

# Control de Potencia Distribuido en Comunicaciones Vehiculares

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](mailto:madiazibarra@gmail.com),  
[ducd@ciencias.uaslp.mx](mailto:ducd@ciencias.uaslp.mx), [cagutierrez@ieee.org](mailto:cagutierrez@ieee.org), [mlr@uaslp.mx](mailto:mlr@uaslp.mx))

**Resumen:** El control de potencia en una red de comunicación vehicular es una estrategia eficiente para mejorar la calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés) en los enlaces de comunicación. Este trabajo de investigación tiene como propósito primero, establecer un marco de referencia para el estudio y diseño de los algoritmos de control de potencia en comunicaciones vehiculares, y segundo, evaluar tres estrategias distribuidas previamente sugeridas para redes celulares. El escenario de evaluación considera tres aspectos prácticos: i) variaciones lentas y desvanecimientos rápidos del canal ii) retardos variantes en el tiempo, e iii) interferencia de canal adyacente (ACI, por sus siglas en inglés). En primer lugar, se propone el modelo del sistema, el cual considera un sistema de comunicación entre vehículos-e-infraestructura instalada a lo largo del camino. En segundo lugar, se retoman tres algoritmos de control de potencia distribuidos: Foschini-Miljanic, control de estructura variable y control lineal cuadrático Gaussiano (LQG, por sus siglas en inglés). Finalmente, los resultados de la simulación en MATLAB indican que el algoritmo LQG superó a las otras estrategias en términos del seguimiento preciso del valor de la razón señal a interferencia-ruido (SINR, por sus siglas en inglés) objetivo y la eficiencia energética.

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

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones vehiculares es una tecnología emergente para la seguridad vial y el control del tráfico (Karagiannis et al., 2011). Además, esta tecnología proporcionará conectividad a Internet a los pasajeros en movimiento. Este tipo de aplicaciones serán posibles gracias al intercambio de información entre vehículos (V2V, por sus siglas en inglés) y entre vehículos-e-infraestructura (V2I, por sus siglas en inglés) creando sistemas de transporte inteligentes (ITS, por sus siglas en inglés) (Karagiannis et al., 2011). Con estos ITS, cada vehículo será capaz de intercambiar información de su estado con otros vehículos y la infraestructura instalada a lo largo del camino en tiempo real. Existen dos tipos de mensajes en las redes vehiculares: periódicos y por eventos (Torrent-Moreno et al., 2006). Los mensajes periódicos son preventivos y tienen como propósito la seguridad de los vehículos vecinos. Estos mensajes también se les conoce como *beacons*, y envían información como velocidad, dirección y posición. Mientras tanto, los mensajes por eventos (*event-driven*) se generan al detectar un peligro en el camino, como el frenado repentino de un vehículo, un vehículo en emergencia circulando a alta velocidad, entre otros. De este modo, se podrán detectar situaciones fatales con tiempo suficiente para advertir al conductor y de esta manera evitar la situación de peligro.

En los últimos años, grupos de trabajo de distintas partes del mundo se han enfocado a desarrollar tecnología para

comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC, por sus siglas en inglés) (Kenney, 2011). La palabra dedicado en DSRC se refiere al hecho de que la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) asignó una licencia de operación de 75 MHz de espectro en la banda de 5.9 GHz con este fin. Esta porción del espectro se divide en siete canales de 10 MHz. Mientras seis de los canales son canales de servicio empleados para aplicaciones de *infotainment* (información y entretenimiento) y eficiencia del tráfico, el canal central se denomina canal de control y se utiliza para aplicaciones de seguridad vial como se muestra en la Fig. 1. En esta figura se muestra la restricción que impone el estándar IEEE 802.11p en los niveles de potencia de transmisión en el enlace de subida y bajada. El término corto alcance se refiere a que la comunicación tiene un alcance de varios cientos de metros, es decir, hasta 1 km de cobertura. Además, la tecnología para DSRC hace uso de las especificaciones del estándar IEEE 802.11p. El estándar 802.11p (Kenney, 2011) constituye una adaptación de la norma 802.11 (Wi-Fi) al entorno vehicular. Específicamente, abarca la capa física (PHY) y la subcapa para el control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés) de la pila de protocolos. La familia de estándares para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares (WAVE, por sus siglas en inglés) 1609.x complementan la norma 802.11p, definiendo aspectos adicionales como mecanismos de seguridad, servicios de red y operaciones de multicanalización.

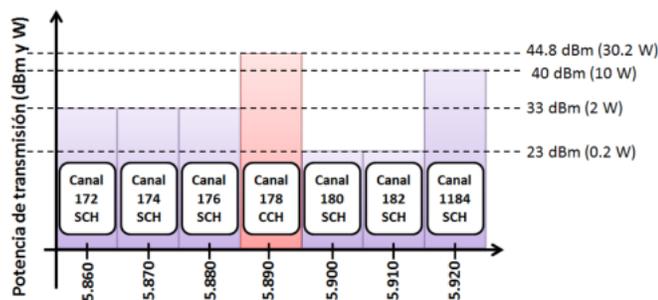


Fig. 1. Asignación de espectro en la banda de 5.9 GHz.

Actualmente, los sistemas de comunicaciones vehiculares basados en el estándar IEEE 802.11p están enfocados en proveer aplicaciones de seguridad, información del tráfico y entretenimiento. Además, requieren de una red inalámbrica que sea confiable y eficiente. Sin embargo, la confiabilidad de los sistemas de comunicación vehiculares es afectada por múltiples factores, entre los que se incluyen pérdidas de propagación, pérdidas generadas por obstáculos, desvanecimientos e interferencias. Aunque estos factores son inevitables, es posible reducir el número de fallos en la red debido a estos fenómenos a través de algoritmos de control de potencia para comunicaciones vehiculares, que tomen en cuenta las clases de mensajes a transmitir, así como el tipo de enlace: V2V o V2I.

En este sentido, en estudios anteriores (Bauza et al., 2013; Fallah et al., 2016; Hisham et al., 2016; Jose et al., 2015; Memedi et al., 2015; Ren et al., 2015; Torrent-Moreno et al., 2009; Zhang et al., 2016), se ha demostrado que el empleo de mecanismos de control potencia para comunicaciones vehiculares mejoran el rendimiento del sistema, en términos del caudal eficaz a través de LTE y enlaces dispositivo-a-dispositivo o D2D (Ren et al., 2015). Esta idea es muy atractiva dado el desarrollo de LTE en los últimos años y su adopción como la plataforma base de las comunicaciones inalámbricas de alta capacidad. De hecho, diversos trabajos proponen el control de potencia para mitigar las interferencias o mantener la conectividad de la red. Por ejemplo, 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 vehicular en el enlace V2V, ya que se ha demostrado en la literatura que la ACI afecta significativamente la confiabilidad de la comunicación.

En este contexto, las aportaciones que se han hecho al estado del arte han sido incipientes, y se considera que existen aún temas que no se han atacado, como la presencia de latencia en un sistema de comunicación vehicular, las mediciones óptimas para evaluar la calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés), y las diferencias entre las dinámicas de los enlaces V2V y V2I. Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como propósito establecer un marco teórico de análisis y diseño para técnicas de control de potencia en comunicaciones vehiculares, y evaluar el desempeño de tres técnicas previamente propuestas en redes celulares: control Foschini-Miljanic (FM), control de estructura variable (VSC, por sus siglas en inglés) y el control lineal cuadrático Gaussiano (LQG, por sus

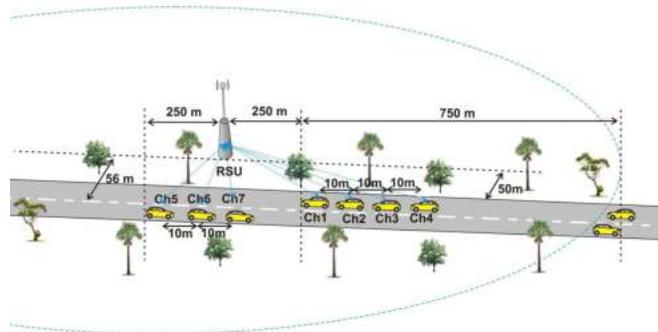


Fig. 2. Estructura del sistema de comunicación vehicular.

siglas en inglés). En particular, se evaluará la variabilidad en el seguimiento de la referencia de la razón señal a interferencia-ruido (SINR, por sus siglas en inglés) ante retardos en el lazo cerrado y el nivel de potencia de transmisión acumulada; buscando evidenciar sus ventajas y desventajas en un posible escenario real.

## 2. MODELO DEL SISTEMA

En este trabajo se considera un sistema de comunicación vehicular como se muestra en la Fig. 2, el cual está compuesto 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 DSRC y el segundo es una unidad fija a lo largo del camino (RSU, por sus siglas en inglés), es decir, la estación base. Es importante destacar que este escenario ha sido estudiado por varios autores en los últimos años (Liang et al., 2017). Este modelo considera un sistema de comunicación en el enlace de subida (i.e. OBUs a RSU) con un total de  $U$  OBUs distribuidos en una carretera de dos carriles como se ilustra en la Fig. 2, y también asume que cada vehículo utiliza un canal disponible de 10 MHz de la banda de 5.9 GHz para la comunicación V2I. Además, en esta figura se asume que el factor principal que limita el desempeño del sistema de comunicación V2I son las señales de interferencia. En este sentido, se propone cuantificar el nivel de interferencia en el sistema de comunicación V2I a través de la SINR (Hisham et al., 2016). Los principales tipos de interferencia que afectan a los sistemas de comunicaciones vehiculares son:

- *Interferencia entre canales adyacentes*: es el resultado de utilizar canales de frecuencias adyacentes en la misma RSU, como se mostró en la Fig. 1 y principalmente son provocados por filtros de separación imperfectos.
- *Interferencia de RSU a RSU*: es causada por RSUs con los mismos canales de frecuencias debido al proceso de reuso de estos.

El estándar IEEE 802.11p limita la energía fuera de la banda de transmisión al asociar una máscara espectral a cada clase de dispositivo como se muestra en la Tabla 1, caracterizada por una potencia máxima de transmisión que se ha utilizado para evitar la interferencia entre los canales adyacentes. En la Fig. 3, se muestran las máscaras espectrales correspondientes a los siete canales de 10 MHz del estándar IEEE 802.11p (Kenney, 2011).

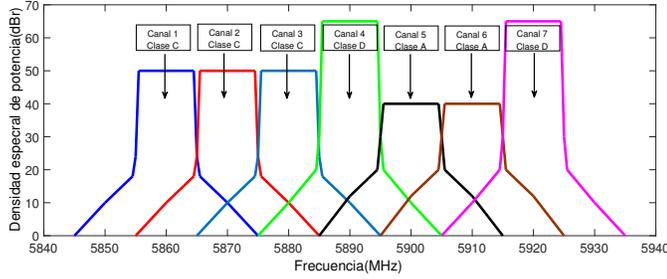


Fig. 3. Mascaras espectrales de los siete canales de 10 MHz del estándar IEEE 802.11p (Kenney, 2011)

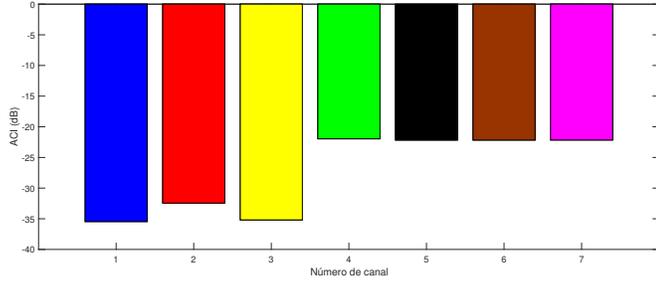


Fig. 4. ACI de los siete canales de 10 MHz.

Sin embargo, como se puede apreciar en la figura los valores de la densidad espectral de potencia no son insignificantes. Por ejemplo, para un dispositivo de la clase A, la pérdida es igual a 28 dB. Lo anterior crea un problema de interferencia entre canales, también conocido como interferencia de canal adyacente (ACI, por sus siglas en inglés), como se mencionó anteriormente (Hisham et al., 2016). Además, en la Fig. 4 se muestran los coeficientes calculados de la ACI de los siete canales de 10 MHz. Estos coeficientes numéricos se incluyen en el modelado del sistema, donde cada coeficiente se cuantifica como el área de la ACI entre el área de la máscara espectral del canal  $i$ -ésimo.

Por otro lado, se considera que cada RSU emplea el mismo conjunto de canales en áreas geográficas diferentes. En este estudio, la QoS del enlace de comunicación se evaluará a través de la SINR como se propone en Hisham et al. (2016). En nuestra formulación, se asume que existen  $M$  RSU's en la red de comunicación vehicular.

El SINR para el  $i$ -ésimo OBU en la  $j$ -ésimo RSU se calcula como:

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

$$\mathbf{I}_j[k] = \begin{bmatrix} 2.847 \times 10^{-4} |h_{j,2}[k]|^2 p_{j,2}[k] \\ 2.847 \times 10^{-4} |h_{j,1}[k]|^2 p_{j,1}[k] + 2.847 \times 10^{-4} |h_{j,3}[k]|^2 p_{j,3}[k] \\ 2.847 \times 10^{-4} |h_{j,2}[k]|^2 p_{j,2}[k] + 1.830 \times 10^{-5} |h_{j,4}[k]|^2 p_{j,4}[k] \\ 2.847 \times 10^{-4} |h_{j,3}[k]|^2 p_{j,3}[k] + 6.081 \times 10^{-3} |h_{j,5}[k]|^2 p_{j,5}[k] \\ 1.821 \times 10^{-5} |h_{j,4}[k]|^2 p_{j,4}[k] + 6.050 \times 10^{-3} |h_{j,6}[k]|^2 p_{j,6}[k] \\ 6.050 \times 10^{-3} |h_{j,5}[k]|^2 p_{j,5}[k] + 1.821 \times 10^{-5} |h_{j,7}[k]|^2 p_{j,7}[k] \\ 6.081 \times 10^{-3} |h_{j,6}[k]|^2 p_{j,6}[k] \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $p_{j,i}[k]$  y  $|h_{j,i}[k]|^2$  representan la potencia de transmisión y la ganancia del canal para el  $i$ -ésimo OBU en la  $j$ -ésima RSU, respectivamente, los coeficientes numéricos del vector  $\mathbf{I}_j[k]$  representan la ACI del  $j$ -ésimo RSU e  $I_{j,i}[k]$  su  $i$ -ésimo elemento,  $\sigma_i^2$  es la varianza del ruido

en el  $i$ -ésimo OBU, y  $\sum_{m=1, m \neq j}^M p_{m,i}[k]|h_{m,i}[k]|^2$  es la interferencia de RSU a RSU como se mencionó en sección anterior. En esta formulación, se podrá garantizar la QoS del enlace de comunicación entre el  $i$ -ésimo OBU a la  $j$ -ésimo RSU si la  $\gamma_{j,i} \geq \gamma^{obj}$ , donde  $\gamma^{obj}$  es el umbral SINR objetivo.

### 3. TÉCNICAS DE CONTROL DE POTENCIA

En esta sección, se describen las tres estrategias de asignación de potencia que se evalúan en este trabajo. Estos algoritmos se implementan en una estructura de lazo-cerrado, con el fin de actualizar el nivel de potencia de transmisión en el enlace de subida. El ajuste de potencia de transmisión para el  $i$ -ésimo OBU en la  $j$ -ésima RSU se realiza de la siguiente manera: la RSU estima la QoS por medio de la SINR ( $\gamma_{j,i}[k]$ ) y la compara con el valor objetivo fijo de  $\gamma^{obj}[k]$ , que garantiza la QoS deseada para esa OBU. La RSU retroalimenta el error de seguimiento de la referencia a la OBU, dado que con base a la información recibida se lleva a cabo el proceso de actualización del nivel de potencia de transmisión.

#### 3.1 Control Foschini-Miljanic

El algoritmo de FM es una de las primeras estrategias propuestas distribuidas en la literatura para redes celulares, el cual se caracteriza por una baja complejidad. La potencia de transmisión se actualiza de acuerdo con la siguiente expresión (Foschini and Miljanic, 1993):

$$p_{j,i}[k+1] = p_{j,i}[k] + k_{FM} a_{j,i}[k], \quad (3)$$

donde  $k_{FM} \in (0, 1]$  es una ganancia que balancea el compromiso entre rapidez de respuesta y robustez. 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:

$$a_{j,i}[k] = e_{j,i}[k - n_{RT}], \quad (4)$$

y el error de seguimiento de la referencia  $e_{j,i}[k]$  se cuantifica de forma porcentual con base a la siguiente ecuación:

$$e_{j,i}[k] = \left[ \frac{\gamma^{obj}}{\gamma_{j,i}[k]} - 1 \right] p_{j,i}[k]. \quad (5)$$

Además, es importante mencionar que siempre se puede encontrar una ganancia  $k_{FM}$  que garantiza la estabilidad en lazo cerrado independientemente del valor del retraso, y entre más grande sea éste, más pequeña debe ser el valor de la ganancia  $k_{FM}$  (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013).

#### 3.2 Control de estructura variable

El algoritmo VSC se propuso en (Uykan and Koivo, 2006), donde esta técnica es una combinación del control propuesto por Foschini-Miljanic y un algoritmo de paso fijo. La actualización de potencia de transmisión se realiza con base en la siguiente expresión:

$$p_{j,i}[k] = p_{j,i}[k] + c \cdot a_{j,i}[k] + d \cdot \text{sign}(a_{j,i}[k]) \quad (6)$$

donde  $c$  y  $d$  son los parámetros de ganancia en este control,  $\text{sign}(\cdot)$  representa la función signo, y  $a_{j,i}[k]$  es la señal del error recibida en la OBU definida en (4). También se utiliza el error porcentual definido en (5) con el fin de evitar la utilización de transformaciones logarítmicas.

Tabla 1. Límites de la densidad espectral de potencia para canales de 10 MHz del estándar IEEE 802.11p (Kenney, 2011), donde la norma define cuatro clases de dispositivos: A, B, C y D. Estos corresponden al nivel de potencia máxima permitida por cada canal durante la transmisión.

Clases de potencia	Máxima densidad espectral de potencia permitida en los límites del rango de frecuencias en decibel relativo (dBr)				
	$\pm 4.5$ MHz offset ( $\pm$ frec. 1)	$\pm 5.0$ MHz offset ( $\pm$ frec. 2)	$\pm 5.5$ MHz offset ( $\pm$ frec. 3)	$\pm 10$ MHz offset ( $\pm$ frec. 4)	$\pm 15$ MHz offset ( $\pm$ frec. 5)
A	0	-10	-20	-28	-40
B	0	-16	-20	-28	-40
C	0	-26	-32	-40	-50
D	0	-35	-45	-55	-65

### 3.3 Control lineal cuadrático Gaussiano

El controlador LQG es un algoritmo de baja complejidad y robusto a la incertidumbre en retrasos de tiempo, por lo tanto se considera una técnica eficaz en el control de asignación de potencia en lazo cerrado. Este algoritmo de control se sintetiza a través de un proceso de minimización de un criterio lineal cuadrático, conformado por un término correspondiente al error de seguimiento de la referencia y otro término procedente a la potencia requerida de transmisión. Por lo tanto, existe un parámetro denotado como  $\Omega \in (0, 1)$  que estabiliza 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). 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:

$$p_{j,i}[k+1] = (1 - \Omega)p_{j,i}[k] + \Omega p_{j,i}[k - n_{RT}] - \Omega a_{j,i}[k], \quad (7)$$

donde el error de seguimiento se define en (4). 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.

## 4. EVALUACIÓN

En esta sección, se evalúan las tres estrategias de control de potencia descritas en la sección anterior: FM, VSC y LQG a través de una simulación en MATLAB, donde se considera una sola RSU omnidireccional de 1 km de radio en la red, i.e.  $M = 1$ . Los parámetros utilizados en la simulación se describen en la Tabla 2, donde para el algoritmo VSC se utiliza la asignación de ganancias  $c = k_{FM}$  y  $d = \Delta_p$  para tener una comparación representativa. La simulación se inicializa considerando una distribución de los OBUs como se muestra en la Fig. 2, con valores iguales de la potencia de transmisión inicial a 1 pW, y el SINR objetivo se fija en 5 dB considerando una modulación BPSK, lo que da como resultado una velocidad de transmisión de datos de 3 Mbps (Jiang and Delgrossi, 2008). Además, en la simulación se implementaron retrasos aleatorios entre 1 y 10 muestras, 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 (7), se toma un valor estimado  $n_{RT} = 5$  muestras.

Enseguida se evalúa el desempeño por 500 iteraciones de la estructura de asignación de potencia, donde cada OBU sigue un perfil uniforme en los desplazamientos como se

muestra en la Fig. 2 contemplando una velocidad de 72 km/h. Considerando que  $M = 1$ , enseguida se omite el subíndice  $j$  en la notación. De esta manera, la ganancia del canal del  $i$ -ésimo OBU se modela con el siguiente perfil:

$$|h_i[k]|^2 = g_i[k] Y_i^{-1}[k] \left( \frac{0.1}{d_i[k]} \right)^\alpha \quad \forall i \in [1, U] \quad (8)$$

donde  $g_i[k]$  es una variable aleatoria con distribución Rayleigh,  $d_i[k]$  define la distancia del  $i$ -ésimo OBU a la RSU,  $\log(Y_i)$  es una variable aleatoria con media cero y varianza 0.1, y el exponente de pérdida  $\alpha$  se selecciona como 3 (Ren et al., 2015). En el modelo descrito en (8), el efecto de las variables  $Y_i[k]$  y  $d_i[k]$  denotan las variaciones lentas de la ganancia del canal, las cuales corresponden a las atenuaciones causadas por los objetos y variaciones en el área de cobertura del sistema. Por otra parte, el efecto de la variable  $g_i[k]$  representa las variaciones rápidas de la ganancia del canal, puesto que corresponde a la propagación por múltiples trayectos o propagación multitrayecto. En la Fig. 5 se muestran las ganancias del canal correspondientes a los primeros 4 OBUs activos, donde se pueden apreciar los desvanecimientos rápidos y las variaciones lentas del canal. Cabe destacar que al considerar un perfil uniforme en los desplazamientos de cada OBU con una velocidad de 72 km/h, las estrategias de ajuste de potencia se enfrentan a un escenario con condiciones severas para mantener la QoS.

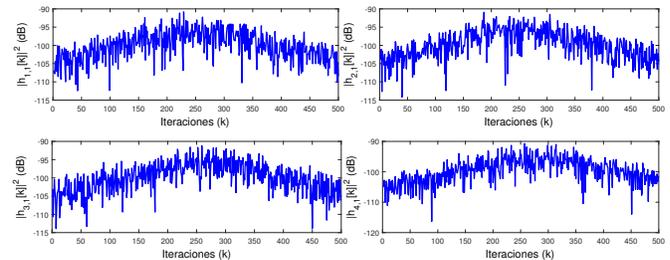


Fig. 5. Perfil del canal para cuatro OBUs del sistema.

En las Figs. 6, 7 y 8 se muestra el desempeño de los 7 OBUs activos para las diferentes estrategias de control, donde se observa que todos los algoritmos de asignación de potencia logran alcanzar el valor SINR objetivo  $\gamma^{obj} = 5$  dB, a pesar del perfil uniforme de movimiento de los OBUs, lo cual conlleva a ganancias de canal y retrasos variantes en el tiempo. Estos resultados demuestran la falta de robustez de los esquemas de FM y VSC, presentando ambos un deterioro en su desempeño de regulación en lazo cerrado en ciertos lapsos de tiempo. Con respecto de la rapidez de respuesta, todas

Tabla 2. Parámetros de simulación de la red vehicular.

Parámetro	Valor
SINR objetivo ( $\gamma^{obj}$ )	5 dB
Potencia del ruido ( $\sigma^2$ )	-90 dBm
Periodo de actualización de potencia ( $T_s$ )	50 ms
Velocidad de transmisión de datos	3 Mbps
Frecuencia de actualización de potencia	20 Hz
Velocidad de los vehículos	72 km/h
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 FM ( $k_{FM}$ )	0.10
Ganancia del control VSC ( $c$ )	0.10
Ganancia del control VSC ( $d$ )	0.0013
Ganancia del control LQG ( $\Omega$ )	0.10
Ganancia del control PF ( $\Delta_p$ )	0.0013
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 muestras
Retraso mínimo ( $n_{RTmin}$ )	0 muestras
Retraso estimado en el controlador LQG ( $n_{RT0}$ )	5 muestras
Latencia máxima	500 ms
Número de vehículos ( $U$ )	7

las estrategias de control logran alcanzar el valor  $\gamma^{obj}$  en alrededor de 8 iteraciones. Mientras tanto, en las Figs. 6, 7 y 8 se visualiza en las gráficas superiores el nivel de potencia de transmisión requerido para cada uno de los algoritmos de control. Cada línea continua y punteada (delgada) en la Figs. 6, 7 y 8 representa el nivel de potencia de transmisión requerida por cada OBU, donde las líneas continuas (delgadas) representan los OBUs que transmiten en los primeros cuatro canales mientras que las líneas punteadas (delgadas) corresponden a los OBUs que transmiten en los canales cinco, seis y siete. Además, las líneas continuas (gruesas) de estas figuras (superior e inferior) representan el promedio de la potencia de transmisión y la SINR respectivamente. A continuación, el error porcentual absoluto medio (MAPE) para  $N$  muestras de datos del  $i$ -ésimo OBU se puede definir como:

$$MAPE_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|\gamma^{obj} - \gamma_i[k]|}{\gamma^{obj}}. \quad (9)$$

Además, el esfuerzo de control correspondiente se calcula a través del nivel de potencia de transmisión acumulada (NPTA) como sigue:

$$NPTA_i = \sum_{k=1}^N p_i[k]. \quad (10)$$

Finalmente se realizaron simulaciones Monte Carlo con respecto al MAPE y NPTA al variar las ganancias de los algoritmos de asignación de potencia, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3, donde el mejor desempeño se resalta con letra oscura en cada caso. En este sentido, con los datos obtenidos se puede concluir que entre menor sea la ganancia  $k_{FM}$ , los algoritmos de control FM y VSC mejoran su desempeño, aunque como era de esperarse entre mayor sea el  $n_{RT}$ , menor deberán ser las ganancias de las estrategias de control como se menciona en (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). Por otro lado, destaca el algoritmo LQG ya que presenta el menor MAPE debido a que en su diseño considera el efecto de retraso de lazo

cerrado. Sin embargo, cuando las ganancias ( $k_{FM}$ ,  $\Omega$ ) son muy pequeñas ( $k_{FM}=0.05$ ,  $\Omega=0.05$ ) las técnicas de control VSC y LQG se deterioran. Por último, en esta misma tabla se muestra el nivel de potencia de transmisión requerida para las tres estrategias de control, donde el mejor desempeño lo obtiene nuevamente la estrategia LQG en términos de eficiencia energética.

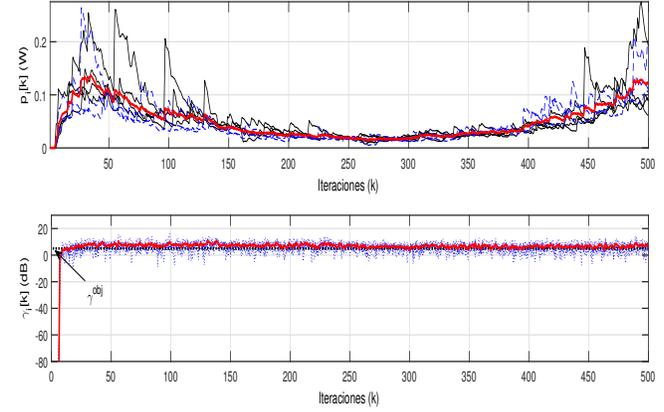


Fig. 6. Desempeño del algoritmo de control LQG en lazo cerrado.

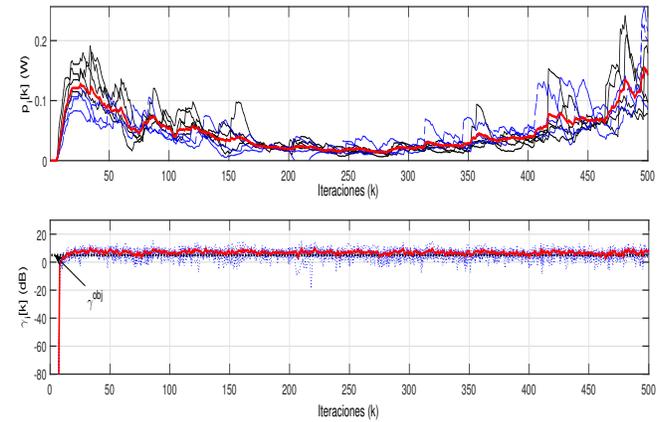


Fig. 7. Desempeño del algoritmo de control FM en lazo cerrado.

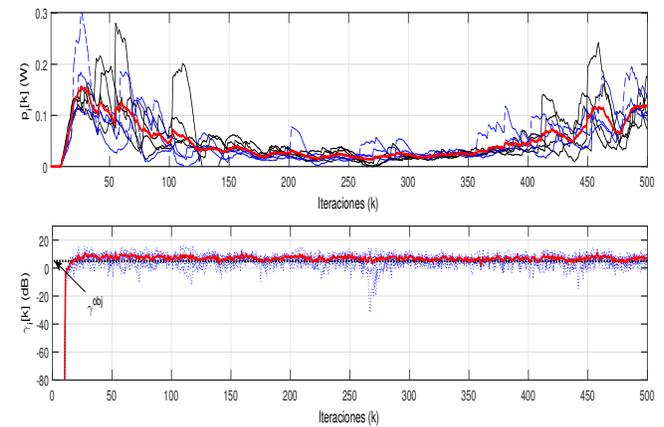


Fig. 8. Desempeño del algoritmo de control VSC en lazo cerrado.

Para llevar a cabo la validación experimental de los algoritmos de control de potencia, se propone a futuro utilizar dispositivos de radio definido por software (USRP),

Tabla 3. MAPE promedio y NPTA Total (dB).

Ganancias de los Algoritmos de Asignación de Potencia	Algoritmo de Control					
	MAPE Promedio			NPTA Total (dB)		
	FM	VSC	LQG	FM	VSC	LQG
$k_{FM}=0.05, \Omega=0.05, \Delta_p=1$ dBm	<b>0.6811</b>	0.6998	0.6952	22.2339	22.2981	<b>22.1550</b>
$k_{FM}=0.10, \Omega=0.10, \Delta_p=1$ dBm	0.6978	0.6974	<b>0.6787</b>	22.4364	22.4458	<b>22.3399</b>
$k_{FM}=0.15, \Omega=0.15, \Delta_p=1$ dBm	0.7904	0.8148	<b>0.6797</b>	22.4995	22.5124	<b>22.3987</b>
$k_{FM}=0.20, \Omega=0.20, \Delta_p=1$ dBm	2.1002	2.5624	<b>0.6918</b>	22.5373	22.5306	<b>22.4394</b>

los cuales están basados en GNU radio. Es importante mencionar, que GNU Radio es un software de código abierto y libre. Además, los USRPs son dispositivos de radiofrecuencia. En un primer escenario, se propone la comunicación V2I con dos OBUs y una RSU, donde cada OBU y la RSU estarán equipados con un dispositivo USRP. Asimismo, las estrategias de control se implementarán en la capa física a través de estos dispositivos.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se definió un marco de estudio para el control de potencia en comunicaciones vehiculares bajo el estándar IEEE 802.11p, y se evaluarón tres esquemas previamente utilizados en redes celulares: Foschini-Miljanic, VSC y LQG. Los resultados obtenidos muestran que el esquema de control LQG no solo garantiza un seguimiento preciso del valor SINR objetivo ante los desvanecimientos rápidos y las variaciones lentas del canal, sino también ante retardos variantes en el tiempo. De igual manera, las técnicas de control FM y VSC presentaron un buen desempeño, a pesar de no considerar en su estructura el efecto del retraso de lazo cerrado. Sin embargo, entre mayor sea la ganancia ( $k_{FM}$ ) los esquemas de control FM y VSC presentan un deterioro en su desempeño de regulación en lazo cerrado. Como trabajo a futuro, se proponen los siguientes puntos: 1) considerar el efecto Doppler en las variaciones rápidas del canal, 2) desarrollar, evaluar y analizar un nuevo algoritmo de control de potencia distribuido para comunicaciones V2I que maximice el caudal, la capacidad del sistema y la eficiencia espectral, y 3) validar el esquema de control de potencia previamente desarrollado en este proyecto a través de 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.

Fallah, Y.P., Nasiriani, N., and Krishnan, H. (2016b). Stable and fair power control in vehicle safety networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3), 1662–1675.

Foschini, G.J. and Miljanic, Z. (1993). A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *IEEE transactions on vehicular Technology*, 42(4), 641–646.

Hisham, A., Sun, W., Strom, E.G., and Brannstrom, F. (2016).

Power control for broadcast V2V communications with adjacent carrier interference effects. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6.

Jiang, D., Chen, Q. and Delgrossi, L. (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.

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., Heijenk, 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.

Liang, L., Kim, J., Jha, S.C., Sivanesan, K., and Li, G.Y. (2017). Spectrum and power allocation for vehicular communications with delayed csi feedback. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(4), 458–461.

Memedi, A., Hagenauer, F., Dressler, F., and Sommer, C. (2015). Cluster-based transmit power control in heterogeneous vehicular networks. *2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 60–63.

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.

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.

Uykan, Z. and Koivo, H.N. (2006). Variable structure power control algorithm in mobile radio systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(10), 2633–2637.

Zhang, F., Tan, G., Yu, C., and et al. (2016). Dynamic feedback power control for cooperative vehicle safety systems. *Springer*, 90(1), 51–74.