

# Caracterización experimental del comportamiento de Network Coding para comunicaciones multicast

Pablo Garrido, Ramón Agüero  
Departamento de Ingeniería de Comunicación,  
Universidad de Cantabria  
39005, Santander  
{pgarrido,ramon}@tlmat.unican.es

**Resumen**—Las comunicaciones multicast, caracterizadas por la existencia de una única fuente, que transmite la misma información a múltiples destinos, están llamadas a ser un ingrediente relevante en las redes de siguiente generación. Este trabajo se centra en el uso del esquema de codificación de red Random Linear Network Coding (RLNC) para ofrecer una mayor escalabilidad en ese tipo de comunicaciones, frente a otros esquemas más tradicionales, incrementando la fiabilidad extremo a extremo. Los resultados teóricos ponen de manifiesto la gran ventaja que supone el utilizar técnicas de codificación, frente al uso de retransmisiones selectivas para recuperar la información perdida. Además, se muestra la viabilidad de la solución propuesta, desplegándola sobre una plataforma experimental compuesta por múltiples dispositivos de bajo coste, Raspberry-Pi's.

**Palabras Clave**—Network Coding, Multicast, Random Linear Network Coding, Implementación

## I. INTRODUCTION

Las comunicaciones multicast están cobrando gran importancia en los últimos años, especialmente para servicios de transmisión de contenidos en directo (*streaming*), tanto de vídeo o de audio. Sin embargo, ofrecer un servicio fiable y escalable no es trivial. Entre otras razones, establecer mecanismos para que el nodo origen conozca el estado de los múltiples receptores genera una sobrecarga importante a medida que el número de destinos aumenta.

Han surgido diversas propuestas para ofrecer servicios multicast. Entre ellas destaca el uso, por parte de los nodos destino, de reconocimientos selectivos negativos [1]. Esta es la base del protocolo NACK-Oriented Reliable Protocol (NORM), propuesto por un grupo de trabajo del IETF [2]. Sin embargo, este tipo de soluciones genera una alta sobrecarga, debido principalmente a la información transmitida por los múltiples receptores. Esta sobrecarga, en muchos casos, hace que las propuestas no sean escalables, por lo que se restringen a un número de usuarios reducido. El protocolo NORM utiliza un esquema de

reconocimientos probabilístico, permitiendo así una mayor escalabilidad [3].

Por otro lado, se ha propuesto aprovechar las posibilidades de las técnicas de codificación fuente sobre redes multicast [4]. En esta aproximación, destacan las soluciones basadas en códigos LT [5] o Raptor [6]. Ambos se caracterizan por generar un número ilimitado de paquetes codificados que, con muy alta probabilidad, permiten recuperar toda la información, recuperándose ante eventuales pérdidas.

Compartiendo algunas de las características de las técnicas de codificación fuente, han ganado popularidad las soluciones de codificación de red, Network Coding (NC), propuestas inicialmente por Ashlweide *et al.* en [7]. Entre las diferentes propuestas que se han llevado a cabo, destaca el esquema Random Linear Network Coding (RLNC), propuesto por Ho *et al.* en [8]. A diferencia de la codificación fuente, los nodos intermedios de la red pueden participar de manera más activa en la comunicación, descartando o generando paquetes recodificados, lo que reduce el impacto de las pérdidas en canales multi-salto [9], aprovechando además la capacidad de escucha oportunista de las redes inalámbricas [10]. Los autores de [11], [12] ya propusieron aprovechar el esquema RLNC en redes multicast, aunque en ambos casos los resultados se obtienen mediante estudios basados en simulación y ambas soluciones se basan en el uso de reconocimientos.

En este trabajo se presenta un esquema NC para redes multicast que no hace uso de reconocimientos y que permite ofrecer un servicio con una calidad adecuada. Primero se analizará la propuesta desde un punto de vista analítico, comparándola con un esquema basado en Automatic Repeat Request (ARQ), en concreto el protocolo NORM. Además, el trabajo presenta la implementación de la solución propuesta sobre una plataforma de dispositivos de bajo coste, Raspberry-Pis, sobre la que se analizarán las

prestaciones de las dos alternativas, a través de una extensa campaña de medidas.

El resto del trabajo se estructura como sigue: la Sección II describe brevemente el funcionamiento de RLNC y del protocolo NORM. Además, se desarrollan las expresiones que permitirán comparar los rendimientos teóricos de ambos esquemas. La Sección III presenta los principales resultados obtenidos. En una primera parte se realiza una comparativa teórica entre el esquema implementado y una solución basada en ARQ para posteriormente describir la plataforma experimenta desplegada y describir los resultados obtenidos tras una extensa campaña de medidas llevadas a cabo sobre la misma. Finalmente, en la Sección IV se enumeran las principales conclusiones que pueden extraerse del trabajo, indicando una serie de líneas de investigación que quedan abiertas, tanto sobre el estudio del esquema RLNC como en la mejora y extensión de la plataforma.

## II. PRELIMINARES

En esta sección se expondrá brevemente la operación básica del esquema RLNC, así como el funcionamiento del protocolo NORM. Además, se introducirán expresiones que permitirán analizar teóricamente el comportamiento de ambas soluciones, que serán empleadas posteriormente a la hora de comparar ambos esquemas.

### A. Random Linear Coding (RLNC)

El esquema RLNC fue originalmente presentado en [8] y en este trabajo se hace uso de un esquema similar al utilizado en [13]. El nodo origen divide la información a transmitir en generaciones. Cada generación contiene un número paquetes,  $k$ , y cada paquete contiene  $L$  bytes, que coincide con la MTU de la tecnología de red que se esté usando. El nodo origen transmite paquetes codificados generados como una combinación aleatoria de paquetes que pertenezcan a la misma generación:

$$p' = \sum_{i=0}^k c_i \cdot p_i \quad (1)$$

donde  $c_i$  se corresponde con los coeficientes seleccionados de forma aleatoria en un cuerpo finito de Galois,  $GF(2^q)$ . Estos coeficientes se pueden representar como un vector,  $\bar{c}$ , que será incluido en una cabecera, sin codificar, en cada paquete  $p'$  transmitido.

En el nodo destino se mantiene una matriz de decodificación  $D$  de tamaño  $k \times k$ . Por cada paquete codificado recibido se extrae de la cabecera el vector de coeficientes, que se inserta en  $D$  (en la fila  $i$ , de acuerdo al rango actual de la matriz) y se comprueba si dicho vector es linealmente independiente de los anteriormente recibidos (el rango de la matriz se vería incrementado). Si no fuera así el paquete recibido se descartaría, dado que no proporciona información novedosa. Una vez que el destino ha recibido  $k$  paquetes codificados linealmente independientes, es decir la matriz de decodificación tiene rango  $k$ , el destino está en disposición de recuperar los paquetes originales.

Para calcular el número de paquetes que el destino debe recibir para poder decodificar una generación se debe conocer primero la probabilidad de que un paquete codificado recibido sea linealmente independiente de los anteriormente recibidos. Esta probabilidad depende de la cantidad de información recibida hasta el momento o, lo que es lo mismo, el rango de la matriz de decodificación y viene dada por la siguiente expresión:

$$\text{Prob}_{r+}^{\text{RLNC}} = 1 - \frac{(2^q)^r}{(2^q)^k} \quad (2)$$

El número medio de paquetes codificados que debería recibir el nodo destino para poder decodificar una generación viene dado por:

$$\overline{\#TX} = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{\text{Prob}_{r+}^{\text{RLNC}}} = k + \alpha \quad (3)$$

donde  $\alpha$  es una constante que no depende del tamaño de la generación pero sí del cuerpo de Galois elegido, como se demuestra en [14] y, que en el caso binario ( $GF(2)$ ),  $\alpha \approx 1,6$ , para ir aproximándose a cero a medida que el tamaño del cuerpo crece. Hay que destacar que bajo esquemas de codificación RLNC no es importante qué paquetes han sido recibidos, sino recibir suficientes paquetes de información para decodificar. En este aspecto se encuentra la principal ventaja de utilizar esquemas de codificación como RLNC sobre redes multicast, donde cada destino debe recibir aproximadamente  $k + \alpha$  paquetes codificados ( $k$  linealmente independientes) para poder recuperar la información, sin importar exactamente cuales, ya que cada uno de ellos transporta la misma información. Se evita así la necesidad de transmitir notificaciones sobre qué paquetes en concreto falta a cada nodo destino.

En el esquema implementado el nodo origen transmite por cada generación un número de paquetes extra,  $N = k(1 + r)$ , donde  $r$  es un factor de redundancia que se deberá configurar según las condiciones particulares de cada caso (canal y grado de servicio). La probabilidad de que un receptor cualesquiera pueda decodificar una generación tras haber recibido  $N'$  paquetes codificados viene dada por la siguiente expresión, presentada por Trullols en [15]:

$$\xi_q(k, N) = \xi_q^0 \left( \left[ \begin{matrix} N \\ N - k \end{matrix} \right]_{2^q} + \sum_{i=1}^{N-k} (-1)^i \binom{N}{i} \left[ \begin{matrix} N - i \\ N - k - i \end{matrix} \right]_{2^q} \right) \quad (4)$$

donde  $\left[ \begin{matrix} m \\ n \end{matrix} \right]_q$  son los coeficiente  $q$ -binomiales (o Gauss) [15] y  $\xi_q^0$  es la probabilidad de decodificar una generación tras recibir exactamente  $k$  paquetes codificados:

$$\xi_q^0 = \xi_q(k, k) = \frac{(2^q)^{k^2}}{((2^q)^k - 1)^k} \prod_{j=1}^k \left( 1 - \frac{1}{(2^q)^j} \right) \quad (5)$$

Se asume un canal entre el nodo origen y el nodo destino,  $i$ , con una Frame Error Rate (FER) conocida,  $FER_i$  y que las pérdidas siguen una distribución uniforme. Bajo estas condiciones, y siguiendo la expresión de Trullols (Eq. (4)), se obtiene la probabilidad de decodificar una generación tras transmitir  $N$  paquetes por el nodo origen:

$$\text{Prob}_{\text{dec}} = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} FER_i^i \times (1 - FER_i)^{N-i} \times \xi_q(k, N) \quad (6)$$

Finalmente, la probabilidad de que un nodo destino,  $i$ , reciba toda la información (por ejemplo, un fichero), compuesta por  $M$  generaciones, es:

$$\text{Prob}_{\text{Succes}} = (\text{Prob}_{\text{dec}})^M \quad (7)$$

esta probabilidad es independiente del número de dispositivos que participen en la red multicast. Se debe escoger un valor de redundancia adecuado a las peores condiciones, teniendo en cuenta que un exceso de redundancia perjudica el rendimiento de la red, ya que origina un mayor número de transmisiones.

### B. NACK-oriented Reliable Protocol (NORM)

El protocolo NORM está diseñado para ofrecer una transmisión fiable para uno o más destinos sobre una red IP multicast. El objetivo es ofrecer una solución escalable y robusta sobre redes heterogéneas. Para ello se basa en el uso de Negative ACKnowledgment (NACK)s selectivos por parte de los destinos, que se utilizan para recuperar los paquetes perdidos.

La principal limitación es el volumen de tráfico generado por las peticiones de información no recibida por los destinos. Esta sobrecarga incrementa linealmente con el número de dispositivos, generando un número elevado de transmisiones hacia el nodo origen. Para reducir este tráfico NORM utiliza un mecanismo de reconocimientos probabilístico [3], que le permite incrementar la escalabilidad manteniendo un nivel adecuado de fiabilidad. Para más detalles sobre el protocolo, el lector puede acudir a [2].

Se asume que el nodo origen quiere transmitir un fichero de tamaño,  $T = M \times k$ , y que la calidad del canal entre el nodo origen y los destinos es conocida e igual para todos,  $\overline{FER}$ . Bajo estas circunstancias es fácil establecer que la probabilidad de que un paquete llegue a todos los destinos ( $R$ ) es  $(1 - FER)^R$ . Por tanto, la probabilidad de que se hayan perdido  $X$  paquetes se puede obtener mediante una distribución binomial, con probabilidad  $p = 1 - (1 - FER)^R$ :

$$\text{Prob}_{\text{lost}}(X, T) = \binom{L}{X} (1 - (1 - FER)^R)^X \times \times ((1 - FER)^R)^{(T-X)} \quad (8)$$

El número medio de paquetes que se necesitan retransmitir bajo un esquema NORM es, por tanto:

$$\overline{\text{TX}}_{\text{NORM}} = T \times (1 - (1 - FER)^R)^X \quad (9)$$

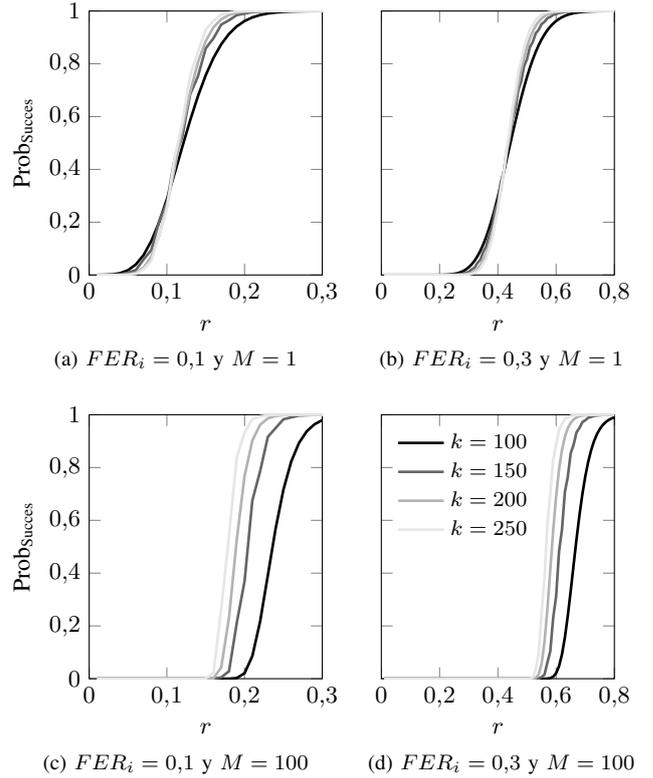


Figura 1: Probabilidad de éxito en función de la redundancia en el sistema y para diferentes tamaños de generación. Se compara el resultado para diferentes probabilidades de error en el canal.

## III. RESULTADOS

En esta sección se comparará inicialmente el rendimiento del esquema RLNC con el del protocolo NORM, utilizando las expresiones teóricas que se han presentado en la Sección II. Posteriormente se describirá la plataforma que se ha desplegado, mediante el uso de Raspberry-Pi's, para evaluar el comportamiento de ambas soluciones sobre equipos reales. Se finalizará describiendo los resultados obtenidos tras una extensa campaña de medidas.

### A. Análisis teórico

Un primer análisis del esquema RLNC propuesto se muestra en la Figura 1, que representa la probabilidad de éxito, definida como la probabilidad de que un receptor cualquiera haya podido decodificar todas las generaciones. Se comparan los valores obtenidos para diferentes configuraciones, modificando tanto el tamaño de la generación como la probabilidad de error en el canal ( $FER_i = 0,1, 0,3$ ). Evidentemente, la redundancia necesaria vendrá marcada fuertemente por la probabilidad de error en el canal. Además, cuanto mayor sea el número de generaciones a recuperar, mayor será también la redundancia, tal y como se puede ver en la expresión 7. Aumentar el tamaño de las generaciones, para transmitir así la misma cantidad de información, reduciendo el número de generaciones necesarias, disminuiría la redundancia necesaria. Sin embargo, es importante tener en cuenta asimismo la sobrecarga

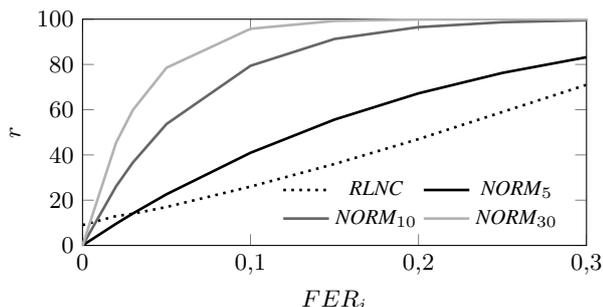


Figura 2: Redundancia que se debería utilizar bajo el esquema RLNC para obtener una probabilidad de 99,99 % de éxito en comparativa con un esquema simplificado de NORM

generada por el vector de coeficientes que, según se analizó en [13], no debería superar un tamaño de  $k = 255$  para un escenario en el que la Maximum Transfer Unit (MTU) sea de 1500 bytes, puesto que este vector tendría un tamaño de  $\frac{k \cdot q}{8}$  bytes.

En la Figura 2 se comparan el esquema implementado RLNC con una versión simplificada de NORM, tal y como se describe en la Sección B.(Eq. 9). Bajo la leyenda RLNC se representa la redundancia con la que se obtendría una probabilidad de éxito del 99,99 %, utilizando la expresión (Eq. 7). En ambos caso la información a transmitir es la misma, 100 generaciones ( $M$ ) con 100 paquetes cada generación ( $k$ ), lo que hace un total de  $100 \times 100$  paquetes ( $L$ ). En el caso de utilizar un esquema RLNC, esta redundancia sería la misma, independientemente del número de dispositivos, siempre que los canales presenten una calidad mejor que  $FER_i$ . En cambio, esto no ocurre para el caso del esquema NORM, donde el número de receptores claramente afecta al número de retransmisiones. Como se puede ver en la Figura 2, la redundancia bajo un esquema de retransmisiones selectivas como NORM es hasta 4,5 veces mayor que un esquema de codificación RLNC.

### B. Plataforma

Con intención de estudiar la aplicabilidad del esquema RLNC en entorno reales, se ha desplegado una plataforma compuesta por dispositivos de bajo coste, Raspberry-Pis. En la Figura 3 se puede ver el despliegue de la plataforma. En concreto, se han dispuesto 31 Raspberry-Pis sobre un tablero, 30 de ellos desplegados según una malla, que harán las veces de receptores multicast. Todos los dispositivos cuentan con un interfaz inalámbrico (802.11) y otro Ethernet, que se utiliza para realizar todas las operaciones de gestión del experimento: comunicarse con cada uno de los dispositivos, inicializarlos, recoger los datos tras las medidas, etc. El interfaz inalámbrico es el único que se utilizará durante los experimentos.

La red está configurada en modo infraestructura, de manera que el nodo superior hace las funciones de punto de acceso del resto de dispositivos, además de tomar el papel de transmisor de la red multicast. Esta configuración



Figura 3: Imagen de la plataforma desplegada. Transmisor en la parte superior y 30 receptores en la matriz de 6x5

permite tener mayor control sobre el tráfico que se envía por la red. El resto de dispositivos, situados según una malla de  $6 \times 5$ , son los nodos receptores que, además, cuentan con una pantalla que muestra las estadísticas de cada experimento/medida. Todos los dispositivos son Raspberry-Pi 3, que cuentan con interfaz 802.11, excepto los dos situados en la parte inferior derecha, que son Raspberry-Pi 2, que utilizan un dongle TP-Link TLWN722N.

El esquema RLNC implementado utiliza la librería KODO [16] tal como está detallado en la Sección II. En concreto, el nodo transmisor, dispositivo en la parte superior del panel, transmite  $N = k \times r$  paquetes codificados por cada generación en modo broadcast. Los receptores, resto de dispositivos de la malla, reciben los paquetes que no se hayan perdido debido a interferencias y las condiciones adversas del canal inalámbrico. Los receptores procederán a recuperar la generación siempre que sea posible. En caso de recibir paquetes que pertenecen a la siguiente generación, la generación queda identificada en la cabecera de cada paquete codificado, marcará la transmisión como incompleta, es decir, no podrá recibir el fichero en su totalidad, pero intentará decodificar la siguiente generación.

Hay varios trabajos que desplegaron con anterioridad plataformas con dispositivos de bajo coste para el estudio de las prestaciones que ofrecen esquemas de Network Coding [17], [18]. En ambos se utilizan Raspberry-Pis como dispositivos de bajo coste y se utiliza la librería KODO para las tareas codificación y decodificación. En [17] se estudia las ventajas de utilizar esquemas de Network Coding en redes con cooperación, es decir, donde nodos intermedios de la red cooperan entre sí para recuperar la información que no han recibido otros nodos de la red. Mientras que en [18] también se analiza las prestaciones del esquema RLNC para comunicaciones multicast inalámbricas. Sin embargo, no presentan un estudio analítico ni comparan con un esquema alternativo para comunicaciones multicast como es NORM.

Además de analizar el comportamiento bajo condiciones adversas, cada dispositivo cuenta con un archivo de

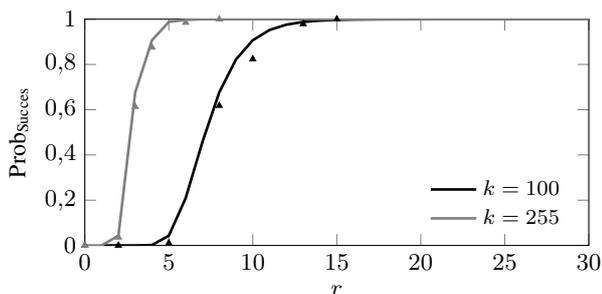


Figura 4: Probabilidad que un dispositivo reciba todas las generaciones. Las líneas se corresponden con el valor teórico, mientras que los marcadores reflejan los valores observados sobre la plataforma de medida.

configuración donde se puede establecer fijar una probabilidad de error ‘sintética’, por la que se descartarían, en el dispositivo  $i$ , paquetes de manera aleatoria, con una probabilidad  $FER_i$ .

Todos los resultados que se muestran a continuación se obtienen tras promediar los valores obtenidos tras 100 experimentos. La cantidad de información transmitida en cada experimento es de 100 generaciones.

En la Figura 4 se compara la probabilidad de éxito teórica frente a la que se obtiene en las medidas. Se ha utilizado para ello, como probabilidad de error en los resultados teóricos ( $FER_i^j$  en (Eq. 6)), la media observada en el conjunto de dispositivos. Como se puede ver, hay una pequeña diferencia entre los dos tipos de resultado, lo que puede justificarse por la gran variabilidad del medio físico, en el que, además, las pérdidas se caracterizan por no seguir una distribución uniforme y habitualmente aparecen a ‘ráfagas’, por ejemplo tras la ejecución de algún proceso de búsqueda activa por parte de los dispositivos activos en el área de influencia de la plataforma.

Como se mencionó anteriormente, los nodos receptores cuentan con un archivo de configuración, que permite establecer una probabilidad de error sintética en cada nodo. En la Figura 5 se representa la probabilidad de éxito cuando todos los nodos están configurados con la misma  $FER$  (0,1 ó 0,3). El sistema tiene un comportamiento muy similar, independientemente de la calidad de canal, aunque se ve claramente que la redundancia aumenta a medida que la calidad de los canales inalámbricos es peor.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un sistema basado en el esquema RLNC para ofrecer un servicio de conexión fiable y escalable para dar servicios multicast en redes inalámbricas. Primero se han planteado expresiones analíticas que modelan el comportamiento de esta solución, así como del correspondiente protocolo NORM. Se puso de manifiesto que, con un esquema basado en reconocimientos selectivos, la sobrecarga total aumenta con el número de receptores en la red. Los resultados muestran que la sobrecarga puede ser hasta 4,5 veces mayor, si se compara con la solución propuesta.

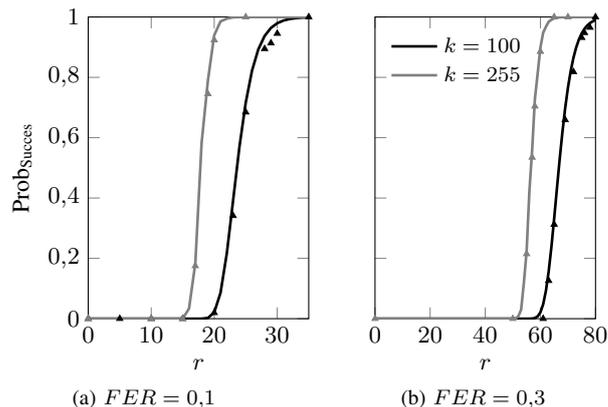


Figura 5: Probabilidad que un dispositivo reciba todas las generaciones con canales con error. Las líneas se corresponden con el valor teórico, mientras que los marcadores reflejan los valores observados sobre la plataforma de medida

Mediante el despliegue de una plataforma de dispositivos de bajo coste, Raspberry-Pi’s, se ha podido analizar la viabilidad del esquema propuesto, a través de una extensa campaña de medidas, cuyos resultados muestran un comportamiento muy similar al adelantado por el modelo teórico.

Gracias a la realización de este trabajo surgen varias líneas de trabajo que se esperan continuar en el futuro:

- Análisis de esquemas de reconocimiento probabilísticos para mejorar la fiabilidad del sistema. Aunque el uso de retransmisiones implica un incremento de la sobrecarga, con en el esquema RLNC solo se necesitan reconocimientos por cada generación, lo que ya reduciría considerablemente la sobrecarga.
- Transmisión de vídeo sobre la plataforma. La retransmisión de contenido multimedia (*streaming*) es, sin duda, una de las aplicaciones más relevantes para las redes multicast. Se utilizará la plataforma desplegada para reproducir vídeo transmitido por el nodo transmisor en las pantallas de los receptores. En estas condiciones las consideraciones son diferentes, ya que un tamaño de generación elevado daría lugar a un retardo inaceptable en la recepción mientras que la pérdida de una generación no es tan relevante, ya que lo que determina la calidad del servicio es la continuidad del vídeo en el receptor.
- Redes multi-salto. También se analizará el comportamiento del esquema RLNC cuando se utilice sobre topologías multi-salto. Como ya se ha mencionado, RLNC ofrece la posibilidad de que los nodos intermedios descarten o generen paquetes recodificados. En varios trabajos previos [19], [20] ya se analizaron estas soluciones, en un entorno de simulación, por lo que resultaría interesante replicar dichos experimentos aprovechando la plataforma desplegada, para comprobar su viabilidad sobre dispositivos reales.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Los autores querían expresar su agradecimiento al Gobierno de España por su financiación en el proyecto “*Aprovisionamiento Dinámico de Conectividad en Escenarios inalámbricos 5G de alta Densidad ADVICE* (TEC2015-71329-C2-1-R).

## REFERENCIAS

- [1] N. Seddigh, B. Nandy, and J. Salim, “System and method for a negative acknowledgement-based transmission control protocol,” Apr. 25 2006, uS Patent 7,035,214. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US7035214>
- [2] B. Adamson, C. Bormann, M. Handley, and J. Macker, “Negative-acknowledgment (nack)-oriented reliable multicast (norm) protocol,” Tech. Rep., 2004.
- [3] J. Nonnenmacher and E. W. Biersack, “Optimal multicast feedback,” in *INFOCOM ’98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, Mar 1998, pp. 964–971 vol.3.
- [4] D. Vukobratovic, V. Stankovic, D. Sejdinovic, L. Stankovic, and Z. Xiong, “Scalable video multicast using expanding window fountain codes,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 11, no. 6, pp. 1094–1104, Oct 2009.
- [5] M. Luby, “LT codes,” in *Proc. of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, 2002, pp. 271–280.
- [6] A. Shokrollahi, “Raptor codes,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2551–2567, June 2006.
- [7] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, “Network information flow,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, Jul 2000.
- [8] T. Ho, R. Koetter, M. Medard, D. Karger, and M. Effros, “The benefits of coding over routing in a randomized setting,” in *Proc of the IEEE International Symposium on Information Theory*, 2003, p. 442.
- [9] P. Pahlavani, D. E. Lucani, M. V. Pedersen, and F. H. P. Fitzek, “PlayNCool: Opportunistic network coding for local optimization of routing in wireless mesh networks,” in *Proc. of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec 2013, pp. 812–817.
- [10] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, “Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing,” in *Proc. of the ACM conference on Applications, technologies, architectures and protocols for computer communications*, vol. 37, no. 4. ACM, Aug. 2007, pp. 169–180.
- [11] X. Xiao, L. M. Yang, W. P. Wang, and S. Zhang, “A wireless broadcasting retransmission approach based on network coding,” in *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications*, May 2008, pp. 782–786.
- [12] D. Nguyen, T. Tran, T. Nguyen, and B. Bose, “Wireless broadcast using network coding,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 914–925, Feb 2009.
- [13] D. Gómez, E. Rodríguez, R. Agüero, and L. Muñoz, “Reliable communications over lossy wireless channels by means of the combination of UDP and random linear coding,” in *Proc. of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, June 2014, pp. 1–6.
- [14] P. Garrido, D. E. Lucani, and R. Agüero, “A markov chain model for the decoding probability of sparse network coding,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
- [15] O. Trullols-Cruces, J. Barcelo-Ordinas, and M. Fiore, “Exact decoding probability under random linear network coding,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 67–69, January 2011.
- [16] M. V. Pedersen, J. Heide, and F. Fitzek, *Kodo: An Open and Research Oriented Network Coding Library*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 145–152.
- [17] H. Khamfroush, D. E. Lucani, J. Barros, and P. Pahlavani, “Network-coded cooperation over time-varying channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 12, pp. 4413–4425, Dec 2014.
- [18] A. Paramanathan, P. Pahlavani, S. Thorsteinsson, M. Hundeboll, D. E. Lucani, and F. H. P. Fitzek, “Sharing the pi: Testbed description and performance evaluation of network coding on the raspberry pi,” in *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2014, pp. 1–5.
- [19] P. Garrido, D. E. Lucani, and R. Agüero, “How to tune sparse network coding over wireless links,” *Proc. of the IEEE International Wireless Communications and Networking Conference*, 2017.
- [20] D. Gomez, P. Garrido, E. Rodriguez, R. Agüero, and L. Muñoz, “Enhanced opportunistic random linear source/network coding with cross-layer techniques over wireless mesh networks,” in *Proc. of the IFIP Wireless Days Conference (WD)*, Nov 2014, pp. 1–4.