

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

SIMULACIÓN DE ENLACES PARA COMUNICACIONES
VEHICULARES CON LUZ VISIBLE

GRADO EN INGENIERÍA DE
TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

VLADISLAV BADIUC
MÁLAGA, 2021

E.T.S. DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN, UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Simulación de enlaces para comunicaciones vehiculares con luz visible

Autor: Vladislav Badiuc

Tutor: Miguel del Castillo Vázquez

Departamento: Departamento de Ingeniería de comunicaciones

Titulación: Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Palabras clave: Comunicación, vehicular, luz, visible

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado una herramienta de simulación en Matlab para poder simular enlaces de comunicación entre dos vehículos usando luz visible. El concreto el enfoque del trabajo es la incorporación de faros matriciales que permitan la iluminación adaptativa en un escenario urbano.

Para las simulaciones se han propuesto varias alternativas de matriz de faros para emular la iluminación adaptativa, es decir, se harán simulaciones de faros típicos europeos, optimización en curva y regiones de sombra. La herramienta soporta diferentes configuraciones de vehículos, faros, y permite seleccionar entre diferentes escenarios de simulación. La herramienta también calcula los principales parámetros del canal.

Simulation of vehicular Communication links with visible light

Author: Vladislav Badiuc

Supervisor: Miguel del Castillo Vázquez

Department: Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Degree: Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Keywords: Visible, Vehicle, Light, Communication

Abstract

In this Bachelor thesis, a Matlab based software tool has been developed to simulate the communication link between two vehicles based on visible light. The main focus is the incorporation of matrix headlights which allow adaptative lighting in a urban environment.

Several matrix headlight models have been proposed for the simulation part to emulate typical european headlighths, curve lighting optimization and to avoid dazzling.

This Application allows the use different vehicle, headlights configurations. It also calculates the main channel parameters.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos del Trabajo Fin de Grado.....	1
1.2. Estructura de la memoria.....	2
2. Fundamentos de los sistemas V2V.....	3
2.1. Descripción de comunicaciones V2V.....	3
2.2. Modelado del canal y del ruido.....	8
2.3. Parámetros del canal.....	11
2.4. Introducción a faros matriciales.....	14
3. Desarrollo de la herramienta de simulación.....	17
3.1. Requisitos de diseño.....	17
3.2. Flujograma.....	18
3.3. Descripción del simulador.....	19
3.3.1. Configuración de vehículos.....	19
3.3.2. Configuración de faros y receptores.....	23
3.3.3. Calculo de parámetros del canal.....	29
3.3.4. Escenarios de simulación.....	36
3.4. Limitaciones del sistema.....	41
4. Análisis de resultados.....	42
4.1. Parámetros generales.....	42
4.2. Patrones de faro matricial simulados.....	43
4.3. Simulaciones.....	48
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	54
5.1. Conclusiones.....	54
5.2. Trabajo futuro.....	54
Referencias.....	56

Lista de Acrónimos

VVLC	Visible Vehicle Light Communication
V2V	Vehicle to Vehicle
V2I	Vehicle to Infraestructure
V2X	Vehicle to Everything
VLC	Visible Light Communication
ITS	Intelligent Transportation System
SNR	Signal to Noise Ratio
EGC	Equal Gain Combining
MRC	Maximal Ratio Combining
SB	Select Best
LOS	Line of Sight
MIMO	Multiple Input Multiple Output
DSRC	Dedicated Short Range Communications

Capítulo 1. Introducción

Durante las últimas décadas, en la mayoría de países desarrollados ha habido un considerable aumento de demanda de vehículos privados. Junto con el número de vehículos también ha crecido el número de carreteras, autopistas e infraestructuras para el transporte privado. Este crecimiento parece haberse estabilizado en 2013 [1].

Esta rápida expansión tiene un inconveniente, el número de accidentes ha tenido el mismo incremento. Se estima que al año alrededor de 1.5 millones de personas fallecen y unos 50 millones de personas sufren daños en las carreteras. La mitad de las víctimas son personas vulnerables, como peatones, ciclistas o motociclistas.

Se estima que alrededor del 80% de estos accidentes se podrían haber evitado si los conductores pudiesen reaccionar con mayor rapidez.

Usando tecnologías como vehículo a vehículo (V2V) y vehículo a infraestructura (V2I) se podría proporcionar asistencia a los conductores evitando estos accidentes de tráfico.

Este Trabajo Fin de Grado se centra en las tecnologías V2V usando el protocolo Visible Vehicular Light Communication (VVLC), se desarrollara una aplicación de simulación.

1.1. Objetivos del Trabajo Fin de Grado

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta software capaz de simular sistemas VVLC en un entorno urbano entre 2 vehículos. El enfoque principal será el uso de faros matriciales, la herramienta debe de soportar diferentes configuraciones de vehículos y faros, se muestra un esquema básico de la aplicación a desarrollar en Fig.1.1.

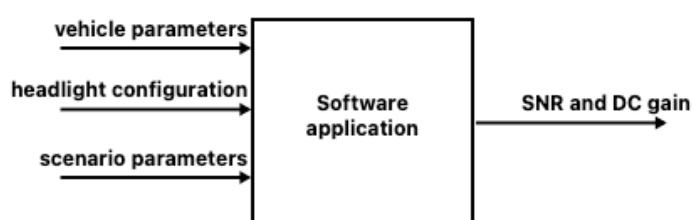


Fig.1.1. Diagrama de bloques básico de la aplicación software a desarrollar.

El escenario se podrá elegir entre cuatro posibles, se podrá regular la longitud del tramo, el radio de curva y la separación de carriles.

La aplicación debe de calcular varios parámetros de calidad, la Signal to Noise Ratio (SNR) y la ganancia en continua, en todos los puntos del trayecto entre vehículos líder y seguidor.

1.2. Estructura de la memoria

La presente memoria se divide en 5 capítulos, este primer capítulo de introducción nos ha dado una breve idea de qué se pretende desarrollar con la aplicación.

En el segundo capítulo se exponen los fundamentos teóricos sobre los que se sostienen las simulaciones realizadas.

En el tercer capítulo se presenta la aplicación software desarrollada en Matlab para las simulaciones y se da una explicación del programa y de su uso.

En el cuarto capítulo se plantean varios usos y se analizan los resultados obtenidos para las distintas configuraciones y su relación con los fundamentos teóricos.

En el quinto y último capítulo se hace una conclusión sobre la viabilidad de los sistemas VVLC para comunicaciones vehiculares y se describen varias líneas futuras de estudio.

Capítulo 2. Fundamentos de los sistemas V2V

Las comunicaciones V2V y V2I permiten a los vehículos recibir información sobre el tráfico mientras envían información propia a otros vehículos. Estos datos se usan para ajustar la trayectoria de los vehículos o para informar a centros de tráfico sobre la situación en carretera.

2.1. Descripción de comunicaciones V2V

El protocolo V2V es un protocolo de comunicación inalámbrica entre 2 vehículos. La tecnología usada para esta comunicación puede ser por radio frecuencia (RF), WiFi o por luz visible (VVLC).

La intención que se tiene con V2V es la creación de una Intelligent Transportation System (ITS), es decir, que los vehículos envíen información entre sí (V2V) y que se comuniquen con infraestructuras presentes en carreteras (V2I). Con la comunicación con infraestructuras se puede hacer que el vehículo nos alerte del estado de la carretera, señalización, obras o accidentes. Es posible que la infraestructura recopile información y la envíe a una central para tomar decisiones sobre tráfico, esto puede ser: llamar una ambulancia en caso de accidente, regular los semáforos o detectar infracciones de tráfico.

Para mejorar la seguridad vial es necesario una tecnología que no sea demasiado compleja, no muy costosa y que pueda ser ampliable a cualquier vehículo. Por ello VLC basado en V2V es una solución muy interesante, porque muchos vehículos ya incorporan iluminación LED y la mayoría de infraestructuras también.

Es posible mejorar el flujo del tráfico y aumentar el comfort de los pasajeros usando V2V, hay planes para extender este sistema a infraestructuras (V2I), redes (V2N) y a peatones (V2P), tal como se muestra en Fig.2.1, esto sería para crear una red ITS que detecte peatones y avise a los vehículos que se acercan.

Si un coche pisa el freno, es más rápido enviar un mensaje al coche de atrás que esperar que sus sensores reciban la señal de los pilotos traseros. Así se reduce el tiempo de reacción drásticamente.

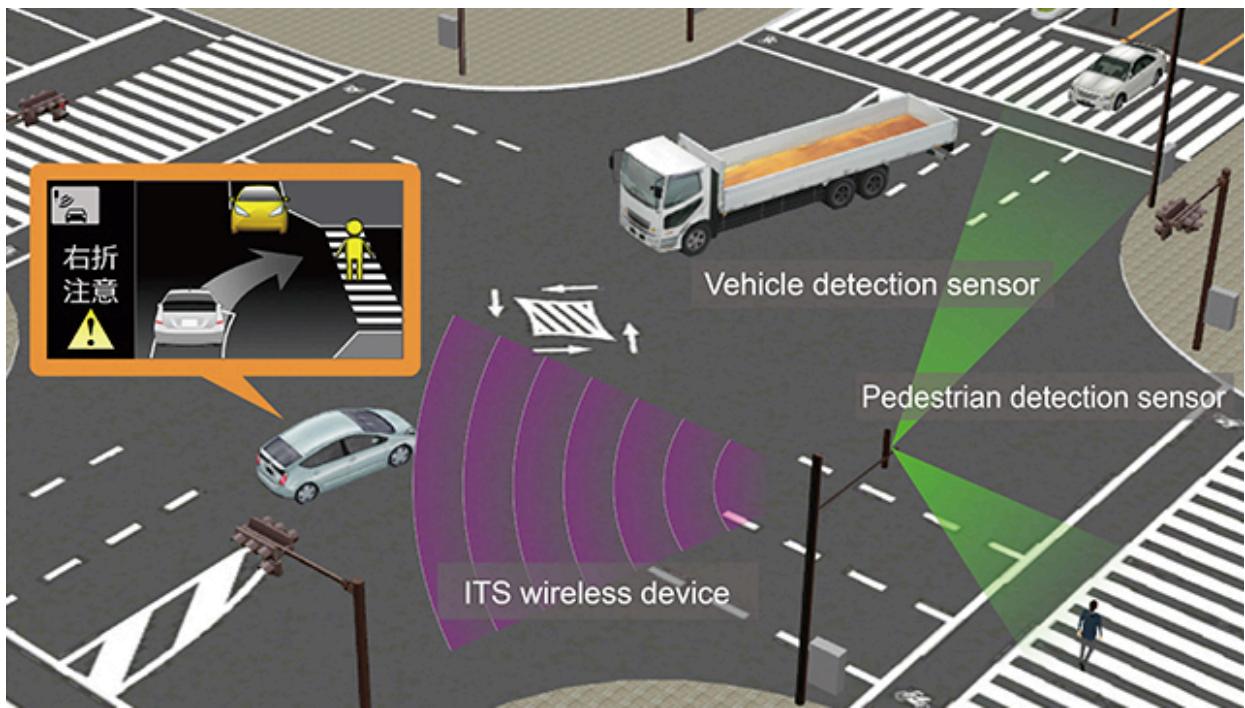


Figura 2.1. Propuesta de sistema V2I ideado por Toyota en 2015. El sistema se basa en un detector de peatones instalado en una farola que alertará al conductor más cercano de la presencia de personas. Esta comunicación se puede hacer por VLC.

Algunas de las ventajas que tiene V2V son [2]:

- Prevención de accidentes: la inmensa mayoría de accidentes ocurren por error humano. Errores tales como maniobras peligrosas o bajos tiempos de reacción pueden ser prevenidos en torno a un 70 ó 80% usando V2V.
- Mejora en el manejo del tráfico: los vehículos al intercambiar información entre sí puede saber las posiciones y velocidades de los otros coches y así adaptarse. Gracias a V2I se podría adaptar los semáforos para evitar colas o desatascar retenciones.
- Asistencia al conductor: el conductor podrá ser informado de cierto eventos en carretera cómo pueden ser inundaciones, alturas de puente o limitaciones de gálibo. Así mismo la asistencia puede ser útil para alineamiento en carril o incluso aparcamiento.
- Mejora de consumo: se ha realizado un estudio con una flota de 5 camiones en autopista en configuración de caravana [13], un camión líder seguido de cerca por los demás en formación de caravana y se ha observado que en los vehículos seguidores se ha consumido un 10% menos de combustible. Esta reducción de consumo se debe principalmente a que el vehículo líder rompe la resistencia al aire para los vehículos

seguidores, además de mantener una velocidad uniforme, reduciendo así la cantidad de acelerones que los vehículos deben de hacer para mantener distancia con los demás camiones.

- Optimización de ruta y dirección: los sistemas de administración de flotas invierten mucho en la optimización de ruta, esto afecta directamente la eficiencia. V2V puede asistir facilitando la dirección y ubicación del destino.

Algunos de los puntos negativos que debemos de considerar son:

- Riesgos de seguridad: una brecha que ocurra en V2V puede tener resultados catastróficos. Un hackeo podría provocar una pérdida total del control del vehículo.
- Problemas de compatibilidad: para adaptar correctamente este sistema de comunicación es absolutamente necesario que todos los vehículos en la carretera lo implementen y que se puedan entender entre sí. Esto es un problema por los diferentes fabricantes intentando empujar su propia tecnología al mercado.
- Problemas de privacidad: aún no existen regulaciones específicas del gobierno, por lo que las empresas privadas podrían aprovecharse para vender información privada de sus usuarios. El seguimiento de un vehículo y la monitorización de los hábitos de conducción pueden ser fácilmente obtenidos por los fabricantes.

Para implementar V2V se pueden implementar varias tecnologías. En 2019 hubo un intento de conectar los coches por V2V basado en WiFi, pero la Unión Europea (UE) ha decidido no apostar por esta tecnología, al igual que hacen China o Estados Unidos [14].

Otras dos alternativas para implementar V2V son tecnología radio frecuencia o por luz visible, vamos a profundizar en la primera [3]:

- En el estándar IEEE 802.11p [7] se define el uso de la banda a 5.9 GHz llamada Dedicated Short Range Communications (DSRC) para la industria automotriz con aplicaciones de conducción inteligente y prevención de accidentes. En la Unión Europea los sistemas de peajes usan la banda de 5.8 GHz, por esta proximidad en frecuencia hacen falta filtros RF paso banda muy precisos. El mayor reto es la coexistencia junto con WiFi y algunas bandas de LTE.

- La comunicación por luz visible (VLC) es una alternativa a RF y LTE, se basa en comunicación óptica remota, usando emisores y receptores dentro de los faros y pilotos de los vehículos. La transmisión ocurre por modulación de la luz emitida. Es una solución relativamente de bajo coste que no interfiere con otras tecnologías [4].

Si comparamos RF y VLC podemos sacar algunas conclusiones:

- RF no necesita Line of Sight (LOS) para comunicarse con un vehículo, pero en VLC es esencial. Usando radio se pueden ignorar los obstáculos entre emisor y receptor, permite enviar hasta 10 mensajes multidireccionales por segundo a todos los vehículos en su proximidad, pero en VLC cualquier obstáculo puede bloquear por completo la comunicación.
- Un sistema de posicionamiento basado en VLC tiene una exactitud de decenas de centímetro, en cambio, en RF pueden ser varios metros de diferencia entre la posición calculada y la real. VLC es más preciso y conveniente a cortas distancias.
- RF interfiere con frecuencias de otras tecnologías, y esto es un problema serio ya que las bandas altas están cada vez más ocupadas y darán aún más problemas con el paso del tiempo [3].
- La luz visible puede verse afectada por fenómenos climáticos como lluvia, nieve ó niebla, condiciones de alta humedad que provocarían dispersión de la emisión Lambertiana reduciendo su alcance. El fenómeno más disruptivo para las VLC es la caída de nieve, puede reducir la distancia efectiva de una VLC de 20% a 80% [5]. La tecnología RF es sensible a interferencias electromagnéticas y VLC a la luz solar.
- El espectro luminoso tiene una banda de 300THz que no está regulada, a diferencia de RF.
- Los bajos tiempos de conmutación de los emisores ópticos nos permiten alcanzar anchos de banda de cientos de MHz. RF permite altos regímenes binarios, pero son mucho más complejos y costosos de implementar [3].

Este estudio se centra en la tecnología VLC, no se toca RF. Esto no quiere decir que no se puedan usar ambas ambas conjuntamente, en cambio puede ser muy interesante complementar un sistema radio con VLC.

Lo que respecta a la implementación, la información deberá ser codificada y modulada antes de transmitirse. El diagrama de bloques está en la Fig.2.2.[1]. Deberá de haber unos pilotos traseros en el vehículo con varios receptores, estos recibirán la señal y la amplificarán. La señal tendrá que pasar por un amplificador de transimpedancia (TIA), ser procesada, demodulada y decodificada, en ese orden.

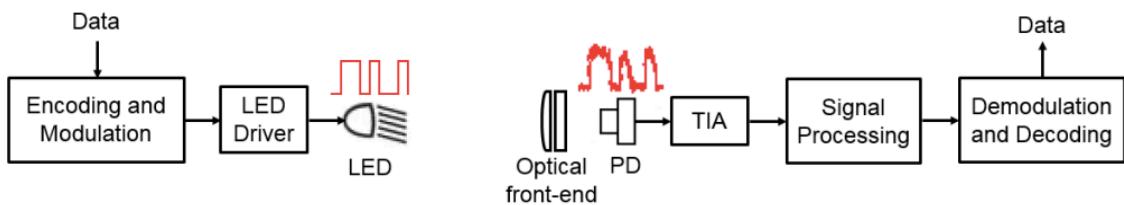


Figura 2.2. diagrama de bloques del transmisor y del receptor VVLC. A la izquierda está el transmisor, a la derecha está el receptor VLC.

Para que dos vehículos se comuniquen por VLC hay otra alternativa, se muestra un esquema del funcionamiento en la Fig.2.3, obtenida de [6]. Usando de receptor una cámara que capture imágenes y que por técnicas de procesado de imagen pueda interpretar la señal recibida.

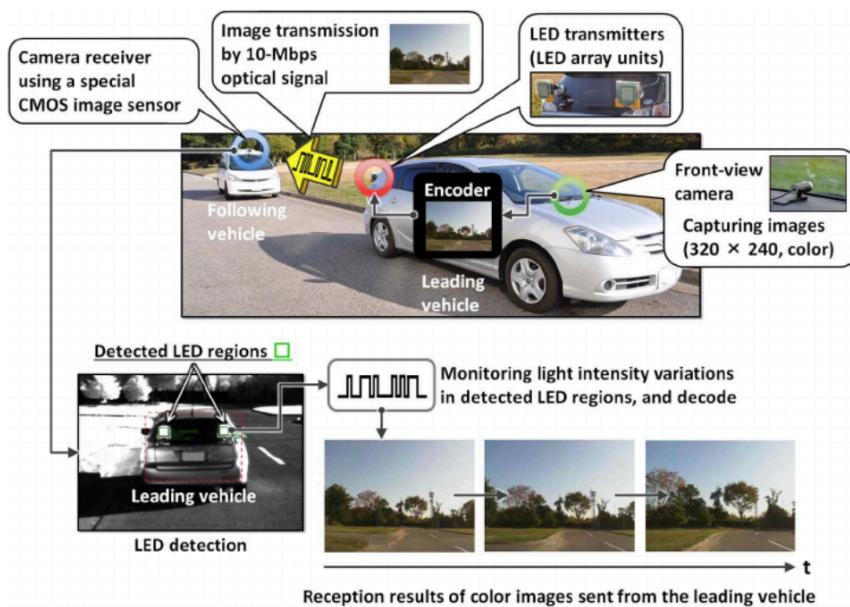


Figura 2.3. Funcionamiento de VLC empleando transmisores LED y una cámara receptora. En este caso, el vehículo líder emite una señal por sus pilotos traseros y el vehículo seguidor utiliza una cámara con sensor CMOS como receptor. Esta técnica requiere mayor capacidad de computación.

Para enviar los datos por luz visible se debe modular la señal primero.

La modulación es la forma en la que la luz varía para representar los diferentes símbolos. Para que la señal pueda ser decodificada, la señal antes debe de ser modulada en un valor positivo cercano al nivel en continua. La frecuencia será lo bastante alta como para ser imperceptible al ojo humano.

Las Single-Carrier Modulation (SCM) se consideran las más robustas, ya que solo hace falta que el LED se pueda encender un número finito de veces. Se pueden alcanzar varios Mbps de data-rate. Para alcanzar mayores anchos de banda se requieren técnicas avanzadas de ecualización.

Las Multi-Carrier Modulation nos permiten alcanzar flujos de información de varios Gbps, pero la complejidad computacional es grande. Las MCM tienen mucho mayor BER cuando la SNR es baja, esto es una característica crucial para aplicaciones en exteriores, por ello es preferible el uso de SCM para comunicación entre vehículos [15].

Tras la modulación la información no se envía directamente, sino que debe de ser codificada antes. La información se formateará en paquetes, estos tendrán una cabecera y un número predefinido de bits. Unos 400 bits suelen ser suficientes como para enviar la velocidad, aceleración, posición y dirección de un vehículo, pero es posible que con el paso del tiempo sea útil enviar más datos, como los obtenidos por V2I.

2.2. Modelado del canal y del ruido

El estudio de una simulación no es adecuado si el modelo no es lo bastante realista. En nuestro caso el modelo puede dividirse en dos partes: el modelo del vehículo líder y del seguidor, y el modelo del canal de transmisión.

En cualquier sistema VLC la potencia óptica de una señal es modulada y la señal resultante se propaga por el espacio libre hasta ser recibido por un fotodiodo y ser convertido en corriente eléctrica. El canal es complejo ya que se degrada por las condiciones climáticas, por luz solar o por iluminación artificial, esta degradación se separa en dos categorías: atenuación y ruido.

De esta manera se puede modelar el canal como un sistema determinista linear time-invariant (LTI) e IM/DD , tal como se muestra en la Fig.2.4:

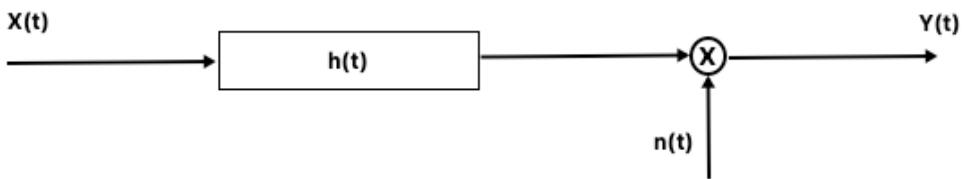


Fig.2.4. Diagrama de bloques del sistema LTI.

Donde $h(t)$ es la respuesta al impulso del canal, $n(t)$ es el ruido aditivo, $X(t)$ es la potencia de entrada e $Y(t)$ es la corriente de salida del sistema. Realmente $Y(t)$ representa la photocorriente $i_p(t)$ producida por el fotodiodo y $X(t)$ es la equivalente potencia modulada producida por el emisor LED.

$$Y(t) = X(t) * h(t) + n(t) \quad (1)$$

Uno de los inconvenientes de usar un fotodiodo es que captura todos los fotones que le llegan. La señal de interés se mezclará con las interferencias degradando la calidad de la misma.

Algunas de estas interferencias son la luz solar y las luces artificiales, la degradación que ocurre en la señal de información es la alteración de la amplitud y la aparición de ruido.

La luz diurna si entra en el FOV del fotodiodo, aumentará el número de fotones entrantes, aumentando la intensidad de salida del fotodiodo, creando interferencia. De esta manera la señal al salir del amplificador de transimpedancia tendrá una ligera corriente en continua, pero ésta puede ser fácilmente eliminada. La contribución de las luces artificiales suele ser mucho menor.

En cambio el ruido es una causa de la estructura interna del fotodiodo receptor, básicamente hay dos tipos de ruido en este tipo de diodo: ruido térmico y ruido shot.

El ruido térmico es independiente de la luz solar, pero el shot está directamente relacionado con la exposición solar, o con luces artificiales fuertes, como pueden ser los faros de otro vehículo a corta distancia.

La luz solar de día puede provocar una variación del ruido de unos $20dB$ a lo largo de todo el día, siendo el máximo en la salida del Sol por la mañana y en la puesta por la tarde [3].

Toda la luz artificial que llega a causa de reflejos en el suelo, en edificios o en superficies húmedas se puede considerar negligible, ya que comparado con la luz que sigue un path recto la contribución es mínima. Incluso se ha observado que con carretera húmeda la transmisión puede mejorar.

En un fotodiodo, la incidencia de la luz natural y artificial provocará dos tipos de ruido, el ruido shot que depende de las condiciones ambientales, y el ruido térmico, que es independiente de la luz.

Como principal fuente de ruido vamos a considerar la luz solar, así mismo consideramos dos tipos de exposición a la luz solar, la directa y la indirecta, mostradas en Fig.2.5 y Fig.2.6, respectivamente. Esta última es un subproducto de la primera y ocurre por la refracción de la luz sobre superficies que acaba llegando al receptor.

El ruido shot provocado por la exposición directa al Sol, variará a lo largo del día, tal como se ilustra en las siguientes figuras:

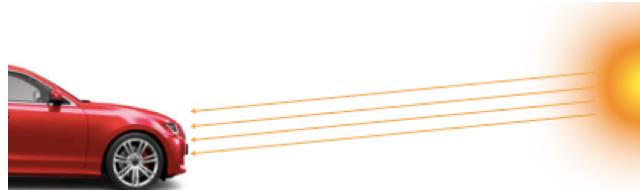


Fig.2.5. Representación gráfica de la exposición solar directa. Por la mañana o en la puesta cuando la posición del Sol mira directamente dentro del FOV de los receptores. El ruido shot será máximo en este caso, llegando a saturar el fotodiodo receptor.



Fig.2.6. Representación gráfica de la exposición solar a medio día. El Sol ya no apunta directamente dentro del FOV de los receptores. El ruido shot será menor.

Se considerará el ruido como blanco, gaussiano e independiente de la señal transmitida. Por razones de simplicidad no tendremos en cuenta otras fuentes de luz como pueden ser los faros de otros vehículos, farolas o luces intermitentes de vehículos de emergencia. Cuando la luz incide sobre la superficie sensible del fotoreceptor se produce ruido de tipo shot cuya varianza podemos calcular de la siguiente manera:

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

La varianza total del ruido se puede expresar:

$$\sigma^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{termico}^2 \quad (3)$$

Donde σ_{shot}^2 caracteriza el ruido shot, $\sigma_{termico}^2$ caracteriza el ruido provocado por la temperatura interna, q es carga del electrón y B es el ancho de banda del receptor. Por otra parte I_{DC} es la photocorriente del ruido, está definida como:

$$I_{DC} = \int_0^{\infty} r(\lambda)E_{sol}(\lambda)gA \quad d\lambda \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la posición de los detectores de los faros, los momentos del día en los que la I_{DC} es máxima coinciden con el amanecer y el atardecer, ya que durante esas horas la baja posición del sol y la incidencia solar aumenta. Si la exposición solar es muy grande puede que se saturen los receptores, dejando de funcionar correctamente.

En este estudio se supondrá que la incidencia solar es indirecta, porque si fuese directo el nivel de irradiancia solar sería demasiado alto, llegando a $E_{sol} = 100mW/cm^2$ [11].

2.3. Parámetros del canal

El canal se modela como un modelo determinista, ya que se necesita describir la posición y orientación de los emisores y receptores en el entorno de simulación. Como es un canal óptico entonces también será un canal Intensity Modulation / Direct Detection (IM/DD), es decir, la modulación se hará en potencia y la recepción por detección directa de la luz.

Para comparar los resultados de nuestras simulaciones, calcularemos dos parámetros, la respuesta en continua ($H(0)$) y la Signal to Noise Ratio (SNR).

La principal fuente de degradación es la atenuación debido a la respuesta al impulso $h(t)$. Como la respuesta en frecuencia es relativamente plana a bajas frecuencias, se puede aproximar por su ganancia en continua $H(0)$. Siendo P_r y P_t la potencia recibida y la transmitida, podemos hacer la siguiente expresión:

$$H(0) = \frac{P_r}{P_t} \quad (5)$$

La SNR dependerá del valor de $H(0)$ y del ruido, en el Capítulo 3 se profundiza en la explicación detallada de la obtención de cada parámetro.

Para obtener la expresión de $H(0)$, consideramos la configuración mostrada en Fig.2.7, donde un LED emite una señal con ángulos θ y φ , la señal se recibe por el fotodiodo con un área sensible A_r , y un ángulo de incidencia ψ , donde θ es el ángulo de emisión, φ es el ángulo de recepción, d representa la longitud del enlace LOS y A_{eff} es el área efectiva [1].

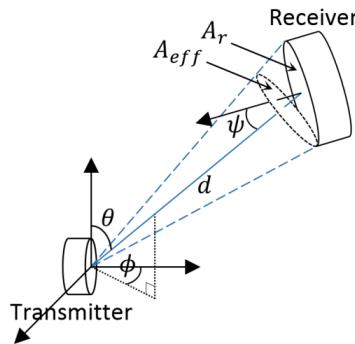


Figura 2.7. Diagrama de la geometría de emisor y receptor.

Como el receptor es un fotodiodo y no el ojo humano, vamos a trabajar en unidades radiométricas y no fotométricas.

Siendo $R(\theta, \varphi)$ el patrón de radiación del LED, la intensidad de radiación de la fuente $I_{e,s}(\theta, \varphi)$, será:

$$I_{e,s}(\theta, \varphi) = P_t R(\theta, \varphi) \quad (6)$$

De la misma manera podemos definir la irradiancia en el receptor, cómo:

$$E_{e,r}(\theta, \varphi) = \frac{I_{e,s}(\theta, \varphi)}{d^2} = \frac{P_t R(\theta, \varphi)}{d^2} \quad (7)$$

Donde $I_{e,s}(\theta, \varphi)$ se mide en W y $E_{e,r}(\theta, \varphi)$ se miden en $W \cdot m^{-2}$.

La potencia óptica media P_r tendrá la siguiente forma:

$$P_r = E_{e,r}(\theta, \varphi)A_{eff}(\psi) \quad (8)$$

Siendo $A_{eff}(\psi)$ el área efectiva del receptor expresado en m^2 , siendo $A_{eff}(\psi) = A_r \cos(\psi)$ para $0 \leq \psi \leq \pi/2$. El receptor tiene un concentrador óptico de ganancia $g(\psi)$ junto con un filtro de transmisión $T(\psi)$, el FOV se representa por ψ_c . Definidos estos parámetros podemos definir la respuesta en continua:

$$H(0) = \frac{A_r}{d^2} R(\theta, \varphi) T(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad \text{si } 0 \leq \psi \leq \psi_c \quad (9)$$

Podemos concluir que la atenuación se incrementa con un factor de distancia al cuadrado y tiene alta dependencia de la orientación del receptor. Podemos expresar las pérdidas del trayecto (Path Loss) como:

$$PL[dB] = -10 \log(H(0)) \quad (10)$$

Para calcular la SNR , tenemos la expresión del ruido en la fórmula (3), queda definir la potencia recibida P_r , tendría la siguiente fórmula:

$$S = r^2 H(0)^2 P_t^2 \quad (11)$$

Por lo que la expresión final de señal potencia quedaría [1]:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{r^2 H(0)^2 P_t^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{termico}^2} \quad (12)$$

Dónde r representa la respuesta del fotodiodo.

2.4. Introducción a faros matriciales

La mayoría de coches tienen en sus faros lámparas halógenas, es el mecanismo más sencillo, y se basa en que produce luz al pasar corriente por el filamento del interior de la bombilla.

La mayor capacidad de computación de los ordenadores actuales nos ha permitido generar formas ópticas del faro más eficientes. Fueron apareciendo los faros halógenos sin filamento, se reemplazo el filamento por gas halógeno y se dejó de usar reflectores metálicos por unos de plástico.

A finales de los 90 se empezaron a fabricar los faros de xenón, que son lámparas de descarga de gas, dando una luz más blanca y un haz más luminoso. En la actualidad los faros halógenos y xenón son los más habituales, en la Unión Europea ya se prohibió la fabricación de más lámparas halógenas.

Han aparecido en el mercado los faros tipo LED y láser, según los fabricantes la tecnología LED sale unas 5 veces más cara que la halógena, pero tiene claras ventajas tanto tecnológicas como ecológicas. La vida útil de unas lámparas LED es de unas 20-25.000 horas, incluso superando la vida útil del propio vehículo.

Los fabricantes han decidido poner todos los LED en serie, de esta manera si uno falla, el resto de LED no pueden funcionar y hace falta cambiarlos todos. El uso que daremos a los faros y pilotos traseros deberá de cumplir la reglamentación europea [5]. Nos centraremos en faros de tipo LED, aunque en el mercado ya existan otros tipos como los láser.

Los faros matriciales son el objeto de estudio de este TFG, es decir, faros con múltiples emisores en forma rectangular, formando una matriz con un número de filas y de columnas que pueden encenderse y apagarse de forma dinámica e independiente. Hay dos ejemplos de esta tecnología en las imágenes Fig.2.8.a y Fig.2.8.b.

En concreto este tipo de faro funciona junto con la unidad electrónica de control (ECU) y un dispositivo de detección de tráfico con el fin de optimizar la iluminación de noche. Este sistema requiere de la capacidad tan dinámica de control que tienen los LED para tener una baja latencia y alta eficiencia. Este sistema nos permita crear regiones de sombra para no deslumbrar a otros conductores, y mejorar la iluminación en curva encendiendo determinados LED.



Fig.2.8. (a) Ejemplo comercial de faro tipo Matrix Headlights producido por Skoda para el modelo Superb, actualmente en el mercado. En la imagen se puede apreciar la cantidad de segmentos LED que contiene esta unidad. **(b)** Faro Matrix LED de Audi, puede encender o apagar cualquier módulo de los LED que se requiera.

En la actualidad muchos modelos de coche vienen al mercado con faros LED matriciales, esto no quiere decir que utilicen la comunicación V2V basada en VLC, pero es una clara ventaja poder darles un doble uso para iluminar y comunicarse por V2V. Marcas como Audi ó BMW lanzan vehículos con faros capaces de evitar deslumbrar a los demás conductores o peatones, se muestra el funcionamiento en la Fig.2.9:



Figura 2.9. Matrix LED System de Audi, actualmente en el mercado. Hoy en día, vehículos de ciertas marcas como BMW o Daimler proporcionan asistencia al conductor, marcando con luz el trayecto correcto a seguir, creando una alfombra de luz y atenuando el resto, además de evitar deslumbrar al vehículo que circula delante, como se muestra en la imagen, donde los faros cortan su emisión en dirección a otros vehículos, mientras iluminan el resto de la carretera para no perder mucha visibilidad.

El vehículo conectado deberá de tener una estructura electrónica suficiente como para poder recolectar suficiente información de las condiciones de conducción y poder encapsular este mensaje y poder enviarlo correctamente.

En los faros del vehículo deberán de haber emisores ópticos adecuados para enviar información, en el mercado existen modelos de lámparas LED que cumplen con los requerimientos de potencia de emisión y velocidad de comutación.

Capítulo 3. Desarrollo de la herramienta de simulación

Para realizar la simulación y visualización de los resultados se ha creado una aplicación denominada V2V_VLC_MatrixHeadlights, tal como su nombre indica las simulaciones se harán empleando la comunicación por luz, se supone que no hay ningún obstáculo entre los vehículos u objetos que impidan LOS entre receptor y emisor.

Se ha partido de un código previo de simulación para faros simples de un solo emisor.

El software elegido para esta tarea fue Matlab App Designer, el cual es una versión posterior a Matlab GUIDE, razón de ello fue una mejor interfaz gráfica, además de no estar denominada por Matlab como obsoleta. Incluye un editor integrado que nos ayuda completando ciertas partes de código [16].

3.1. Requisitos de diseño

El software que se va a desarrollar debe de cumplir unos requisitos de funcionamiento:

1. Se debe de poder cambiar entre los posibles escenarios y modificar ciertas características, como, el radio de curva, la anchura del carril y la longitud del tramo.
2. Se debe de poder modificar las dimensiones más características de ambos vehículos, con posibilidad de configurar cada uno por separado.
3. Los faros matriciales del vehículo emisor deben de ser modificables. El número de emisores, la matriz que forman, la distancia entre cada fila y columna de emisores. Así mismo se debe de poder configurar la potencia, orientación y el orden Lambertiano de cada emisor LED.
4. En el vehículo receptor se deben de poder configurar los parámetros de recepción, el FOV, el área de detección y ganancia óptica.
5. Para estudiar diferentes niveles de ruido y anchos de banda, se debe de poder configurar la intensidad de la incidencia directa e indirecta de la luz, y el ancho de banda.

3.2. Flujograma

El programa de simulación desarrollado está compuesto por una aplicación principal y seis aplicaciones auxiliares, tal como se muestra en la Fig.3.1. De las seis, cinco sirven para configuraciones de vehículos, de receptores, potencia, directividad, apuntamiento de los emisores, y la última sub-aplicación se emplea para poder visualizar el diagrama de iluminación de ambos faros o de cada uno por separado.

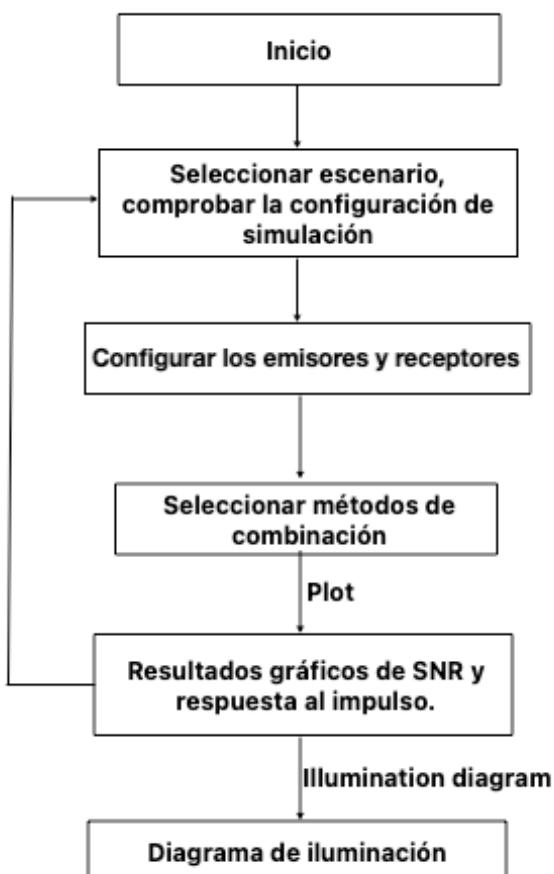


Figura 3.1. Flujograma de la aplicación software desarrollada.

Para usar esta aplicación hay que seleccionar el escenarios y las configuraciones y para ejecutar la simulación hay que presionar sobre **Plot**, luego se puede volver a introducir otra configuración, o presionar sobre **Illumination diagram** para mostrar la iluminación producida por los faros.

3.3. Descripción del simulador

En cada escenario solo utilizaremos 2 vehículos por simplicidad, siempre en configuración de caravana, es decir, un vehículo detrás del otro en el mismo carril o en carriles paralelos. El vehículo que circula delante será el líder y el vehículo de atrás será el seguidor. Para este estudio lo que nos interesa son las posiciones relativas de los transmisores y receptores dentro de los escenarios. Para ello definimos geométricamente cada vehículo y a partir de las dimensiones de cada vehículo estimamos las posiciones de todos los transmisores y receptores ópticos.

En cada apartado se explicará también el uso y configuración dentro de la aplicación.

3.3.1. Configuración de vehículos

En un entorno urbano circulan una gran cantidad de vehículos con diferentes prestaciones y usos. La mayoría son utilitarios como coches compactos, berlinas, familiares con dimensiones comunes, pero también están presentes vehículos más grandes con dimensiones mucho mayores. Debido a estas dimensiones la SNR recibida podría ser diferente a la estimada, ya sea por culpa de una mayor altura o por la distribución geométrica del vehículo. Para hacer una buena aproximación a la realidad debemos de considerar todo tipo de vehículos, desde grúas móviles de enorme altura y anchura, hasta los automóviles deportivos que tienen mayor anchura y baja altura, por alguna de estas razones se podrían recibir peor señal que un utilitario común.

Las dimensiones básicas de todo vehículo son la longitud, $L[m]$, suelen variar entre los 6 y los 2.5 metros. La anchura, $W[m]$ suele variar menos por razones de estabilidad en curva y se mantiene en el rango de 2.2 y 1.8 m. La altura, $H[m]$ suele ser mayor en los Sport Utility Vehicle (SUV) sobrepasando los 2.3 m y se reduce en los superdeportivos, llegando a los 1.2 m.

En la Figura 3.2.(a) se puede apreciar la geometría típica de un automóvil y en la Fig.3.2.b hay algunos ejemplos reales, extraídos de[9][10].



Modelo	Longitud [m]	Altura [m]	Anchura [m]
Scania R 360	5.933	2.875	2.476
Smart fortwo	2.695	1.555	1.893
Jeep Wrangler	4.334	1.841	1.894
Ferrari SF90	4.710	1.186	1.972

Fig.3.2. (a) Dimensiones de Ferrari SF90. (b) Dimensiones de diversos vehículos presentes en un entorno urbano.

A diferencia de las dimensiones anteriores, los parámetros que nos hacen falta son más difíciles de encontrar, estos son las posiciones relativas de los faros y pilotos traseros, W_f (front width), W_b (back width), H_f (front height), H_b (back height).

Los faros y pilotos deben respetar la reglamentación, tanto en altura como en separación, oficialmente la normativa dice para los faros delanteros :

- En anchura: el borde de la superficie aparente en la dirección del eje de referencia más alejado del plano longitudinal medio del vehículo no deberá hallarse a más de 400 mm del borde exterior extremo del vehículo. La distancia entre los bordes interiores de las dos superficies aparentes en la dirección del eje de referencia no será inferior a 600 mm. Esta distancia podrá reducirse a 400 mm cuando la anchura máxima del vehículo sea inferior a 1 300 mm.
- En altura: deben de estar por encima del suelo.

Además, la normativa europea dicta las siguientes normas para los pilotos traseros:

- En anchura: el punto de la superficie aparente en la dirección del eje de referencia más alejado del plano longitudinal medio del vehículo no deberá hallarse a más de 400 mm del borde exterior extremo del vehículo. La distancia entre los bordes interiores de las dos superficies aparentes en la dirección de los ejes de referencia será no menos de 600 mm; esta distancia podrá reducirse a 400 mm si la anchura máxima del vehículo es inferior a 1 300 mm.
- En altura: obligatoriamente deben de estar a una distancia del suelo de 350 mm como mínimo y 1 500 mm como máximo. [7]

Conocida la posición y las dimensiones de un vehículo, el cálculo de las coordenadas de los faros delanteros y traseros es muy simple. Así para el vehículo situado en las coordenadas (x_1, y_1, z_1) , que definen su centro geométrico, las posiciones de los faros en ausencia de rotación será $(x_1 - L/2, y_1 + W_f/2, H_f)$ y $(x_1 - L/2, y_1 - W_f/2, H_f)$, para los faros derecho e izquierdo respectivamente. De forma análoga para los pilotos traseros obtenemos $(x_1 + L/2, y_1 + W_b/2, H_b)$ y $(x_1 - L/2, y_1 + W_b/2, H_b)$ para el piloto derecho e izquierdo respectivamente. Las primeras dos coordenadas las utilizaremos para calcular la posición de los transmisores del vehículo seguidor, y las dos últimas para estimar la posición de los receptores en los pilotos traseros del vehículo líder.

En el desarrollo de la aplicación se ha tenido en cuenta la variabilidad de dimensiones que se pueden presentar en los faros comerciales, por ello casi todos los parámetros son regulables, la altura, la anchura, las posiciones de cada faro, la potencia, la orientación de iluminación de cada transmisor y la directividad.

Como vehículo más representativo se ha elegido un Seat Leon. Los valores de ambos vehículos líder y seguidor, en principio corresponden con las dimensiones de un Seat Leon, se muestran en la siguiente figura:



Fig.3.3. medidas aproximadas de modelos utilizados para vehículo seguidor y líder.

En la aplicación, para realizar la configuración de vehículos, se debe de presionar sobre Vehicle configuration, Fig.3.4.(a). Se abre el subprograma mostrado Fig.3.4.(b).

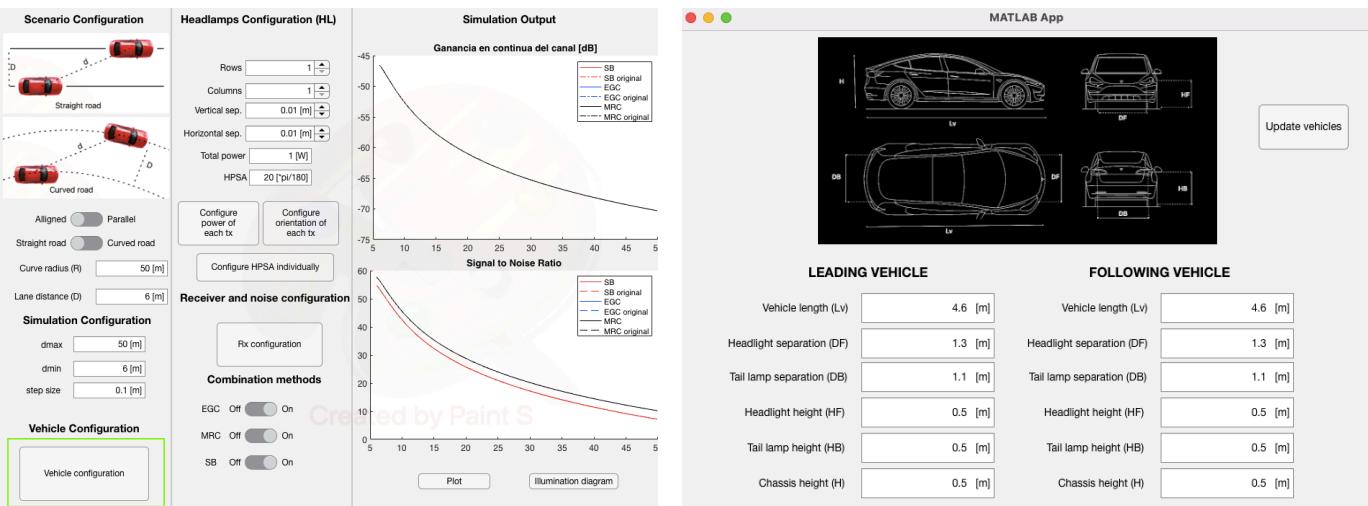


Fig.3.4. (a) La opción Vehicle Configuration está dentro del recuadro verde. **(b)** Subprogramma para configuración de vehículos de la simulación.

Deben de aparecer los siguientes parámetros configurables: Vehicle length, la altura del vehículo, Headlight separation, separación de faros delanteros, Tail lamp separation, separación de pilotos traseros, Headlight height, altura de faros delanteros, Tail lamp height, altura de pilotos traseros y Chassis height, altura del chasis.

Después de introducir las medidas de los vehículos a simular, es necesario presionar sobre Update vehicles, para confirmar y guardar los datos introducidos.

3.3.2. Configuración de faros y receptores

El número de receptores en el vehículo líder será fijo, pero cada faro del vehículo emisor tendrá una matriz de diodos LED con un cierto número de filas y columnas, cada faro con una P_t , estos valores serán totalmente ajustables en la aplicación, se podrá modificar la potencia y apuntamiento de cada transmisor individualmente. Así mismo se podrá regular la separación entre emisores tanto en vertical como en horizontal.

Para modelar el comportamiento de los emisores en los faros se considera que las lámparas LED emiten siguiendo un patrón Lambertiano con simetría de revolución respecto a su eje de referencia, de modo que las emisiones dependan únicamente del ángulo azimutal φ , de acuerdo con la ecuación:

$$R(\varphi) = \frac{(m + 1)\cos^m(\varphi)}{2\pi} \quad (13)$$

El parámetro m determina la directividad del emisor, se denomina factor Lambertiano, cuanto mayor sea la m , mayor será la directividad. Este parámetro está directamente relacionado con el Half Power Semi Angle (HPSA) de la siguiente manera:

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))} \quad (14)$$

Con estas fórmulas ya es posible obtener los valores de directividad y potencia para un determinado emisor. Los valores típicos en el mercado son LED con pocos Vatios de potencia y un HPSA de 20°.

Un emisor está caracterizado por cuatro parámetros: su vector de posición $\vec{r}_e = (\vec{x}_e, \vec{y}_e, \vec{z}_e)$, su vector de orientación \vec{n}_e , su directividad m y su potencia transmitida P_t .

Por otra parte los receptores suelen estar compuestos por la unión de un fotodiodo PIN, un concentrador y un filtro óptico. La potencia final recibida por este conjunto de elementos se puede definir con la siguiente fórmula:

$$Pr(\psi) = \begin{cases} E_r A_g \cos(\psi) & \text{si, } 0 \leq \varphi \leq FOV \\ 0 & \text{si resto} \end{cases} \quad (15)$$

Donde E_r representa la irradiancia recibida, g representa la ganancia del concentrador y ψ es el ángulo de incidencia respecto a la normal. La ganancia del concentrador no formador de imagen es independiente del ángulo ψ y sólo depende del FOV del receptor según la siguiente ecuación :

$$g = \left(\frac{n}{\sin(\text{FOV})} \right)^2 \quad (16)$$

Donde n es el índice de refracción del concentrador.

Teniendo en cuenta estas expresiones podemos ver que un receptor se puede definir completamente por cinco parámetros: $\vec{r}_r = (\vec{x}_r, \vec{y}_r, \vec{z}_r)$, su vector de orientación \vec{n}_r , la ganancia óptica g y su área de detección A . La distancia entre la lámpara emisora y receptora se puede expresar de la siguiente manera:

$$d = \sqrt{(x_r - x_e)^2 + (y_r - y_e)^2 + (z_r - z_e)^2} \quad (17)$$

El ángulo de emisión φ se puede expresar:

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{(\vec{n}_e(\vec{r}_r - \vec{r}_e))}{d} \quad (18)$$

Respectivamente el ángulo de recepción ψ será:

$$\psi = \cos^{-1} \frac{(\vec{n}_r(\vec{r}_e - \vec{r}_r))}{d} \quad (19)$$

Para modelar los faros matriciales se usarán 4 variables, Fig.3.5:

- **Columns:** M , define el número de columnas de la matriz de emisores LED. Sus valores pueden ir de 1 a 10, la separación entre las columnas es regulable con otro parámetro. El límite máximo de columnas es para no hacer simulaciones muy pesadas, ya que a partir de 10 se ve muy poca diferencia en los resultados. Separación entre columnas regulable con otro parámetro.
- **Rows:** N , define el número de filas de emisores de la matriz de emisores LED. Sus valores pueden ir de 1 hasta 10, la separación entre filas es regulable con otro parámetro.

- Vertical separation: ΔV , parámetro que define la separación vertical entre emisores. Puede tomar valores desde 0.01m hasta 0.2m. Los valores altos de este parámetro están pensados para cuando el número de filas es reducido.
- Horizontal separation: ΔH , parámetro que define la separación horizontal entre emisores. Puede tomar valores entre 0.01m hasta 0.2m. Los valores altos de este parámetro están pensados para cuando el número de columnas es reducido.

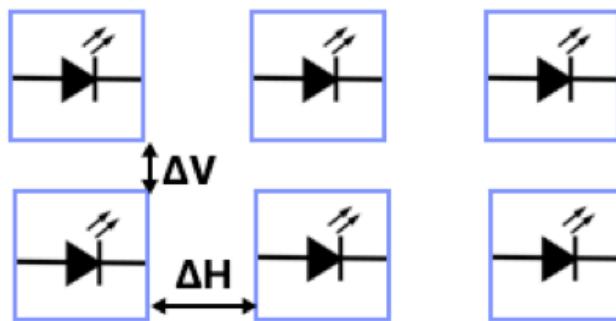


Fig.3.5. Representación gráfica de los emisores de un faro matricial, en este ejemplo, el faro es de 2 filas por 3 columnas, con una separación horizontal y vertical.

En la aplicación al inicio solo hay faros de un solo emisor (1 fila por 1 columna), esto se puede modificar presionando sobre los sliders que están en la sección Headlamps Configuration, Fig.3.6.

En esta sección podemos configurar la potencia, orientación y factor Lambertiano de cada emisor individualmente.

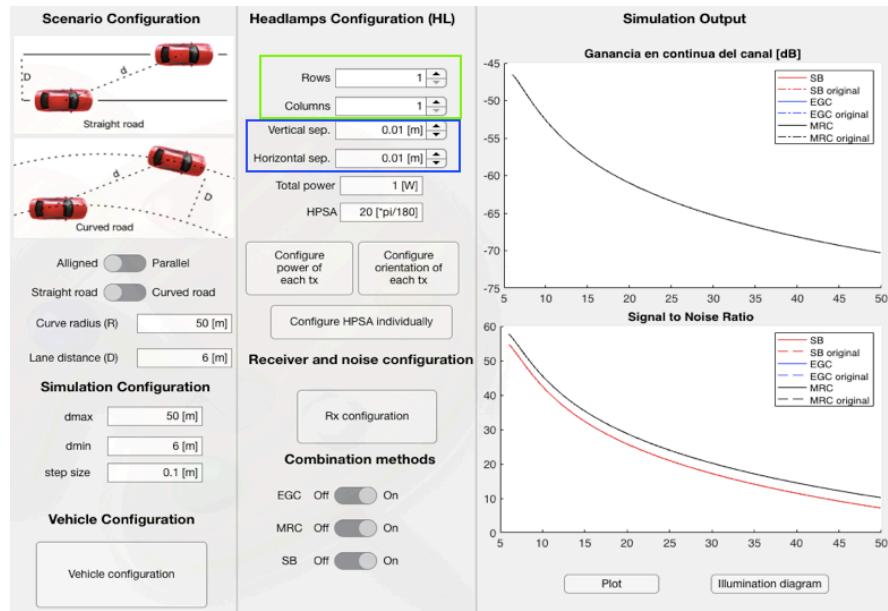


Fig.3.6. Ventana principal de la aplicación de simulación. Los sliders para modificar las filas y columnas de emisores del faro matricial aparecen dentro del rectángulo verde. Para modificar la separación entre filas y columnas de emisores aparecen dentro del azul.

Por ejemplo, si seleccionamos 2 filas y 5 columnas, tendríamos los siguientes faros de la siguiente figura:

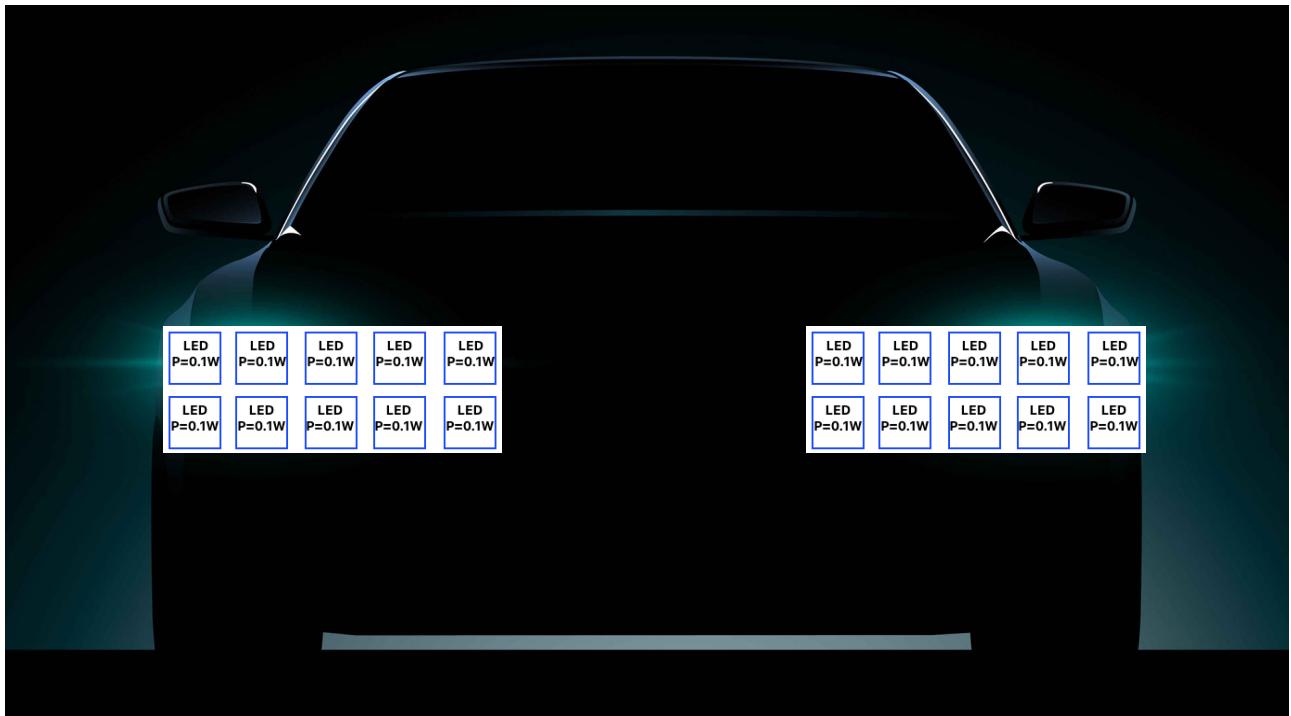


Fig.3.7. Se crearán los siguientes faros, por defecto se repartirá un vatio entre todos los emisores de cada faro, tendrán el mismo apuntamiento (0°) y orden Lambertiano de 2.3 correspondiente a un HPSA de 20° .

El siguiente paso será ajustar la potencia, orientación y el orden Lambertiano. Si se quiere distribuir una potencia uniformemente entre todos los emisores de un faro se debe de

introducir dentro de la casilla Total power. Si se quiere dar la misma directividad a todos los emisores, se debe de introducir en la casilla HPSA, de este modo se modificará el parámetro m de todos los emisores.

Para modificar los parámetros de los LED individualmente hay que presionar sobre el correspondiente botón dentro del rectángulo verde, Fig.3.8:

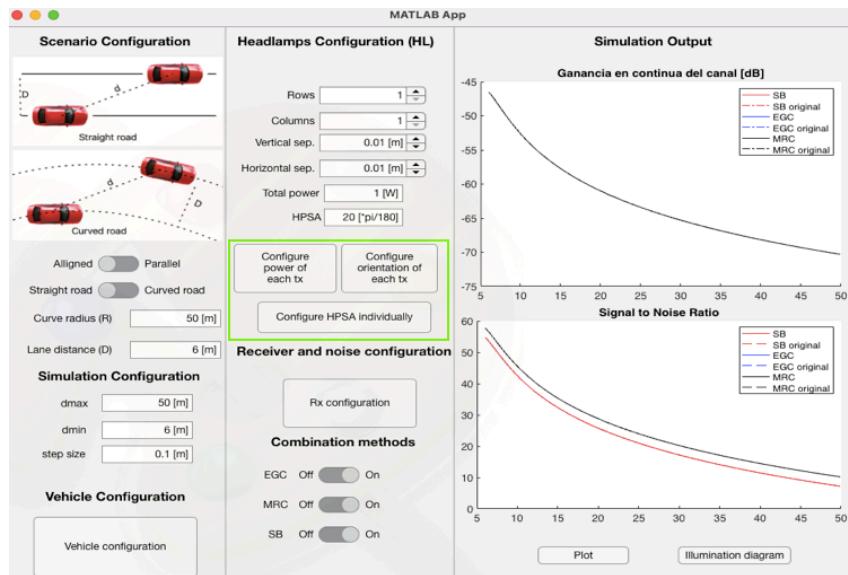


Fig.3.8. Cada uno de los tres botones nos abrirá un subprograma diferente.

- El primero de los subprogramas, Configure power of each tx, Fig.3.9:

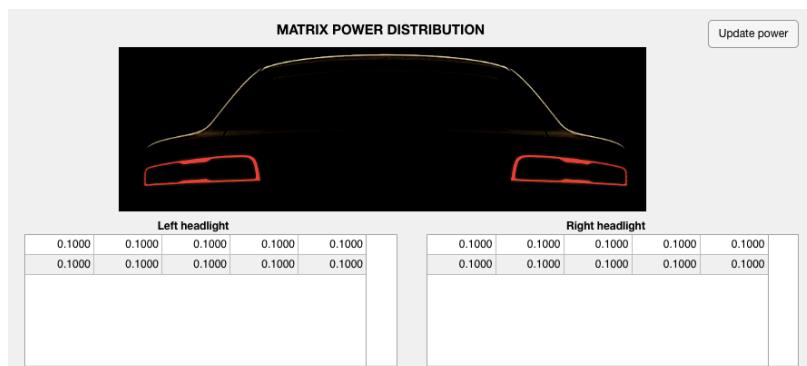


Fig.3.9. Ventana de configuración de las potencias de los emisores.

Cada casilla representa la potencia emitida por un emisor LED del faro matricial. Los valores están expresados en W.

Después de introducir los datos necesarios, es necesario presionar Update power, para confirmar y guardar los valores.

- El segundo subprograma, Configure orientation of each tx, Fig.3.10:

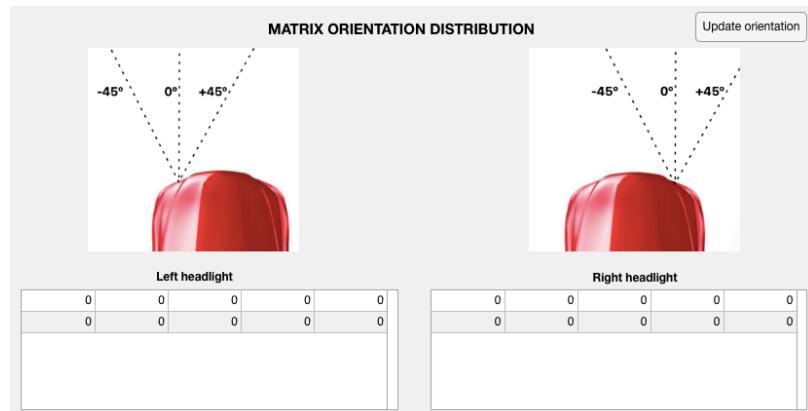


Fig.3.10. Ventana de configuración de las orientaciones de los emisores.

Los valores están expresados en grados sexagesimales. Los valores válidos están entre $[-90^\circ, 90^\circ]$, es decir, que se pueden orientar a la izquierda y a la derecha, respectivamente.

Al terminar de introducir los datos, se debe de presionar Update orientation.

- El tercer subprograma, Configure orientation of each tx, Fig.3.11:

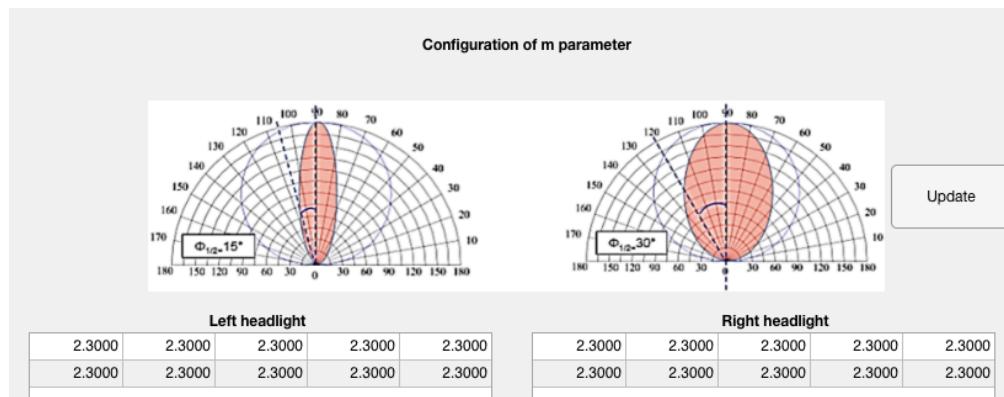


Fig.3.11. ventana de configuración del orden Lambertiano de los emisores.

Al terminar de configurar los ordenes Lambertianos, hay que presionar Update.

Ya sabemos que el orden Lambertino, se puede calcular como:

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))} \quad (20)$$

Este parámetro afecta a la directividad de los emisores, cuanto mayor m, mejor será la directividad de la emisión Lambertiana provocada por el emisor.

3.3.3. Calculo de parámetros del canal

Se modela este canal V2V para una configuración formada por 2 vehículos: un primer vehículo, denominado vehículo líder, que circula delante y un segundo vehículo, denominado 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 cambian su función, el líder recibe y el seguidor emite.

En tramos rectos, los dos tipos de canales son simétricos, pero en tramo curvo esta simetría se pierde.

En el caso más simple, el vehículo transmisor tendrá dos emisores y el vehículo receptor tendrá dos fotodiodos receptores, por lo que esto será una configuración MIMO con 4 Line Of Sight (LOS). Se muestra en la Fig.3.12.[8]:

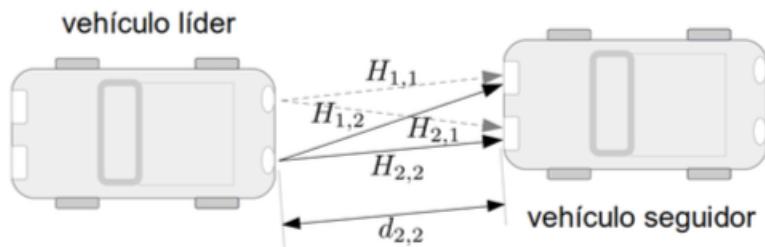


Fig.3.12. Representación gráfica del canal MIMO, usando 2 emisores LED.

Para explicar el funcionamiento del canal MIMO para faros matriciales, primero se explicará el canal para los faros LED con un emisor por faro, y después se extenderá al caso de faros matriciales, que será más complejo.

- Canal MIMO de 2 emisores [8]:

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del canal MIMO para 2 emisores y 2 receptores, se tomará como punto de partida la ecuación de la ganancia en continua de un enlace LOS.

En la Fig.3.13, cada rombo negro representa al LED emisor y los rombos verdes representan a los receptores. Se ilustra la contribución del emisor del faro izquierdo en el canal MIMO simple.

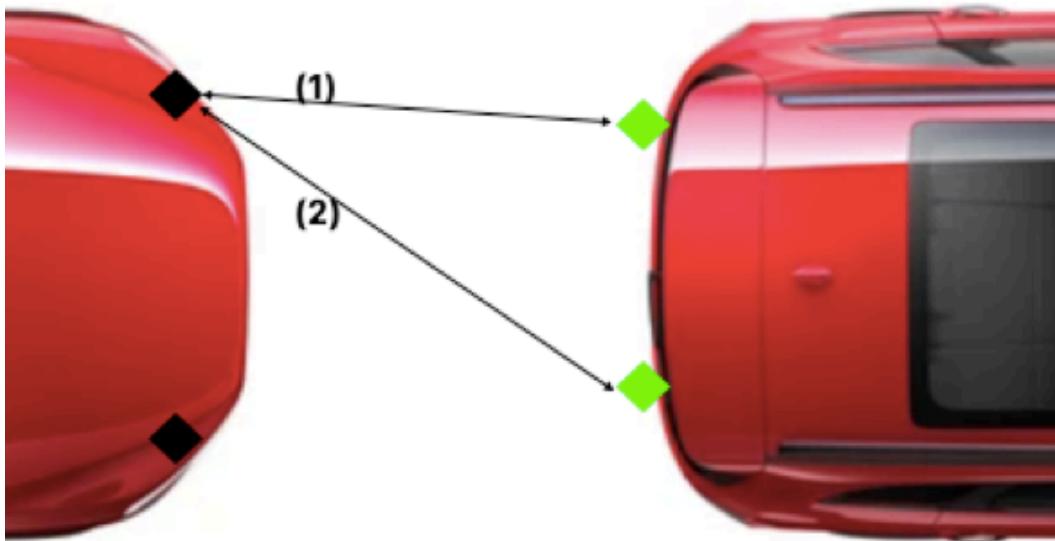


Fig.3.13. Representación gráfica del canal MIMO simple, donde (1) corresponde con $H_{1,1}$ y (2) con $H_{1,2}$.

Asumiendo que la ganancia en continua del enlace LOS formado por el emisor m -ésimo y el receptor n -ésimo puede escribirse como:

$$H_{m,n}(0) = \begin{cases} \frac{A}{d_{m,n}^2} R(\varphi_{m,n}) g \cos(\psi_{m,n}) & \text{si, } 0 \leq \varphi \leq FOV \\ 0 & \text{si, resto} \end{cases} \quad (21)$$

Donde $R(\varphi_{m,n})$ representa el patrón de emisión en la dirección de recepción, g representa la ganancia del concentrador, $\psi_{m,n}$ es el ángulo de recepción, A es el área de detección y $d_{m,n}$ es la distancia del enlace, la ganancia obtenida por el canal MIMO con unos pesos w_n será:

Donde $M = N = 2$ y el término $H_{m,n}$ se calcula aplicando la ecuación para $H_{m,n}(0)$.

$$H(0) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M H_{m,n}(0)w_n \quad (22)$$

Una vez conocida la respuesta al impulso de un canal LOS, puede ajustarse la ecuación a un canal MIMO simple de la siguiente manera:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M h_{m,n}(t)w_n \quad (23)$$

Si además consideramos que la respuesta al impulso es un conjunto de deltas desplazadas respecto al origen del tiempo de propagación de la señal para la distancia del enlace, es decir, $h_{m,n} = H_{m,n}(0)\delta(t - d_{m,n}/c)$, donde $\delta(t)$ representa la delta de Dirac y c representa la velocidad de la luz en el vacío, quedando la respuesta al impulso total del canal MIMO como:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_n H_{m,n}(0)\delta(t - d_{m,n}/c) \quad (24)$$

- Canal MIMO de M emisores:

Conocidos los fundamentos del canal V2V-VLC para faros simples de un solo emisor, adaptamos el estudio de canal MIMO simple a MIMO con faros matriciales.

Ahora, cada faro con matriz de emisores tendrá las contribuciones que se muestran en la Fig.3.14, nótense que ahora en el faro izquierdo del coche emisor hay 2 emisores (rombos negros).

Para los faros simples hemos utilizado los subíndices m, n . Nuestro estudio se complica matemáticamente, porque ahora el subíndice $M = 2(\text{filas} * \text{columnas})$, esto significa que el patrón de iluminación ahora tendrá la forma:

$$R_i(\varphi) = \frac{m_i + 1}{2\pi} \cos^{m_i}(\varphi) \quad (25)$$

Donde $m_i \in [1, 2(\text{filas} * \text{columnas})]$, y representa los ordenes Lambertianos de todos los emisores de ambos faros matriciales.

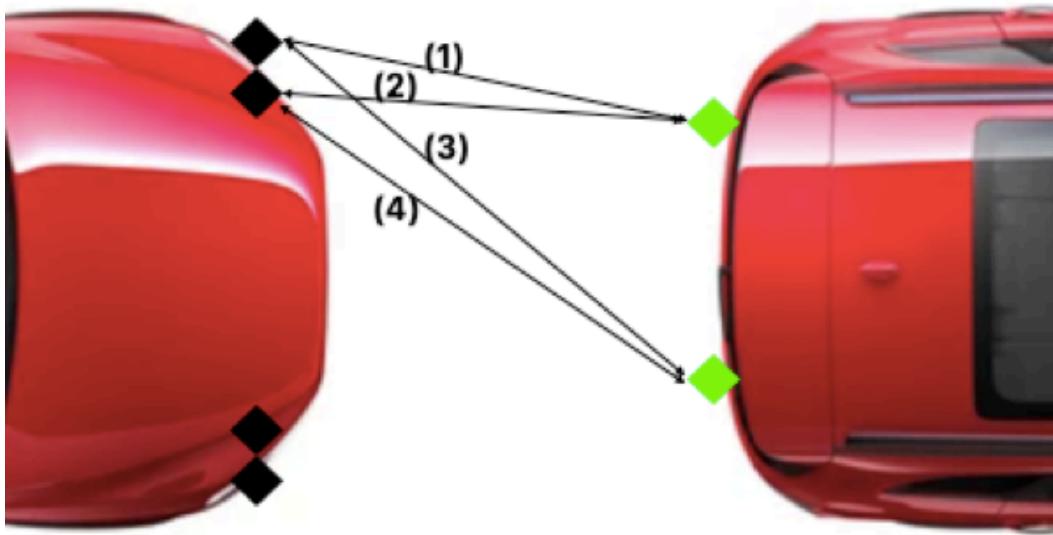


Fig.3.14. Representación gráfica del canal MIMO solo del faro matriciales, donde (1) corresponde con $H_{1,1}$, (2) con $H_{2,1}$, (3) con $H_{1,2}$ y (4) con $H_{2,2}$.

La ganancia en continua del enlace LOS formado por el emisor m -ésimo, el receptor n -ésimo, sigue la misma fórmula (20).

La ganancia obtenida por el canal MIMO con unos pesos w_n será la misma que en el caso simple, por lo que se usa la misma fórmula (21).

Las fórmulas son las casi las mismas, iguales que en el caso del MIMO simple, pero, ahora el valor de $M = 2(\text{filas} * \text{columnas})$, y el patrón de iluminación ($R_i(\varphi)$) han aumentado su complejidad.

Para el canal MIMO matricial, la respuesta al impulso se mantiene la fórmula (22).

Si además consideramos que la respuesta al impulso es un conjunto de deltas desplazadas respecto al origen del tiempo de propagación de la señal para la distancia del enlace, es decir,

$h_{m,n} = H_{m,n}(0)\delta(t - d_{m,n}/c)$, donde $\delta(t)$ representa la delta de Dirac y c representa la velocidad de la luz en el vacío, quedando la respuesta al impulso total del canal MIMO igual que en el caso de 2 emisores, se repite (22).

Se puede concluir que para los faros simples y para los matriciales se usan las mismas fórmulas, pero para el caso simple $N = 2$, $M = 2$ y para los matriciales $N = 2$, $M = 2$ (filas * columnas), un ejemplo en la Fig.3.15.

Las simulaciones que realiza la aplicación, se sostienen sobre estas últimas fórmulas. Están adaptadas para Matlab gracias al uso de varios bucles for y manipulación matricial.



Fig.3.15. Para un vehículo con faros matriciales de 2 filas por 3 columnas, los valores de M para cada emisor se muestran en la figura. En el caso de faros simples, el emisor del faro derecho y del faro izquierdo, corresponden, respectivamente a $M = 1$ y $M = 2$.

Ya tenemos definida la ganancia en continua y la respuesta al impulso, ahora lo que nos queda por definir es el valor de los pesos w_n , sabemos que la suma del valor de todos los pesos debe de darnos uno, $\sum w_n = 1$. Analizaremos 3 distintos métodos de combinación, estos son: Equal Gain Combining (EGC), Maximal-Ratio Combining (MRC) y Select Best (SB).

Empezaremos por el más sencillo de los tres, el EGC, consiste en asignar a las N señales recibidas pesos idénticos de valor $w_n = 1/N$.

El segundo método, MRC discrimina proporcionalmente en función de la SNR de cada receptor, dando mayor importancia a las señales recibidas con mayor calidad. Este método suele maximizar la SNR y es preferible frente al EGC. Hay un inconveniente que complica el diseño y ocurre por la necesidad de calcular la SNR de cada rama antes de distribuir los pesos.

Los pesos MRC vienen dados por:

$$w_n = k_0 \frac{rP_{r,n}}{\sigma_n^2} \quad (26)$$

Dónde 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 del ruido en el receptor n -ésimo y k_0 es un parámetro constante, independiente del valor de n .

El tercer y último método SB consiste en seleccionar la señal de uno de los receptores, y descartando la otra, es decir, los pesos serían $w_n = (1,0)$ o $w_n = (0,1)$ en función de la rama seleccionada. Presenta el mismo inconveniente que MRC, que requiere una estimación de SNR previa, pero presenta una ventaja porque permite obtener anchos de banda más elevados, por lo cual es más apropiado para aplicaciones que requieren alta velocidad de transmisión.

Los valores finales del canal MIMO serán dependientes del método de combinación seleccionado.

Una vez elegido el método de combinación, sabiendo los pesos w_n , calculamos la SNR:

$$SNR = \frac{(rP_t H(0))^2}{\sum_{n=1}^N w_n^2 \sigma_n^2} \quad (27)$$

En el programa de simulación, para acceder a la configuración de estos parámetros, debemos presionar sobre Rx configuration, Fig.3.16, se abre la ventana de Fig.3.17:

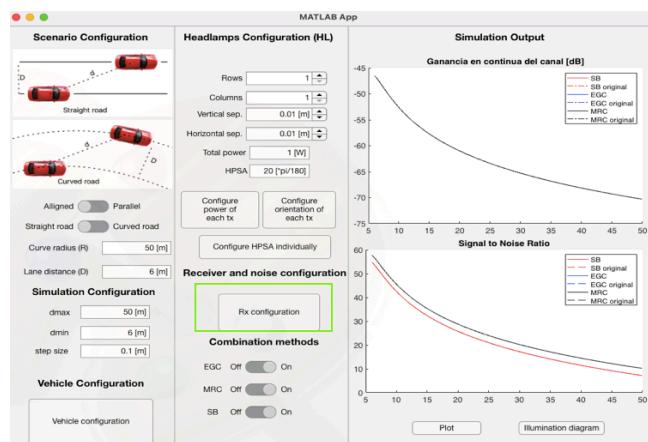


Fig.3.16. En la ventana principal, Rx Configuration está ubicado dentro del rectángulo verde.

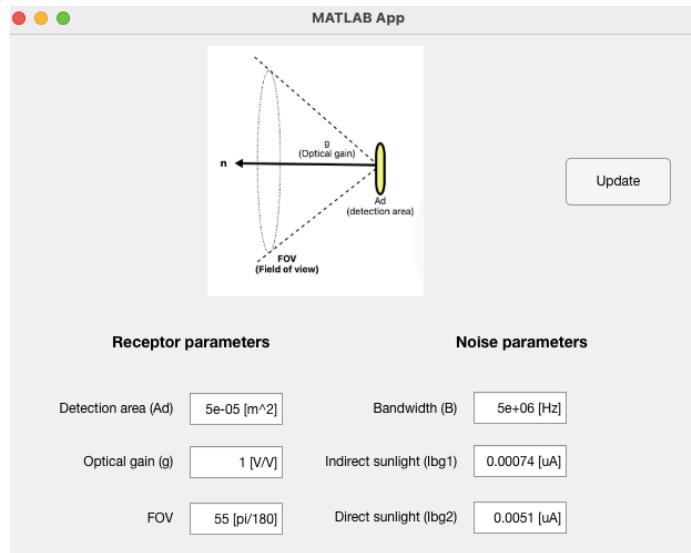


Fig.3.17. Ventana de configuración de receptor y ruido.

Los parámetros de ruido que usaremos son Bandwidth, Indirect sunlight y Direct sunlight, que corresponden al ancho de banda, intensidad de luz solar indirecta e intensidad de luz solar directa.

Los parámetros del receptor son Detection area, Optical gain y FOV, que corresponden respectivamente al área de detección del diodo receptor, la ganancia óptica del receptor y el campo de visión. Después de modificar los datos se debe de presionar sobre Update.

En el apartado *Combination methods*, Fig.3.18, tenemos tres sliders que sirven para poder seleccionar los métodos de combinación que queremos visualizar en los plots.

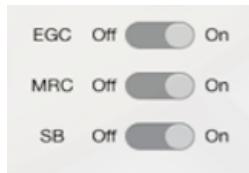


Fig.3.18. Sliders de selección de métodos de combinación, se pueden usar para aislar resultados de diferentes métodos de combinación.

Cuando tenemos todos los parámetros deseados introducidos debemos de presionar sobre *Plot* para esbozar los resultados de nuestra simulación.

Por último, podremos presionar sobre *Illumination diagram* para abrir una ventana más, mostrada en la siguiente figura:

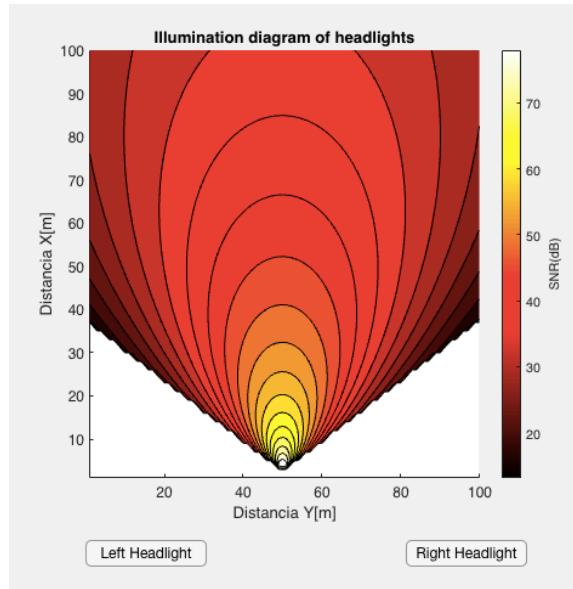


Fig.3.19. Ventana de Illumination diagram.

Básicamente el gráfico obtenido es un contorno de la potencia radiada que emiten los faros del vehículo emisor en SNR

Se puede mostrar el diagrama para ambos faros a la vez o para cada uno individualmente, esto se puede hacer seleccionando Left Headlight y Right Headlight.

3.3.4. Escenarios de simulación

La carretera urbana constituye una infraestructura viaria con características mixtas entre las carreteras que discurren fuera del poblado y el viario principal de la ciudad. La carretera que atraviesa suelo urbano o metropolitano debe satisfacer las necesidades de tráficos locales e interurbanos, tráficos con características y exigencias distintos.

Se considera que una carretera tiene categoría de urbana cuando [17]:

- Atraviesa medio urbano o urbanizable,
- Genera impactos ambientales sobre medios urbanizados.
- Soporta la circulación de tráficos urbanos de cierta importancia.

La carretera que cumpla una de estas características se puede considerar urbana.

La frontera entre la carretera y la red urbana no está claramente definida.

Los entornos urbanos suelen estar altamente transitados, por razones de seguridad existen limitaciones de velocidad. El límite superior en ciudad suele ser 50 km/h, a veces, incluso 20 km/h.

Debido a esta baja velocidad se puede emplear tramos curvos con radio bastante reducido, en autopista donde la limitación es de 120 km/h el radio de curva debe ser suficientemente alto para no afectar la estabilidad del vehículo.

Para estudiar este tipo de entorno utilizaremos 2 escenarios, el primero será un tramo de un solo carril donde ambos vehículos están perfectamente alineados el uno con el otro. En el segundo escenario ambos vehículos tendrán una separación D entre sus ejes centrales.

Cada escenario se podrá particularizar para tramo recto o curvo, por lo que tendremos 4 casos de estudio en total:

- Escenario 1 en recta.
- Escenario 1 en curva.
- Escenario 2 en recta.
- Escenario 2 en curva.

A) Geometría del escenario 1

Se muestra un esquema en la Fig.3.20, obtenido de [8]. Las coordenadas del vehículo seguidor (x_1, y_1) se pueden obtener geométricamente 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.

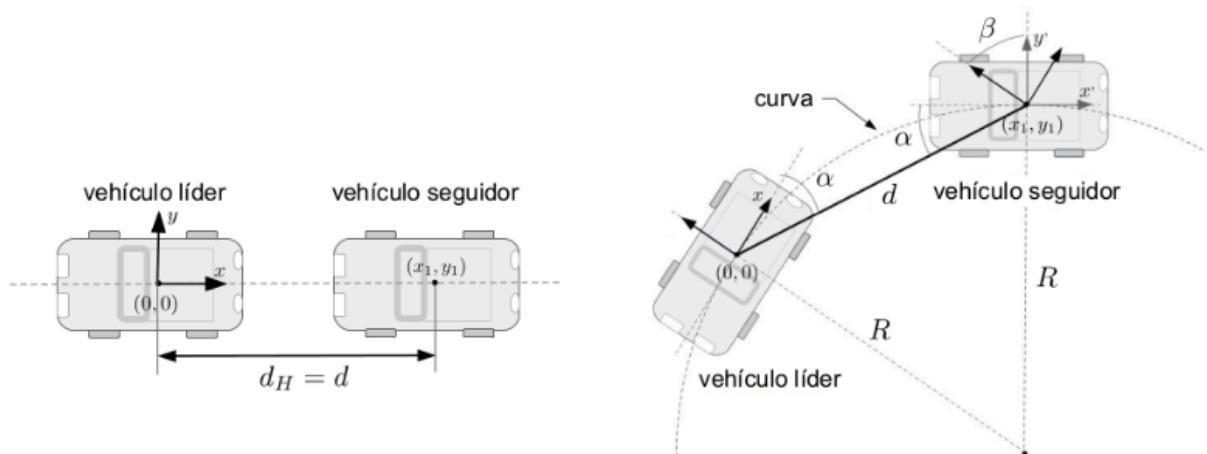


Fig.3.20. Escenario 1 en tramo recto y tramo curvo respectivamente.

En lo que respecta a las coordenadas de las lámparas emisoras y receptoras, para los dispositivos ópticos situados en el vehículo líder, vendrán dadas directamente por las expresiones que se presentarán en el apartado 3.3.1.Configuración 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 $\vec{n} = (1,0,0)$ para los pilotos traseros del vehículo líder y $\vec{n} = (-\cos(\beta), \sin(\beta), 0)$ para los faros delanteros del vehículo seguidor.

B) Geometría del escenario 2

La geometría del segundo escenario presenta mayor complejidad matemática. Se muestra su esquema en la Fig.3.21, obtenida de [8].

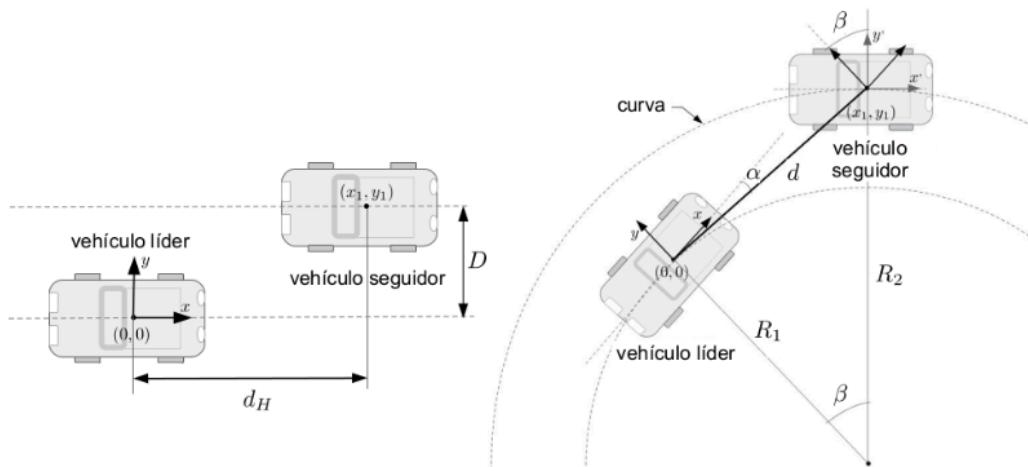


Fig.3.21. Escenario 2 en tramo recto y tramo curvo, respectivamente.

Las coordenadas del coche 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 $\beta \leq \beta_o$ con $\beta_o = \cos^{-1}(R_1/R_2)$ y negativo si $\beta > \beta_o$, para tramos curvos.

Una gran diferencia con el Escenario 1 son los ángulos α y β , ahora tendrán la siguiente forma:

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{R_1^2 + R_2^2 - d^2}{2R_1R_2}\right) \quad (28)$$

$$\alpha = \cos^{-1}(R_2/d\sin(\beta)) \quad (29)$$

Respectivamente 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 transmisoras y receptoras, así como los correspondientes vectores unitarios de orientación del Escenario 2, son las mismas que las del Escenario 1, empleando los nuevos valores de α y β [2]. Se muestra en la Fig.3.3:

Se muestran ejemplos reales de cada escenario en las figuras Fig.3.22.(a) y Fig.3.22.(b).

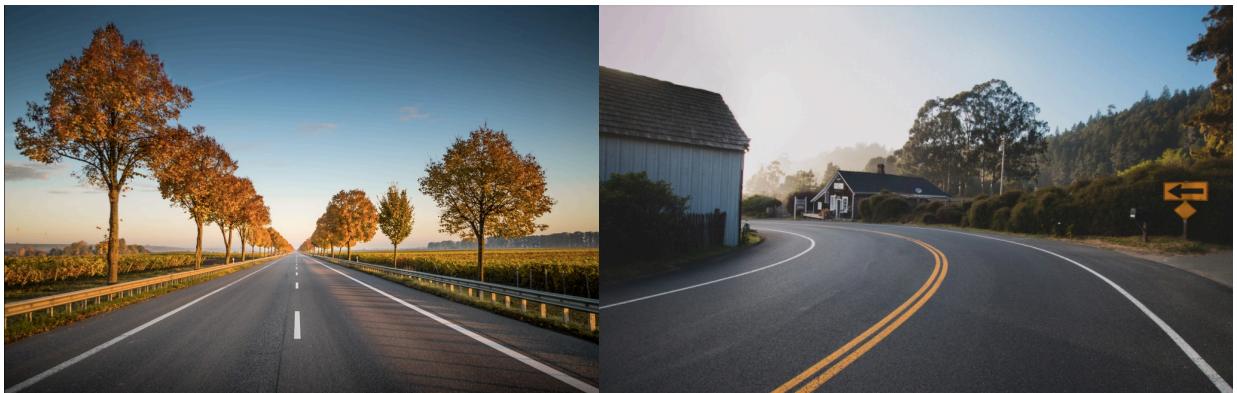


Fig.3.22. (a) Ejemplo de escenario en recta, trayecto plano sin curvas ni desniveles. Para el caso de escenario 1, ambos vehículos utilizarían el mismo carril y estarían alineados. Para el escenario 2, el vehículo líder y el seguidor no estarán alineados, porque utilizan carriles distintos, o simplemente desalineación por culpa del error humano. (b) Ejemplo de escenario en curva, con curva en entorno urbano. Para la simulación se supone que la curva es de radio uniforme y que no hay desniveles ni obstáculos en el path entre ambos vehículos.

Explicación de uso en la aplicación:

Nada más abrir la aplicación, nos aparecerá un pop-up informativo, informando que ajustemos el tamaño de ventana en caso de necesidad, por un bug en el tamaño de uno de los tres paneles de los que se compone la ventana principal.

La ventana principal tiene el siguiente aspecto, Fig.3.23:

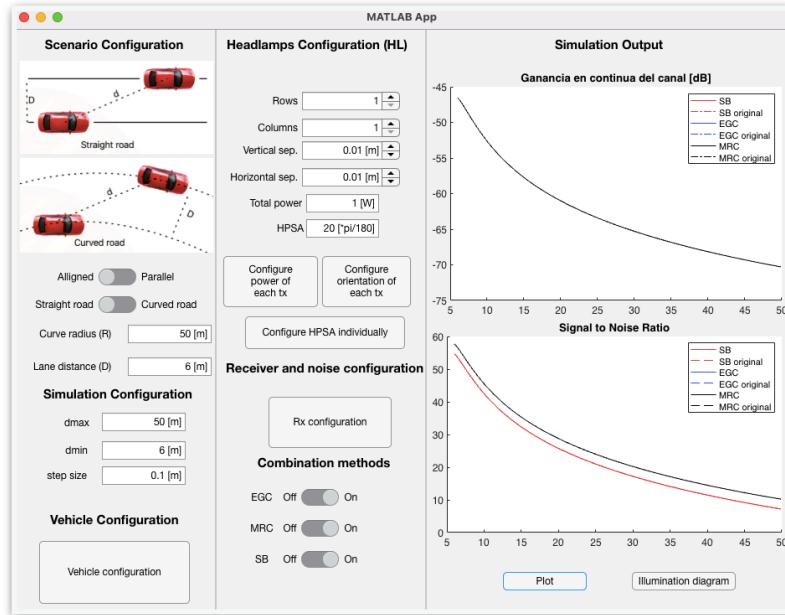


Fig.3.23. Ventana principal de la aplicación desarrollada. Las gráficas denominadas original, son las obtenidas para un vehículo con un solo emisor LED por faro de 1W y apuntamiento 0º.

Al iniciar la aplicación en las gráficas de la derecha se nos muestra los resultados de $H(0)$ y SNR para el caso más simple de dos emisores, estos plots se dejan como punto de comparación durante todas las simulaciones. Para cada caso son diferentes plots. Como nuestro objetivo es el análisis de los faros matriciales, se usarán las gráficas iniciales, esto se hará para distinguir fácilmente los cambios hechos por nuestras matrices de emisores con los emisores unitarios.

El primer paso es elegir el escenario en el que queremos hacer la simulación, en el primer slider tenemos las opciones `Alligned` y `Parallel`, que corresponden al primer y segundo escenario, Fig.3.24. En el segundo slider están `Straight road` y `Curved road`, para seleccionar entre carretera recta y curva, respectivamente.



Fig.3.24. (a) Slider para la elección de escenario y configuración de curva y carril.

(b) Configuración de la simulación, trayecto simulado y precisión.

En el primer escenario, ambos coches estarán alineados, es decir, en el mismo carril con los ejes de ambos vehículos alineados. En el segundo escenario los vehículos tendrán una distancia D entre sus ejes. El segundo slider nos da las opciones *Straight road* y *Curved road*, que se corresponden a tramo recto y tramo curvo de radio R . Los valores de D y R se pueden modificar en sus correspondientes casillas.

Lo siguiente es la configuración de la simulación, por defecto tenemos definidos $d_{max} = 50\text{ m}$, $d_{min} = 6\text{ m}$ y $step\ size = 0.1\text{ m}$.

En algunas simulaciones es interesante modificar el valor d_{max} para averiguar qué ocurre a distancias largas

3.5. Limitaciones del sistema

Todo el desarrollo se ha llevado acabo en Matlab R2020b, pero debería de ser compatible con cualquier versión de Matlab desde la R2013b.

Para la computadora es recomendable al menos 4 GB de RAM para un buen flujo de información, aunque con 2 GB también funciona. El procesador puede ser cualquier Intel o AMD x86 [16].

Algunos valores de la aplicación se han limitado hasta cierto punto, por ejemplo solo es posible hacer matrices de 10 filas por 10 columnas de transmisores en el vehículo emisor. Esto se ha hecho para no sobrecargar los bucles y no resultar en un programa demasiado lento. Hay principalmente tres parámetros que afectan al rendimiento, estos son: la d_{min} , la d_{max} y la d_d , respectivamente son la distancia mínima de inicio de simulación, la distancia final de simulación y la diferencia entre puntos.

Esto ocurre porque el bucle de simulación principal depende del numero de puntos entre d_{min} y d_{max} , este número de puntos se puede definir como:

$$\frac{d_{max} - d_{min}}{d_d} \quad (30)$$

En principio la aplicación no ocupa demasiada memoria, así que no hay que cambiar ninguna configuración de Ajustes en Matlab, tal como la memoria disponible del Heap. La configuración por defecto es suficiente.

Capítulo 4. Análisis de resultados

A continuación se explican los valores utilizados en la app, en el segundo apartado se presentan varios patrones de faros matriciales que se usarán en las simulaciones, y por último se simulará teniendo en cuenta usos posibles que se podrían dar a las configuraciones simuladas.

4.1. Parámetros generales

Las dimensiones de ambos vehículos son aproximadamente las de un Seat Leon, ya que es un modelo muy común en el entorno urbano europeo, además las dimensiones son habituales.

Entonces, la longitud y anchura son $L = 4.6m$ y $W = 1.8m$, con una separación de faros $W_{front} = 1.3m$ y una separación de los pilotos traseros $W_{back} = 1.1m$. Se asume que tanto la altura de los faros y de los pilotos traseros es la misma $H_{front} = H_{back}$.

Para los faros delanteros se ha elegido una matriz de 2 filas por 5 columnas, con una separación de 1cm tanto en separación vertical, como en horizontal.

El patrón de emisión será Lambertiano con $P_t = 2W$, es decir en cada faro $1W$, y $\varphi_{1/2} = 20^\circ$. El orden Lambertiano se puede modificar en la aplicación, pero se dejará él mismo para todos los emisores de todos los patrones de faro.

Para los receptores una $FOV = 55^\circ$, el área de detección es $A = 50mm^2$ y una ganancia óptica $g = 1$.

Para el ruido, el ancho de banda $B = 5MHz$, se considera que el único ruido presente es el shot provocado por la exposición a la luz natural.

Los valores de photocorriente de $I_{DC} = 5100\mu A$ e $I_{DC} = 740\mu A$ se sacaron de un estudio[11] realizado con exposición solar directa e indirecta, respectivamente, sobre un fotodiodo típico de área $A = 0.8cm^2$ [8].

Nunca se pondrá más de $P_t = 1W$ por faro, ya que evidentemente aumentando la potencia emitida se podría lograr siempre una mejora de la SNR, pero la mejora de la eficiencia es esencial.

4.2. Patrones de faro matricial simulados

Se utilizarán cinco patrones diferentes de faro matricial, el vehículo simulado podrá usar ambos faros del mismo patrón, o un patrón diferente por faro.

Se ha tenido en cuenta la iluminación adaptativa para estas configuraciones, es decir, se intentará evitar deslumbramientos y optimizar la visibilidad de la carretera.

La orientación de las columnas de los emisores LED dentro del faro tendrá la siguiente matriz, esto será igual para todos los patrones, Fig.4.1.

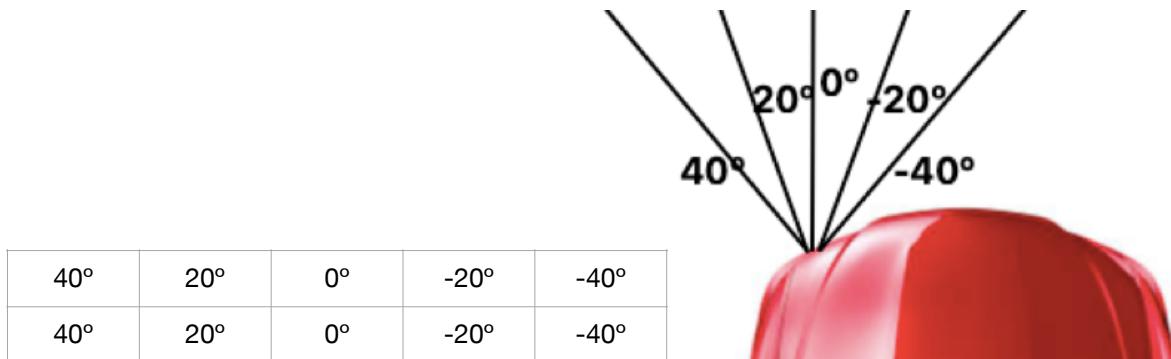


Fig.4.1. (a) Tabla de orientación común para todos los patrones, estos valores son para el caso de faro izquierdo, si fuese faro derecho se debería de dar la vuelta a la matriz. (b) Representación gráfica de la orientación de los emisores. No se han tenido en cuenta las lentes de los faros.

Lo que variará en los cinco patrones son las matrices de potencia, se darán regiones de sombra apagando ciertas columnas de LED, y se dejarán a máxima potencia las zonas que se desea iluminar, esta potencia es de 0.1W.

- Patrón número 1:

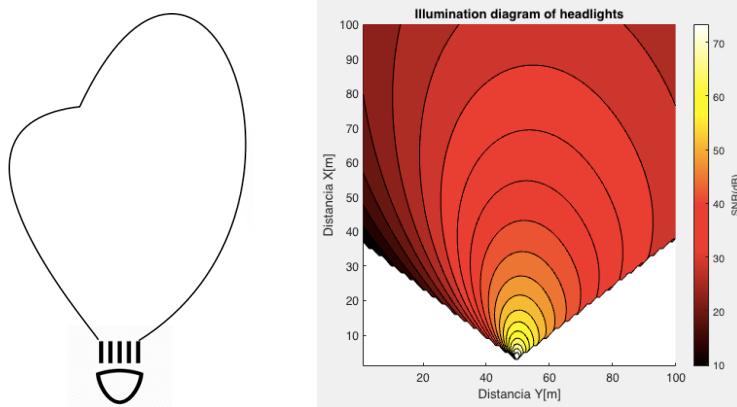
El primer patrón tendrá un patrón asimétrico, radiando menos potencia al carril izquierdo.

Esto se hará dando la siguiente matriz de potencia:

0	0.075W	0.1W	0.1W	0.1W
0	0.075W	0.1W	0.1W	0.1W

Fig.4.2. Matriz de potencia para patrón número 1. Se apagan los LED de la columna del extremo izquierdo y se atenúa parcialmente la columna adyacente. Este patrón emite el 75% de la potencia disponible.

Se ilustra una aproximación de la emisión Lambertiana, Fig.4.3, es decir, la forma geométrica que tomaría la luz. También está representado el diagrama de iluminación que se obtiene con la aplicación software desarrollada.



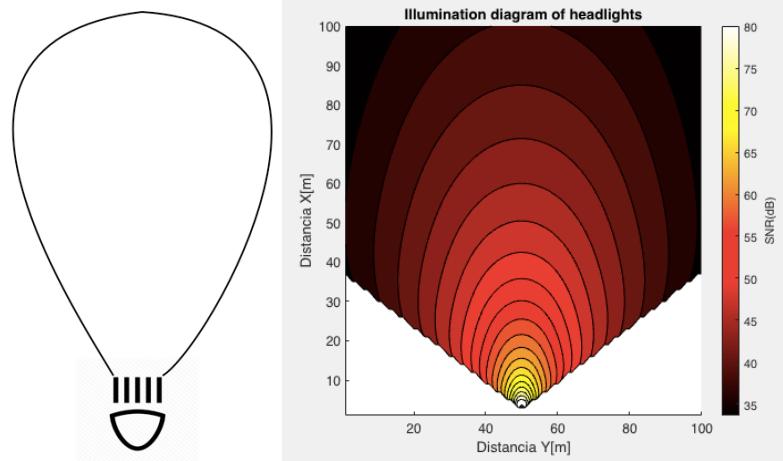
**Fig.4.3. (a) Patrón de emisión luminosa radiada para el primer patrón.
(b) Diagrama de iluminación para el primer patrón obtenido con la aplicación desarrollada.**

- Patrón número 2:

El segundo patrón será simétrico, tendrá menor potencia lateral en ambos lados, deslumbrando menos los carriles adyacentes, representado en Fig.4.4 y 4.5. En concreto la disminución de potencia será en los LED de las dos columnas laterales.

0.05W	0.1W	0.1W	0.1W	0.05W
0.05W	0.1W	0.1W	0.1W	0.05W

Fig.4.4. Matriz de potencia para patrón número 2. Se atenúan los LED de la columna del extremo izquierdo y del extremo derecho. Este patrón emite el 80% de la potencia disponible.



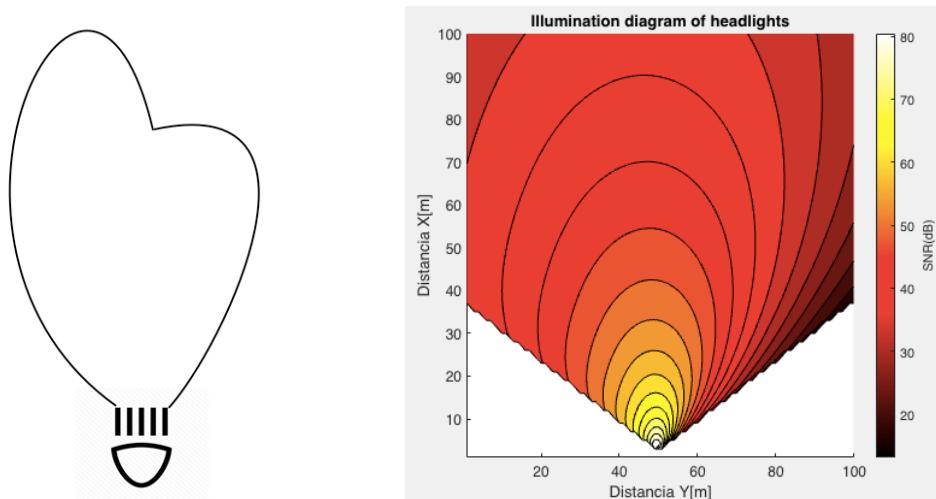
**Fig.4.5. (a) Patrón de emisión luminosa radiada para el segundo patrón.
(b) Diagrama de iluminación para el segundo patrón obtenido con la aplicación desarrollada.**

- Patrón número 3:

El tercer patrón volverá a ser asimétrico, parecido al primero, pero, esta vez radiando menos potencia al carril derecho, Fig.4.6 y Fig.4.7.

0.1W	0.1W	0.1W	0.075W	0
0.1W	0.1W	0.1W	0.075W	0

Fig.4.6. Matriz de potencia para patrón número 3. Se apagan los LED de la columna del extremo derecho y se atenúa parcialmente la columna adyacente. Este patrón emite el 75% de la potencia disponible.



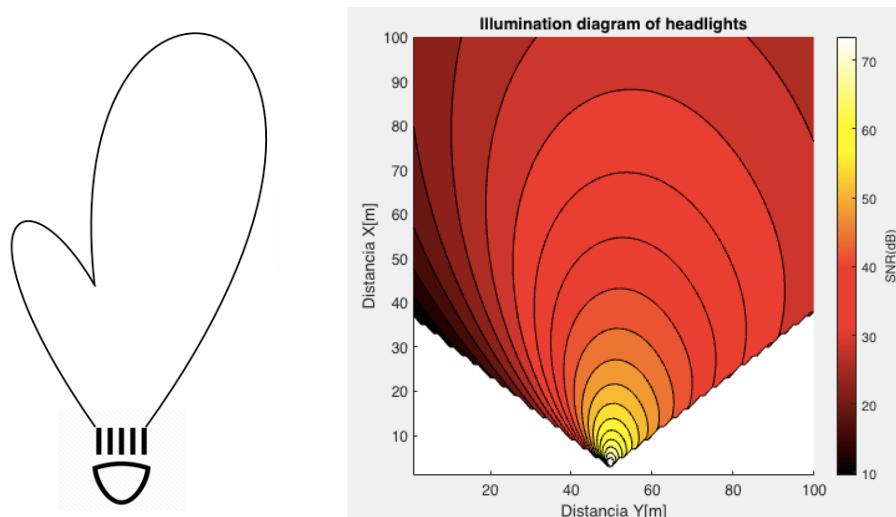
**Fig.4.7. (a) Patrón de emisión luminosa radiada para el tercer patrón.
(b) Diagrama de iluminación para el tercer patrón obtenido con la aplicación desarrollada.**

- Patrón número 4:

En el cuarto patrón se ha tenido en mente un modelo que dé sombra a un vehículo que circula por el carril adyacente izquierdo, Fig.4.8 y Fig.4.9.

0.075W	0	0.1W	0.1W	0.1W
0.075W	0	0.1W	0.1W	0.1W

Fig.4.8. Matriz de potencia para patrón número 4. Se apagan los LED de la columna izquierda y se atenúa parcialmente la columna adyacente lateral. Este patrón emite el 75% de la potencia disponible.



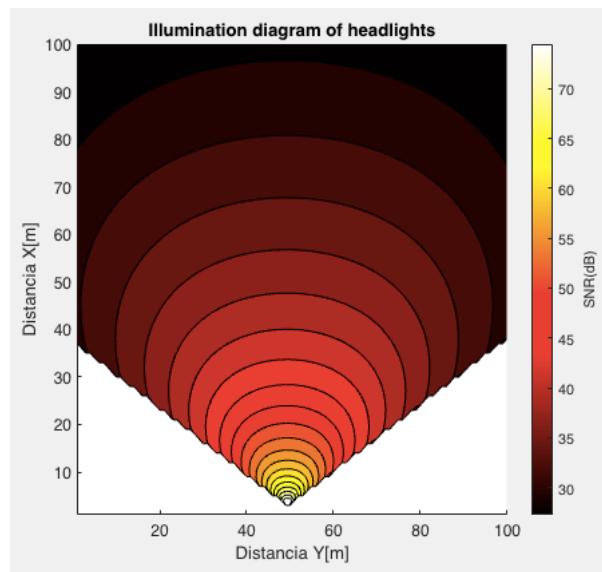
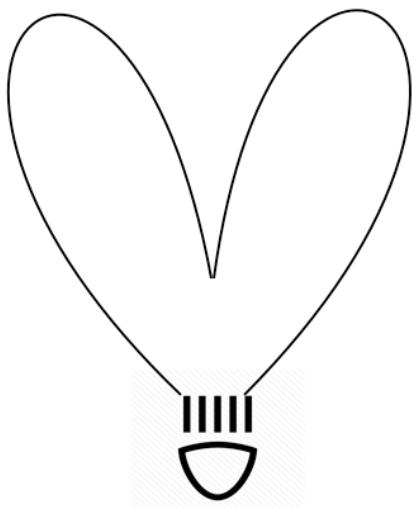
**Fig.4.9. (a) Patrón de emisión luminosa radiada para el cuarto patrón.
(b) Diagrama de iluminación para el cuarto patrón obtenido con la aplicación desarrollada.**

- Patrón número 5:

En el quinto patrón se ha tenido en mente un modelo que no deslumbre a un vehículo que circula delante, pero iluminando los alrededores para no perder visibilidad, Fig.4.10 y Fig.4.11.

0.1W	0.075W	0	0.075W	0.1W
0.1W	0.075W	0	0.075W	0.1W

Fig.4.10. Matriz de potencia para patrón número 5. Se apagan los LED de la columna central y se atenúan parcialmente ambas columnas adyacentes. Este patrón emite el 70% de la potencia disponible.



**Fig.4.11. (a) Patrón de emisión luminosa radiada para el quinto patrón.
(b) Diagrama de iluminación para el quinto patrón obtenido con la aplicación desarrollada.**

4.3. Simulaciones

Se van a emular tres tipos de modelos, el primero, será comprobar la asimetría de los faros típicos europeos, corresponde a las primeras dos simulaciones. En la tercera y cuarta simulación se emulará la mejora de iluminación en curva. Finalmente, en la quinta y sexta se ha intentado crear un modelo que evite deslumbrar.

- Escenario 1 recto con patrones de faro número 1 y 2.

Se elige esta configuración para iluminar según la normativa europea [18]. Mostrado en Fig.4.12:

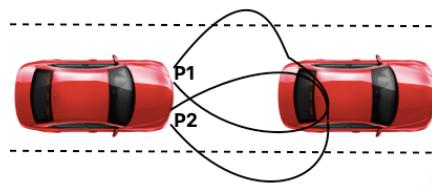


Fig.4.12. Descripción gráfica de la primera simulación, ambos vehículos están alineados en el mismo carril recto. Los patrones de faros del vehículo seguidor son del número 1 y 2, porque son una aproximación a la luz de cruce de haz europeo[18].

Se abre la aplicación software, se deja el escenario seleccionado por defecto, no se modifica la configuración de vehículos, se seleccionan faros matriciales tal como aparece en Fig.4.13.:

Rows	2
Columns	5
Vertical sep.	0.01 [m]
Horizontal sep.	0.01 [m]
Total power	1 [W]
HPSA	20 [$\pi/180$]

Fig.4.13. Configuración de faros matriciales, 10 emisores por faro, con separación horizontal y vertical de 1cm, con la misma directividad y 1W distribuido entre todos los emisores de cada faro, 0.1W por emisor, en este caso.

Se introduce la siguiente matriz de potencia mostrada en Fig.4.14, siguiendo los patrones número 1 y 2, para los faros izquierdo y derecho, respectivamente:

Left headlight					Right headlight				
0	0.0750	0.1000	0.1000	0.1000	0.0500	0.1000	0.1000	0.1000	0.0500
0	0.0750	0.1000	0.1000	0.1000	0.0500	0.1000	0.1000	0.1000	0.0500

Fig.4.14. Configuración de potencias de los emisores del faro. El faro izquierdo aprovecha el 75% de la potencia y el derecho el 80%, en total se emite el 77.5% de la potencia, hay asimetría de emisión.

Se presiona plot para simular esta configuración, y se obtiene la siguiente SNR, mostrada en la Fig.4.15:

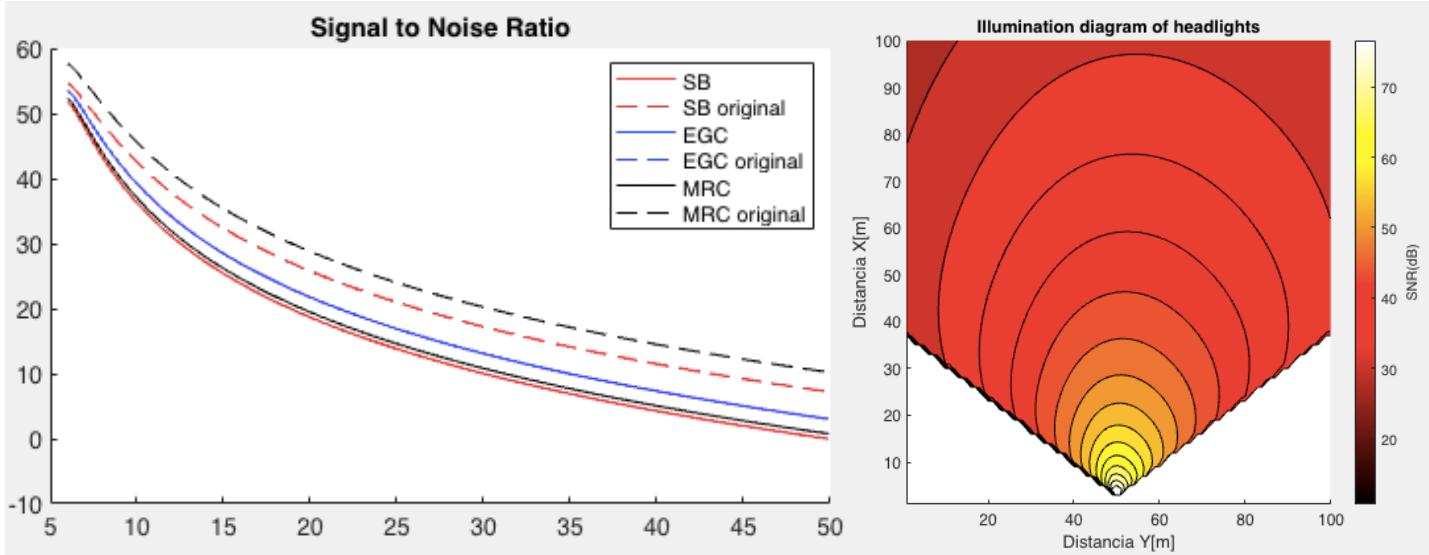


Fig.4.15. (a) Resultados de SNR para el primer escenario recto usando patrones 1 y 2.
(b) Diagrama de iluminación de ambos faros, izquierdo del patrón número 1 y el derecho del número 2. Se puede apreciar que hay menor radiación de potencia al carril izquierdo.

En la gráfica de SNR se pueden apreciar los siguientes aspectos:

- En la leyenda, los valores “original” representan el caso simple de un solo emisor de $P_t = 1W$ por faro, sin apuntamiento.
- La SNR obtenida con faros matriciales es peor, en torno a unos $7 - 8dB$ menor. El método de combinación que menos se ha visto afectado es el MRC, esto es porque la emisión de potencia no es simétrica y MRC es el método que mejor calibra sus pesos en este caso. Una bajada de SNR también significa menor deslumbramiento
- Escenario 2 recto con patrones de faro número 1 y 2.

El principal objetivo de la luz de cruce de haz asimétrica es no deslumbrar al carril paralelo o contrario, tal como se muestra en la siguiente figura:

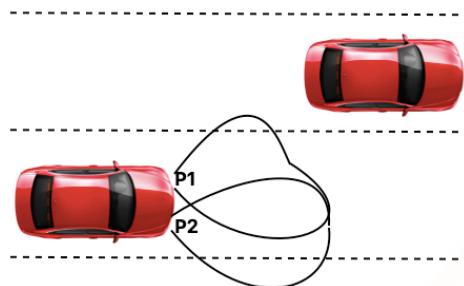


Fig.4.16. Descripción gráfica de la segunda simulación, ambos vehículos en carriles paralelos, con una D=3.5m.

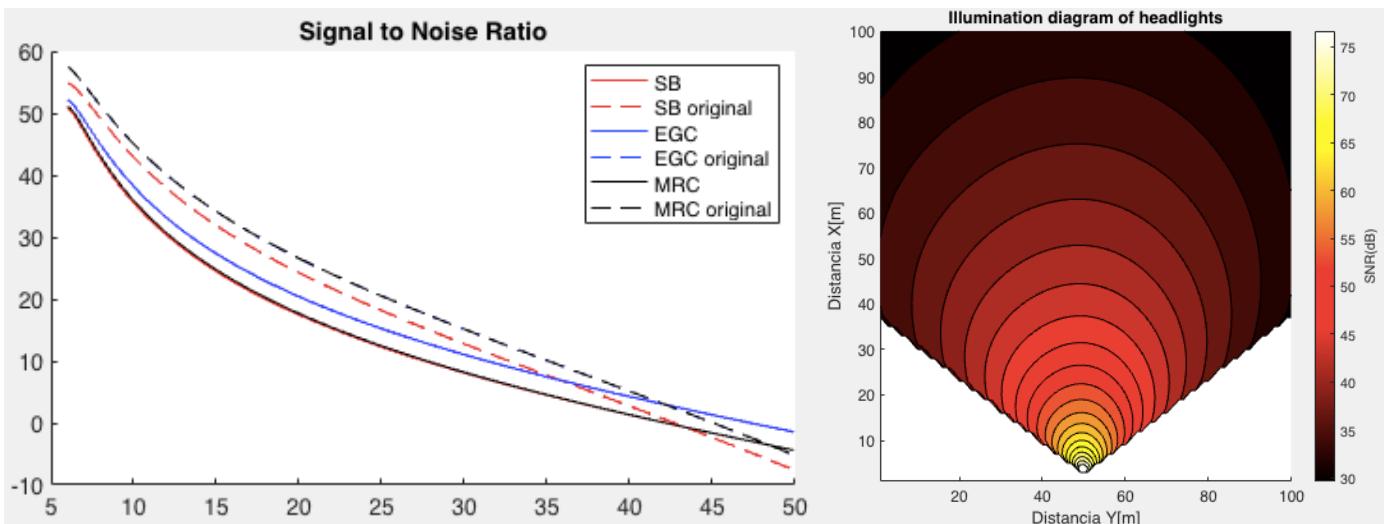


Fig.4.17. (a) Resultados de SNR para el segundo escenario recto usando patrones 1 y 2, efectivamente el haz de cruce parece decaer la SNR en el carril paralelo.(b) Diagrama de iluminación para la configuración simulada.

En la gráfica de SNR se pueden apreciar los siguientes aspectos:

La emisión de potencia vuelve a ser asimétrica, por ello MRC vuelve a destacar, sobretodo se ve la mejora a larga distancia, llegando a superar el caso original a partir de los 40m.

- Escenario 1 curvo con patrones de faro número 3 y 2.

Esta configuración tiene como intención mejorar la visibilidad de la carretera. Al detectar un giro del volante, la ECU deberá encender un patrón parecido al representado en la siguiente imagen:

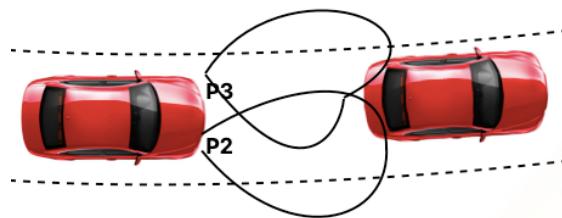
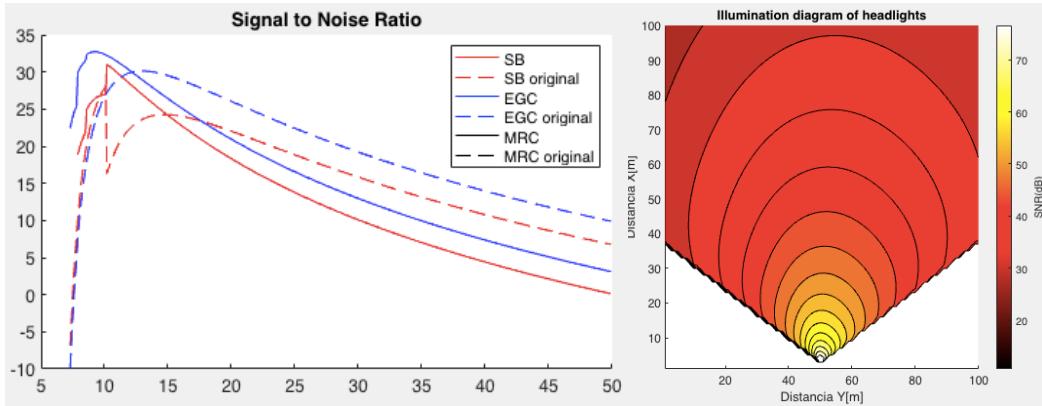


Fig.4.18. Descripción gráfica de la tercera simulación, ambos vehículos alineados en el mismo carril curvo. Un sistema con iluminación adaptativa encendería un patrón similar al número 3 en el faro izquierdo para iluminar la carretera.



**Fig.4.19. (a) Resultados de SNR para el primer escenario en curva usando patrones 3 y 2.
(b) Diagrama de iluminación para la configuración simulada.**

En este caso hay mayor SNR a corta distancia, debido al apuntamiento directo de algunos emisores cuando los vehículos están muy cerca. MRC vuelve a destacar por la emisión asimétrica.

- Escenario 2 curvo con patrones de faro número 3 y 2.

En este caso se ilumina la carretera curva y se simula la recepción en el carril paralelo o contrario, Fig.4.20:

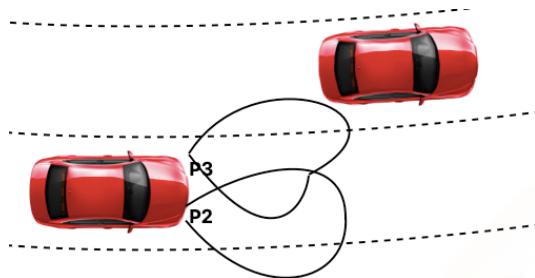


Fig.4.20. Descripción gráfica de la cuarta simulación, ambos vehículos están en carriles curvos paralelos.

La distancia entre ambos carriles es la misma que en la segunda simulación, $D = 3.5\text{m}$. Se obtiene la siguiente SNR simulada:

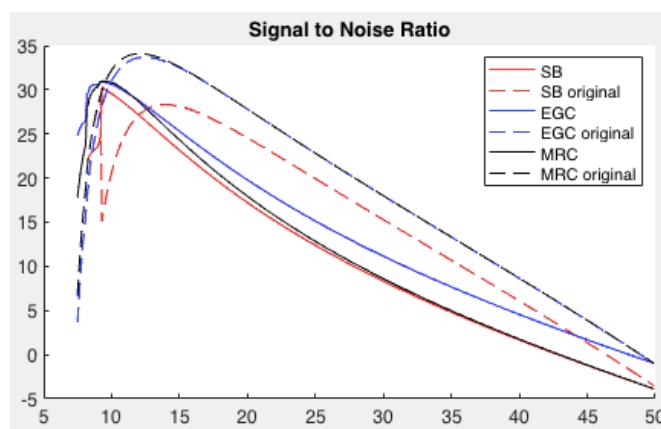


Fig.4.21. Resultados de SNR para el segundo escenario en curva usando patrones 3 y 2.

Usando el patrón de potencia número 3 en el faro izquierdo y el número 2 en el faro derecho, se emite el 77.5% de la potencia, emisión asimétrica. Se aprecia una pérdida de SNR recibida por el vehículo líder. El método MRC vuelve a dar mejores resultados que los demás.

- Escenario 2 recto con patrones de faro número 4 y 2.

Se selecciona un modelo asimétrico con patrón 2 y 4, para evitar deslumbramiento del carril paralelo.

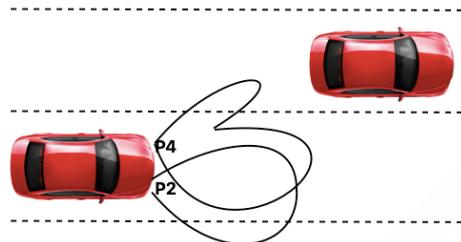
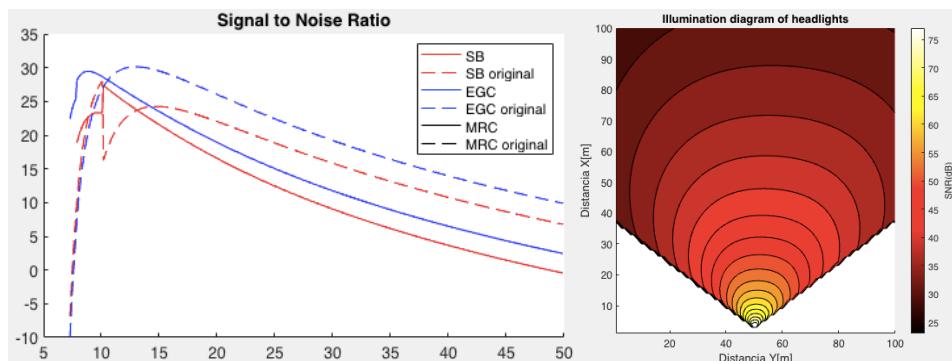


Fig.4.22. Descripción gráfica de la quinta simulación, ambos vehículos están alineados en el mismo carril curvo. El patrón número 2 está para iluminar la carretera y el número 4 para crear una región de sombreado, para no deslumbrar al vehículo que circula en el carril izquierdo.



**Fig.4.23. (a) Resultados de SNR para el segundo escenario en recta usando patrones 4 y 2.
(b) Diagrama de iluminación para patrón 4 y 2, se aprecia menor potencia radiada al carril izquierdo.**

Observando la gráfica de la SNR se podría decir que se deslumbra menos al vehículo líder. A corta distancia hay deslumbramiento, pero tiene menor intensidad. El deslumbramiento empieza unos metros antes, pero tiene menor potencia. Esto es debido al apuntamiento de los emisores. La SNR decae en unos 15 – 20dB.

- Escenario 1 recto con ambos faros del patrón número 5.

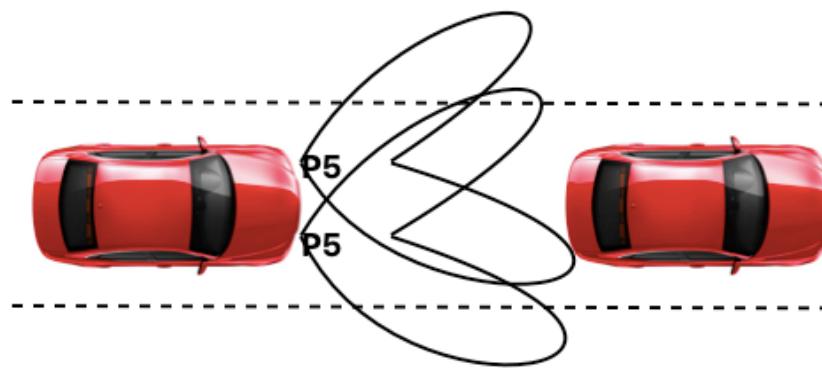
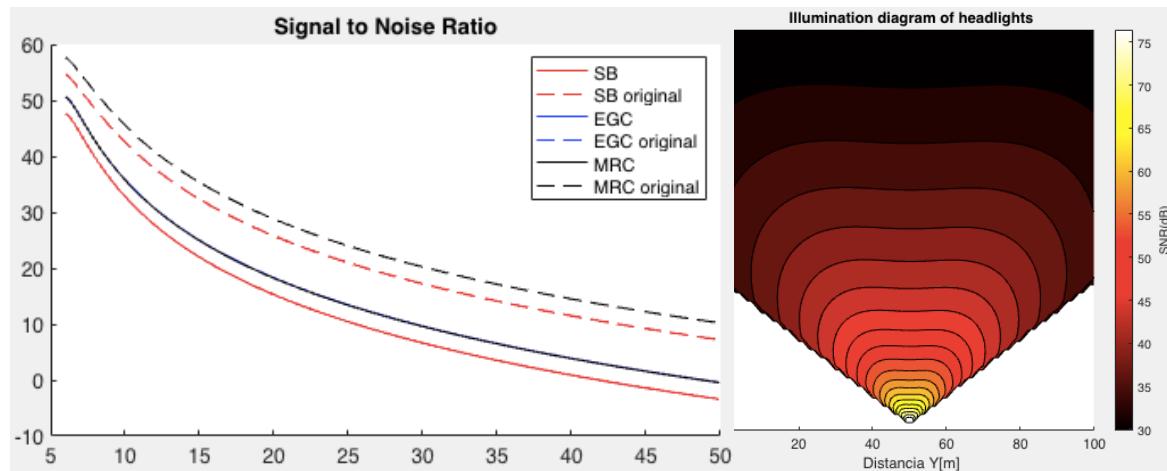


Fig.4.24. Descripción gráfica de la sexta simulación, ambos vehículos están alineados en el mismo carril recto. Ambos patrones se han elegido del número 5, para intentar no deslumbrar al vehículo de delante, mientras se ilumina el resto de la carretera.



**Fig.4.25. (a) Resultados de SNR para el primer escenario en recta usando patrones número 5 .
(b) Diagrama de iluminación para ambos faros patrón 5, se aprecia menor potencia radiada al centro.**

Observando la Fig.4.25 se puede confirmar que usando ambos faros del patrón número 5 es posible reducir mucho el deslumbramiento del vehículo líder, especialmente a medida que va aumentando la distancia, la potencia recibida por el coche líder se va reduciendo. Como la emisión de ambos faros es idéntica, el canal es simétrico y por ello no hay diferencia entre los plots de MRC y EGC.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

En este TFG se ha desarrollado una herramienta software capaz de simular sistemas V2V basados en VLC entre dos vehículos en un entorno urbano. El enfoque principal ha sido el uso de faros matriciales, pero la herramienta es capaz de soportar múltiples configuraciones de vehículos y faros.

La app permite seleccionar entre varios escenarios, y modificar algunos parámetros como el radio de la curva o la distancia entre carriles. Como parámetro de calidad más representativo se usa la SNR que es calculada en todos los puntos intermedios entre emisor y receptor.

Se ha observado que es posible reducir el deslumbramiento de otros vehículos, mientras se ilumina bien la carretera, apagando y atenuando ciertos LED de un faro matricial. Es posible mejorar las características de transmisión en curva o en carril paralelo usando un apuntamiento adecuado de emisores.

5.2. Trabajo futuro

En este Trabajo Fin de Grado, se ha intentado hacerlo en las condiciones más realistas posibles, pero, en un entorno urbano van a haber obstáculos, como árboles, otros vehículos o peatones, que pueden provocar caídas considerables de SNR en el receptor, ó incluso bloquear por completo la señal. Pueden darse fenómenos climáticos como niebla, lluvia o nieve, condiciones de alta humedad que provocarían dispersión de la emisión Lambertiana reduciendo su alcance. El fenómeno más disruptivo para las VLC es la caída de nieve, puede reducir la distancia efectiva de una VLC de 20% a 80% [11].

En la urbe también habrá contaminación lumínica como farolas, sirenas de vehículos de emergencia o reflejos de luz.

El estudio del Broadcast entre vehículos sería de especial interés por sus aplicaciones en seguridad [12].

Referencias

- [1] Bastien Béchadergue. "Visible Light Range-Finding and Communication Using the Automotive LED Lighting". Signal and Image processing. Université Paris Saclay, 2017.
- [2] Jeremy Coliins. "Advantages of Vehicle to Vehicle Communication". Fleet Management. Azuga. September 2020. <https://www.azuga.com/blog/vehicle-to-vehicle-communication-benefits>
- [3] Robert Aigner, Connie Mackenzie, Alex Jazac. "Advanced RF Filters for V2V and Other Automotive Applications". <https://www.qorvo.com/resources/d/advanced-rf-filters-for-v2v-and-automotive-white-paper>
- [4] D. Darlis, R. A. Priramadhi y K. F. M. Joni. "Implementation of Vehicular-Visible Light Communication for motorcycle platooning". <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1098/3/032023/pdf>
- [5] Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE), Reglamento n.o 48, Disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en lo que respecta a la instalación de dispositivos de alumbrado y señalización luminosa [2019/57], 2019.
- [6] Isamu Takai, Michinori Andoh, Tomohisa Harada, Keita Yakutomi, "Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and CameraReceiver". IEEE Photonics Journal. October 2014. https://www.researchgate.net/publication/265555753_Optical_Vehicle-to-Vehicle_Communication_System_Using_LED_Transmitter_and_Camera_Receiver
- [7] Jiang Daniel, Delgrossi Luca, "IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments". IEEE Vehicular Technology Conference. 2008.
- [8] M. Del Castillo-Vázquez, A. Jurado-Navas, A. Puerta-Notario, "Efecto del desalineamiento en enlaces para comunicaciones entre vehículos con luz visible", 2020.

[9] "Ficha técnica Cabeza Tractora Scania R 480 Euro 5". 2020. <https://www.europacamiones.com/ficha-tecnica-gama/scania-la4x2mn%28l%29a%28b%29>

[10] "Medidas vehículos: Smart fortwo, Jeep Wrangler y Ferrari SF90". 2020. <https://www.medidasdecoches.com/medidas-coches-smart.html>

[11] Avătămăniței SA, Beguni C, Căilean AM, Dimian M, Popa V. Evaluation of Misalignment Effect in Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communications: Experimental Demonstration of a 75 Meters Link. 2021 May 21.

[12] O'Brien, Dominic & Zeng, Lubin & Le Minh, Hoa & Faulkner, G. & Joachim, Walewski & Randel, Sebastian. (2008). "Visible light communications: Challenges and possibilities. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications", 2008.

[13] John Vissers, Jochen Banspach, Valerio Liga, Tito Tang, Hans Nordin, Stephane Julien, Sergio Martinez, Cecile Villette, "V1 Platooning use-cases, scenario definition and Platooning Levels". European Comission. November 2018. https://platooningensemble.eu/storage/uploads/documents/2021/03/24/ENSEMBLE-D2.2_V1-Platooning-use-cases,-scenario-definition-and-platooning-levels_FINAL.pdf

[14] Euractiv. "Whats driving Europe's strategy on connected cars?". <https://en.euractiv.eu/wp-content/uploads/sites/2/special-report/EURACTIV-Special-Report-Whats-driving-Europe-s-strategy-on-connected-cars.pdf>

[15] Bastien Béchadergue, Wen-Hsuan Shen, Hsin-Mu Tsai. "Comparison of OFDM and OOK modulations for vehicle-to-vehicle visible light communication in real-world driving scenarios". Ad Hoc Networks, Elsevier, 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02196320/document>

[16] "Matlab App Designer Code Generation", https://es.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/app-designer-code-generation.html

[17] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. “Carreteras Urbanas”. 1997. <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/5158E4BA-E9DA-46BF-B740-9CE0A395995E/55864/0410600.pdf>

[18] European Union Law, “Reglamento n ° 112 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) — Prescripciones uniformes sobre la homologación de los faros de los vehículos de motor que emiten un haz de carretera o un haz de cruce asimétrico”. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2014.250.01.0067.01.SPA&toc=OJ%3AL%3A2014%3A250%3ATO_C