

# Maximización de la Utilidad en una Red de Comunicación Vehicular

M.A. Díaz-Ibarra, D.U. Campos-Delgado, C.A. Gutiérrez  
J.M. Luna-Rivera

*Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México (e-mail: madiazibarra@gmail.com, ducd@fciencias.uaslp.mx, cagutierrez@ieee.org, mlr@uaslp.mx)*

---

**Resumen:** En este artículo se estudia el problema de maximizar la utilidad de una red de comunicación entre vehículos e infraestructura basada en el estándar IEEE 802.11p. Con este fin, en primera instancia se modela el enlace de comunicación en la red. En segundo lugar, se propone un esquema de optimización iterativo basado en dos estructuras de retroalimentación anidadas, donde el lazo externo establece el valor objetivo de la razón señal a interferencia-ruido (SINR, por sus siglas en inglés), tal que se maximice la función de utilidad global de la red; y el lazo interno ajusta la potencia de transmisión en el enlace de comunicación para alcanzar el valor de referencia del SINR, a pesar del canal variante en el tiempo, la interferencia y la latencia en la red. Finalmente, los resultados de la simulación en MATLAB indican que el esquema propuesto obtiene valores de SINR objetivos óptimos que logran maximizar la utilidad y mejoran la eficiencia energética en la red.

*Keywords:* Eficiencia energética, calidad de servicio, algoritmo de control de potencia LQG, red de comunicación vehicular.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones inalámbricas juegan un papel fundamental en los sistemas de transporte inteligente (ITS, por sus siglas en inglés) debido a que esta comunicación permitirá el intercambio de mensajes entre vehículos (V2V, por sus siglas en inglés) y entre vehículos-e-infraestructura (V2I, por sus siglas en inglés), donde los conductores serán notificados con la información recibida sobre el estado de accidentes, tráfico y otras eventualidades en la carretera (Torrent-Moreno et al., 2006; Kenney, 2011; Karagiannis et al., 2011). A través de este intercambio de información, se contará con tiempo suficiente para la toma de decisiones con respecto a las rutas más óptimas con el fin de evitar accidentes y congestiones de tránsito.

En los años 90, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) asignó 75 MHz de ancho de banda en el rango de frecuencias de 5.850 - 5.925 GHz para los servicios de ITSs (Kenney, 2011). Este ancho de banda de 75 MHz está dividido en seis canales de servicio y un canal central de control. Los canales de servicio son empleados para aplicaciones de *infotainment* (información y entretenimiento) y eficiencia del tráfico, mientras que el canal de control está reservado para el intercambio de mensajes de control y para aplicaciones de seguridad vial. En Kenney (2011) se presenta la distribución de estos canales, así como la potencia máxima de transmisión permitida y el rango de frecuencias de cada uno de ellos.

En los ITS, el control de potencia es una técnica eficaz para mantener los requerimientos específicos de la calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés) por cada vehículo (Díaz-Ibarra et al., 2018). También, el objetivo de actualizar dinámicamente los niveles de potencia de

transmisión en los vehículos permite compensar la interferencia y las variaciones del canal de comunicación. Por lo tanto, en la literatura se han propuesto diferentes enfoques para el control de potencia en comunicaciones vehiculares. En Hisham et al. (2016) se proponen dos algoritmos de control de potencia con el fin de mitigar la interferencia de canal adyacente (ACI, por sus siglas en inglés) para la comunicación entre vehículos, ya que estudios recientes han demostrado que la ACI afecta significativamente la confiabilidad en los enlaces de comunicación. Sin embargo, todos estos análisis y observaciones, se basan en el estándar LTE-V (Molina-Masegosa and Gozalvez, 2017). En Torrent-Moreno et al. (2009) se propone un método de control de potencia distribuido para controlar la carga de los mensajes periódicos, buscando asegurar la recepción satisfactoria de los mensajes de emergencia de mayor prioridad. En Bauza et al. (2013) se propone una estimación del enlace consciente de la potencia (PoLiQ, por sus siglas en inglés) para estimar la calidad de los enlaces de las redes vehiculares, con base en la recepción periódica de paquetes desde los nodos vecinos y el conocimiento de los parámetros de transmisión de los vehículos. Por otro lado, se han propuesto mecanismos de control de potencia para mejorar el rendimiento del sistema. Por ejemplo en Ren et al. (2015), los autores estudian cómo aplicar de una manera eficiente una comunicación de dispositivo-a-dispositivo (D2D, por sus siglas en inglés) subyacente a un sistema celular para soportar una conexión de V2V (llamada D2D-V). En ese sentido, se adaptan estrategias para la reutilización de canal y el control de potencia óptimo, con el objetivo de maximizar la capacidad del sistema y la tasa de transmisión de datos alcanzable mínima en los enlaces de comunicación. En Jose et al. (2015), se sugieren

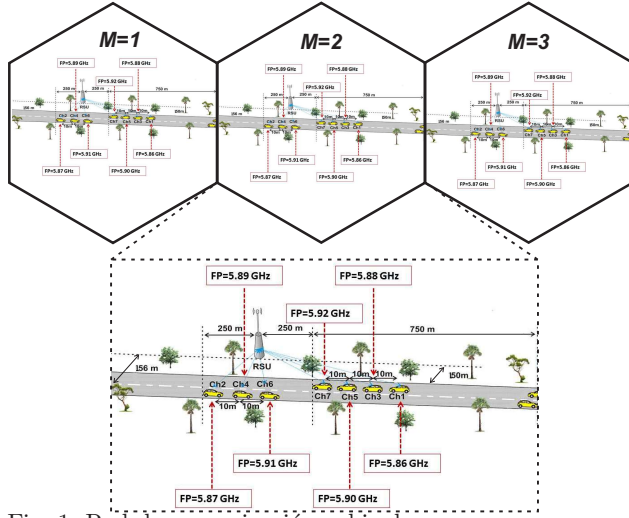


Fig. 1. Red de comunicación vehicular.

algoritmos distribuidos para controlar la tasa y la potencia de transmisión para redes vehiculares, de esta manera se regula la velocidad del envío de información y la energía utilizada en la transmisión por cada vehículo de forma distribuida. Por lo tanto, se maximiza el rendimiento del sistema global.

En este trabajo de investigación se propone el control de potencia para maximizar la utilidad en una red de comunicación vehicular basada en el estándar IEEE 802.11p con el fin de garantizar los requerimientos específicos de la QoS en los enlaces de comunicación. Además, en este documento se presenta una derivación analítica de la optimización de la utilidad y una evaluación detallada del esquema propuesto. En este contexto, en este trabajo no sólo se han considerado los esquemas de control de potencia como en Díaz-Ibarra et al. (2018) sino que se ha formulado el problema de optimización siguiendo las ideas en Campos-Delgado et al. (2014) con el objetivo de maximizar la utilidad de la red de comunicación.

## 2. MODELO DEL SISTEMA

En este estudio se considera una red de comunicación vehicular como se muestra en la Fig. 1, la cual está compuesta por dos tipos de nodos: El primero se llama unidad abordo (OBU, por sus siglas en inglés), que representa a un vehículo con tecnología de comunicación; el segundo nodo es una unidad fija a lo largo del camino (RSU, por sus siglas en inglés) (i.e. estación base). Este modelo considera un sistema de comunicación en el enlace de subida (i.e. OBUs a RSUs) con  $M$  RSUs y  $U$  OBUs en movimiento distribuidos en una carretera de dos carriles como se ilustra en la Fig. 1, donde se asume que cada vehículo utiliza un canal de los siete disponibles con anchos de banda de 10 MHz, y también se considera que cada RSU emplea el mismo conjunto de canales en áreas geográficas diferentes. En consecuencia, el factor principal que limita el desempeño del sistema de comunicación V2I son las señales de interferencia como se mencionó en Díaz-Ibarra et al. (2018). En este trabajo, la QoS del enlace de comunicación se evaluará a través del SINR como se propone en Hisham et al. (2016).

El SINR para la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU se calcula como:

$$\gamma_{l,i}[k] = \frac{W}{r_{l,i}} \frac{p_{l,i}[k] |h_{l,i}[k]|^2}{I_{l,i}[k] + \sum_{m=1, m \neq l}^M p_{m,i}[k] |h_{m,i}[k]|^2 + \sigma_{l,i}^2}, \quad \forall i \in [1, U], l \in [1, M], \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_l[k] = \begin{bmatrix} c_{l,2} |h_{l,2}[k]|^2 p_{l,2}[k] \\ c_{l,1} |h_{l,1}[k]|^2 p_{l,1}[k] + c_{l,3} |h_{l,3}[k]|^2 p_{l,3}[k] \\ c_{l,2} |h_{l,2}[k]|^2 p_{l,2}[k] + c_{l,4} |h_{l,4}[k]|^2 p_{l,4}[k] \\ c_{l,3} |h_{l,3}[k]|^2 p_{l,3}[k] + c_{l,5} |h_{l,5}[k]|^2 p_{l,5}[k] \\ c_{l,4} |h_{l,4}[k]|^2 p_{l,4}[k] + c_{l,6} |h_{l,6}[k]|^2 p_{l,6}[k] \\ c_{l,5} |h_{l,5}[k]|^2 p_{l,5}[k] + c_{l,7} |h_{l,7}[k]|^2 p_{l,7}[k] \\ c_{l,6} |h_{l,6}[k]|^2 p_{l,6}[k] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

donde  $W$  es el ancho de banda por canal,  $r_{l,i}$ ,  $p_{l,i}[k]$  y  $h_{l,i}[k]$  denotan la velocidad de transmisión de datos, la potencia de transmisión y la ganancia de canal para la  $l$ -ésima OBU en la  $i$ -ésima RSU, respectivamente, los coeficientes numéricos del vector  $\mathbf{I}_l[k]$  representan la ACI de la  $l$ -ésima RSU e  $I_{l,i}[k]$  su  $i$ -ésimo elemento (Díaz-Ibarra et al., 2018),  $\sigma_{l,i}^2$  es la varianza del ruido, y  $\sum_{m=1, m \neq l}^M p_{m,i}[k] |h_{m,i}[k]|^2$  es la interferencia de RSU a RSU. Con esta formulación, es posible garantizar la QoS del enlace de comunicación entre la  $i$ -ésima OBU a la  $l$ -ésima RSU si la  $\gamma_{l,i} \geq \gamma_{l,i}^{obj}$ , donde  $\gamma_{l,i}^{obj}$  es el umbral SINR objetivo óptimo. En la estimación del SINR en (1) se obtiene cierta variabilidad asociada con las estimaciones del canal y los factores de interferencia, y para reducir este efecto se aplica una etapa de filtrado. Con este fin, se emplea un filtro  $\alpha - \beta - \gamma$  (Tenne and Singh, 2002), el cual se ha empleado comúnmente en sistemas de radar.

## 3. OPTIMIZACIÓN DE LA UTILIDAD

El concepto de utilidad para sistemas de comunicación inalámbricos es aquel que mide el número total de bits transmitidos exitosamente por joule de energía consumido (Saraydar et al., 2002). En este sentido, un alto nivel de SINR en el enlace de comunicación entre la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU resultará en una tasa de error de bit (BER, por sus siglas en inglés) más baja y por lo tanto una velocidad de transmisión más alta. Sin embargo, para lograr un nivel alto de SINR se requiere que las OBUs transmitan a una mayor potencia, lo que resultará en una mayor interferencia entre canales adyacentes e interferencia de RSU a RSU. Este compromiso se puede cuantificar mediante la siguiente función de utilidad por OBU activo en la red como (Campos-Delgado et al., 2014):

$$u = \frac{T}{p} \text{ bits/joule}, \quad (3)$$

donde  $T$  representa la tasa de transferencia y  $p$  la potencia de transmisión. La función de utilidad para la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU en el instante de tiempo  $k$  se puede expresar como:

$$u_{l,i}[k] = \frac{L r_{l,i} f(\gamma_{l,i}[k])}{\underbrace{N}_{T_{l,i}[k]}} \frac{1}{p_{l,i}[k]} = \frac{L r_{l,i}}{\underbrace{N}_{w_{l,i}}} \frac{f(\gamma_{l,i}[k])}{p_{l,i}[k]} \frac{\text{bits}}{\text{joule}}, \quad (4)$$

donde  $L$  es el número de bits de información por símbolo de multicanalización por división de frecuencias ortogonales

(OFDM, por sus siglas en inglés) y  $N$  es el número total de bits en cada símbolo OFDM ( $N > L$ );  $r_{l,i}$  es la velocidad de transmisión, y  $f(\gamma_{l,i}[k])$  es una función de eficiencia relacionada con la tasa de recepción de símbolos OFDM. En general, la función de eficiencia tiene las siguientes propiedades:

- $f(0) \rightarrow 0$  y  $f(\infty) \rightarrow 1$ ,
- $f'(\gamma_{l,i}[k]) > 0 \forall \gamma_{l,i}[k] > 0$  con  $f'(0) \rightarrow 0$  y  $f'(\infty) \rightarrow 0$ .

La función de eficiencia se modela como (Campos-Delgado et al., 2014):

$$f(\gamma_{l,i}[k]) = (1 - \exp^{-\gamma_{l,i}[k]})^N, \quad (5)$$

por lo tanto, la utilidad de toda la red se puede escribir como:

$$\mathcal{U}(\mathbf{p}_1[k] \cdots \mathbf{p}_M[k]) = \sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^U u_{l,i}[k] = \sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^U w_{l,i} \frac{f(\gamma_{l,i}[k])}{p_{l,i}[k]} \quad (6)$$

donde

$$\mathbf{p}_l[k] = [p_{l,1}[k] \cdots p_{l,U}[k]]^T \quad l \in [1, M]. \quad (7)$$

El problema consiste en determinar los valores de los vectores  $\{\mathbf{p}_l[k]\}_{l=1}^M$  en el instante de tiempo  $k$  que maximizan la utilidad de la red bajo un intervalo específico de la QoS. Matemáticamente el problema de optimización puede ser descrito como sigue:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{p}_1[k] \cdots \mathbf{p}_M[k]} \mathcal{U}(\mathbf{p}_1[k] \cdots \mathbf{p}_M[k]), \\ & \text{s.t. } \gamma_{min} \leq \gamma_{l,i}[k] \leq \gamma_{max} \quad \forall i \in [1, U], l \in [1, M]. \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $\gamma_{min}$  y  $\gamma_{max}$  son la cota inferior y superior, respectivamente, en el SINR.

De la definición de la función de utilidad en (4) para la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU y calculando sus derivadas parciales se obtiene (por simplicidad se omite la dependencia del índice de tiempo  $k$ ):

$$\frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{l,i}} = \frac{w_{l,i}}{(p_{l,i})^2} \left\{ p_{l,i} f'(\gamma_{l,i}) \frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{l,i}} - f(\gamma_{l,i}) \right\}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{m,i}} = \frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{m,i}}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{l,j}} = \frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{l,j}}. \quad (11)$$

A continuación, se calculan las derivadas parciales del SINR con respecto a la potencia de transmisión como:

$$\frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{l,i}} = H_{l,i}^l, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{m,i}} = -\gamma_{l,i} H_{l,i}^m, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \gamma_{l,i}}{\partial p_{l,j}} = -\gamma_{l,i} H_{l,i}^j, \quad (14)$$

donde

$$H_{l,i}^l = \frac{\frac{W}{r_{l,i}} |h_{l,i}|^2}{I_{l,i} + \sum_{h=1, h \neq l}^M p_{h,i} |h_{h,i}|^2 + \sigma_{l,i}^2}, \quad (15)$$

$$H_{l,i}^m = \frac{|h_{m,i}|^2}{I_{l,i} + \sum_{h=1, h \neq m}^M p_{h,i} |h_{h,i}|^2 + \sigma_{l,i}^2}, \quad (16)$$

$$H_{l,i}^j = \frac{\frac{\partial I_{l,i}}{\partial p_{l,j}}}{I_{l,i} + \sum_{h=1, h \neq l}^M p_{h,i} |h_{h,i}|^2 + \sigma_{l,i}^2}. \quad (17)$$

En seguida, se calcula la derivada parcial de la interferencia de canal adyacente con respecto a la potencia de transmisión como:

$$\frac{\partial I_{l,i}}{\partial p_{l,j}} = \begin{cases} \sum_{j=i-1, j \neq i}^{i+1} c_{l,j} |h_{l,j}|^2 & \text{si } j \in [i-1, i+1], \\ c_{l,j} |h_{l,j}|^2 & \text{si } i \in [2, \dots, U-1], \\ & \text{si } i=1 \Rightarrow j=2, \\ & \text{si } i=U-1 \Rightarrow j=U, \\ 0 & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (18)$$

Por sustitución directa de las ecuaciones (12), (13) y (14) en (9), (10) y (11), respectivamente, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{l,i}} &= \frac{w_{l,i}}{(p_{l,i})^2} \left\{ f'(\gamma_{l,i}) \underbrace{p_{l,i} H_{l,i}^l}_{\gamma_{l,i}} - f(\gamma_{l,i}) \right\}, \\ &= \frac{w_{l,i}}{(p_{l,i})^2} \{ f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} - f(\gamma_{l,i}) \}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{m,i}} = -\frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} H_{l,i}^m, \quad (20)$$

$$\frac{\partial u_{l,i}}{\partial p_{l,j}} = \begin{cases} -\frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} H_{l,i}^j & \text{si } j \in [i-1, i+1], \\ -\frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} H_{l,i}^j & \text{si } i \in [2, \dots, U-1], \\ -\frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} H_{l,i}^j & \text{si } i=1 \Rightarrow j=2, \\ & \text{si } i=U-1 \Rightarrow j=U, \\ 0 & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (21)$$

La derivada parcial de la utilidad de red  $\mathcal{U}$  con respecto a la potencia de transmisión de la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU es:

$$\frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{p}_1 \cdots \mathbf{p}_M)}{\partial p_{l,i}} = \sum_{h=1}^M \sum_{j=1}^U \frac{\partial u_{h,j}}{\partial p_{l,i}}. \quad (22)$$

Por una sustitución directa de las ecuaciones (19), (20) y (21) en (22), la derivada parcial se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{U}(\mathbf{p}_1 \cdots \mathbf{p}_M)}{\partial p_{l,i}} &= - \sum_{m=1, m \neq l}^M \frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f(\gamma_{m,i}) H_{m,i}^l \gamma_{m,i} - \\ & \sum_{m=1, m \neq l}^M \frac{w_{l,j}}{p_{l,j}} f(\gamma_{l,j}) H_{l,j}^i \gamma_{l,i} + \\ & \frac{w_{l,i}}{(p_{l,i})^2} \{ f'(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} - f(\gamma_{l,i}) \} \end{aligned} \quad (23)$$

Como resultado, si la derivada de la utilidad de la red en la ecuación (22) se iguala a cero se obtiene:

$$f(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} - f(\gamma_{l,i}) = \hat{M}_{l,i}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{p}) \quad \forall i \in [1, U], l \in [1, M], \quad (24)$$

donde

$$\hat{M}_{l,i}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{p}) \triangleq \frac{(p_{l,i})^2}{w_{l,i}} \sum_{m=1, m \neq l}^M \frac{w_{l,i}}{p_{l,i}} f(\gamma_{m,i}) H_{m,i}^l \gamma_{m,i} \quad (25)$$

$$+ \sum_{j \in J_i} \frac{w_{l,j}}{p_{l,j}} f(\gamma_{l,j}) H_{l,j}^i \gamma_{l,j}$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_{1,1} \ \dots \ \gamma_{M,U}]^T \quad (26)$$

$$\mathbf{p} = [p_{1,1} \ \dots \ p_{M,U}]^T \quad (27)$$

y

$$J_i = \begin{cases} [i-1, i+1] & \text{si } i \in [2, \dots, U-1] \\ 2 & \text{si } i = 1 \\ U-1 & \text{si } i = U \end{cases}. \quad (28)$$

Con respecto a (24), es importante observar que  $\hat{M}_{l,i} \geq 0$ , donde este término aglomera la interferencia con otras RSUs de la red, y entre OBUs con canales adyacentes. Debido a esta interferencia, la ecuación en (24) no se encuentra desacoplada por cada OBU en la red. Además, de acuerdo a Campos-Delgado et al. (2014), el valor más alto de  $\gamma_{l,i}$  que cumple (24) se obtiene cuando  $\hat{M}_{l,i} = 0$ , y para otros valores positivos,  $\gamma_{l,i}$  será menor debido a la interferencia. Otro punto a resaltar, es que cada OBU obtiene un SINR objetivo  $\gamma_{l,i}$  óptimo diferente caracterizado por la solución de:

$$f(\gamma_{l,i}) \gamma_{l,i} - f(\gamma_{l,i}) = \hat{M}_{l,i}(\boldsymbol{\gamma}, \mathbf{p}). \quad (29)$$

Dado que existe una relación inyectiva entre el SNIR por OBU y su potencia de transmisión en un sistema de comunicación con interferencia (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013), se propone realizar el proceso de optimización en (8) por medio de un esquema iterativo con dos lazos de ajuste, a diferentes escalas de tiempo. Primero se propone realizar el cómputo del SNIR óptimo en la iteración  $t$  según la ecuación:

$$f(\gamma_{l,i}^t) \gamma_{l,i}^t - f(\gamma_{l,i}^t) = \hat{M}_{l,i}(\boldsymbol{\gamma}^{t-1}, \mathbf{p}^{t-1}), \quad (30)$$

donde se emplean los valores de SNIR  $\boldsymbol{\gamma}^{t-1}$  y potencia de transmisión  $\mathbf{p}^{t-1}$  en la iteración anterior  $t-1$ , y por medio de la solución a (27) se encuentra el valor SNIR objetivo  $(\gamma_{l,i}^t)^{obj}$  considerando las cotas inferior y superior:

$$(\gamma_{l,i}^t)^{obj} = \max(\gamma_{min}, \min[\gamma_{l,i}^t, \gamma_{max}]). \quad (31)$$

Finalmente, se plantea un lazo de control interno para asignar la potencia de las OBUs a través de un control de potencia lineal cuadrático Gaussiano (LQG, por sus siglas en inglés), responsable de alcanzar el SINR objetivo  $(\gamma_{l,i}^t)^{obj}$  en cada OBU ajustando los niveles de potencia de transmisión  $(p_{l,j}[k])$  para garantizar la calidad de servicio deseada de la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU.

Por otra parte, para resolver (30), en el lazo de ajuste del valor objetivo de SINR, la potencia de transmisión  $(\mathbf{p}^{t-1})$  de la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU se cuantifica como un promedio de la potencia en el instante de tiempo  $t-1$  como:

$$\mathbf{p}^{t-1} = \frac{1}{Q} \left[ \sum_{k=1}^Q p_{1,1}[k] \ \dots \ \sum_{k=1}^Q p_{M,U}[k] \right]^T, \quad (32)$$

donde se asume que hay  $Q$  muestras de tiempo discretas dentro de cada iteración del lazo de ajuste externo del valor objetivo de SINR.

#### 4. ASIGNACIÓN DE POTENCIA

En este trabajo, la asignación de potencia es una estrategia para reducir la interferencia en la red de comunicación vehicular (transmisión en el enlace de subida). También, el objetivo de este control de potencia es alcanzar la QoS requerida o de manera equivalente, un valor SINR objetivo óptimo de la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU. En esta formulación, el SINR objetivo óptimo se utiliza para maximizar la utilidad  $\mathcal{U}$  en el lazo de control externo. Luego, la  $l$ -ésima RSU transmite el siguiente error de porcentaje a la  $i$ -ésima OBU como:

$$e_{l,i}[k] = \left[ \frac{(\gamma_{l,i}^t)^{obj}}{\gamma_{l,i}[k]} - 1 \right] p_{l,i}[k], \quad (33)$$

donde con base a la información recibida se lleva a cabo el proceso de actualización del nivel de potencia de transmisión en el lazo de control interno a través del esquema de control LQG.

El control LQG es un algoritmo de baja complejidad y robusto a la incertidumbre en los retrasos de tiempo asociados con la cuantificación de la QoS, por consiguiente se considera una estrategia eficaz en la asignación de potencia en lazo cerrado. Existe un parámetro denotado como  $\Omega \in (0, 1)$  que balancea el esfuerzo de la acción de control contra la rapidez de convergencia del error, donde la rapidez de convergencia se mejora cuando  $\Omega \rightarrow 1$  pero se pierde robustez (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). Como se mencionó anteriormente, una vez que se cuantifica el error por la RSU, esta información es enviada a la OBU para actualizar la potencia de transmisión con base a la siguiente fórmula:

$$p_{i,j}[k+1] = (1-\Omega)p_{i,j}[k] + \Omega p_{i,j}[k - n_{RT}] - \Omega a_{i,j}[k], \quad (34)$$

donde  $a_{i,j}[k]$  denota el error de seguimiento recibido en la OBU. Debido a que la señal de error se ve afectada por los retrasos de lazo cerrado  $n_{RT}$  ligados con la latencia en la actualización de la potencia, su expresión estaría dada por:

$$a_{i,j}[k] = e_i[k - n_{RT}], \quad (35)$$

y el error de seguimiento de la referencia  $e_{i,j}[k]$  se cuantifica de forma porcentual definido en (33). Además, es importante señalar que una de las principales ventajas del control LQG es que incluye el efecto del retraso de lazo cerrado  $n_{RT}$  en su estructura.

#### 5. EVALUACIÓN Y RESULTADOS

La evaluación del esquema propuesto para maximizar la utilidad de una red de comunicación vehicular (en el enlace de subida) se realiza a través de una simulación en Matlab, donde se consideran tres RSUs omnidireccionales de 1 km de radio en la red, i.e.  $M = 3$ . Los parámetros utilizados en la simulación se describen en la Tabla 1. La simulación se inicializa considerando una distribución de las OBUs como se muestra en la Fig. 1, con valores iguales de la potencia de transmisión inicial a 1 pW, y el SINR objetivo se fija en 5 dB durante las primeras 50 iteraciones, lo que da como resultado una velocidad inicial de transmisión de datos de 3 Mbps (D. Jiang and L. Delgrossi, 2008). Además, en la simulación se implementaron retrasos aleatorios entre 0 y 10 muestras, donde se asume que la actualización del retraso se realiza en cada 20 muestras, es decir, cada segundo, esto debido a que en las comunicaciones



vehiculares la retroalimentación de información se enfrenta a una latencia máxima de 500 ms (Karagiannis et al., 2011), la cual corresponde a 10 muestras en este trabajo. Con esta consideración, en el algoritmo LQG en (34), se toma un valor estimado  $n_{RT_o} = 5$  muestras.

Enseguida se evalúa el desempeño por 500 iteraciones del esquema propuesto, donde cada OBU sigue un perfil uniforme en los desplazamientos como se muestra en la Fig. 1 contemplando una velocidad de 72 km/h. De esta manera, la ganancia del canal de la  $i$ -ésima OBU en la  $l$ -ésima RSU se plantea con el siguiente perfil:

$$|h_{l,i}[k]|^2 = g_{l,i}[k]\lambda_{l,i}[k] \left( \frac{0.1}{d_{l,i}[k]} \right)^\alpha, \quad \forall i \in [1, U], l \in [1, M], \quad (36)$$

donde  $g_{l,i}[k]$  se modela mediante el principio de suma de cisoides (SOS, por sus siglas en inglés), el cual puede ser descrito matemáticamente como (Gutiérrez and Pätzold, 2010):

$$g_{l,i}[k] = \sum_{n=1}^{N_c} c_n \exp\{\iota(2\pi f_n k + \theta_n)\}, \quad \iota = \sqrt{-1} \quad (37)$$

donde  $N_c$  es la  $n$ -ésima onda plana con una ganancia aleatoria  $c_n$ , una frecuencia Doppler aleatoria  $f_n$  y una fase aleatoria  $\theta_n$ . De acuerdo con el modelo en Gutiérrez and Pätzold (2010) las fases  $\theta_n$  se definen como variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (i.i.d) y cada una tiene una distribución uniforme sobre el intervalo  $[-\pi, \pi)$ . Las frecuencias Doppler  $f_n$  son variables aleatorias obtenidas de la siguiente expresión:

$$f_n \triangleq f_{max} \cos(\alpha_n), \quad \forall n \in [1, N_c], \quad (38)$$

donde  $f_{max}$  es el desplazamiento Doppler máximo debido al movimiento de la OBU (componentes multitrayecto del canal) y es igual a  $f_{max} = \frac{v}{\lambda}$  ( $v$  es la velocidad de la OBU y  $\lambda$  es la longitud de onda) y  $\alpha_n$  son variables aleatorias i.i.d que describen el ángulo de arribo (AOA, por sus siglas en inglés) de la  $n$ -ésima onda incidente donde  $\alpha_n$  esta uniformemente distribuida en  $[0, \pi)$ . Por otra parte,  $\lambda_{l,i}[k]$  estaría dada por (Pätzold, 2011):

$$\lambda_{l,i}[k] = 10^{(\sigma_L \sum_{n=1}^{N_c} c_n \cos(2\pi f_n k + \theta_n) + m_L)/20}, \quad (39)$$

donde  $\sigma_L$  y  $m_L$  representan la desviación estándar y la media del desvanecimiento por sombra, respectivamente. Por último,  $d_{l,i}[k]$  define la distancia de la  $i$ -ésima OBU a la  $l$ -ésima RSU y el exponente de pérdida  $\alpha$  se selecciona como 3 (Ren et al., 2015).

En la Fig. 2 se muestra una evaluación Monte Carlo con 100 realizaciones del planteamiento de validación. Con fines de comparación, se ilustra el desempeño de la utilidad de la red al considerar valores objetivo de SINR fijos para cada OBU durante toda la simulación, y con valores de 5, 7, 9 y 11 dB. Como se esperaba la utilidad máxima de la red se logra con el SINR óptimo de la ecuación (31) a pesar del perfil de desplazamiento variable de cada OBU. Es importante destacar que debido a la limitación del espacio disponible en este artículo, solo se presentan resultados para la velocidad de 72 km/h. Sin embargo, se realizaron pruebas para diferentes velocidades y los resultados fueron consistentes.

Finalmente, en la Fig. 3 se muestra las respuestas en tiempo para la estructura de asignación de potencia con 3

Tabla 1. Parámetros de simulación de la red vehicular.

Parámetro	Valor
SINR objetivo fijo inicial ( $\gamma^{obj}$ )	5 dB
Número total de bits en cada símbolo OFDM ( $N$ )	64
Número de bits de información por símbolo OFDM ( $L$ )	48
Ancho de banda por canal ( $W$ )	10 MHz
Potencia del ruido ( $\sigma^2$ )	-90 dBm
Periodo de actualización de potencia ( $T_p$ )	50 ms
Periodo de actualización del SINR objetivo ( $T_s$ )	2.5 s
Velocidad de transmisión de datos	3 Mbps
Frecuencia de actualización de potencia	20 Hz
Frecuencia de actualización del SINR objetivo	2/5 Hz
Duración de la simulación	25 s
Máxima potencia de transmisión ( $p_{max}$ )	30.2 W
Mínima potencia de transmisión ( $p_{min}$ )	1 pW
Ganancia del control LQG ( $\Omega$ )	0.10
Mínima distancia de seguridad	10 m
Distancia de la carretera a la RSU	150 m
Exponente de pérdida $\alpha$	3
Celda omnidireccional (R)	1 km
Retraso máximo ( $n_{RTmax}$ )	10
Retraso mínimo ( $n_{RTmin}$ )	0
Retraso estimado en el controlador LQG ( $n_{RT_o}$ )	5 muestras
Latencia máxima	500 ms
Número de vehículos ( $U$ )	21
Número de RSUs ( $M$ )	3
Alfa ( $\alpha$ )	0.4
Beta ( $\beta$ )	0.001
Gama ( $\gamma$ )	$2 \times 10^{-5}$
Desviación estándar del desvanecimiento ( $\sigma_L$ ) por sombra ( $\sigma_L$ )	6 dB
Media del desvanecimiento por sombra ( $m_L$ )	0

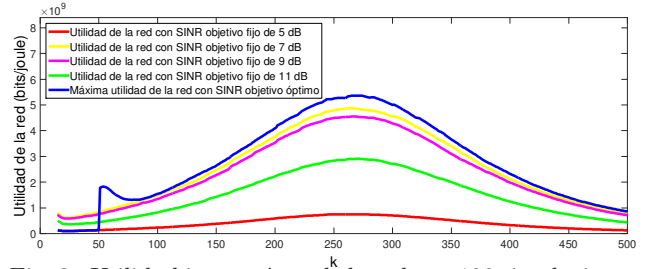


Fig. 2. Utilidad instantánea de la red con 100 simulaciones Monte-Carlo para una velocidad de 72 km/h.

RSUs (i.e., con 21 OBU's activos) en la red de comunicación vehicular. En esta figura, la gráfica superior presenta el nivel de potencia de transmisión requerido por cada OBU a lo largo de las 500 iteraciones de la simulación a través del esquema LQG, así como también el nivel de potencia promedio de todas las OBU's; mientras tanto, la gráfica inferior muestran el SINR logrado por cada OBU, y también la respuesta promedio, donde cada 50 iteraciones el SINR óptimo se actualiza mediante la expresión en (31). Por lo tanto, el proceso de ajuste del SINR objetivo se lleva a cabo a una frecuencia de 2/5 Hz (i.e. en cada 50 muestras), mientras que la frecuencia de actualización de potencia es 20 Hz (i.e. en cada muestra). Además, esta gráfica presenta el SINR objetivo óptimo a partir de la iteración 51, donde cada OBU sigue un SINR objetivo diferente, los cuales maximizan la utilidad de la red y al mismo tiempo garantizan la QoS en los enlaces de comunicación. Por otro lado, durante las primeras 50 iteraciones de simulación, todas las OBU's logran alcanzar en promedio el valor SINR  $\gamma_{l,i}^{obj} = 5$  dB en menos de 20 iteraciones a pesar del perfil uniforme de movimiento de los vehículos (ver Fig. 1), lo cual produce ganancias de canal y retrasos variantes en el tiempo. Es importante mencionar que los desvanecimientos rápidos del canal producen pequeñas oscilaciones alrededor del

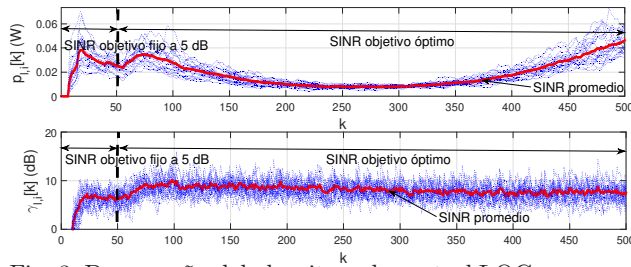


Fig. 3. Desempeño del algoritmo de control LQG para una velocidad de 72 km/h: (inferior) SINR, y (superior) nivel de potencia de transmisión requerida.

SINR objetivo. Este efecto se puede visualizar en la parte inferior de la Fig. 3 donde estas variaciones producen perturbaciones en el seguimiento de la referencia, pero el esquema LQG siempre es capaz de compensarlas.

## 6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se propuso un esquema para maximizar la utilidad en una red de comunicación vehicular basado en el estándar IEEE 802.11p. En la maximización de la utilidad, la solución propuesta implica un procedimiento de dos etapas: (i) el lazo de control interno permite actualizar la potencia de transmisión de forma dinámica para compensar las variaciones del canal; y (ii) el lazo de control externo fija el SINR objetivo óptimo para cada OBU, según el grado de interferencia en la red. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la capacidad de seguimiento del SINR objetivo por medio del control LQG permite la maximización de la utilidad a pesar de tener un proceso variante en el tiempo. Por otro lado, una de las principales ventajas de este controlador es que proporciona robustez contra la latencia en el sistema de comunicación vehicular. Además, los resultados muestran que el esquema propuesto no solo garantiza la máxima utilidad de la red, sino que también mejora su eficiencia energética, lo cual permite reducir la interferencia entre canales adyacentes y la interferencia de RSU a RSU. Finalmente, los resultados obtenidos muestran que el esquema propuesto obtiene valores de SINRs objetivos óptimos que logran la máxima utilidad de red en comparación con SINRs objetivos fijos (i.e. 5 dB, 7 dB, 9 dB y 11 dB). Como trabajo futuro, se complementará el proceso de validación mostrado en este artículo, bajo diferentes velocidades de propagación de los vehículos, patrones de propagación de las OBUs, y además se evaluará en un banco de pruebas experimental.

## REFERENCES

Bauza, R., Gozalvez, J., and Sepulcre, M. (2013). Power-aware link quality estimation for vehicular communication networks. *IEEE Communications Letters*, 17(4), 649–652.

Campos-Delgado, D.U. and Luna-Rivera, J.M. (2013). Performance study of distributed power control algorithms under time-delays and measurement uncertainty. *IEEE Latin America Transactions*, 7(4), 690–697.

Campos-Delgado, D.U., Luna-Rivera, J.M., and Gutiérrez Díaz de Leon, C.A. (2014). Pre-equalization in the downlink of a multicarrier wireless network under utility and sum-rate optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 62(10), 3541–3551.

D. Jiang, Q.C. and L. Delgrossi, B. (2008). Optimal data rate selection for vehicle safety communications. In *Proc. 5th ACM Int. Workshop on Veh. Inter-Networking (VANET 2008)*, 30–38. San Francisco.

Díaz-Ibarra, M.A., Campos-Delgado, D.U., Gutiérrez, C.A., and Luna-Rivera, J.M. (2018). Control de potencia distribuido en comunicaciones vehiculares. In *Congreso Nacional de Control Automático (CNCA)*, 460–465. San Luis Potosí, MX.

Gutiérrez, C.A. and Pätzold, M. (2010). The design of sum-of-cisoids Rayleigh fading channel simulators assuming non-isotropic scattering conditions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(4), 1308–1314.

Hisham, A., Sun, W., Ström, E.G., and Brännström, F. (2016). Power control for broadcast V2V communications with adjacent carrier interference effects. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6.

Jose, J., Li, C., Wu, X., Ying, L., and Zhu, K. (2015). Distributed rate and power control in DSRC. *2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2822–2826.

Karagiannis, G., Altintas, O., Ekici, E., Heijnen, G., Jarupan, B., Lin, K., and Weil, T. (2011). Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 13(4), 584–616.

Kenney, J. (2011). Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the united states. *Proceedings of the IEEE*, 9(7), 1162–1182.

Molina-Masegosa, R. and Gozalvez, J. (2017). LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(4), 30–39.

Pätzold, M. (2011). *Mobile radio channels*. John Wiley & Sons, second edition edition.

Ren, Y., Liu, F., Liu, Z., Wang, C., and Ji, Y. (2015). Power control in D2D-based vehicular communication networks. *Communications and Network*, 64(12), 5547–5562.

Saraydar, C.U., Mandayam, N.B., and Goodman, D.J. (2002). Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Transactions on Communications*, 50(2), 291–303.

Tenne, D. and Singh, T. (2002). Characterizing performance of alpha;- beta;- gamma; filters. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 38(3), 1072–1087.

Torrent-Moreno, M., Mittag, J., Santi, P., and Hartenstein, H. (2009). Vehicle-to-vehicle communication: Fair transmit power control for safety-critical information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7), 3684–3703.

Torrent-Moreno, M., Santi, P., and Hartenstein, H. (2006). Distributed fair transmit power adjustment for vehicular ad hoc networks. *3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2, 479–488.