

SIMULACIÓN DE CANALES VVLC

En esta sección se modelan y simulan diferentes canales de comunicaciones para aplicaciones vehiculares en el rango visible (VVLC). Por simplicidad, de las diferentes configuraciones de canal posibles, descritas en el informe anterior, inicialmente sólo se ha contemplado la configuración V2V (*vehicle-to-vehicle*) con circulación en caravana o *platooning*. Para esta configuración, se han deducido las ecuaciones que definen la respuesta al impulso, la ganancia en continua y la relación señal-ruido del canal, considerando diferentes métodos de combinación para las señales recibidas. Las ecuaciones obtenidas se han aplicado, posteriormente, a dos tipos de escenarios que modelan la circulación típica de vehículos en entornos urbanos. Estos escenarios incluyen tanto tramos de vía rectos como curvos. La simulación de estos escenarios permite evaluar las prestaciones y viabilidad de los sistemas VVLC.

Modelado de elementos

A continuación, se explican los modelos que sirven para caracterizar la posición y comportamiento de vehículos, emisores, receptores y fuentes de luz ambiental que se utilizarán en las simulaciones.

Vehículos

En lo que respecta a los vehículos, es necesario caracterizarlos geométricamente para poder calcular la posición de las lámparas emisoras y receptores en las simulaciones. Como se muestra en la Fig.1(a), las principales dimensiones de un vehículo son su longitud, L [m], anchura, W [m] y batalla, S [m]. En la actualidad, existe una gran gran variedad de modelos de vehículos en circulación que presentan dimensiones muy diversas. Como muestra de ello, en la Fig.1(b) se recogen algunos ejemplos de dimensiones típicas. Nótese que estas dimensiones son relativamente fáciles de encontrar. En concreto, las mostradas en la tabla, se han extraído de [1].

Atendiendo a su uso y tamaño, los vehículos suelen clasificarse en diferentes categorías que incluyen: coches pequeños o compactos, berlinas, familiares, SUVs (*sub-urban vehicles*), furgonetas, etc. La lectura de los datos de la tabla de la Fig.1(b) indica que las longitudes, L [m], típicas pueden variar bastante, desde los 3.5 m de los vehículos más pequeños, tipo FIAT 500, hasta aproximadamente los 5 m de los SUVs más grandes. En las anchuras, W , por el contrario, el rango de variación es menor y éstas toman valores comprendidos entre los 1.6 m y los 2 m. Otra dimensión de interés es la separación entre los ejes del vehículo, denominada batalla, S [m]. En este caso, los valores oscilan entre los 2.3 m y los 3 m.

A diferencia de las dimensiones anteriores, las relativas a la posición de los faros y pilotos traseros, W_{front} , W_{back} , H_{front} y H_{back} , son más difíciles de encontrar. Además, estas dimensiones dependen enormemente del tipo y modelo de vehículo en cuestión. No obstante, existen algunas limitaciones que impone la reglamentación [2]. Así, los faros delanteros deben guardar entre sí una separación mínima $W_{front} \geq 60$ cm y una distancia máxima con el borde del vehículo de 40 cm. Por tanto, teniendo en cuenta los datos típicos de la tabla de la Fig.1(b), se tendría que

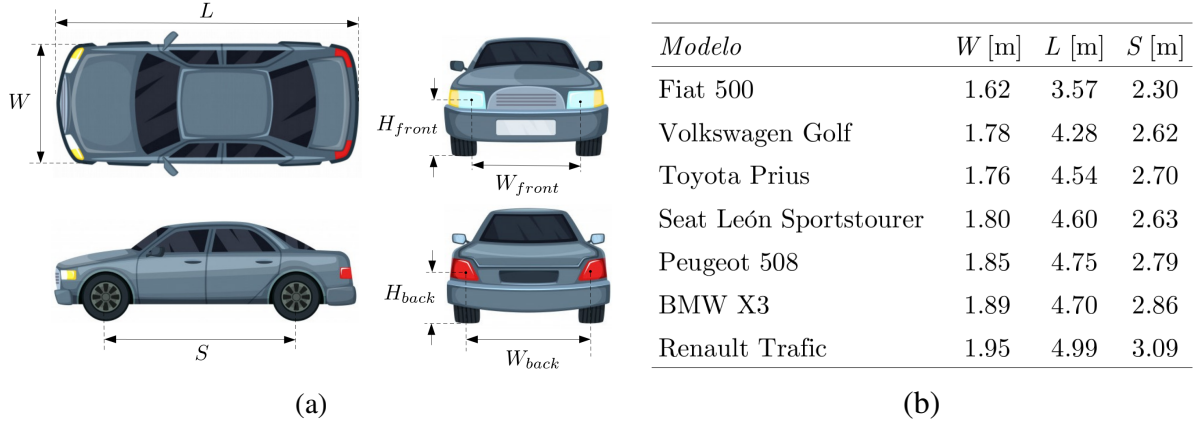


Figura 1: (a) Geometría del modelo de vehículo. (b) Dimensiones de algunos vehículos en circulación.

$82 \text{ cm} \leq W_{front} \leq 1.95 \text{ m}$. Para los pilotos traseros, las limitaciones normativas para la distancia de separación W_{back} son las mismas que para W_{front} y su valor depende, entre otras cuestiones, del diseño del portón trasero del vehículo. Por otro lado, en lo que respecta a las alturas de faros y pilotos respecto al suelo, H_{front} y H_{back} , éstas dependen esencialmente de la altura del vehículo. Téngase en cuenta que H_{front} y H_{back} , serán siempre mayores en SUVs, todoterrenos y furgonetas que en el resto de vehículos. No obstante, en todos los casos, las alturas estarán comprendidas entre 35 cm y 1.5 m.

Conocida la posición y las dimensiones de un vehículo, el cálculo de las coordenadas de los faros delanteros y pilotos traseros es muy simple. Así, para un vehículo situado en las coordenadas (x_1, y_1, z_1) , que definen su centro geométrico, las posiciones de faros y pilotos, en ausencia de rotación, se obtienen como $(x_1 - L/2, y_1 + W_{front}/2, H_{front})$ y $(x_1 - L/2, y_1 - W_{front}/2, H_{front})$, para el faro derecho e izquierdo; y, de forma análoga, como $(x_1 + L/2, y_1 + W_{back}/2, H_{back})$ y $(x_1 - L/2, y_1 + W_{back}/2, H_{back})$ para el piloto derecho e izquierdo, respectivamente. Téngase en cuenta que este cálculo también es aplicable a los receptores ya que éstos comparten posición con los faros del vehículo.

Lámparas emisoras y receptores

Para modelar el comportamiento de los faros y pilotos traseros (lámparas emisoras) y de los receptores, se parte del estudio que se presentó en el informe anterior. En concreto, en dicho informe se explicó detalladamente que, a pesar de que las emisiones de faros y pilotos se han estudiado extensamente en la bibliografía [3], [4], [5], en la actualidad, no existe ningún modelo disponible que describa su patrón de emisión. Por ello, para simular el comportamiento de los emisores, aquí se ha seguido el enfoque más empleado en la bibliografía que consiste en considerar que las lámparas LED emiten siguiendo un patrón lambertiano con simetría de revolución respecto a su eje de referencia, de modo que sus emisiones dependen únicamente del ángulo azimutal ϕ , de acuerdo con la ecuación:

$$R(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi), \quad (1)$$

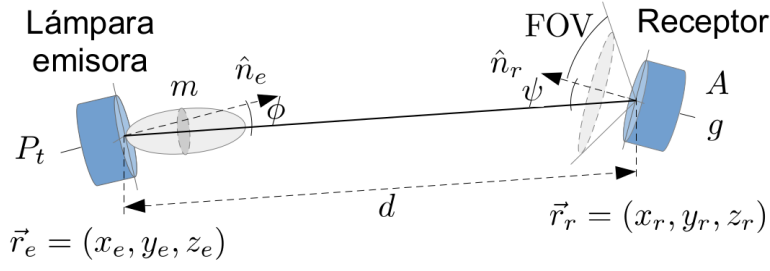


Figura 2: Parámetros geométricos del emisor y detector.

donde el parámetro m determina la directividad de la fuente, de modo que valores mayores de m dan lugar a emisores con mayor directividad. La relación entre el parámetro m y el semiángulo de potencia mitad $\Phi_{1/2}$ del emisor es la siguiente:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))}. \quad (2)$$

Siguiendo el procedimiento descrito en [5], es posible determinar los valores de directividad y potencia para una determinada lámpara, teniendo en cuenta la normativa de emisiones y su hoja de características. Así, en [5] se modeló un faro delantero modelo LUXEON Altillon como una fuente lambertiana con $P_t = 2 \text{ W}$ y $\Phi_{1/2} = 20^\circ$. De forma análoga, se modeló un piloto trasero como una fuente Lambertiana con $P_t = 1 \text{ W}$ y $\Phi_{1/2} = 20^\circ$. Estos dos modelos de lámpara se han tomado como referencia para obtener los resultados de las simulaciones que se llevarán a cabo más adelante.

En definitiva y, a modo de resumen, como se muestra en la Fig.2 un faro delantero o un piloto trasero de un vehículo vendrá completamente definido por 4 parámetros; a saber, su vector de posición o coordenadas $\vec{r}_e = (x_e, y_e, z_e)$, su vector de orientación \hat{n}_e , su directividad, definida a través de m , y su potencia transmitida P_t .

Por otro lado, en lo que respecta a los receptores, como se explicó en el informe anterior, éstos suelen estar compuestos por la unión de un fotodiodo PIN, un concentrador y un filtro óptico. La potencia recibida por dicho conjunto, despreciando inicialmente el efecto del filtrado, viene dada por:

$$P_r(\psi) = \begin{cases} E_r A g \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq \text{FOV} \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \quad (3)$$

donde E_r representa la irradiancia recibida, g representa la ganancia del concentrador y ψ es el ángulo de incidencia definido respecto a la normal, como se muestra en la Fig.2. La ganancia para concentradores no formadores de imagen es independiente del ángulo ψ y sólo depende del FOV del receptor a través de la ecuación siguiente:

$$g = \left(\frac{n}{\sin(\text{FOV})} \right)^2, \quad (4)$$

donde n es el índice de refracción del concentrador.

Teniendo en cuenta estas expresiones, como se muestra en la Fig.2, un receptor vendrá completamente definido por cinco parámetros: su vector de posición $\vec{r}_r = (x_r, y_r, z_r)$, su vector de

orientación \hat{n}_r , su campo de visión FOV, su ganancia óptica g y su área de detección A . La distancia d de separación entre la lámpara y el receptor se puede calcular de forma directa a partir de sus coordenadas con la ecuación:

$$d = \sqrt{(x_r - x_e)^2 + (y_r - y_e)^2 + (z_r - z_e)^2}. \quad (5)$$

De igual modo, los ángulos de emisión ϕ y recepción ψ se pueden obtener a partir de la geometría de la Fig.2 como:

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\hat{n}_e(\vec{r}_r - \vec{r}_e)}{d} \right) \quad (6)$$

y

$$\psi = \cos^{-1} \left(\frac{\hat{n}_r(\vec{r}_e - \vec{r}_r)}{d} \right) \quad (7)$$

respectivamente, donde la distancia d se obtiene a partir de la ec.(5) .

Luz ambiental

Para simular el efecto de la luz ambiental, inicialmente, sólo se ha tenido en cuenta la aportación de la luz solar, despreciándose otras fuentes de luz que pueden estar presentes en una carretera como las farolas o los faros de otros vehículos. No obstante, es necesario indicar aquí que, la luz solar es, con diferencia, la principal fuente de iluminación ambiental en condiciones de conducción diurna. Como ya se explicó en el informe anterior, cuando la luz solar incide sobre un fotodetector, produce en éste la aparición de un ruido shot cuya varianza se calcula como:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qI_{DC}B \quad (8)$$

donde q representa la carga del electrón, B es el ancho de banda de ruido del receptor e I_{DC} es la fotocorriente continua de ruido que, a su vez, viene dada por:

$$I_{DC} = \int_0^\infty r(\lambda)E_{sol}(\lambda)gAd\lambda. \quad (9)$$

Como se puede apreciar, en el cálculo de I_{DC} hay que considerar dos parámetros que dependen de la longitud de onda: la respuesta del fotodiodo, r , y la irradiancia solar, E_{sol} . Además, en el caso de la irradiancia, hay que tener en cuenta que ésta presenta variaciones de varios órdenes de magnitud a lo largo del día. Estas variaciones son consecuencia de los cambios de posición que experimenta el sol con el transcurso del tiempo. Teniendo en cuenta que, en un vehículo, los fotodetectores están situados junto a los faros, los momentos del día en los que I_{DC} es máxima coinciden con el amanecer y el atardecer, ya que, durante esas horas, el sol está en una posición baja y su incidencia sobre los receptores es directa. En estas condiciones de exposición directa al sol, la luz es tan potente que puede llegar a saturar los receptores. Nótese que, en exposición directa, sin tener en cuenta el efecto de filtrado del fotodiodo, el nivel de irradiancia solar es muy elevado, del orden de $E_{sol} = 100 \text{ mW/cm}^2$ [6]. Por ello, en nuestras simulaciones, se asumirá en todos los casos que la exposición al sol es indirecta. En concreto, los valores de I_{DC} empleados, se han tomado de las medidas experimentales de luz solar realizadas por Moreira *et al.* y publicadas en [7]. En este trabajo, los autores obtuvieron, trabajando con un fotodiodo típico de área $A = 0.8 \text{ cm}^2$, medidas de fotocorrientes de $I_{DC} = 5100 \mu\text{A}$ e $I_{DC} = 740 \mu\text{A}$, para condiciones de exposición directa al sol y exposición indirecta, respectivamente.

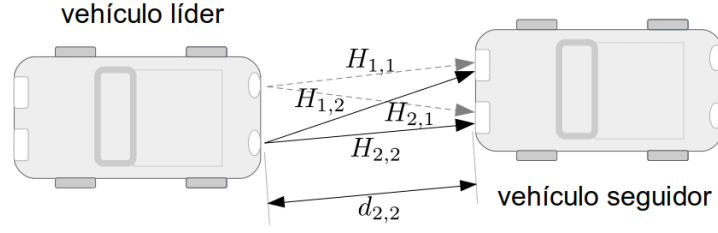


Figura 3: Modelo de canal V2V.

Modelado del canal

En la Fig.3 se muestra el modelo de un canal V2V para una configuración de tipo caravana o *platooning*. Como se puede apreciar, la configuración está formada por dos vehículos: un primer vehículo, denominado vehículo líder, que circula delante y un segundo vehículo, denominado vehículo seguidor, que circula detrás. En esta configuración, son posibles dos tipos de canales. En el primer tipo, el vehículo líder actúa como transmisor y el vehículo seguidor como receptor, mientras que, en el segundo tipo de canal, los vehículos intercambian los papeles de manera que el vehículo líder pasa a actuar como receptor mientras que el vehículo seguidor actúa como transmisor. Cuando los vehículos circulan en tramos rectos, los dos tipos de canales son simétricos. Sin embargo, en las curvas, se pierde esta simetría. En cualquiera de los casos, como se muestra en la figura, el canal V2V estará constituido por cuatro enlaces LOS que se forman por la unión de los dos emisores del vehículo transmisor, con los dos receptores del otro vehículo. Esta configuración se conoce en la bibliografía como canal MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*).

Cálculo de parámetros

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del canal MIMO pueden deducirse a partir de las ecuaciones que modelan los cuatro enlaces que lo forman. Así, tomando como punto de partida la ecuación de la ganancia en continua de un enlace LOS, definida por la ec.(12) del informe anterior, puede obtenerse la expresión de la ganancia en continua del canal MIMO. Por tanto, asumiendo que la ganancia en continua del enlace LOS formado por el emisor m -ésimo y el receptor n -ésimo puede escribirse como:

$$H_{m,n}(0) = \begin{cases} \frac{A}{d_{m,n}^2} R(\phi_{m,n}) g \cos(\psi_{m,n}) & 0 \leq \psi_{m,n} \leq \text{FOV} \\ 0 & \text{resto} \end{cases}, \quad (10)$$

donde $R(\phi_{n,m})$ representa el valor del patrón del emisor en la dirección del receptor, g es la ganancia óptica del concentrador, $\psi_{m,n}$ es el ángulo de recepción, A es el área del detector y $d_{m,n}$ es la distancia del enlace, la expresión de la ganancia del canal MIMO obtenido combinando las señales recibidas con unos pesos de valor w_n viene dada por:

$$H(0) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M H_{m,n}(0) w_n, \quad (11)$$

donde $M = N = 2$ y el término $H_{m,n}$ se obtiene de la ec.(10).

De forma análoga, asumiendo conocida la respuesta al impulso del enlace formado por el emisor m -ésimo y el receptor n -ésimo, $h_{m,n}(t)$, puede obtenerse la expresión de la respuesta al impulso del canal MIMO como:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M h_{m,n}(t) w_n. \quad (12)$$

Si, además, se tiene en cuenta que, en los enlaces LOS, la respuesta al impulso no es más una delta desplazada respecto al origen el tiempo de propagación de la señal para la distancia del enlace, es decir, $h_{m,n}(t) = H_{m,n}(0) \delta(t - d_{m,n}/c)$, donde $\delta(t)$ representa la función delta de Dirac y c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío, entonces, la respuesta al impulso del canal MIMO quedaría como sigue:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_n H_{m,n}(0) \delta(t - d_{m,n}/c). \quad (13)$$

Por otro lado, en lo que respecta al valor de los pesos, w_n , existen distintos métodos para su obtención. El método más simple se denomina *equal-gain combining* (EGC) y consiste en asignar a las $N = 2$ señales recibidas pesos idénticos de valor $w_n = 1/N$. En el segundo método, denominado *maximal-ratio combining* (MRC), los pesos, w_n , se escogen proporcionales a la relación señal-ruido en cada receptor. De este modo, se concede una mayor importancia a las señales recibidas con más calidad. El método MRC maximiza la SNR final por lo que, en general, es preferible al EGC. Sin embargo, presenta como principal inconveniente que, para poder aplicarlo, se requiere la estimación de la SNR recibida en cada rama, lo que complica el diseño de los receptores. En la combinación MRC los pesos vienen dados por

$$w_n = k_0 \frac{r P_{r,n}}{\sigma_n^2}, \quad (14)$$

donde r representa la respuesta del fotodetector, $P_{r,n}$ es la potencia de señal recibida en el receptor n -ésimo, σ_n^2 es la varianza de ruido en el receptor n -ésimo y k_0 es un parámetro constante, independiente del valor de n . Téngase en cuenta que, en todos los casos, los pesos deben cumplir que $\sum w_n = 1$. El último método se denomina *select best* (SB) y consiste en seleccionar la señal de uno de los receptores, descartando la otra, es decir, los pesos serían $w_n = (1, 0)$ o $w_n = (0, 1)$ en función de la rama seleccionada. Al igual que la combinación MRC, esta técnica presenta el inconveniente de que requiere la estimación de la SNR en los receptores. La principal ventaja que ofrece este método es que permite obtener anchos de banda del canal muy elevados, lo que lo hace muy apropiado para aplicaciones que requieren alta velocidad de transmisión. Los valores finales de los parámetros del canal MIMO dependerán del método de combinación escogido.

Una vez conocidos los pesos, w_n , la relación señal-ruido eléctrica del canal MIMO se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{SNR} = \left(\frac{(\sum_{n=1}^N r P_{r,n} w_n \sum_{m=1}^M H_{m,n}(0))^2}{\sum_{n=1}^N w_n^2 \sigma_n^2} \right) = \frac{(r P_t H(0))^2}{\sum_{n=1}^N w_n^2 \sigma_n^2} \quad (15)$$

donde $H(0)$ es la ganancia en continua del canal, definida por la ec.(11) y σ_n^2 representa la varianza del ruido recibido en cada detector, definida por la ec.(8).

Escenarios de simulación

Para simular las situaciones reales con conducción en caravana, se ha escogido un escenario de tipo urbano en el que la velocidad de circulación máxima está limitada a $v = 40$ km/h. Con esta velocidad, el radio mínimo de las posibles curvas de la vía es de 50 m [8]. A efectos de simulación, este escenario se ha subdividido en otros dos, cuya geometría se ha representado en la Fig.4 como *Escenario 1* y *Escenario 2*, respectivamente. Con la geometría del *Escenario 1* se modelan las situaciones de conducción en las que los dos vehículos siguen una misma trayectoria a lo largo de la vía. Por otro lado, con la geometría del *Escenario 2* se modelan las situaciones en las que los dos vehículos siguen trayectorias diferentes. Nótese que este segundo escenario es más general que el primero ya que permite considerar desalineamientos entre vehículos situados en el mismo carril cuando $D < 3.5$ m y desalineamientos entre vehículos situados en carriles distintos cuando $D \geq 3.5$ m, siendo 3.5 m la anchura típica de un carril [8]. Por simplicidad, para simular ambos escenarios, el origen de coordenadas se ha situado en el centro del vehículo líder.

A) Geometría del escenario 1

Como se puede observar en la Fig.4(a), en el *Escenario 1*, las coordenadas del vehículo seguidor (x_1, y_1) se pueden obtener geoméricamente en función de la distancia de separación entre vehículos, d , como $(0, d)$ para rectas y $(d \cos(\alpha), d \sin(\alpha))$ para curvas, donde $\alpha = \sin^{-1}(d/2R)$ y R representa el radio de la curva. En lo que respecta a las coordenadas de las lámparas emisoras y receptores, para los dispositivos situados en el vehículo líder, vendrán dadas directamente por las expresiones que se presentaron en el apartado de modelado de vehículos, mientras que para los dispositivos del vehículo seguidor será necesario aplicar un desplazamiento, d , y una rotación por un ángulo $\beta = 2\alpha$. Por último, los vectores unitarios de orientación, serán $\hat{n} = (1, 0, 0)$ para los pilotos traseros del vehículo líder y $\hat{n} = (-\cos(\beta), \sin(\beta), 0)$ para los faros delanteros del vehículo seguidor.

B) Geometría del escenario 2

La geometría del *Escenario 2* es algo más compleja que la anterior, como se aprecia en la Fig.4(b). Ahora, las coordenadas del vehículo seguidor (x_1, y_1) se obtienen a partir de la distancia entre vehículos, d , y su separación, D como $(\sqrt{d^2 - D^2}, D)$ para tramos rectos y como $(d \cos(\alpha), \pm d \sin(\alpha))$, con signo positivo si $\beta \leq \beta_0$ con $\beta_0 = \cos^{-1}(R_1/R_2)$ y negativo si $\beta > \beta_0$, para tramos curvos. Nótese, que ahora los ángulos α y β son diferentes a los obtenidos en el *Escenario 1* y vienen dados por

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{R_1^2 + R_2^2 - d^2}{2R_1R_2} \right) \quad (16)$$

y

$$\alpha = \cos^{-1} (R_2/d \sin(\beta)) \quad (17)$$

respectivamente, donde R_1 y R_2 son los radios de las curvaturas correspondientes a las trayectorias de ambos vehículos. Las expresiones para obtener las coordenadas de las lámparas emisoras y receptores, así como las correspondientes a los vectores unitarios de orientación del *Escenario 2*, son las mismas que las del *Escenario 1*, empleando los nuevos valores de β y α .

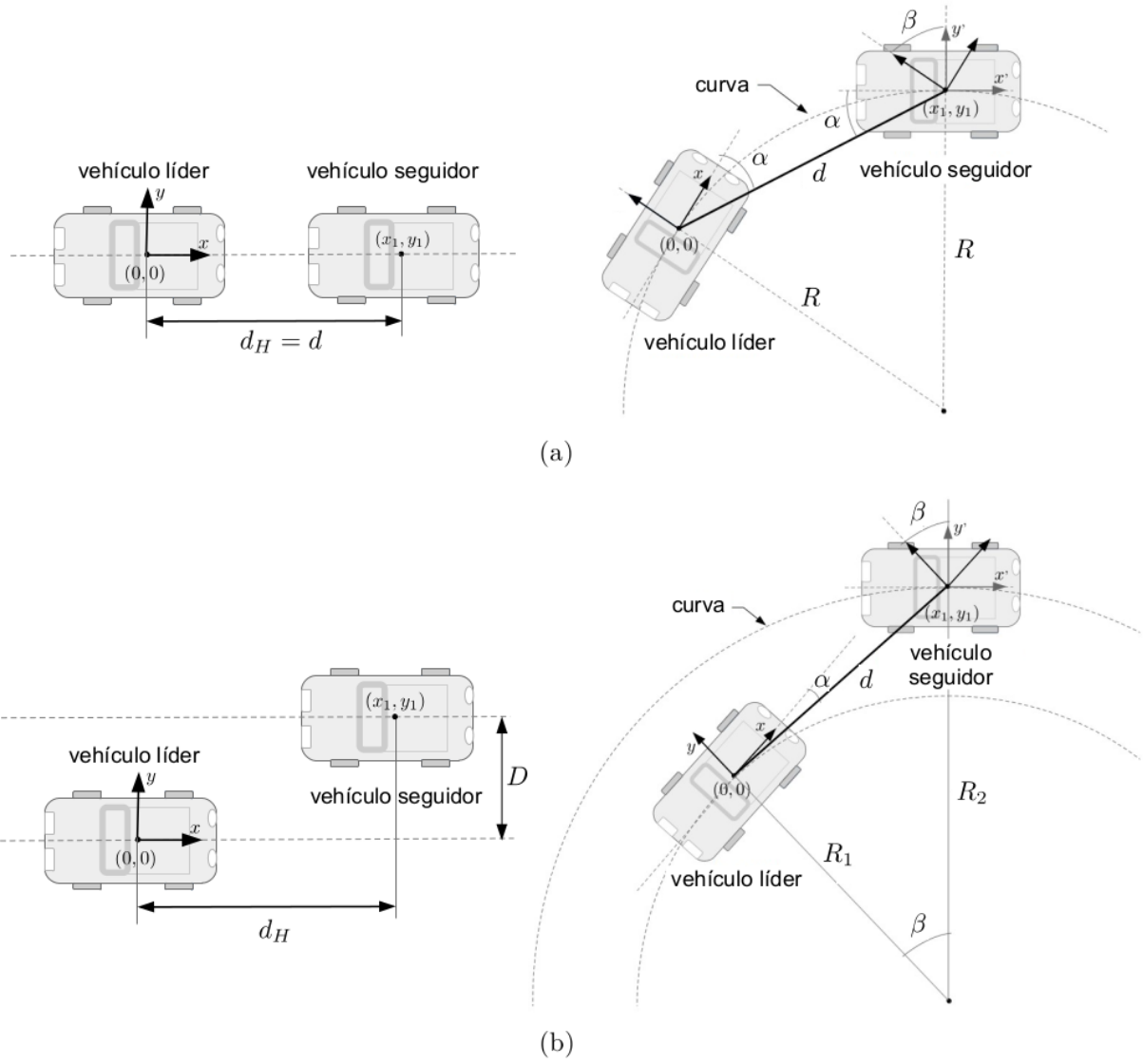


Figura 4: Geometría correspondiente los escenarios simulados. (a) *Escenario 1* con tramo recto y curvo. (b) *Escenario 2* con tramo recto y tramo curvo.

Análisis de simulaciones

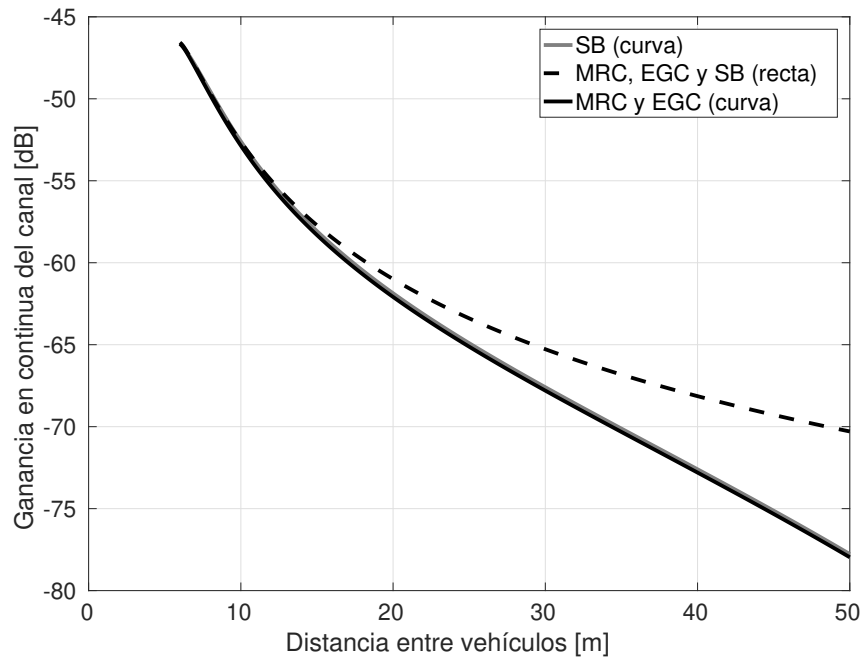
En las siguientes líneas, se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas empleando los modelos y escenarios descritos en los apartados previos. En todos los casos, se ha considerado un vehículo promedio de dimensiones $L = 4.6$ m, $W = 1.8$ m y $S = 2.6$ m, con una separación de faros y pilotos traseros de $W_{front} = 1.3$ m y $W_{back} = 1.1$ m, respectivamente. Para las alturas, se ha asumido que $H_{front} = H_{back}$. Por otro lado, en lo que respecta a los datos correspondientes a emisores y receptores, se han considerado los siguientes. Para las lámparas emisoras, se ha asumido emisión Lambertiana con $P_t = 2$ W y $\Phi_{1/2} = 20^\circ$, para los faros delanteros, y $P_t = 1$ W y $\Phi_{1/2} = 20^\circ$, para los pilotos traseros. En los receptores, se ha asumido un área fotosensible $A = 50$ mm², un FOV = 55° y una ganancia para el concentrador $g = 1$. Por último, para simular el ruido, se ha asumido que éste se debe únicamente al ruido shot provocado por la luz solar indirecta, por lo que $I_{DC} = 740$ μ A. El ancho de banda de ruido considerado es $B = 5$ MHz.

Escenario 1

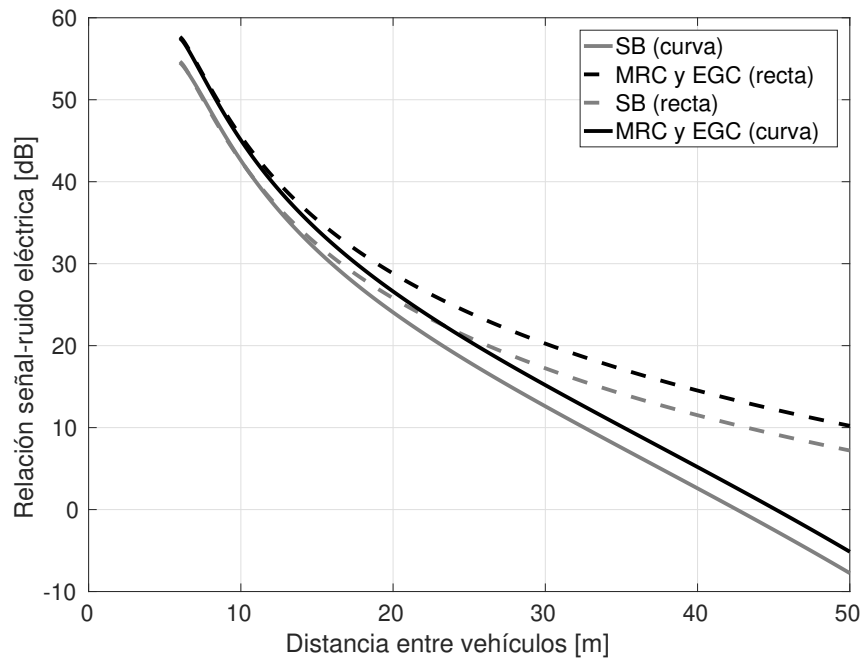
En la Fig.5 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros del canal MIMO correspondientes a la simulación del *Escenario 1*. En estas simulaciones, se ha asumido que el vehículo líder actúa como transmisor y el vehículo seguidor como receptor. Para evitar situaciones de casi colisión, se ha supuesto que existe un espacio mínimo entre vehículos de 1.4 m, por lo que, teniendo en cuenta que $L = 4.6$ m, en las gráficas sólo se muestran valores de d a partir de 6 m. Para las curvas, se ha asumido un radio $R = 50$ m.

En primer lugar, la Fig.5(a) presenta la ganancia en continua del canal, $H(0)$, para los tres métodos de combinación descritos, EGC, MRC y SB, en función de la separación entre vehículos d . Obsérvese que, como cabía esperar, la ganancia del canal MIMO se reduce cuando aumenta la separación entre vehículos. Esta reducción es, además, más acusada en los tramos curvos que en los rectos, con diferencias que llegan a ser de 7.6 dB para $d = 50$ m. El motivo de este empeoramiento es el progresivo desalineamiento que se produce entre las lámparas emisoras y los receptores en los tramos curvos. Nótese, que en este escenario no se aprecian apenas diferencias en la aplicación de las diferentes técnicas de combinación.

Por otro lado, en la Fig.5(b) se muestra la variación de la relación señal-ruido eléctrica (SNR) con la separación entre vehículos. Como se puede apreciar en la figura, la SNR muestra un comportamiento similar al obtenido con la ganancia, es decir, una paulatina reducción al aumentar la separación entre vehículos. De nuevo, esta reducción es más acusada para los tramos curvos debido al desapuntamiento que se produce entre dispositivos. No obstante, a diferencia de lo que ocurría en la figura anterior, ahora sí se aprecian variaciones entre métodos de combinación. Así, la SNR obtenida con las combinaciones MRC y EGC supera en aproximadamente 3 dB a la SNR de la combinación SB. Esto indica que descartar la señal de un receptor implica siempre una pérdida de calidad. Por último, es importante resaltar que con los valores de SNR obtenidos en este escenario, se podrían establecer con facilidad enlaces operativos para distancias próximas a los 40 m.



(a)



(b)

Figura 5: Parámetros del canal MIMO en el *Escenario 1*: (a) Ganancia en continua. (b) Relación señal-ruido eléctrica.

Escenario 2

Los resultados de los parámetros del canal MIMO correspondiente a las simulaciones del *Escenario 2* se presentan en la Fig.6. De nuevo se ha asumido que el vehículo líder actúa como transmisor y el vehículo seguidor como receptor. En este segundo escenario, se han asumido que los radios que definen las trayectorias curvas de ambos vehículos (ver Fig.4(b)) son $R_1 = 50$ m y $R_2 = R_1 + D$, respectivamente, donde D se ha tomado igual a 3.5 m que es la anchura típica de un carril.

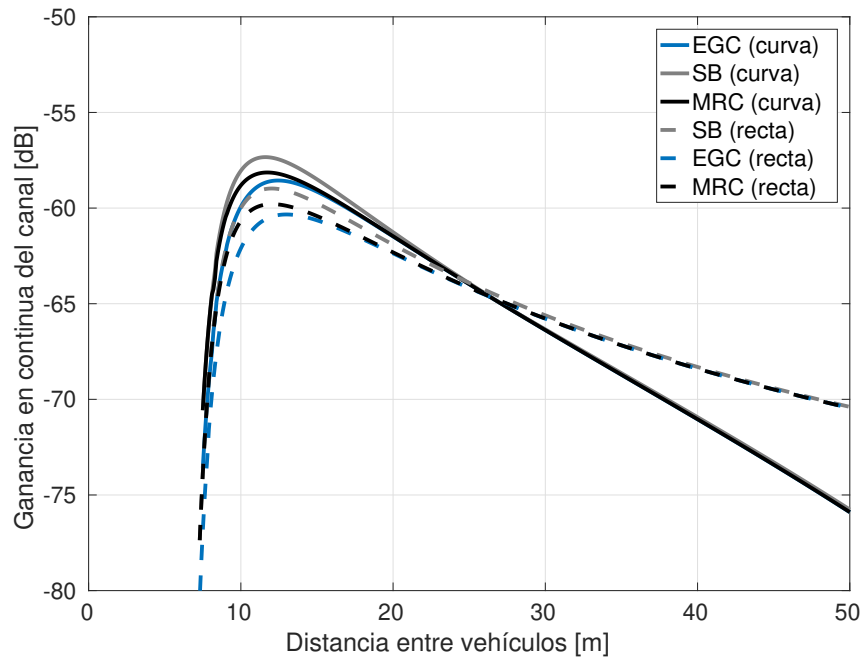
Como se puede apreciar, en este nuevo escenario, las curvas de ganancia en continua, de la Fig.6(a), y relación señal-ruido del canal MIMO, de la Fig.6(b), tienen una forma diferente a la del *Escenario 1*. Obsérvese que, ahora, en lugar de un decaimiento paulatino con la distancia, se aprecia la aparición de un máximo para separaciones próximas a 12 m, seguido de una disminución progresiva. Este máximo es debido a la mejora de visibilidad que se produce entre las lámparas emisoras y los receptores al separarse los vehículos, ya que cuando éstos están muy próximos, el desplazamiento lateral de 3.5 m dificulta el establecimiento de los enlaces. Curiosamente, en este escenario, los resultados obtenidos para tramos curvos son superiores a los de los tramos rectos siempre que las separaciones sean inferiores a aproximadamente 25 m. Esta aparente anomalía es debida a que, al aumentar la separación, d , el segundo vehículo (que circula por la zona exterior de la curva) tiende a alinearse con el primero (que circula por la interior), mejorando el apuntamiento. Sin embargo, a partir de los 25 m mencionados, la mejora desaparece y el despuntamiento produce una gran reducción de la ganancia y la SNR del canal.

Por otro lado, a diferencia de lo que ocurría en el *Escenario 1*, ahora sí se aprecian diferencias entre los resultados obtenidos por los distintos métodos de combinación. Así, en la Fig.6(a), se observan claramente estas diferencias en los primeros metros de separación. Sin embargo, a partir de los 20 m, las diferencias desaparecen y los tres métodos de combinación producen el mismo resultado. Nótese que la ganancia obtenida para tramos rectos en el *Escenario 1* y en el *Escenario 2* tienden a coincidir cuando aumenta la distancia. Así por ejemplo, se puede comprobar que, para 50 m, las ganancias son iguales. En tramos curvos, los resultados del *Escenario 2* son algo mejores que los del *Escenario 1* ya que, al circular el segundo vehículo por la curva exterior, para una misma separación, d , el desalineamiento que se produce es menor.

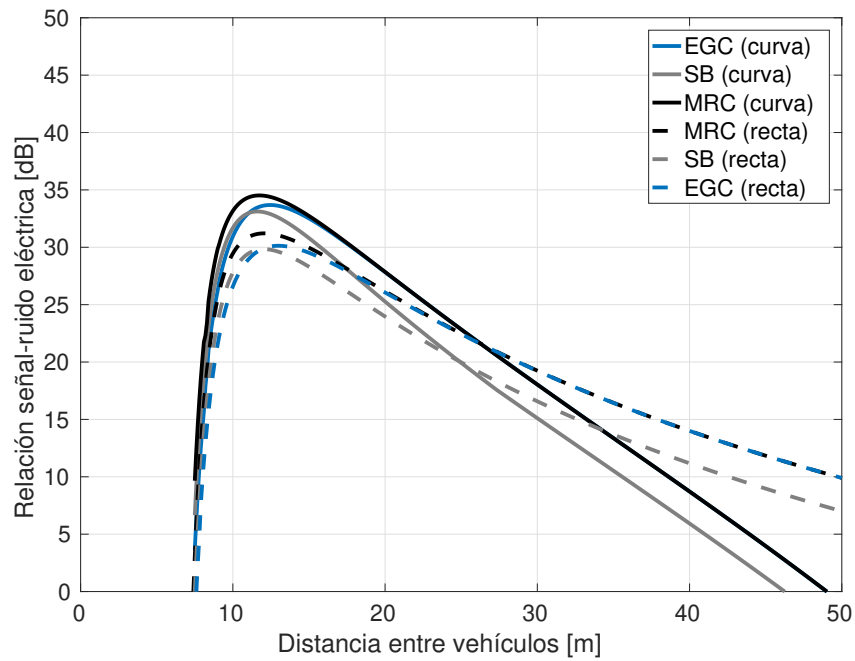
En lo que respecta al comportamiento de la SNR, se puede comprobar que, al igual que ocurría en el *Escenario 1*, los resultados obtenidos con combinación MRC y ECG superan en 3 dB a los de la combinación SB. Por último, hay que resaltar que dados los valores de SNR de la figura, en este escenario son viables enlaces entre vehículos para distancias del orden de 40 m.

A) Efecto del uso de faros orientables

Para evaluar la mejora de los parámetros del canal MIMO que se obtiene al trabajar con faros orientables, que son capaces de girar en las curvas para iluminar mejor la carretera, se ha realizado una nueva simulación del *Escenario 2* en la que, ahora, el vehículo seguidor pasa a ser el transmisor y el vehículo líder actúa como receptor, es decir, los vehículos intercambian su papel respecto a las simulaciones previas.



(a)



(b)

Figura 6: Parámetros del canal MIMO en el *Escenario 2*: (a) Ganancia en continua. (b) Relación señal-ruido eléctrica.

La orientación de los faros en las curvas se ha simulado cambiando los vectores de posición de las lámparas delanteras del vehículo para que apunten hacia el interior de la curva con un ángulo γ medido respecto a la tangente de la curva. Este ángulo se ha calculado siguiendo dos criterios diferentes. En el primero, γ viene dado por el giro necesario para que a la distancia a la que la tangente a la trayectoria del vehículo se sale del ancho de la vía, D , el faro apunte al centro de la carretera. Con este criterio, γ viene dada por:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{R + D/2}{R + D} \right), \quad (18)$$

donde D representa la anchura de la vía y R es el radio de la curva. Por otro lado, en el segundo criterio, γ se obtiene como el doble del ángulo de giro que toman las ruedas para describir la curva, es decir,

$$\gamma = 2 \tan^{-1}(S/R), \quad (19)$$

donde S representa la batalla, o distancia entre ejes del vehículo.

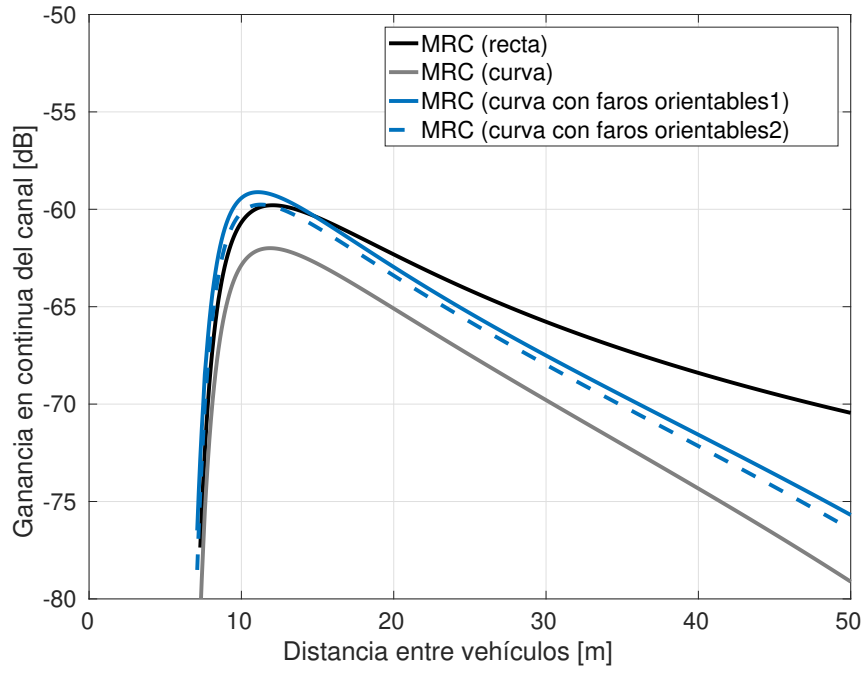
La Fig.7 presenta los resultados de simulación obtenidos para los parámetros del canal MIMO con faros orientables y combinación MRC. En concreto, en la Fig.7(a) se muestra la ganancia en continua y en la Fig.7(b) la SNR del canal. A efectos de comparación, además de los resultados obtenidos con los faros orientables, trazados en azul, se han dibujado los obtenidos con faros fijos en tramos rectos (traza negra) y curvos (traza gris).

Se puede comprobar que la ganancia obtenida para tramos rectos es idéntica a la de la Fig.6(a). Esto es debido a que, como ya se explicó, el canal MIMO es simétrico en tramos rectos. Sin embargo, en los tramos curvos, no se da esta simetría por lo que la ganancia obtenida en estos tramos es peor que la ganancia de la Fig.6(a). La razón para este peor resultado está en el hecho de que transmitir desde el exterior de la curva es peor que transmitir desde el interior de la misma. En lo que respecta al uso de faros orientables, en la Fig.7(a) se observa que con ambos criterios se obtiene una mejora en la ganancia del canal. Esta mejora es de aproximadamente 3.7 dB para el primer criterio y de unos 3.4 dB para el segundo.

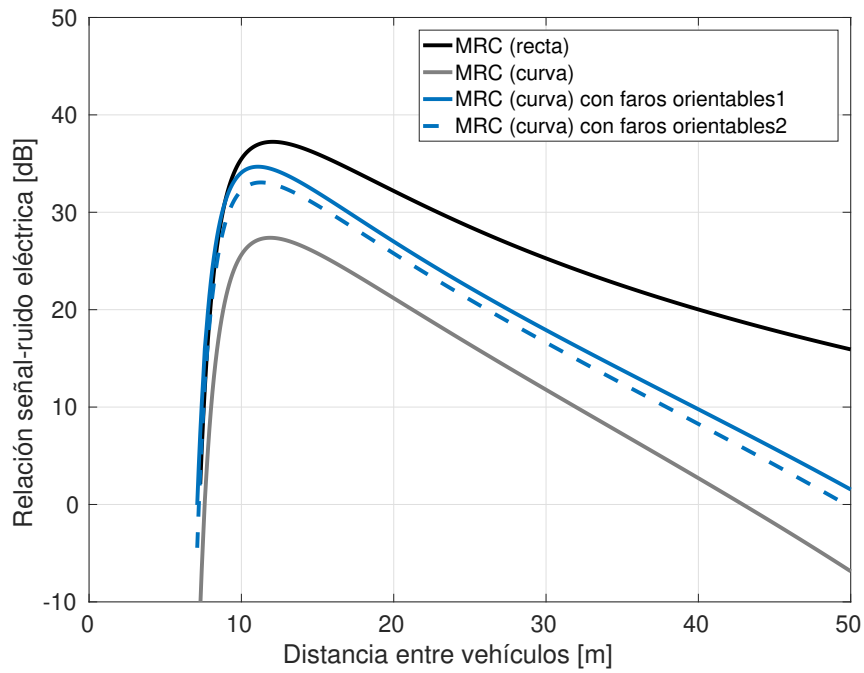
Por otro lado, de la observación de la SNR mostrada en la Fig.7(b) se pueden extraer los siguientes comentarios. Se observa que la SNR obtenida para el tramo recto es mejor que la SNR de la Fig.6. Esto es debido a que los faros delanteros transmiten el doble de potencia que los pilotos traseros, por eso la diferencia es de 6 dB. En lo que respecta al uso de faros orientables, el comportamiento de la SNR es muy similar al de la ganancia. No obstante, ahora, la mejora es un poco mayor para ambos criterios 8.8 dB para el primero y 6.8 dB para el segundo, lo que permite ampliar la distancia de viabilidad para los enlaces hasta los 50 m, aproximadamente.

B) Efecto del FOV de los receptores

Para evaluar el efecto del campo de visión de los receptores en la SNR del canal, se han realizado varias simulaciones del *Escenario2* en las que se ha ido cambiando el FOV de los receptores. La variación del FOV se ha incluido en las simulaciones empleando un concentrador óptico con índice de refracción $n = 1.5$. De este modo, y de acuerdo con la ec.(4), la reducción del FOV produce un aumento de la ganancia. Se han simulado cuatro FOVs diferentes de valores 60°, 50°, 40° y 30°. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig.8.



(a)



(b)

Figura 7: Parámetros del canal MIMO con vehículos con faros orientables en el *Escenario 2*: (a) Ganancia en continua. (b) Relación señal-ruido eléctrica. Se han seguido dos criterios diferentes para el cálculo del ángulo de giro que en la figura aparecen numerados como 1 y 2.

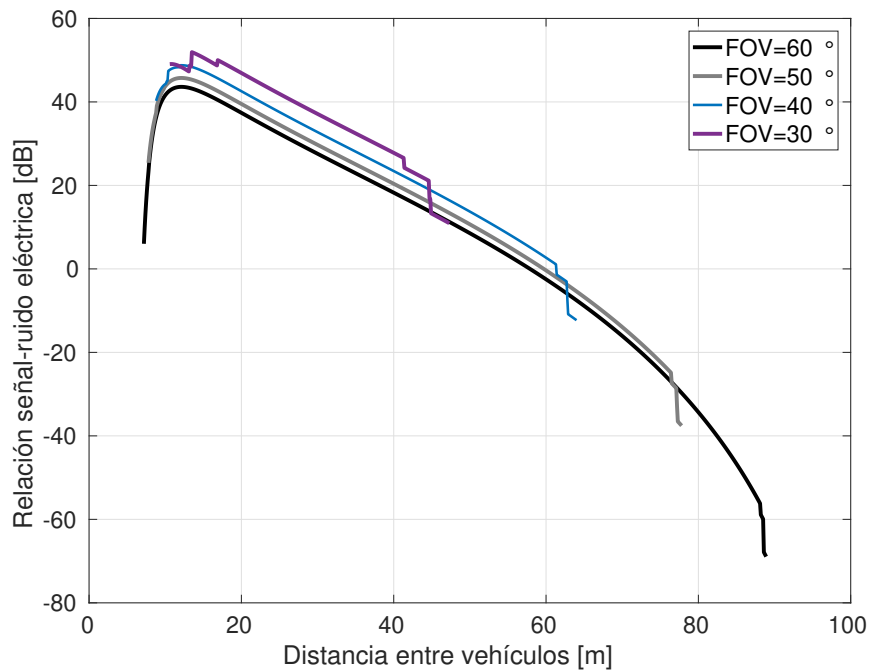


Figura 8: Efecto del FOV en la relación señal-ruido del canal MIMO en el *Escenario 2*.

Como se puede apreciar, a medida que se reduce el FOV se producen dos efectos. El primero es una clara pérdida de alcance. Esto es debido a que al reducirse el FOV, en las curvas, los receptores dejan de captar la luz de las lámparas emisoras para distancias cada vez menores. Así, el alcance pasa de aproximadamente 90 m para un $\text{FOV} = 60^\circ$, a unos escasos 42 m para un $\text{FOV} = 30^\circ$, es decir, menos de la mitad. El segundo efecto que se observa es una mejora de la SNR. Esta mejora llega a ser del orden de 4.7 dB, para el mejor de los casos, y es debida al aumento de ganancia que proporciona el concentrador.

Referencias

- [1] “<https://www.medidasdecoches.com/>,” tech. rep.
- [2] “Reglamento CEE 48 para el montaje de la iluminación delantera, lateral y trasera,” tech. rep., 2016.
- [3] S. J. S.J. Lee, J.K. Kwon and Y. Kwon, “Simulation modeling of visible light communications channel for automotive application,” in *IEEE ITSC*, sep 2010.
- [4] Y. S.-H. W. Viriyasitavat and T. Hsin-Mu, “Channel model for visible light communications using off-the-shelf scooter tailling,” in *Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2013.
- [5] B. Béchandergue. 2018.
- [6] A. H. v. R. R. Otte, L.P. de Jong. Kluwer Academic Publishers, 1999.

- [7] R. V. A.J.C. Moreira and A. Duarte, “Optical interference produced by artificial light,” *Wireless Networks*, vol. 3, may 1997.
- [8] M. de Fomento. Boletín Oficial de Estado (BOE), 2016.