetes de media diferentes para generar símbolos redundantes $(n-k)$, creando una palabra de código de longitud $n$. Estos símbolos redundantes se colocan en paquetes separados. De esta manera, se genera un código de bloque sistemático que consta de $n$ paquetes a partir de $k$ paquetes de media [2].

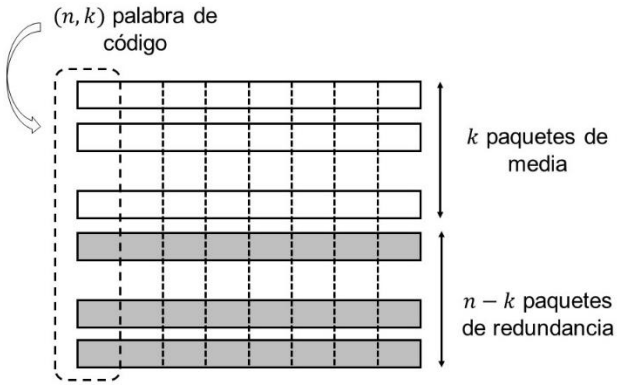


Figura 1: Codificador de canal RS (n,k).

**Modelo de evaluación de calidad**

De acuerdo con [7], la QoE 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. Hay varios modelos que se utilizan en la actualidad para estimar una evaluación de la calidad de la experiencia, basados en el MOS. 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.

Dentro de estos modelos de evaluación de la calidad de la experiencia, el Modelo E es un excelente candidato debido a su naturaleza analítica, poco costo computacional y fácil implementación en software. El modelo E brinda un conjunto de ecuaciones que relacionan los parámetros característicos del servicio al que se desee evaluar. Aunque el Modelo E no es del todo exacto, sí es ampliamente utilizado y puede entregar un margen de justicia útil para lograr el objetivo propuesto, siempre que se elijan los parámetros apropiadamente. En esta investigación se aplica el mismo criterio que en las investigaciones precedentes (considerar que las pérdidas son aleatorias), lo que permite realizar una comparación justa de los resultados.

Dado que en esta investigación se permitirá el deterioro de los parámetros demora de extremo a extremo y pérdida de paquetes, ambos influyentes directos en la calidad; se propone utilizar el modelo E-WB como evaluador de calidad porque este modelo brinda un conjunto de ecuaciones que permiten establecer relaciones matemáticas entre los parámetros de la señal: demora y pérdida de paquetes y el factor R del modelo E.

Este modelo brinda un parámetro *R* que se traduce en un nivel de MOS. Luego estos valores cuantitativos del MOS se pueden expresar mediante una descripción cualitativa en función de la opinión de los usuarios finales. Para los efectos de este estudio se va a tener en cuenta los niveles de satisfacción de los usuarios, que están determinados por rangos de niveles de MOS. La Tabla 2, tomada de [3] y [4] relaciona estos rangos.

Tabla 2: Niveles de satisfacción de los usuarios para diferentes rangos de MOS

| **Rango de MOS** | **Grado de satisfacción de los usuarios** |
|---|---|
| 4.34-4.50 | Muy satisfactorio |
| 4.03-4.34 | Satisfactorio |
| 3.60-4.03 | Muchos usuarios satisfechos |
| 3.10-3.60 | Muchos usuarios insatisfechos |
| 2.58-3.10 | Casi todos insatisfechos |
| menor que 2.58 | No recomendado |

El Modelo E-WB, se define para un canal de transmisión WB de 50-7000 Hz, tal como se define en [8]. Para un contexto NB, se define una relación media entre la escala R (rango [0; 100]) y las clasificaciones MOS (rango [1; 4,5]) recogidas de los participantes de la prueba "media" en un ensayo experimental "medio" [9]. Para un contexto de WB o mixto de NB/WB, la escala R fue ampliada de una manera que deja el uso de NB de la escala sin afectar, incluyendo la posición de la conexión de referencia. Para un contexto NB/WB, el valor máximo de R es $R_{max}$=129, aproximadamente un 29% para reflejar la mejora de calidad al migrar de NB a WB. Esta escala R extendida es una escala R "universal" y es aplicable tanto a los canales de transmisión NB como WB [10]. Para calcular el factor $R_{wb}$ se usa (1) [10]:

$$Rwb = Ro,wb - Is,wb - Id,wb - Ie,eff,wb + A \quad (1)$$

Donde:

- Ro,wb: Representa la relación señal/ruido básica.
- Is,wb: Este aspecto no ha sido analizado en WB hasta el momento, por tanto $Is,wb = 0$.
- Id,wb: Factor de deterioro de retardo. Representa los impedimentos causados por la demora *end-to-end*.
- Ie,eff,wb: Factor de deterioro efectivo del equipo.
- A: Este efecto aún no se ha estudiado para el caso de WB, se recomienda $A = 0$.

Para esta investigación se toma $Ro,wb = 129$ según [5] y [11]. Luego la expresión quedaría de esta forma [5]:

$$Rwb = 129 - Id,wb - Ie,eff,wb \quad (2)$$

**Algoritmo propuesto**

En la Tabla 3 se presenta el algoritmo propuesto para minimizar los bits redundantes de la codificación de canal. En [5], los autores Duy-Huy Nguyen y Hang Nguyen, proponen un algoritmo de adaptación dinámica de la razón de codificación fuente-canal conjunta, de forma que optimizan la relación entre la codificación de fuente y canal con el objetivo de reducir al máximo la redundancia de canal, permitiendo una reducción del MOS en 1%, una probabilidad de pérdida de paquetes después de aplicada la codificación FEC de un 1%, y un retardo de extremo a extremo (*end-to-end*) de 150 ms. Sin embargo, las condiciones rígidas impuestas por el algoritmo original, aparentemente

TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

desaprovechan las posibilidades de obtener mayores ganancias en términos de razón absoluta de transmisión, comprometer la calidad percibida por los usuarios del servicio. De este modo no hay cambios en la escala cualitativa de evaluación de la calidad.

Tabla 3: Algoritmo propuesto en seudocódigo

| |
|---|
| **Paso 1:** |
| Para todas las *Rs* ϵ {modo 0,…, modo 8} de AMR-WB |
| Para k=1 hasta k0 |
| Para n=k+1 hasta n0 |
| Calcular retardo *end-to-end* (*De2e*) |
| Calcular la razón de pérdida de paquetes *Ppl* |
| **Paso 2:** |
| Encontrar para cada *Rs*, todos los pares ($k_i$, $n_i$) que cumplen las condiciones de la ecuación 13 |
| **Paso 3:** |
| Calcular *Id,wb; Ie,eff,wb; Rwb; MOS; BWr* para las combinaciones seleccionadas en el paso anterior |
| **Paso 4:** |
| Encontrar el MOS más alto para cada modo de AMR-WB, haciéndole corresponder $k_{best}$ y $n_{best}$ |
| **Paso 5:** |
| Permitir la reducción del MOS en 1% |
| Determinar a cual rango de la escala de nivel de satisfacción pertenece |
| Fijar un MOS de referencia igual al valor mínimo del rango en el que se encuentre el MOS reducido |
| **Paso 6:** |
| Encontrar todos los pares subóptimos ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) cuyo MOS es mayor o igual al MOS tomado como referencia en el paso anterior |
| **Paso 7:** |
| Para cada *Rs* obtener a partir de los pares subóptimos el MOSr y Gr |
| El algoritmo seleccionara para cada *Rs* el par subóptimo en este orden: |
| Selecciona el que menor BWr tenga |
| Selecciona el que menor MOSr tenga |
| Selecciona el que mayor Gr tenga |
| **Paso 8:** |
| Para todos los modos de AMR-WB, luego de haber obtenido el par subóptimo |
| El algoritmo seleccionara el mejor modo subóptimo en este orden: |
| Selecciona el que mayor Gr tenga |
| Selecciona el que menor MOSr tenga |
| Selecciona el que menor BWr tenga |

**Descripción del algoritmo**

El primer punto a definir en la descripción del algoritmo es el establecimiento de las siguientes restricciones:

$$\begin{cases} De2e \leq Dmax \\ Ppl \leq Pmax \end{cases} \quad (3)$$

Esto asegura que el retardo *end-to-end* y la razón de pérdida de paquetes máximo permitido no superen los parámetros recomendados por la UIT-T para este servicio. En el primer paso, para cada modo del códec AMR-WB, se hace variar $k$ y $n$ en los rangos $k = 1,2,\ldots,k_0$ y $n = k+1,\ldots,n_0$ donde $k_0$ y $n_0$ son valores máximos disponibles de la tasa de codificación de canal de la red LTE ($n_0 > k_0$). Para todas las posibles combinaciones de $k$ y $n$ se calculan los parámetros *De2e* y *Ppl*.

En el segundo paso, se descartan las combinaciones que no cumplan la condición planteada en la ecuación 3. Es decir, se obtienen para cada *Rs*, pares ($k_i$, $n_i$) que cumplen las condiciones deseadas. En el tercer paso, que se ejecuta sólo para las combinaciones que no fueron descartadas en el paso anterior, se calculan los valores de *Id,wb; Ie,eff,wb; Rwb y MOS*. Y se calcula el ancho de banda mínimo requerido *WBr* mediante la ecuación [5]:

$$BWr \geq \frac{n}{k} * \left(Rs + \frac{Hoverhead}{T * f}\right) \quad (4)$$

En el cuarto paso, se selecciona el mayor valor del MOS y se determinan para que valores de k y n se obtuvo y esos valores de $k_i$ y $n_i$ se llaman $k_{best}$ y $n_{best}$ porque son los valores de la combinación para los que se obtiene mayor MOS.

Una observación de la Tabla IV permite apreciar que han sido definidos rangos de MOS para determinados niveles de satisfacción. En el quinto paso, se calcula un MOS que con respecto al mayor se redujo un 1% y se analiza en que rango de la escala de niveles de satisfacción se encuentra y se obtiene un MOS de referencia (MOSref) que toma el valor del extremo inferior de este rango. De esta forma se está permitiendo la máxima reducción del MOS posible sin que afecte los niveles de satisfacción de los usuarios.

Tabla 4: Nivel de satisfacción de los usuarios para diferentes rangos de MOS

| **Rango de MOS** | **Grado de satisfacción de los usuarios** |
|---|---|
| 4.34-4.50 | Muy satisfactorio |
| 4.03-4.34 | Satisfactorio |
| 3.60-4.03 | Muchos usuarios satisfechos |
| 3.10-3.60 | Muchos usuarios insatisfechos |
| 2.58-3.10 | Casi todos insatisfechos |
| < 2.58 | No recomendado |

En el sexto paso, se encuentran todos los pares ($k_i$, $n_i$) cuyo MOS sea mayor o igual que el MOSref, y se marcan como valores subóptimos ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$). En el séptimo paso, para estos pares subóptimos se calcula el MOS reducido (*MOSr*), y el porcentaje de reducción de bits redundantes (*Gr*). El *MOSr* representa la reducción que sufre el MOS para una combinación dada de k y n con respecto al mejor MOS, y se puede obtener mediante la ecuación [5]:

$$MOSr = \frac{MOS(kbest, nbest) - MOS(ksubopt, nsubopt)}{MOS(kbest, nbest)} * 100 \quad (5)$$

El *Gr* representa el porciento que se redujo la redundancia de canal para los pares ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) con respecto al par ($n_{best}$, $k_{best}$), y se puede obtener mediante la ecuación [5]:

$$Gr = \frac{(nbest - kbest) - (nsubopt - ksubopt)}{nbest - kbest} * 100 \quad (6)$$

Se puede ver que cuando el *MOSr* es más grande, la calidad de voz es menor y para mayor reducción de los bits redundantes, la BER (*Bit Error Rate*) es más alta y esto conduce a la calidad de voz inferior. Para encontrar el equilibrio entre *MOSr* y *Gr*, se procede como sigue:

- Para los pares de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) de cada modo, el algoritmo encuentra primero el/los par/es ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) que tienen menor *BWsubopt*, en caso de que haya varios valores iguales, escogerá en segundo lugar al/a los par/es ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) que tiene el valor más bajo del *MOSr*, si hay varios que cumplen esta condición,

TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

entonces el algoritmo seleccionará en tercer lugar el par de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) que mayor Gr tenga. En este paso se obtendrá la mejor relación k/n para cada modo de AMR-WB.

En el octavo paso, para el par de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) de todos los modos, el algoritmo encuentra en primer lugar un par que tiene el valor máximo de Gr, en el caso de que haya varios valores iguales, el algoritmo escogerá en segundo lugar el par de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) que tiene el valor más bajo del *MOSr*, si hay varios que cumplen esta condición, entonces el algoritmo seleccionará en tercer lugar el par de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$) que tiene el valor más bajo de ancho de banda subóptimo *BWsubopt*, donde *BWsubopt* es el ancho de banda requerido correspondiente al par de ($k_{subopt}$, $n_{subopt}$). Finalmente, la propuesta ofrecerá la mejor solución subóptima para minimizar los bits redundantes generados por la codificación de canal con una reducción MOS aceptable que no cambie el nivel de aceptación de los usuarios.

**Resultados parciales**

Para el análisis se corre el algoritmo considerando pr=5%, pr=10% y pr=15%; y se analiza el impacto que tiene variar los valores de *pr* en cada uno de los modos. La Tabla 5 muestra la codificación óptima para modo 0 y los diferentes valores de pr, el mejor MOS, como se esperaba, corresponde a la combinación k y n con mayor redundancia (k=1, n=5), este MOS clasifica en el rango de "muchos usuarios insatisfechos", así que para el procesamiento ulterior del algoritmo se deberá garantizar que se mantenga en este rango.

Tabla 5: Mejor MOS y grado de satisfacción para el modo 0

| pr(%) | $k_{best}$ | $n_{best}$ | $MOS_{best}$ | Satisfacción |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 1 | 5 | 3,58 | Muchos Usuarios Insatisfechos |
| 10 | 1 | 5 | 3,58 | Muchos Usuarios Insatisfechos |
| 15 | 1 | 5 | 3,58 | Muchos Usuarios Insatisfechos |

En la Tabla 6 se muestran todos los pares que el algoritmo marcó como subóptimos para los diferentes valores de pr, es decir, que cumplen que su *De2e* y su *Ppl* son menores que las especificadas en las condiciones iniciales del algoritmo y que el MOS correspondiente a ese par es mayor que el MOSref. Se descartan las combinaciones que arrojan valores de MOS iguales al mayor MOS. Las filas marcadas son las seleccionadas por el algoritmo para este modo, corresponden en primer lugar a los pares que menor BWr requieren. Para pr=5% el par seleccionado es (k=4, n=5), con una reducción del MOS de un 6.56% y una reducción de bit redundantes de la codificación de canal del 75%; para pr=10% es (k=2, n=3), con una reducción del MOS de un 12.56% y una reducción de bits redundantes de la codificación de canal del 75%; y para pr=15% es (k=3, n=5), con una reducción del MOS de un 11.02% y una reducción de bit redundantes de la codificación de canal del 50%.

Luego de correr el algoritmo para todos los modos, se obtienen resultados similares a los obtenidos en el modo cero. La variación numérica del MOS no es apreciable, es del orden de $10^{-3}$ en todos los casos, esto se debe a que la codificación de canal para las posibles combinaciones es robusta, para valores de probabilidades de pérdidas entre los rangos recomendados para el diseño de sistemas de servicio telefónico sobre IP. Para la mayoría de los casos, la reducción del MOS es mayor que el 1% y no cambia la satisfacción de los usuarios permitiéndose esa reducción. Se puede observar que a medida que cambian las combinaciones de (k, n) y pr, varían los valores de *De2e* y *Ppl* y esto a su vez hace que varíe el MOS en función de las relaciones entre los parámetros definidas por las ecuaciones del Modelo E.

Para valores mayores de pr la reducción de bits redundantes de la codificación de canal que se puede conseguir es menor, y esto es debido a que para peores condiciones de canal mayor es la probabilidad de errores, por tanto, mayor debe ser la redundancia para detectarlos y corregirlos.

Tabla 6: MOS subóptimo y grado de satisfacción para modo 0

| **pr=5%** |
|---|

| $k_{subop}$ | $n_{subop}$ | $MOS_{subop}$ | Satisfacción | MOSr(%) | Gr(%) | BWr(Kbps) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3,52 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 1,78 | 75 | 20,70 |
| 2 | 3 | 3,46 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 3,48 | 75 | 15,52 |
| 2 | 4 | 3,57 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 0,31 | 50 | 20,70 |
| 3 | 4 | 3,40 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 5,07 | 75 | 13,80 |
| 3 | 5 | 3,56 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 0,60 | 50 | 17,25 |
| **4** | **5** | **3,35** | **Muchos Usuarios Insatisfechos** | **6,56** | **75** | **12,94** |
| **pr=10%** | | | | | | |
| $k_{subop}$ | $n_{subop}$ | $MOS_{subop}$ | Satisfacción | MOSr(%) | Gr(%) | BWr(Kbps) |
| 1 | 2 | 3,33 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 6,87 | 75 | 20,70 |
| 1 | 3 | 3,55 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 0,71 | 50 | 31,05 |
| **2** | **3** | **3,13** | **Muchos Usuarios Insatisfechos** | **12,56** | **75** | **15,52** |
| 2 | 4 | 3,51 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 2,03 | 50 | 20,70 |
| 2 | 5 | 3,57 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 0,31 | 25 | 25,88 |
| 3 | 5 | 3,44 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 3,77 | 50 | 17,25 |
| **pr=15%** | | | | | | |
| $k_{subop}$ | $n_{subop}$ | $MOS_{subop}$ | Satisfacción | MOSr(%) | Gr(%) | BWr(Kbps) |
| 1 | 3 | 3,49 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 2,34 | 50 | 31,05 |
| 1 | 4 | 3,57 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 0,31 | 25 | 41,40 |
| 2 | 4 | 3,35 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 6,29 | 50 | 20,70 |
| 2 | 5 | 3,53 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 1,28 | 25 | 25,88 |
| **3** | **5** | **3,18** | **Muchos Usuarios Insatisfechos** | **11,02** | **50** | **17,25** |

**Resultados generales**

Una vez que el algoritmo se ha corrido para los valores de pr (5%, 10%, 15%) y están seleccionadas las combinaciones subóptimas para cada modo se pueden mostrar los resultados siguientes.

Tabla 7: Mejor MOS y grado de satisfacción para cada modo y pr=5%

| Modo | $k_{best}$ | $n_{best}$ | $MOS_{best}$ | Satisfacción |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 5 | 3,58 | Muchos Usuarios Insatisfechos |
| 1 | 1 | 5 | 4,04 | Satisfactorio |
| 2 | 1 | 5 | 4,37 | Muy Satisfactorio |
| 3 | 1 | 5 | 4,39 | Muy Satisfactorio |
| **4** | **1** | **5** | **4,43** | **Muy Satisfactorio** |
| 5 | 1 | 5 | 4,46 | Muy Satisfactorio |
| 6 | 1 | 5 | 4,47 | Muy Satisfactorio |
| 7 | 1 | 5 | 4,49 | Muy Satisfactorio |
| 8 | 1 | 5 | 4,44 | Muy Satisfactorio |

El algoritmo en este caso selecciona primero todas las combinaciones de (modo, k, n) que tengan mayor reducción de bit redundantes de la codificación de canal, 75% en este caso y son los tríos: (0, 4, 5), (1, 4, 5), (2, 4, 5), (4, 2, 3), (5, 3, 4), (6, 3, 4), (7, 4, 5) y (8, 2, 3); en segundo lugar selecciona de las combinaciones anteriores las que tengan menor reducción del MOS, en este caso sería la combinación (4, 2, 3) con 1.59% de reducción del MOS; y como no hay otra combinación que tenga igual valor de reducción de MOS, el algoritmo termina aquí, de modo que para una probabilidad de pérdida de paquetes “en bruto” de la ruta un 5%, el modo que mejor se adapta a las condiciones de

TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

trasmisión y logra optimizar el ancho de banda en función del nivel de satisfacción es el modo 4. Las Tablas 7 y 8 muestran estos resultados.

Tabla 8: MOS subóptimo y grado de satisfacción para cada modo y pr=5%

| **Modo** | **$k_{subop}$** | **$n_{subop}$** | **$MOS_{subop}$** | **Satisfacción** | **MOSr(%)** | **Gr(%)** | **BWr(Kbps)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 4 | 5 | 3,35 | Muchos Usuarios Insatisfechos | 6,56 | 75 | 12,94 |
| 1 | 4 | 5 | 3,83 | Muchos Usuarios Satisfechos | 5,25 | 75 | 15,81 |
| 2 | 4 | 5 | 4,20 | Satisfactorio | 3,84 | 75 | 20,69 |
| 3 | 3 | 5 | 4,38 | Muy Satisfactorio | 0,26 | 50 | 30,25 |
| **4** | **2** | **3** | **4,36** | **Muy Satisfactorio** | **1,56** | **75** | **29,70** |
| 5 | 3 | 4 | 4,44 | Muy Satisfactorio | 2,25 | 75 | 29,67 |
| 6 | 3 | 4 | 4,37 | Muy Satisfactorio | 2,15 | 75 | 31,87 |
| 7 | 4 | 5 | 4,39 | Muy Satisfactorio | 2,23 | 75 | 34,00 |
| 8 | 2 | 3 | 4,37 | Muy Satisfactorio | 1,59 | 75 | 42,00 |

La Fig. 2 muestra la relación del MOS con la razón de bits de cada modo de AMR-WB y con la razón de codificación de canal, considerando pr=5%.

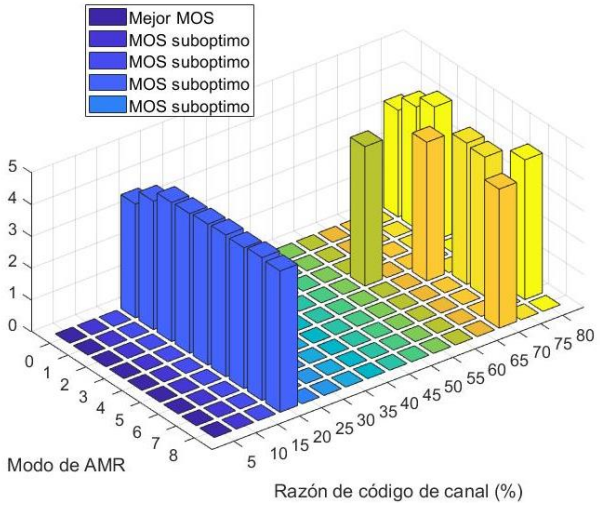


Figura 2: MOS vs. Modo de AMR-WB y razón de codificación de canal y pr=5%

Para pr=10%, el algoritmo procede como en el caso anterior, pero esta vez solo hay dos tríos con la mayor reducción de bit de redundancia de canal, 75% en este caso y son los tríos: (0, 2, 3) y (1, 2, 3); luego el seleccionado es (1, 2, 3) que tiene una reducción del MOS de un 10.43%, menor a la de la otra combinación posible, y el algoritmo termina en este paso. El modo mejor adaptado para este valor de pr es el modo 1. La Fig. 3 muestra la relación del MOS con la razón de bits de cada modo de AMR-WB y con la razón de codificación de canal, considerando pr=10%.

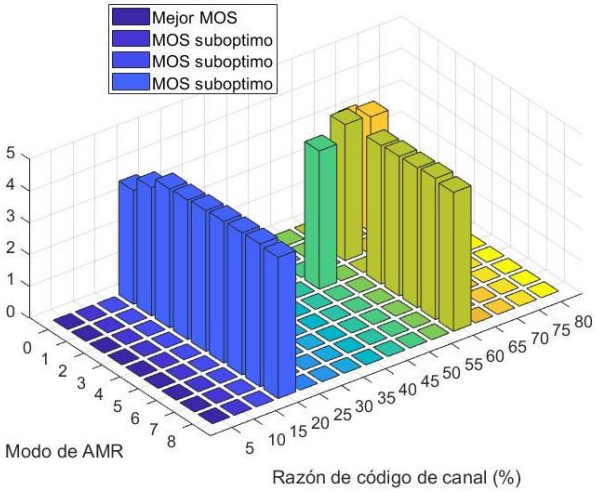


Figura 3: MOS vs. Modo de AMR-WB y razón de codificación de canal y pr=10%

Para pr=15%, las posibles combinaciones corresponden a la mayor reducción de los bits redundantes de la codificación de canal, 50% para este caso y son: (0, 3, 5), (1, 3, 5), (2, 3, 5) y (7, 2, 4), resultado del primer paso de discriminación del algoritmo; el segundo paso selecciona a la combinación (7, 2, 4) que corresponde a la que menos reducción del MOS produce, de un 2.13%; y aquí termina el algoritmo. El modo mejor adaptado para pr=15% es entonces el modo 7. La Fig. 4 muestra la relación del MOS con la razón de bits de cada modo de AMR-WB y con la razón de codificación de canal, considerando pr=15%

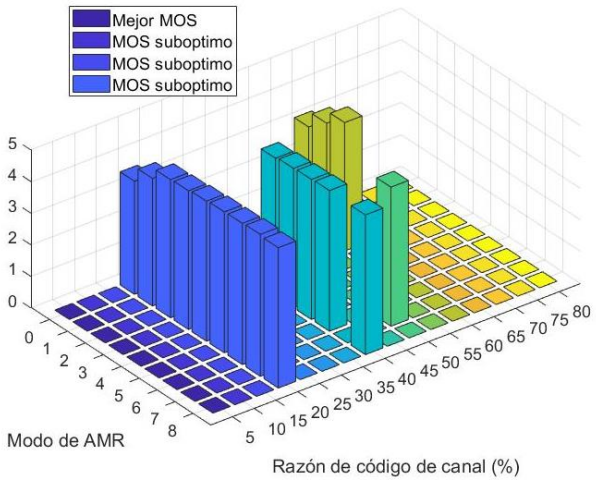


Figura 4: MOS vs. Modo de AMR-WB y razón de codificación de canal y pr=15%

Nótese que, como se venía presumiendo desde las primeras simulaciones, a medida que aumenta pr, se logra una menor reducción del número de bits redundantes de la codificación de canal. Precisamente de esta redundancia es de lo que se vale la codificación de canal para enfrentar con robustez las pérdidas; y la robustez de la codificación de canal es provechoso en términos de calidad. El modo 0 venia descartándose desde el principio porque el valor del mayor MOS es 3.58, y este valor no cumple con los requerimientos del MOS que se fijaron en esta investigación.

**Comparación con los resultados obtenidos en [5]**

Cuando se implementa el código del algoritmo propuesto por Duy-Huy Nguyen y Hang Nguyen en [5], se recrea su mismo escenario y se obtienen sus resultados, estos se extienden para los valores de pr usados en esta investigación (5%, 10% y 15%).

El gráfico de barras de la Fig. 5 muestra el ancho de banda requerido para la adaptación por el algoritmo original y por el modificado en esta investigación. Como se puede observar la mejora en ancho de banda es significativa. Esta ganancia se obtuvo, necesariamente, sacrificando algún otro parámetro de la comunicación. En este caso lo que se

TELEMÁTICA
REVISTA DIGITAL de las Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones
Revista Telemática. Vol. 19 No. 2, Mayo-Agosto, 2020, p. 31-42 ISSN 1729-3804

sacrifica es valor numérico del MOS, manteniendo niveles de satisfacción positivos, según lo planteado con anterioridad. Esta reducción del MOS (MOSr) se muestra en el gráfico de la Fig. 6.

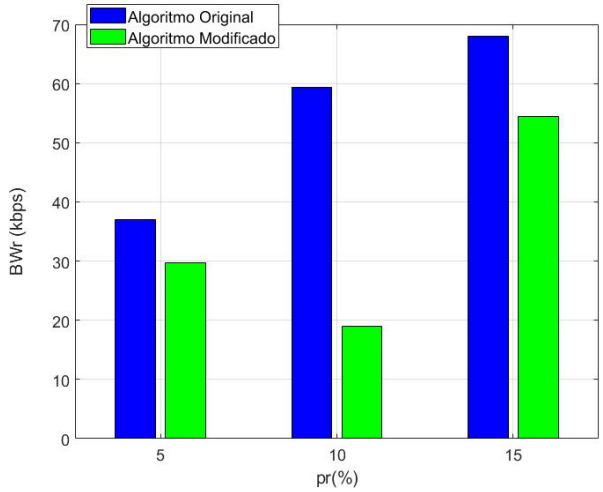


Figura 5: Comparación del BWr por el algoritmo original y por el modificado

Nótese, que para pr=10% la reducción del ancho de banda requerido para el algoritmo modificado, con relación al ancho de banda requerido por el algoritmo original es mayor y esto está perfectamente en concordancia con la reducción que sufre el MOS. Para pr=10% es cuando se obtiene mayor reducción del MOS, el algoritmo propuesto permite una reducción del MOS del 10.43% mientras que el algoritmo original lo hace solo del 0.23%

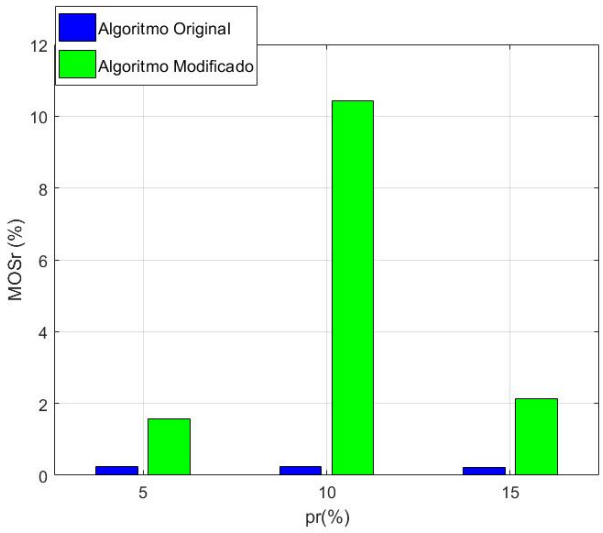


Figura 6: Comparación de la reducción del MOS permitida en el algoritmo original y en el modificado

Estas ganancias están condicionadas por las variaciones que se proponen a parámetros como la probabilidad de pérdida de paquetes y el MOSref en el algoritmo modificado. Al variar estos parámetros, un mayor número de combinaciones (k, n) que antes se descartaban, son tomadas en cuenta, porque el rango de aceptación se amplía.

## 3. CONCLUSIONES

Se implementó el algoritmo propuesto y se determinó que los valores numéricos del MOS disminuyeron entre un 1.5 % y un 10.5 %. Sin embargo, se mantuvieron los niveles de satisfacción de los usuarios del servicio, manteniendo el

mismo nivel en la escala cualitativa de evaluación de la calidad. Esto permitió una reducción del número bits redundantes de la codificación de canal entre 10 kbps y 40 kbps. Esta reducción a su vez, disminuye el ancho de banda requerido para la trasmisión de voz. Esto tiene un impacto positivo en el número de conexiones simultaneas que soporta la red en el mismo ancho de banda. Como las redes 5G mantienes los mismos parámetros y códec que las redes LTE en cuanto a transmisión de voz; los resultados obtenidos en esta investigación son aplicables para redes móviles 5G.

## RECONOCIMIENTOS

A mi familia por el apoyo incondicional y a los colegas que tributaron a la investigación.

## REFERENCIAS

[1] 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.

[2] 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.

[3] M. Chen y M. N. Murthi, «Optimized unequal error protection for voice over IP», en *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings.(ICASSP'04). IEEE International Conference on*, 2004, vol. 5, pp. V–865.

[4] H. Yousefi'zadeh y others, «Optimal rate adaptation for voip over wireless tandem links», en *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010-MILCOM 2010*, 2010, pp. 287–292.

[5] D.-H. Nguyen y H. Nguyen, «A dynamic rate adaptation algorithm using WB E-model for voice traffic over LTE network», en *Wireless Days (WD), 2016*, 2016, pp. 1–6.

[6] UIT-T, «Rec. G.722.2 (2003) Wideband coding of speech at around 16 kbitps using Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB)», *Int. Telecommun. Union Geneve Switz.*, p. 72, 2003.

[7] E. Liotou, D. Tsolkas, 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, jul. 2015.

[8] UIT-T, «Rec. G.722 (1993) Codificación de audio de 7 kHz dentro de 64 kbps», *Union Int. Telecomunicaciones Ginebra Suiza*, p. 72, 1993.

[9] ITU-T, «Rec. G.107 (2011) The E-model: a computational model for use in transmission planning», *Int. Telecommun. Union Geneve Switz.*, p. 20, 2011.

[10] ITU-T, «Rec. G.107.1 (2015) Wideband E-model», *Int. Telecommun. Union Geneve Switz.*, p. 20, 2015.

[11] L. Pang y L. Böszörmenyi, «Adaptive jitter buffer based on quality optimization under bursty packet loss», *Int. J. Adv. Telecommun. Vol. 5 Number 1 2 2012*, 2012.

## SOBRE LOS AUTORES

Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Central de las Villas (UCLV) en 2017. Comenzó su vida laboral en el Departamento de Matemáticas de la Universidad Central de las Villas y hasta la fecha se desempeña como profesor. Ha impartido cursos de pregrado tales como Series, Ecuaciones Diferenciales, Variable Compleja y Cálculo Operacional. Donde ha colaborado en la elaboración de materiales didácticos para estos cursos. Ha cursado diplomados en Pedagogía, Matemática Computacional, Metaheurísticas, IoT, Ingeniería de Software. Sus principales intereses de investigación están relacionados con las mediciones, el modelado y la evaluación de la calidad de servicios multimedia en redes IP.