

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN DE CÁMARAS NEUROMÓRFICAS PARA COMUNICACIONES OCC

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Alberto Ramos Monagas

Tutores: Dr. José Alberto Rabadán Borges

Dr. Víctor Guerra Yáñez

Fecha: Septiembre de 2022

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado de cierta manera en la realización del presente trabajo.

“A mi familia, sobre todo a mis padres por el apoyo incondicional que me han dado en la duración del proyecto Por no soltarme de la mano en ningún momento de proceso y por creer en mi ni cuando yo mismo lo hacía.

A mi pareja y psicóloga personal, que estuvo apoyándose en cada decisión que tomara y tuvo la paciencia y la entrega para proporcionarme la ayuda idónea en el momento idóneo. Sin su apoyo nada hubiera sido igual.

A mi grupo de amigos que he creado en mi paso por el máster, porque he descubierto a personas maravillosas que me han servido de apoyo y querido durante esta trayectoria. Sin vosotros esta aventura no hubiera sido igual, y os llevo a cada uno en el corazón.

Al Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC) por acogerme en el Laboratorio de Fotónica y a sus integrantes por el tiempo dedicado en ayudarme y formarme.

Y, por último, a mis tutores por darme la oportunidad de contribuir en esta área de la tecnología tan poco estudiada y por guiarme durante esta aventura, sacando tiempo de donde no lo tenían para poder reunirse conmigo, resolver mis dudas y por su inmejorable trato. Sin ellos no hubiera sido posible sacar este trabajo a delante.”

Resumen

Las *Optical Wireless Communications* han cobrado importancia en los últimos años con el desarrollo de enlaces de comunicaciones de alta velocidad basados en la luz visible e infrarroja. Estas técnicas ofrecen la suficiente velocidad y escalabilidad como para ser incluidas en futuros esquemas más allá del 5G para dar soporte a los actuales sistemas de radiofrecuencia. La premisa de esta tecnología es establecer una conexión mediante la luz emitida de lámparas, farolas o televisores LED, es decir, aquellos dispositivos capaces de emitir luz. De forma complementaria nace *Optical Camera Communications*, una tecnología que utiliza las cámaras como receptores gracias a la ubicuidad de los sensores CMOS disponibles en un gran número de dispositivos móviles. Esta característica convierte a esta tecnología en una seria candidata a ser adoptada por el mercado de masas. Sin embargo, a finales de la década de 2000, las cámaras impulsadas por eventos establecieron un nuevo paradigma en el campo de los sensores de imagen. Este tipo de dispositivos, también denominados cámaras neuromórficas, funcionan de forma diferente a los sensores de imagen tradicionales, ya que cuentan con una matriz de píxeles que responden de forma independiente a los cambios de brillo en la imagen, permaneciendo en estado de reposo cuando no se detectan dichos cambios. Sin embargo, esta tecnología no ha sido debidamente estudiada con fines de comunicación. Esto abre una nueva línea de investigación, el uso de este tipo de cámaras como receptores.

Palabras clave

Cámaras neuromórficas, comunicación por cámara óptica, comunicación óptica inalámbrica, comunicación de luz visible y sensores de imagen.

Abstract

Optical wireless communications have become increasingly important in recent years with the development of high-speed communications links based on visible and infrared light. In addition, both technologies offer enough speed and scalability to be included in future schemes beyond 5G to support current radio frequency systems. The premise of this technology is to establish a connection with the light of lamps, streetlamps, or LED televisions, i.e., those devices that emit light. As complementary technology, Optical Camera Communications is born, a technology that uses cameras as receivers thanks to the ubiquity of CMOS sensors available in a large number of mobile devices. This feature makes this technology a serious candidate to be adopted by the mass market soon. Nevertheless, in the late 2000s, event-driven cameras established a new paradigm in the field of image sensors. These types of devices, which are also referred to as neuromorphic cameras, operate differently from traditional image sensors by having an array of pixels that respond independently to changes in brightness in the image, remaining in a quiescent state when no such changes are detected. Notwithstanding, this technology has not been properly studied for communication purposes. This opens a new line of research, the use of this type of cameras as receivers.

Key words

Neuromorphic Cameras, Optical Camera Communication, Optical Wireless Communication, Visible Light Communication, and Image Sensors.

Índice de contenidos

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	16
1.1. ANTECEDENTES	16
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	20
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	21
1.4. MEDIOS UTILIZADOS.....	22
1.5. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	23
CAPÍTULO 2: OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION	25
2.1. INTRODUCCIÓN	25
2.2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	25
2.3. APLICACIONES Y TECNOLOGÍAS DE APOYO	27
2.3.2. <i>Free Spacial Optical</i>	29
2.3.3. <i>Visible Light Communications</i>	31
2.3.4. <i>LiFi</i>	33
2.3.5. <i>Optical Camera Communications</i>	35
2.4. DESAFÍOS Y LIMITACIONES.....	36
2.4.1. <i>Dispositivos y componentes</i>	37
2.4.2. <i>Sistemas ópticos front-end</i>	39
2.4.3. <i>Modelos de canales</i>	40
2.4.4. <i>Técnicas de transmisión de datos</i>	41
2.4.5. <i>Protocolos de control de acceso al medio</i>	42
2.4.6. <i>Mitigación de interferencias y apoyo a la movilidad</i>	42
2.4.7. <i>Redes y protocolos</i>	43
CAPÍTULO 3: OPTICAL CAMERA COMMUNICATION	45
3.1. INTRODUCCIÓN.....	45
3.2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	46
3.3. TRANSMISORES Y RECEPTORES OCC	48
3.3.1. <i>Transmisores</i>	48
3.3.2. <i>Receptores</i>	49
3.4. ESQUEMAS DE MODULACIÓN	54
3.4.1. <i>Modulación de muestreo de Nyquist</i>	54
3.4.2. <i>Señalización de región de interés</i>	56
3.4.3. <i>Modulación híbrida cámara-PD</i>	56
3.4.4. <i>OCC basado en Rolling Shutter</i>	57
3.5. APLICACIONES.....	59
3.5.1. <i>Esquemas interiores</i>	59
3.5.2. <i>Esquemas exteriores</i>	62
	9

3.6.	POTENCIAL Y DESAFÍOS	63
3.6.1.	<i>Potencial tecnológico</i>	64
3.6.2.	<i>Retos y desafíos</i>	65
CAPÍTULO 4: SENSORES DE VISIÓN NEUROMÓRFICOS		68
4.1.	INTRODUCCIÓN	68
4.2.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	68
4.2.1.	<i>Sistema visual humano</i>	68
4.2.2.	<i>Dynamic Vision Sensor</i>	70
4.2.3.	<i>Background Activity</i>	74
4.3.	COMPARACIÓN CON LOS SENSORES CONVENCIONALES	75
4.4.	PROCESAMIENTO DE LOS EVENTOS	77
4.4.1.	<i>Representación de eventos</i>	77
4.4.2.	<i>Métodos para el procesamiento de los eventos</i>	79
4.5.	SISTEMAS Y APLICACIONES BASADOS EN EVENTOS	80
4.5.1.	<i>Seguimiento</i>	81
4.5.2.	<i>Clasificación</i>	82
4.5.3.	<i>Reconocimiento</i>	82
4.5.4.	<i>Detección</i>	82
4.5.5.	<i>Localización y odometría</i>	83
4.5.6.	<i>Sistemas de transporte</i>	83
4.5.7.	<i>Salud</i>	84
4.5.8.	<i>Industria</i>	84
4.6.	POTENCIAL DE LA TECNOLOGÍA	84
4.7.	LIMITACIONES Y DESAFÍOS	85
CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL SISTEMA		87
5.1.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL MODELO	87
5.2.	LIMITACIONES Y SOLUCIONES DEL MODELO	89
5.3.	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO	90
5.4.	ARQUITECTURA DEL SISTEMA	91
5.5.	IMPLEMENTACIÓN	95
CAPÍTULO 6: RESULTADOS EXPERIMENTALES		99
6.1.	OBJETIVOS DE LA VALIDACIÓN	99
6.2.	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	99
6.3.	DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	101
6.3.1.	<i>Número de eventos por segundo</i>	101
6.3.2.	<i>Forma de onda detectada</i>	101
6.4.	ANÁLISIS DE LOS DATOS	101
6.4.1.	<i>Análisis del número de eventos por segundo</i>	102
		10

6.4.2.	<i>Análisis de la forma de onda detectada</i>	105
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		132
7.1.	REVISIÓN DE LOS OBJETIVOS	132
7.2.	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	132
7.3.	IMPACTO DEL USO DE CÁMARAS DVS	133
7.4.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	133
CAPÍTULO 8: PLIEGO DE CONDICIONES		134
8.1.	INTRODUCCIÓN.....	134
8.2.	REQUISITOS HARDWARE	134
8.3.	REQUISITOS SOFTWARE.....	135
8.4.	INFRAESTRUCTURA.....	135
CAPÍTULO 9: PRESUPUESTO		136
9.1.	INTRODUCCIÓN.....	136
9.2.	RECURSOS MATERIALES.....	136
9.1.	RECURSOS SOFTWARE.....	137
9.2.	RECURSOS HARDWARE	137
9.3.	RECURSOS HUMANOS.....	138
9.3.	REDACCIÓN DEL DOCUMENTO	139
9.4.	DERECHOS DEL VISADO DEL COITT	140
9.5.	GASTOS DE TRAMITACIÓN Y ENVÍO	141
9.6.	PRESUPUESTO TOTAL.....	141
BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA		142
ANEXOS		160
A.1.	CÓDIGO UTILIZADO	160
A.1.1.	<i>def_instrumentation.py</i>	160
A.1.2.	<i>events_per_second.py</i>	160
A.1.3.	<i>def_measureFreq.py</i>	161
A.1.4.	<i>high_power_pixel.py</i>	162
A.1.5.	<i>extract_data.py</i>	163

Índice de figuras

Figura 1. Efecto RS inducido por una lámpara LED RGB que conmuta la secuencia R, G y B (foto en el IDeTIC).....	18
Figura 2. Ensanchamiento del pulso debido al efecto RS (captura del IDeTIC).....	19
Figura 3. Comportamiento del tiempo de exposición [15].....	19
Figura 4. Experimento realizado en el laboratorio de software del IDeTIC.	20
Figura 5. Señal recuperada del experimento (foto del IDeTIC).	21
Figura 6. Diagrama de bloques del sistema OWC [29].....	26
Figura 7. Configuraciones de enlace OWC: (a) LOS dirigida, (b) LOS no dirigida, (c) difusa, (d) cuasi difusa, (e) LOS multipuntos y (f) configuraciones de receptor [29].	26
Figura 8. Ejemplo de aplicaciones de OWC [30].	28
Figura 9. Diagrama de bloques básico de un sistema FSO [33].	30
Figura 10. Algunos escenarios de aplicación de los sistemas FSO [39].	31
Figura 11. Arquitectura básica de la conectividad UE-a-CN en el sistema VLC [50].....	33
Figura 12. Escenarios de aplicación de los sistemas VLC/LiFi, (a) interior, (b) exterior [30].	34
Figura 13. Metodología básica de trabajo de LiFi [57].	35
Figura 14. Espectro combinado de IR y VL es 2600 veces mayor que el espectro completo de RF [66].....	37
Figura 15. Ancho de banda necesario del dispositivo en función del espectro de emisión [70].	38
Figura 16. Diagrama de un sistema OCC [99].....	46
Figura 17. Principio de funcionamiento de un sistema OCC [100].....	47
Figura 18. Filtros de color de un sensor de imagen. (a) Disposición Bayer. (b) Disposición Foveon X3 [100].	47
Figura 19. Esquema de las principales pantallas en el mercado [105].....	48
Figura 20. Campo de visión diagonal de una cámara [106].	49
Figura 21. Ejemplo del proceso de demosaicing [106].	50
Figura 22. (a) Comparación entre el GS y el RS; (b) comparación estructural entre los sensores CCD y CMOS [106].	51
Figura 23. (a) Periodo de captura del frame; (b) distorsión RS que provoca un objeto skewed en el frame de captura [106].	53
Figura 24. Modulación de muestreo Nyquist [106].	55
Figura 25. Marca de agua invisible para OCC [106].....	55
Figura 26. Señalización de la región de interés [106].....	56
Figura 27. Funcionamiento básico de un sistema IS-OWC [106].	57
Figura 28. Proceso de demodulación basado en RS [106].	58
Figura 29. Frames capturados de la modulación OOK con diferentes frecuencias [106].	58
Figura 30. Efecto Blooming en RS-OCC [106].	59
Figura 31. Esquema de movimiento sobre la cámara [106].	60

Figura 32. Transmisor basado en pantalla para SVLC [106].	61
Figura 33. Esquema de posicionamiento en interiores para OCC [106].	61
Figura 34. Separación espacial de múltiples fuentes mediante un sensor de imagen [142].	62
Figura 35. Distorsiones causadas por varias lentes [106].	66
Figura 36. (a) la composición del sistema visual humano, (b) la estructura multicapa de la retina, y (c) sinapsis [162].	69
Figura 37. (a) Cámara basada en eventos y (b) principio de funcionamiento de la detección de eventos [170].	71
Figura 38. (a) Esquema abstracto de píxeles del DVS, (b) principio de funcionamiento, (c) respuesta de un array DVS a una persona, (d) matriz DVS sobre una espiral de 500 Hz y (e) secuencia continua de eventos [162].	72
Figura 39. Principio del filtro de correlación espaciotemporal. Un evento puede pasar el filtro si tiene correlación con sus vecinos espaciales dentro de una ventana temporal dT [174].	74
Figura 40. Visualización de la salida de un sensor de visión neuromórfico y una cámara estándar [182].	76
Figura 41. Distintas aplicaciones de la tecnología neuromórfica [203].	81
Figura 42. Sobremuestreo vs submuestreo [228].	87
Figura 43. Diseño esquemático del sistema.	91
Figura 44. Diseño del transmisor.	92
Figura 45. Cámara DVXplorer [232].	92
Figura 46. Sistema receptor.	94
Figura 47. Capas del kit de desarrollo de DV software [233].	95
Figura 48. Arquitectura del sistema.	95
Figura 49. Primera parte del diseño (<code>def_instrumentation.py</code>).	96
Figura 50. Configuración del software DV.	96
Figura 51. Segunda parte del diseño (<code>def_measureFreq.py</code>).	97
Figura 52. Tercera parte del diseño (<code>extract_data.py</code>).	97
Figura 53. Flujo de trabajo completo.	98
Figura 54. Ejemplo de la configuración experimental.	99
Figura 55. Medidas en cámara oscura.	100
Figura 56. Señales cuadradas 5 Vpp a diferentes frecuencias.	100
Figura 57. Visualización de DV para 0.25 m por frecuencia.	106
Figura 58. Visualización de DV para 0.5 m por frecuencia.	106
Figura 59. Visualización de DV para 1 m por frecuencia.	107
Figura 59. Visualización de DV para 1.5 m por frecuencia.	107
Figura 60. Visualización de DV para 2 m por frecuencia.	108
Figura 61. Visualización de DV para 2.5 m por frecuencia.	108
Figura 62. Visualización de DV para 3 m por frecuencia.	109
Figura 64. Forma de onda de 100 Hz a 0.25 m.	110
Figura 65. Forma de onda de 1 kHz a 0.25 m.	110
Figura 66. Forma de onda de 5 kHz a 0.25 m.	111

<i>Figura 67. Forma de onda de 10 kHz a 0.25 m.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 68. Esquemático del circuito de un píxel DVS [234].</i>	<i>112</i>
<i>Figura 68. Forma de onda de 100 Hz a 0.5 m.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 69. Forma de onda de 1 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 70. Forma de onda de 5 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 71. Forma de onda de 10 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 72. Forma de onda de 100 Hz a 1 m.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 73. Forma de onda de 1 kHz a 1 m.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 74. Forma de onda de 5 kHz a 1 m.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 75. Forma de onda de 10 kHz a 1 m.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 76. Forma de onda de 100 Hz a 1.5 m.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 77. Forma de onda de 1 kHz a 1.5 m.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 78. Forma de onda de 5 kHz a 1.5 m.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 79. Forma de onda de 10 kHz a 1.5 m.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 81. Situación con más de un evento por cambio de luminosidad [234]......</i>	<i>120</i>
<i>Figura 80. Forma de onda de 100 Hz a 2 m.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 81. Forma de onda de 1 kHz a 2 m.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 82. Forma de onda de 5 kHz a 2 m.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 83. Forma de onda de 10 kHz a 2 m.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 84. Forma de onda de 100 Hz a 2.5 m.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 85. Forma de onda de 1 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 86. Forma de onda de 5 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 87. Forma de onda de 10 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 88. Forma de onda de 100 Hz a 3 m.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 89. Forma de onda de 1 kHz a 3 m.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 90. Forma de onda de 5 kHz a 3 m.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 91. Forma de onda de 10 kHz a 3 m.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 94. Forma de onda continua de 100 Hz a 0.5 m.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 95. Forma de onda continua de 1 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 96. Forma de onda continua de 5 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 97. Forma de onda continua de 10 kHz a 0.5 m.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 98. Forma de onda continua de 100 Hz a 2.5 m.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 99. Forma de onda continua de 1 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 100. Forma de onda continua de 5 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 101. Forma de onda continua de 10 kHz a 2.5 m.....</i>	<i>130</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Comparación de las distintas tecnologías OWC [30].</i>	28
<i>Tabla 2. Comparación entre Rolling y Global shutter [106].</i>	52
<i>Tabla 3. Principales ventajas y limitaciones de OCC [106].</i>	63
<i>Tabla 4. Frame rate de la cámara en varios dispositivos [106].</i>	65
<i>Tabla 5. Comparación de tres retinas de silicona representativas [162].</i>	73
<i>Tabla 6. Características de frames vs eventos [183].</i>	76
<i>Tabla 7. Características de la cámara DVXplorer [232].</i>	93
<i>Tabla 8. Valores de eventos por distancia para 0.25 m.</i>	102
<i>Tabla 9. Valores de eventos por distancia para 0.5 m.</i>	102
<i>Tabla 10. Valores de eventos por distancia para 1 m.</i>	102
<i>Tabla 11. Valores de eventos por distancia para 1.5 m.</i>	102
<i>Tabla 12. Valores de eventos por distancia para 2 m.</i>	103
<i>Tabla 13. Valores de eventos por distancia para 2.5 m.</i>	103
<i>Tabla 14. Valores de eventos por distancia para 3 m.</i>	103
<i>Tabla 15. Polaridad de los eventos detectados.</i>	104
<i>Tabla 16. Coste de los recursos software.</i>	137
<i>Tabla 17. Coste de los recursos hardware.</i>	138
<i>Tabla 18. Coste de los recursos humanos.</i>	139
<i>Tabla 19. Presupuesto parcial.</i>	139
<i>Tabla 20. Presupuesto con el coste de redacción.</i>	140
<i>Tabla 21. Presupuesto total.</i>	141
<i>Tabla 22. Código de def_instrumentation.py.</i>	160
<i>Tabla 23. Código de events_per_second.py.</i>	160
<i>Tabla 24. Código de def_measureFreq.py.</i>	161
<i>Tabla 25. Código de high_power_pixel.py.</i>	162
<i>Tabla 26. Código de extract_data.py.</i>	163

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Hoy en día, con el continuo aumento de los dispositivos conectados a Internet, junto con la rápida difusión del Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), ha generado una gran demanda en el campo de las comunicaciones inalámbricas, así como una progresiva saturación del espectro radioeléctrico, que se ha convertido en un problema real [1]. Este suceso ha obligado a los investigadores en la búsqueda de soluciones que alivien la carga de dichos canales de radio convencionales, a la vez que se aseguren velocidades de transmisión altas y la escalabilidad en futuras arquitecturas. De esta manera, aparecen así las Comunicaciones Ópticas Inalámbricas (OWC, del inglés *Optical Wireless Communication*), cuyos enlaces se han posicionado como una tecnología alternativa en el sector de las comunicaciones, más concretamente, dentro del campo de las comunicaciones ópticas se sitúa en la rama de las Comunicaciones por Luz Visible, del inglés *Visible Light Communication* (VLC) [2]. Este conjunto de técnicas utiliza el amplio espectro no regulado de la luz visible (VL, del inglés *Visible Light*) junto a la actual infraestructura de luminarias LED para la transmisión de información, a la par que preservan su función principal como sistema de iluminación. Por ende, las OWC han cobrado gran importancia con el paso de los últimos años gracias al desarrollo de los enlaces de comunicaciones de alta velocidad basados en VLC y de infrarrojos (IR).

Tanto VLC como IR ofrecen suficiente velocidad y escalabilidad para ser incluidas en futuros esquemas más allá de los del 5G, sirviendo de apoyo a los sistemas actuales de radiofrecuencia (RF) [3]. Además, se ha realizado un importante esfuerzo para proporcionar enlaces OWC a nivel de *multigigabit*. De la misma manera, los esquemas de modulación multiportadora, los enfoques de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, del inglés *Wavelength Division Multiplexing*) y la reducción de la capacidad parasita de los dispositivos LED durante el proceso de fabricación son algunos de los aspectos que se han estudiado en profundidad [4,5].

Por otra parte, también se ha investigado la multiplexación espacial basada en el momento de amplitud orbital (OAM, del inglés *Orbital Amplitude Momentum*) como alternativa para los *backhails* de alta velocidad en 5G utilizando OWC [6]. En el ámbito de las telecomunicaciones, una red de retorno, del inglés *backhaul*, se define como la porción de una red jerárquica que comprende los enlaces intermedios entre el núcleo (*backbone*) y las subredes en sus bordes. Su uso suele implicar una línea de alta capacidad, es decir, líneas de alta velocidad capaces de transmitir un gran ancho de banda (BW) a velocidades muy elevadas. De manera análoga, también se ha investigado en

profundidad el uso de esquemas u estructuras MIMO, del inglés *Multiple Input Multiple Output*, utilizando sistemas ópticos de formación de imágenes y matrices receptoras [7].

Es tal el interés por esta tecnología que el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) posee un grupo asignado, el IEEE 802.15.7, para la regulación y normalización de estos sistemas, así como sus aplicaciones [8]. No obstante, a pesar de los importantes avances mencionados en el campo de los enlaces, las velocidades de datos alcanzados y del desarrollo de estándares durante los últimos años, se puede observar que, tanto VLC como OWC, tienen una importante barrera de entrada al mercado de masas (mercado de bienes a gran escala para un número significativo de consumidores finales). Es por ello por lo que, algunos fabricantes como pureLifi (Reino Unido) y Oledcomm (Francia), han intentado introducir en el mercado algunos productos no estandarizados sin éxito.

De igual forma, la introducción de receptores OWC en los teléfonos móviles actuales es un proceso costoso en términos de producción y muchos de estos fabricantes aún no han abordado el diseño de los circuitos integrados (CI) con el uso de esta tecnología. Conjuntamente, el exceso de expectativas y promesas de dicha técnica con respecto a los resultados obtenidos ha causado un gran rechazo [9]. Como posible solución a este problema, se ha propuesto el uso de las cámaras como receptores de los enlaces ópticos. A esta rama de la tecnología se le conoce como *Optical Camera Communication* (OCC) [10].

Los sistemas OCC comparten con cualquier sistema de comunicaciones los bloques de transmisión, canal y receptor. Del mismo modo, es una tecnología relacionada con la mencionada OWC, que utiliza la ubicuidad de los sensores de imagen en los teléfonos inteligentes y en una gran cantidad de aparatos electrónicos de consumo. Estas características convierten a OCC en una seria candidata a la adopción masiva del mercado en un futuro próximo.

La mayoría de las cámaras mencionadas anteriormente se basan en la técnica de persiana o *Rolling Shutter* (RS), que implementa un proceso de escaneo del sensor fila por fila. De esta manera, una fuente de luz LED que cambie a una frecuencia superior a la velocidad de obturación, aparecerá en la imagen como una serie de rayas oscuras y brillantes, representando así datos binarios. Dicho efecto es aprovechado por los enlaces OCC para mejorar la velocidad de transmisión más allá del *frame rate* (número de imágenes capturadas por segundo, FR) [11-12]. Análogamente, la investigación actual sobre OCC se centra en proporcionar capacidades de localización, comunicación *device-to-device* (D2D), comunicación entre vehículos y redes de sensores [13].



Figura 1. Efecto RS inducido por una lámpara LED RGB que conmuta la secuencia R, G y B (foto en el IDeTIC).

La Figura 1 muestra el efecto de RS en una evaluación experimental realizada en el Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC). Se puede observar que, aunque el ojo humano no puede percibir la variación de la forma de onda de la fuente de luz (emitida durante un tiempo de exposición lo suficientemente elevado en el receptor), la cámara integrada en el smartphone si es capaz de detectar tales variaciones gracias al efecto de RS.

La anchura de la línea viene dada por la relación entre la frecuencia de corte (f_c) y el tiempo de desplazamiento de la fila (t_D), que corresponde a la ventana temporal durante el proceso de exploración/lectura de la fila. Asimismo, el BW máximo alcanzable de un enlace OCC basado en RS depende de varios parámetros.

Por un lado, la relación entre la frecuencia de muestreo (f_M) y el t_D permite determinar la anchura de la línea. El tamaño proyectado por la fuente de luz en el sensor imagen depende de la geometría del enlace y de la óptica del receptor. Como norma general, cuanto mayor sea el emisor, mayor será el número de símbolos detectados en la imagen.

Como se observa en la Figura 2, el tiempo de exposición (t_E) tiene un efecto perjudicial en las comunicaciones, ya que, a medida que aumenta, el BW del canal se reduce debido a que el sistema se comporta como un filtro de media móvil [14].

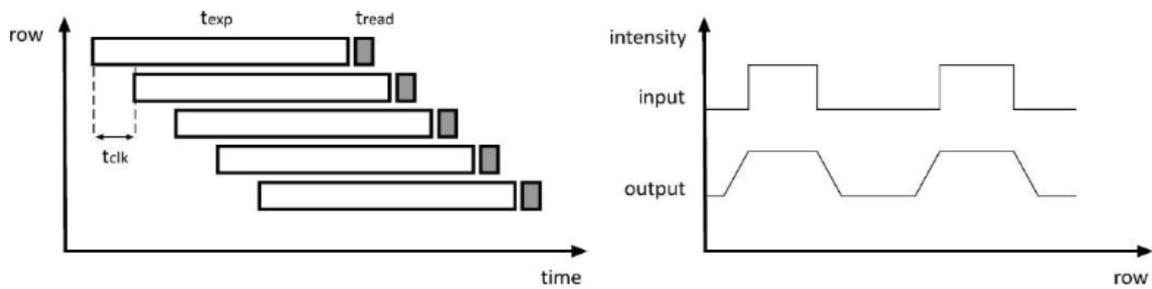


Figura 2. Ensanchamiento del pulso debido al efecto RS (captura del IDETIC).

El t_E [15] se define como el tiempo que se tarda en escanear una fila de píxeles. Los tiempos largos generan imágenes más brillantes ya que los fotodiodos acumulan luz durante un tiempo prolongado, mientras que los cortos, por el contrario, producen imágenes más oscuras.

En términos de comunicaciones, los t_E largos podrían generar un efecto crítico. La Figura 3 muestra cómo afecta t_E a las bandas recibidas, presentándose el aumento de t_E de izquierda a derecha. Este aumento produce una mezcla cada vez mayor entre las bandas conectadas, hasta un punto en el que no se distinguen. Por lo tanto, es necesario reducir al mínimo el t_E alcanzable.

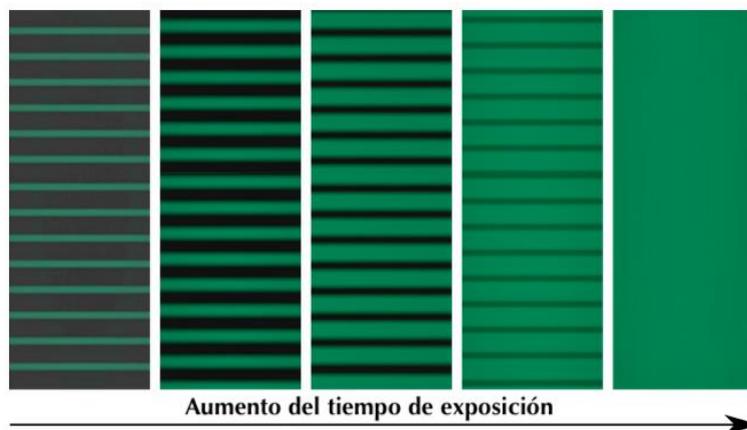


Figura 3. Comportamiento del tiempo de exposición [15].

A finales de la década de los 2000, las cámaras basadas en eventos o sensores de visión dinámica (DVS) establecieron un nuevo paradigma en el ámbito de los sensores de imágenes [16]. Estos tipos de dispositivos, que también se denominan cámaras neuromórficas, funcionan de forma diferente a la de los sensores de imágenes tradicionales.

1.2. Justificación e importancia

Las cámaras neuromórficas disponen de una matriz de píxeles que responden de forma independiente a los cambios de brillo en la imagen, permaneciendo en un estado de reposo cuando no se detectan variaciones. De tal manera, la intensidad de luz detectada se compara continuamente con un nivel de referencia, produciendo eventos si se supera ese umbral.

Los distintos paquetes de datos mostrados en la Figura 2 incluyen una marca de tiempo (t), las coordenadas de los píxeles (x, y) y la dirección del evento (flanco de subida \uparrow o de bajada \downarrow), formando en su conjunto un flujo de datos. Adicionalmente, algunos de estos tipos de cámaras incluyen una medición instantánea de la intensidad de la luz (sensor de imagen monocromático).

La Figura 4 muestra una imagen obtenida en el laboratorio del IDeTIC con una cámara DVS modelo DVXplorer de Inivation2 [17] en la que se muestra el entorno del experimento y el software de visualización del DVS. Dicho experimento consta de una cámara DVS separada a 1,2 metros de un LED azul excitado con una señal con forma de onda cuadrada a 100 Hz. Mientras, en la Figura 5 se puede apreciar que, después de procesar una captura con una baja sensibilidad, la señal se recupera correctamente.



Figura 4. Experimento realizado en el laboratorio de software del IDeTIC.

La tasa de datos de este tipo de cámaras suele superar varios cientos de millones de eventos por segundos. Además, estas cámaras se usan actualmente en entornos industriales para aplicaciones de *computer vision* (CV) [18], campo que enseña a los ordenadores a ver y entender el contenido de las imágenes y como tecnología de apoyo para vehículos autónomos [19]. No obstante, esta tecnología no ha sido debidamente estudiada con fines de comunicación. El gran BW disponible en este tipo de receptor, así como su sensibilidad y rango dinámico mejorados, convierte a esta tecnología en un perfecto candidato para la implantación de una amplia gama de enlaces OWC.

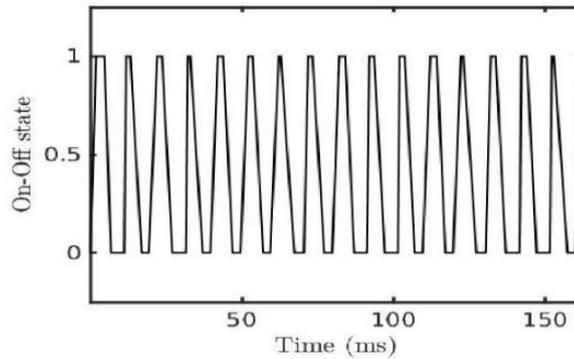


Figura 5. Señal recuperada del experimento (foto del IDeTIC).

La importancia de este tipo de cámaras ha conseguido aumentar el interés y la atención por parte de la comunidad científica para entender cuáles pueden ser sus aplicaciones. Dado que esta tecnología emula el comportamiento de la visión humana como un sistema de picos, se han desarrollado múltiples aplicaciones de *machine learning* (ML) y CV durante los últimos años. Por ejemplo, en [20] utilizaron un conjunto de datos de conducción basados en DVS para entrenar y probar un sistema de redes neuronales en forma de picos, demostrando su viabilidad para la conducción autónoma. Al mismo tiempo, en [21] utilizaron una cámara DVS para entrenar un conjunto de máquinas neuronales (NSM, del inglés *Neural State Machines*), con fines relacionados con CV.

En esta propuesta se pretende analizar y proponer diferentes opciones y estudiar cuáles son sus características y parámetros más importantes. El modelo que se va a evaluar consta de un sistema de transmisión con un emisor LED que varía su frecuencia y un sistema de recepción basado en cámara neuromórfica.

Al tratarse de una tecnología altamente novedosa, no hay muchas referencias sobre las técnicas, las prestaciones y capacidades de este tipo de sistemas. Así pues, este proyecto pretende abrir una nueva línea de investigación con un gran potencial, ya que, como se comentó anteriormente, las cámaras DVS aún no han sido estudiadas adecuadamente como receptores OCC, y las posibilidades de contribuir a este nuevo campo son infinitas.

1.3. Objetivos y alcance del proyecto

Este proyecto se centra en determinar el diseño de un aplicativo que permitirá efectuar la comunicación síncrona entre transmisor y receptor con una cámara neuromórfica. Las cámaras neuromórficas son difíciles de incorporar en un CI, como ocurre con los microbolómetros en las cámaras térmicas infrarrojas de onda media (MWIR). Dichas cámaras suelen presentar un número

reducido de píxeles debido al elevado coste de integración a nivel espacial de toda la electrónica de control adyacente. Sin embargo, los actuales diseños de última generación muestran sensores con resoluciones de 1280x960 y con un bajo consumo de energía (122 nW por píxel) [22], proporcionando una velocidad de 1,3 Gevents/s. Este tipo de sensor, aunque todavía no ha llegado al mercado, se espera que proporcione tasas de datos aún más altas para el funcionamiento de VLC en el futuro.

En definitiva, este proyecto se centra en proporcionar el modelado fundamental de los dispositivos DVS para las comunicaciones OCC, utilizando cámaras basadas en eventos como receptores, y en demostrar la viabilidad del uso de esta tecnología para una amplia gama de aplicaciones y escenarios. Asimismo, debido a lo novedoso e innovador de este tipo de técnica, el proyecto se centra en proporcionar los fundamentos científicos y técnicos de las comunicaciones basadas en DVS.

En relación con los objetivos, el presente proyecto tiene como meta el estudio de los sistemas OCC utilizando como receptores cámaras neuromórficas. Análogamente, el presente Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene fijados los siguientes los objetivos generales:

- OG1.** Estudiar el comportamiento de los enlaces basados en DVS en interiores.
- OG2.** Estudiar la viabilidad de desarrollar receptores ópticos basados en cámaras DVS.

Por otro lado, los objetivos específicos están recogidos en:

- OE1.** Estudiar mecanismos eficientes de procesamiento de flujos DVS para explotar la velocidad de datos alcanzable de este tipo de cámaras.
- OE2.** Caracterizar el límite experimental de las cámaras DVS para establecer enlaces de largo alcance mientras reciben información a la máxima velocidad posible, y evaluar las métricas de comunicación resultantes.
- OE3.** Estudiar la viabilidad de integrar este tipo de cámaras en sistemas OWC para diferentes entornos de aplicación.

1.4. Medios utilizados

En este punto se definen los medios materiales utilizados para la elaboración de este proyecto, cuyos medios se pueden clasificar en diferentes recursos *hardware* (HW) y *software* (SW).

Además, el presente proyecto contará con la infraestructura y los equipos de instrumentación de la División de Tecnología Fotónica y Comunicaciones (DTFC) del IDeTIC.

Para la realización del código fue necesario disponer de un ordenador portátil con conexión a internet, el entorno de programación Python y del SW de DVXplorer para el manejo de la cámara. Este último medio permite visualizar y registrar la salida del sensor de la cámara DVS DXA100 (receptor OCC), desarrollar aplicaciones en función a los eventos recibidos y desplegar aplicaciones en dispositivos IoT hasta el servidor en la nube.

De igual forma, para la parte HW, fue necesario contar con una fuente de alimentación LED para operar como emisor óptico con una *protoboard*, una cámara oscura como medio de transmisión para conseguir un aislamiento de la luz durante las pruebas, una cámara DVS con su respectivo trípode, un generador de funciones para variar la frecuencia de la señal emitida y una fuente de alimentación.

1.5. Organización de la memoria

Este documento se estructurará en 8 capítulos, siendo este primero el actual, en el que se lleva a cabo una introducción inicial a modo de motivación, con el fin de comprender los motivos que han llevado a la elaboración de este proyecto. Además, se define la importancia y necesidad del tema que se aborda, dejando explícitos los elementos de la investigación y diseño. Los capítulos sucesivos abarcan contenidos bastantes diferenciados, los cuales son comentados a continuación.

- **Capítulo 2.** A lo largo de este capítulo se ofrece una visión general de los sistemas basados en comunicaciones ópticas inalámbricas, centrándose en una serie de configuraciones y tecnologías específicas.
- **Capítulo 3.** Este capítulo presenta los principios subyacentes de las comunicaciones ópticas por cámara y ofrece una visión general de esta tecnología emergente con las recientes actividades de estandarización. Asimismo, se describen las cuestiones técnicas clave, como la movilidad, la cobertura, las interferencias, la mejora del rendimiento, etc.
- **Capítulo 4.** Este capítulo se centra principalmente en los sensores de visión neuromórficos que emiten datos basados en eventos en lugar de en fotogramas. A lo largo del capítulo se ofrece un estudio de la literatura existente que cubre la detección neuromórfica, el procesamiento de señales y algunas de sus principales aplicaciones.
- **Capítulo 5.** A lo largo del capítulo se documenta el diseño del sistema implementado en Python, que pone en práctica la teoría de la visión neuromórfica implantada por el uso de

cámaras basadas en eventos como receptores. Del mismo modo, se describe el diseño del transmisor y del receptor, así como las decisiones tomadas en cada uno de ellos.

- **Capítulo 6.** En este capítulo tiene lugar la descripción del sistema implementado, utilizado para la realización de pruebas de funcionamiento y de validación. Una vez realizadas, se exponen los resultados obtenidos.
- **Capítulo 7:** Este capítulo refleja los logros obtenidos con el diseño de un sistema basado en comunicaciones ópticas por cámara basada en eventos, a partir de un análisis de los resultados y de los experimentos probados. Las limitaciones se redactan teniendo en cuenta las limitaciones del método descrito, para su posterior perfeccionamiento por parte de otros diseñadores e investigadores del campo; así como para el enriquecimiento de algunas de las temáticas abordadas.
- **Capítulo 8:** A lo largo de este capítulo se expone la parte contractual en la cual se establecen los requisitos necesarios para la elaboración de este proyecto
- **Capítulo 9:** En este capítulo se expondrá de manera desglosada el presupuesto de este proyecto siguiendo las directrices técnicas del COITT (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación).

Finalmente, se incluirán las referencias bibliográficas, haciendo un listado de la documentación consultada y siguiendo las normas establecidas. De igual forma, la totalidad del código se encontrará en el apartado del anexo.

CAPÍTULO 2: Optical Wireless Communication

2.1. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas se han convertido sin duda en una utilidad esencial de nuestra vida cotidiana [23]. En la actualidad, la mayoría de este tipo de sistemas utilizan tecnologías de RF para transmitir información. Sin embargo, con la creciente demanda de aplicaciones y servicios de datos, la demanda del espectro de RF supera a la oferta, provocando la congestión de un espectro insuficiente, incapaz de soportar la cantidad de comunicaciones inalámbricas en el futuro, creando así, un cuello de botella en el tráfico inalámbrico [24]. En este sentido, es necesario considerar el espectro óptico para la comunicación inalámbrica.

Hoy en día, el espectro óptico ya es un elemento clave para todo lo que engloba Internet. Las redes de fibra óptica no sólo conectan continentes, sino que constituyen la columna vertebral de las redes de comunicación que proporcionan acceso de datos de alta velocidad a ciudades, pueblos, y cada vez más, hogares. Ampliar los horizontes de la fibra óptica para incluir el medio del espacio libre no sólo parece un paso lógico, sino también uno relativamente sencillo de dar.

Por ello, en los últimos años ha aumentado considerablemente el interés, tanto en el mundo académico como en el de la industria por las tecnologías de comunicación inalámbrica óptica (OWC, del inglés *Optical Wireless Communication*). En la actualidad existen una amplia gama de tecnologías OWC, debido a los numerosos casos de usos a los que pueden prestar. Las principales tecnologías OWC son las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO, del inglés *Free Space Optical*), comunicaciones por luz visible (VLC, del inglés *Visible Light Communication*), las comunicaciones por cámara óptica (OCC, del inglés *Optical Camera Communication*) y las redes inalámbricas con luz, comúnmente denominadas LiFi (del inglés, *Light Fidelity*).

2.2. Descripción y características

En comparación con sus contrapartes en RF [25], las OWC (350-1550 nm) ofrecen características superiores como un BW casi ilimitado para proporcionar una capacidad casi óptima; robustez frente a interferencias electromagnéticas; un alto grado reutilización; un alto grado de seguridad y privacidad; capacidad de soportar aplicaciones de alta velocidad; amplio alcance de los enlaces, desde unos pocos metros hasta 5 km; tecnología verde con una alta eficiencia energética debido al bajo consumo de energía; inmunidad al desvanecimiento; una alta escalabilidad; y

reducción del tiempo de comercialización [26]. Además, como operan en el espectro no regulado, no es necesario el pago de una licencia, lo que supone una solución rentable.

Asimismo, los sistemas OWC que comprenden las comunicaciones ultravioletas (UV, del inglés *Ultra-Violet*), IR, VLC, OCC, FSO [27], entre otros, pueden utilizarse tanto en entornos interiores como exteriores, incluso bajo el agua [28]. La Figura 6 muestra el diagrama de bloques típico

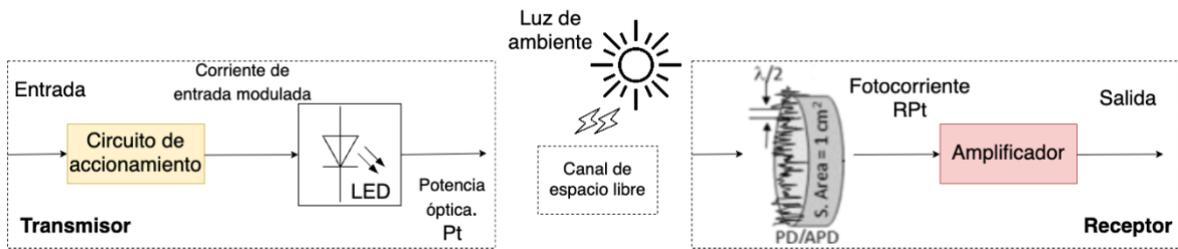


Figura 6. Diagrama de bloques del sistema OWC [29].

La Figura 6 ilustra el diagrama de bloques de un sistema OWC típico compuesto por el transmisor, el canal y el receptor. Donde R hace referencia a la responsividad del fotodetector y P_t es la potencia de transmisión. Mientras, la Figura 7 muestra la posible configuración del enlace OWC, así como el tipo de receptores.

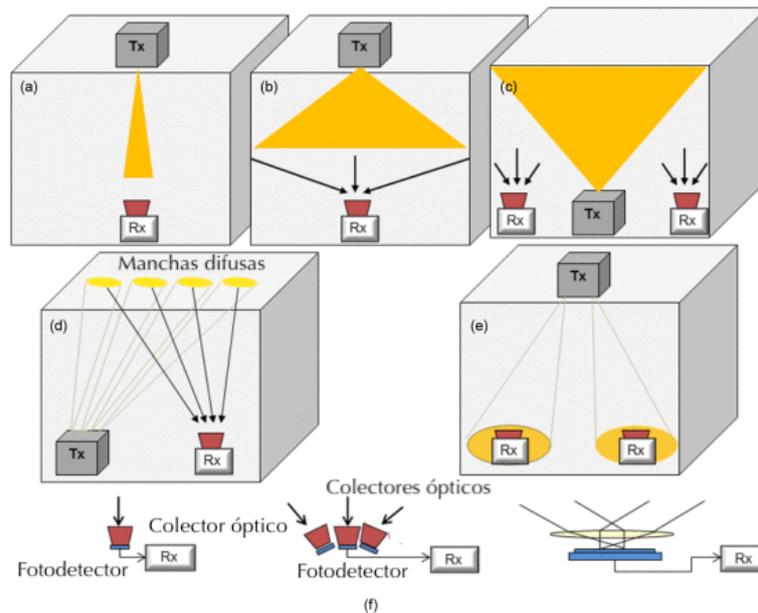


Figura 7. Configuraciones de enlace OWC: (a) LOS dirigida, (b) LOS no dirigida, (c) difusa, (d) cuasi difusa, (e) LOS multipuntos y (f) configuraciones de receptor [29].

El enlace de línea de visión (LOS, del inglés *Line Of Sight*) es la mejor opción para los sistemas OWC en términos de tasas de datos muy elevadas y conexiones de bajo rendimiento de tasa de error de bits, utilizándose principalmente en la aplicación en exteriores. En cambio, las configuraciones difusas y de dispersión ofrecen una mayor movilidad y son más resistentes a las sombras, pero para los enlaces de alta velocidad la pérdida de trayectoria, el ruido y la dispersión inducida por múltiples trayectorias limitan la velocidad máxima de datos en comparación con el enlace LOS.

La mayor parte de los sistemas OWC conocidos se basan en el esquema de modulación de intensidad/detección directa (IM/DD, del inglés *Intensity Modulation/Direct Detection*). El uso de este tipo de esquemas hace necesario un ajuste preciso del frente de onda entre la señal entrante y el oscilador local para garantizar una recepción coherente eficaz. Al igual que en las comunicaciones por fibra óptica, en el lado del receptor se utiliza un fotodetector (PD) para convertir las señales ópticas en eléctricas, seguido de la demodulación/decodificación estándar de la información. En el caso de DD, la implementación es sencilla y utiliza transceptores de bajo coste sin necesidad de diseños complejos de circuitos de alta frecuencia en comparación con los sistemas coherentes.

2.3. Aplicaciones y tecnologías de apoyo

El término OWC hace referencia a cualquier transmisión óptica en un medio no guiado, aunque sus variaciones basadas frecuencia pueden tener un uso diferente. Estas variaciones pueden emplearse en una amplia gama de aplicaciones de comunicaciones que van desde las interconexiones ópticas dentro de los CI, pasando por los enlaces terrestres, hasta las comunicaciones por satélite.

La Figura 8 muestra varios ámbitos en los que se puede aplicar OWC, como son la industria, la sanidad, el transporte, los hogares, las oficinas, centros comerciales, espacios submarinos y el espacio.

En estas aplicaciones, todos los tipos de comunicación, como la de dispositivo a dispositivo (D2D, del inglés *Device-to-Device*); máquina a máquina (M2M, del inglés *Machine-to-Machine*); chip a chip; máquina a usuario; usuario a máquina; vehículo a infraestructura (V2I); vehículo a vehículo (V2V) e infraestructura a vehículo (V2X, del inglés *Infrastructure-to-Vehicle*); punto a punto; multipunto a punto; y punto a multipunto, pueden realizarse utilizando tecnologías OWC. En función del tipo de aplicación, de la velocidad de datos requerida y de la plataforma, pueden aplicarse diversas tecnologías OWC.



Figura 8. Ejemplo de aplicaciones de OWC [30].

La Tabla 1 presenta una comparativa de las varias tecnologías OWC en términos de las características más importantes.

Tabla 1. Comparación de las distintas tecnologías OWC [30].

Tema	VLC	LiFi	OCC	FSO
Transmisor	LED/LD	LED/LD (combinados con difusor óptico)	LED	LD
Receptor	PD/cámara	PD	Cámara	PD
Distancia de comunicación	20 m	10 m	60 m	Más de 10,000 km
Movilidad	No obligatorio	Obligatorio	No obligatorio	No
Nivel de interferencia	Bajo	Bajo	Nulo	Bajo
Topología de la comunicación	Unidireccional o bidireccional	Bidireccional	Unidireccional	Unidireccional o bidireccional
Velocidad de datos	10 Gbps usando LED y 100 Gbps usando LD	10 Gbps usando LED y 100 Gbps usando LD	55 Mbps	40 Gbps

Espectro	VL	IR/VL/UV	IR/VL	IR/VL/UV
Regulación del espectro	No	No	No	No
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de datos muy alta - Espectro disponible muy amplio - Amplia gama de aplicaciones - Uso simultáneo de iluminación y comunicación - Alta seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación bidireccional punto a multipunto - Baja movilidad - Velocidad de datos muy alta - Espectro disponible muy amplio - Amplia gama de aplicaciones - Uso simultáneo de iluminación y comunicación - Alta seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> - Buen rendimiento en condiciones exteriores - Uso simultáneo de la iluminación y la comunicación - Alta seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de datos muy alta - Comunicación de muy larga distancia - Alta seguridad - El rendimiento no se ve afectado significativamente por la lluvia
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - No se garantiza movilidad - Pequeña área de cobertura - Rendimiento afectado por el entorno - Bajo rendimiento en exteriores - Puede crear un agujero de cobertura - Comunicación NLOS muy limitada 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeña área de cobertura - Rendimiento afectado por el entorno - Bajo rendimiento en exteriores - Puede crear un agujero de cobertura - Comunicación NLOS muy limitada 	<ul style="list-style-type: none"> - No apto para comunicaciones de largo alcance - Sólo para aplicaciones de baja velocidad - Sólo comunicaciones LOS 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimiento significativamente afectado por la niebla, la nieve y el polvo - Se ve afectado por la desviación del receptor - Sólo comunicaciones LOS

A continuación, se ofrece una breve descripción de dichas tecnologías.

2.3.2. Free Spacial Optical

La comunicación terrestre FSO es una tecnología LOS que opera en las longitudes de onda de 850, 1300 y 1500 nm, que corresponden a la primera, segunda y tercera ventana de transmisión

de las comunicaciones ópticas, respectivamente [31]. Puede utilizarse en diversas aplicaciones, desde enlaces de alta velocidad entre edificios hasta redes de banda ancha inalámbricas de nueva generación, *back-haul* para redes celulares inalámbricas y enlace tierra a satélites.

Con el rápido desarrollo y la madurez de los dispositivos óptico-electrónicos, la tecnología FSO se ha restablecido en muchas aplicaciones. Actualmente, la tecnología de radio sobre FSO se considera una nueva plataforma universal que permite la convergencia sin fisuras de las redes de fibra y FSO, extendiendo así la conectividad de banda ancha a zonas desatendidas [32].

La Figura 9 muestra el diagrama de bloques básico de un sistema FSO. Gracias a la formación del haz óptico, es posible la comunicación a larga distancia mediante sistemas FSO. Inicialmente, la información de origen se codifica. Opcionalmente, se puede utilizar la codificación del canal antes de la modulación. El modulador realiza un proceso de modulación OOK/OFDM y si es necesario, se puede utilizar un amplificador óptico para aumentar la intensidad de la potencia del láser modulado.

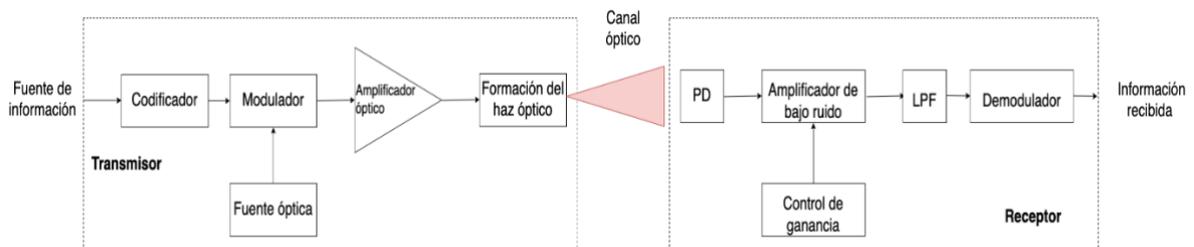


Figura 9. Diagrama de bloques básico de un sistema FSO [33].

A continuación, el haz de luz es recogido y reenfocado mediante una lente de formación de haz antes de ser transmitido [33]. Aunque a fuente óptica típica en los sistemas FSO es un LD [34], algunos fabricantes también utilizan LEDs de alta potencia. La fuente óptica utilizada en los sistemas FSO debe proporcionar una potencia óptica relativamente alta en un amplio rango de temperaturas. Las características principales del transmisor óptico en los sistemas FSO son el tamaño, la potencia y la calidad del haz, que determinan la intensidad del láser y la divergencia mínima que se puede obtener del sistema.

El *front-end* del receptor comprende filtros ópticos con una lente para recoger y enfocar el haz recibido en el PD. Seguidamente, la corriente de salida del PD se convierte en tensión. El filtro paso bajo se utiliza para limitar los niveles de ruido térmico y de fondo. Finalmente, el demodulador realiza el proceso de demodulación necesario para obtener los datos de transmisión originales.

El hecho de que FSO sea transparente al tipo de tráfico y al protocolo de datos hace que su integración en la red de acceso existente sea mucho más rápida, fiable y rentable en comparación con las comunicaciones de fibra tradicionales. A pesar de estas ventajas, el rendimiento de FSO se degrada principalmente por las condiciones atmosféricas [35] como la niebla, el humo, el aire y la presencia de errores de apuntamiento [36].

Los haces láser que se propagan a través del canal atmosférico son muy susceptibles a los efectos adversos de la desviación del haz. Esto se debe a las variaciones del índice de refracción a lo largo de las vías de transmisión causadas por las desigualdades tanto de la temperatura como de la presión de la atmósfera [37]. En consecuencia, en los sistemas basados en IM/DD esto conduce a las fluctuaciones aleatorias en el dominio temporal y espacial de la intensidad recibida, conocidas como desvanecimiento del canal [38].

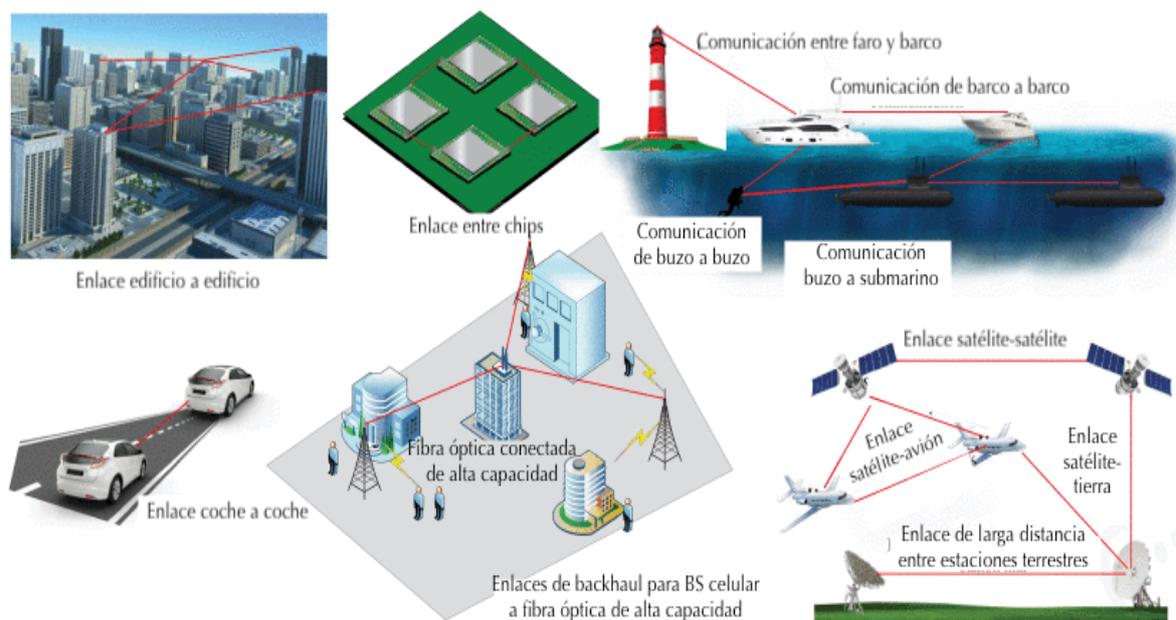


Figura 10. Algunos escenarios de aplicación de los sistemas FSO [39].

Por otro lado, la Figura 10 muestra algunos escenarios de aplicación de los sistemas FSO. En esta figura, se muestra la interconexión óptica en rango de nm de una amplia gama de tipos de conectividad inalámbrica.

2.3.3. Visible Light Communications

VLC (389-780 nm) es una tecnología relativamente novedosa en la que se posiciona como alternativa a tecnologías de acceso IR en interiores [40-41]. Este tipo de sistemas, además de operar

en la banda visible, aprovechando los diodos emisores de luz (LEDs), pueden ser alimentados a velocidades muy altas sin que el ojo humano note el efecto de la iluminación.

Por otro lado, además de iluminación, VLC es capaz de ofrecer comunicación de datos y localización en interiores (donde los actuales sistemas de posicionamiento global (GPS, del inglés *Global Position Systems*) basados en RF ofrecen una cobertura limitada o nula en entornos interiores o subterráneos) utilizando las actuales luminarias basadas en LEDs [42].

Los LEDs son una fuente de luz más eficiente (> 400 lux, requisito mínimo para transmitir datos a alta velocidad) que sus análogos, las lámparas incandescentes y fluorescentes y tienen una vida útil más larga, por lo que proporcionan beneficios tanto ecológicos como económicos [43]. Estas características han hecho que el campo de los VLC de corto alcance en interiores sea muy atractivo para la comunidad investigadora a nivel mundial, a través de asociaciones como el consorcio VLC en Japón en 2003, el Foro Mundial de Investigación Inalámbrica, el proyecto europeo OMEGA [44], el organismo de normalización IEEE [45] y el VLC utraparalelo financiado por el consejo de investigación del Reino Unido [46].

La actual norma VLC del IEEE, aprobada en 2011, admite hasta 96 Mbps. Un grupo de trabajo ha reactivado recientemente la labor del IEEE 802.15.7 y está trabajando en una capa física VLC mejorada basada en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para permitir velocidades de datos máximas de Gbps. También está previsto que esta norma admita OCC, en la que las cámaras de los teléfonos inteligentes se utilizan para la recepción en aplicaciones de baja velocidad de datos [47].

Para que VLC se integre plenamente en las topologías inalámbricas actuales, es necesario abordar una serie de retos, entre los que se incluyen el aumento del rendimiento de los datos [48]; las elevadas pérdidas en el trayecto, las interferencias introducidas por la luz artificial, las interferencias entre símbolos (ISI, del inglés *Intersymbol Interference*) inducidas por trayectos múltiples, la movilidad y el bloqueo; la no linealidad de la respuesta electro-óptica del LED; y la atenuación de la luz.

Los LEDs existentes en el mercado tienen un BW limitado (hasta 50 MHz para los IR y 400 kHz para los LED orgánicos). Utilizando LEDs comerciales de alta potencia, los sistemas pueden proporcionar velocidades de datos mayores a 200 Mbps. Análogamente, en un recinto interior, la transmisión simultánea de flujos de datos mediante el uso de varias unidades de iluminación LED,

típicamente empleadas para proporcionar una iluminación uniforme de la sala, permite aumentar el rendimiento de los datos [49, 50].

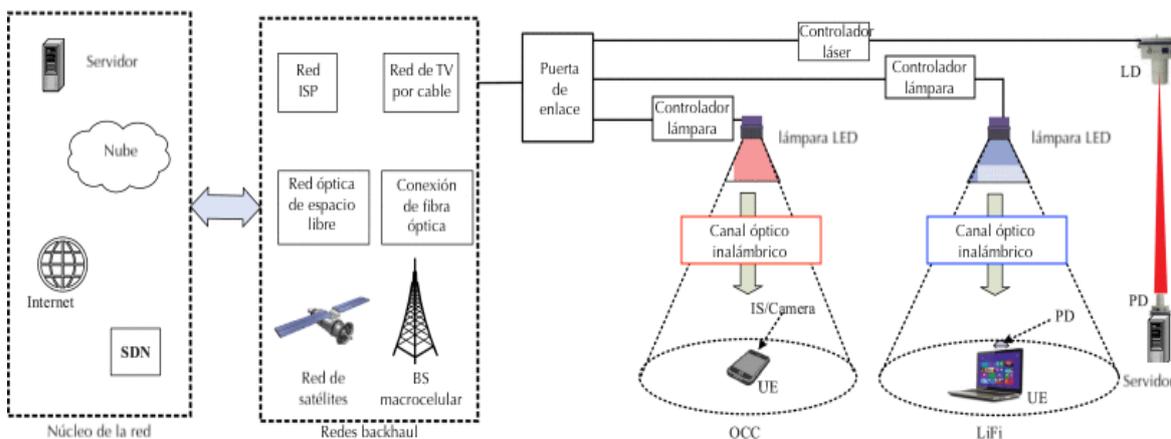


Figura 11. Arquitectura básica de la conectividad UE-a-CN en el sistema VLC [50].

En la Figura 11 se muestra una arquitectura básica para la conectividad entre el equipo de usuario (UE) y la red central (CN) en el sistema VLC. Las cámaras o PDs se utilizan como receptores. A continuación, las redes de acceso VLC se conectan a Internet, a cualquier servidor o al CN a través de la conexión *backhaul* por cable o inalámbrica.

En entornos interiores, el GPS tiene graves limitaciones debido a la alta atenuación, la multitrayectoria y la normativa de seguridad, y sólo ofrece una precisión de unos pocos metros. Por otro lado, el posicionamiento en interiores basado en VLC es una opción atractiva, que utiliza las lámparas de techo LED existentes para los servicios de navegación en interiores con una precisión muy alta de unos pocos centímetros [37]. Finalmente, VLC puede utilizarse en una amplia gama de aplicaciones, como las redes de área local inalámbricas, redes de vehículos, entre otras.

2.3.4. LiFi

Las principales diferencias entre LiFi y VLC son que VLC utiliza sólo la parte VL del espectro luminoso, mientras que LiFi utiliza VL en el trayecto de ida, pero es posible utilizar IR, VL o UV en el trayecto de vuelta [51, 52]; los sistemas VLC pueden ser unidireccionales [53] o bidireccionales [54], mientras que LiFi es un sistema de comunicación bidireccional; LiFi proporciona movilidad de usuario sin fisuras, mientras que para VLC no es obligatorio; y los sistemas VLC incluyen cualquiera de las comunicaciones punto a punto, punto a multipunto y multipunto a punto, mientras que los sistemas LiFi deben incluir comunicaciones multiusuario, es decir, comunicaciones punto a multipunto y multipunto a punto.

De esta manera, LiFi es un sistema de red inalámbrico que admite la movilidad de los usuarios sin problemas; por lo tanto, forma una nueva capa de pequeñas células dentro de las redes inalámbricas heterogéneas existentes. Así, un sistema VLC se puede considerar LiFi sólo si tiene características LiFi (por ejemplo, comunicación multiusuario, comunicaciones punto a multipunto y multipunto, y movilidad de usuario sin fisuras). Por otra parte, un sistema LiFi puede tratarse como VLC solo si se utiliza VL como medio de transmisión.

La tecnología LiFi [55] es similar a la Wifi, con la excepción de que se utiliza el espectro óptico (300 GHz y 700 GHz) en lugar del de RF para la transmisión [56]. Proporciona conectividad inalámbrica de alta velocidad e iluminación. Al igual que VLC, utiliza LEDs como transmisores y PD como receptores que soportan comunicación, iluminación y localización. En un sistema LiFi, el transmisor y el receptor se presentan en ambos extremos de la comunicación.



Figura 12. Escenarios de aplicación de los sistemas VLC/LiFi, (a) interior, (b) exterior [30].

La Figura 12 muestra escenarios de aplicación (tanto en interiores como en exteriores) de las tecnologías VLC/LiFi. En el entorno interior, la comunicación y la iluminación se realizan simultáneamente. Por otro lado, en el exterior, se realiza tanto la comunicación como la iluminación (por ejemplo, en las farolas y los faros de los vehículos), mientras que, en otros casos, sólo se realiza la comunicación (por ejemplo, en las señales de tráfico y luces traseras de los vehículos).

Los ejemplos mostrados en la Figura 12 (a) se aplican tanto a comunicaciones VLC como a LiFi, dependiendo del medio de comunicación soportado para el enlace ascendente y de las características proporcionadas. Análogamente, en la Figura 12 (b), la comunicación farola-*smartphone* es un ejemplo que incluye tanto sistemas VLC como LiFi.

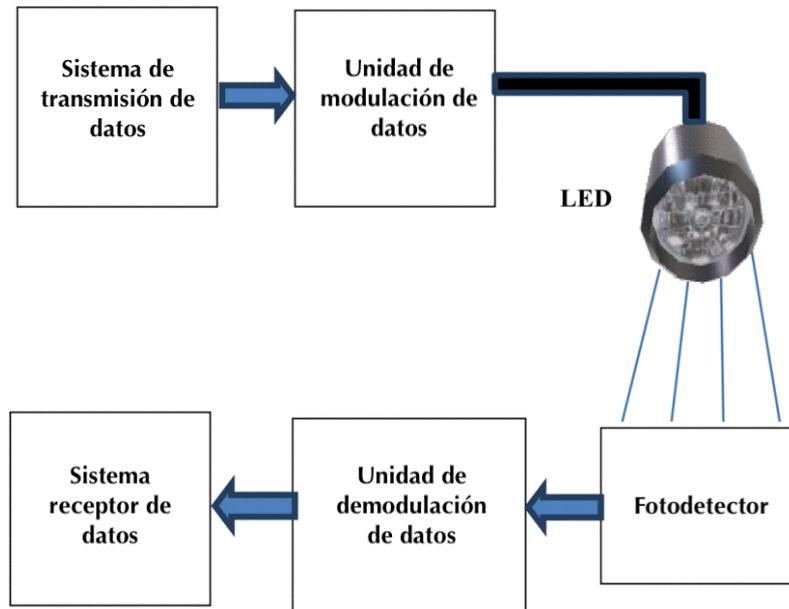


Figura 13. Metodología básica de trabajo de LiFi [57].

Por lo general, la comunicación se basa en un sistema binario, cuando el LED está encendido transmite "1" y cuando está apagado transmite "0" [58]. El fenómeno de encendido y apagado del LED es demasiado rápido, por lo que no puede ser percibido por el ojo humano y la funcionalidad principal del LED no se ve afectada [59]. Asimismo, la modulación de intensidad utilizada en este tipo de sistemas no puede ser percibida por el ojo humano y, por tanto, la comunicación es tan fluida como en otros sistemas de RF. De tal forma, el rendimiento de LiFi también se ve afectado por la luz solar y las fuentes de luz ambientales.

La Figura 13 muestra cómo la información se transmite en forma de señales desde el transmisor hasta la unidad de modulación, donde se convierte la señal digital utilizando diferentes técnicas de modulación, y posteriormente el LED transfiere la información en forma binaria mediante luz visible. Dicha luz es captada por el fotodetector, donde la señal luminosa es convertida en señal eléctrica [60], se demodula y finalmente es recibida por el receptor.

2.3.5. Optical Camera Communications

OCC emplea LEDs y una cámara como transmisores y receptores, respectivamente. Los datos transmitidos desde diferentes fuentes de luz se captan y distinguen fácilmente de forma simultánea mediante el sensor de imagen de una cámara [30]. La luz solar y otras fuentes de ruido de fondo se descartan separando los píxeles asociados a ellas. Por lo tanto, el sistema OCC puede proporcionar una comunicación sin interferencias incluso en condiciones de exterior. Sin embargo,

aunque OCC proporciona un rendimiento estable en entornos exteriores, la velocidad de datos alcanzable es relativamente baja. Por lo tanto, las únicas aplicaciones que admite OCC son las que requieren una baja velocidad de datos.

Debido a la gran importancia de esta tecnología se ha considerado relevante dedicar un capítulo para su profundo análisis. En el CAPITULO 3: Optical Camera Communication se expondrán los principios básicos de OCC y una visión general de esta tecnología emergente con las recientes actividades de estandarización. Además, se presentará la información acerca de las cuestiones clave referidas a la movilidad, cobertura, inferencias y la mejora del rendimiento, así como las futuras investigaciones y cuestiones abiertas.

2.4. Desafíos y limitaciones

Está comprobado que las comunicaciones basadas en RF están cada vez más restringidas debido a la limitación de los recursos del espectro en las redes inalámbricas. Por ello, para hacer frente a la creciente demanda, muchos investigadores consideran que el espectro óptico sin licencia (1 mm-10 nm) es una técnica prometedora complementaria a la de RF. Es tal el interés que se están instalando sistemas OWC en redes urbanas [61], redes de alta velocidad [62], enlaces FSO de última milla [63], enlaces de alta velocidad en interiores [64] y sistemas VLC en interiores [65].

A pesar de las ventajas de los sistemas OWC, existen algunas limitaciones como la fuerte dependencia de la línea de la LOS, la pequeña área de cobertura, la sensibilidad al bloqueo repentino de una conexión, las interferencias creadas por diferentes fuentes de luz, la degradación del rendimiento por el exterior y la limitada potencia de transmisión.

Por tanto, superar estas limitaciones es un reto para el éxito del despliegue de OWC. El uso de una banda de RF (3 kHz-300 GHz) está estrictamente regulado por diferentes autoridades locales e internacionales [30]. Las interferencias son un problema grave en las comunicaciones basadas en este tipo de sistemas. Sin embargo, las tecnologías inalámbricas basadas en RF permiten una mayor movilidad y un mejor rendimiento en condiciones de ausencia de línea de visión (NLOS). Estas características especiales de los sistemas de RF pueden superar algunas limitaciones de los sistemas OWC. A continuación, se presentan alguno de los principales retos en todas las áreas de investigación de OWC.

2.4.1. Dispositivos y componentes

La Figura 14 muestra todo el espectro electromagnético donde, aunque el espectro óptico es tres órdenes de magnitud mayor que todo el espectro de RF, existen limitaciones fundamentales que actualmente impiden aprovechar plenamente esta enorme cantidad de recursos, especialmente cuando se utilizan LEDs como transmisores.

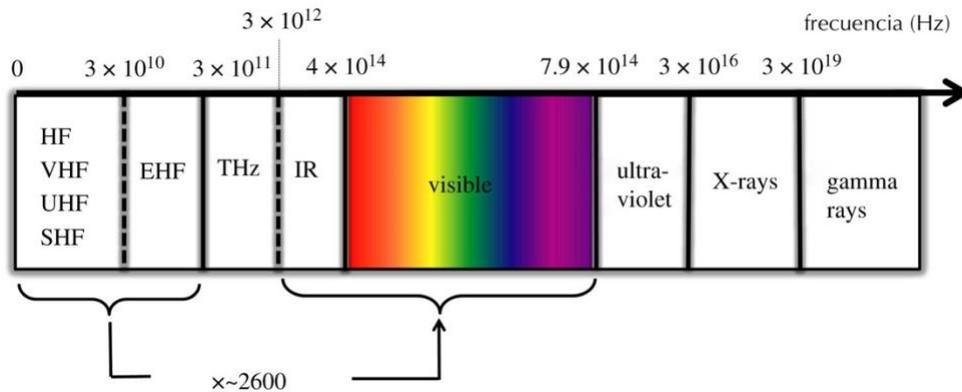


Figura 14. Espectro combinado de IR y VL es 2600 veces mayor que el espectro completo de RF [66].

Esto se debe a que el BW de los LED típicos están limitados a 10 y 100 MHz [67], limitando las velocidades de datos de un único LED, normalmente por debajo de los 10 Gbps [68]. Sin embargo, para superar esta limitación, es posible utilizar múltiples dispositivos de BW similar, pero con un espectro de emisión diferente, lo que se conoce como multiplexación por división de longitud de onda (WDM). En [69], se demuestra que cuatro LEDs estándar disponibles en el mercado producen una velocidad de datos de 15,7 Gbps a pesar del solapamiento parcial de sus espectros de emisión. Un uso óptimo de WDM requeriría un gran BW del dispositivo, que puede aproximarse mediante la Ecuación 1.

$$B_{\text{dispositivo}} \approx c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad \text{EC.1}$$

Donde:

c es la velocidad de la luz en el vacío.

$\Delta\lambda$ es el espectro de emisión de la fuente de luz suponiendo una máscara rectangular.

λ es la longitud de onda central.

La Ecuación 1 se presenta en la Figura 15 en función de la longitud de onda central del espectro de emisión.

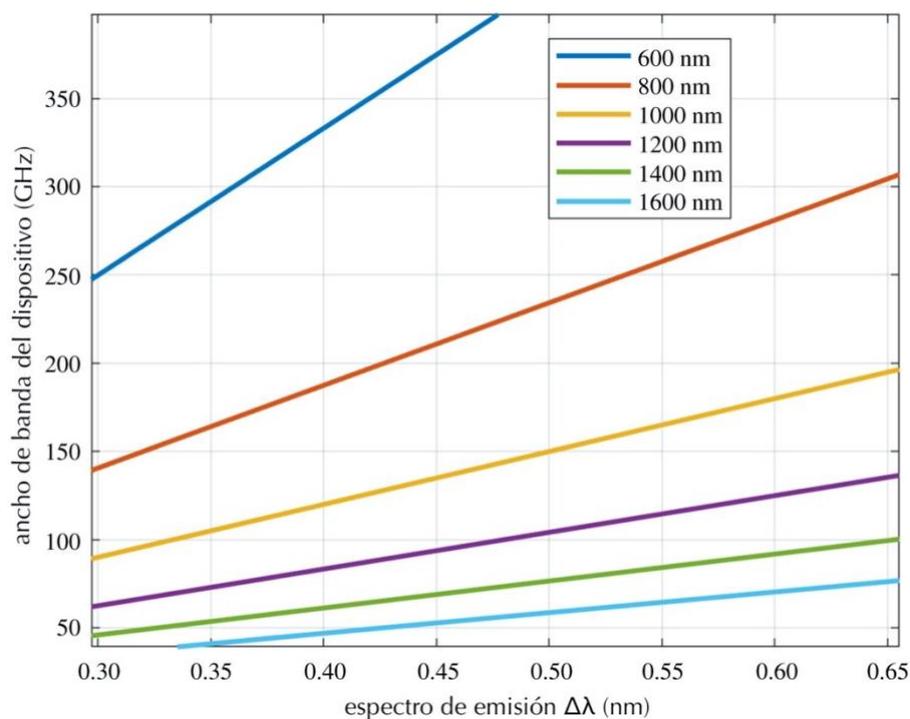


Figura 15. Ancho de banda necesario del dispositivo en función del espectro de emisión [70].

De la figura anterior se deduce que una fuente de luz roja (600 nm) con un espectro de emisión de 0,45 nm requeriría un BW superior a 350 GHz. En primer lugar, es evidente que no es posible conseguir un espectro de emisión tan estrecho con los LEDs actuales y, en segundo lugar, es difícil conseguir un BW de 350 GHz con la tecnología disponible hoy en día [71], por no hablar de conseguir sensores que tengan tal BW.

Superar las limitaciones de los dispositivos es un área de investigación activa. A diferencia de la comunicación punto a punto, como en FSO, los sistemas de redes inalámbricas tienen que proporcionar conexiones inalámbricas simultáneas a un número muy grande de usuarios finales en entornos interiores. Por lo tanto, existe un reto adicional (además del BW del dispositivo) que está relacionado con los márgenes del enlace y la sensibilidad del receptor debido al pequeño tamaño del detector y a la gran dispersión de la potencia óptica.

A corto y medio plazo, la iluminación basada en láser puede ofrecer el próximo paso hacia mayores BW de los dispositivos, al tiempo que proporciona una alta potencia óptica de salida para mejorar el rendimiento de la velocidad de datos del enlace y mantener los requisitos de seguridad ocular.

2.4.2. Sistemas ópticos front-end

El *front-end* óptico puede dividirse en la parte transmisora y la parte receptora. Como el objetivo es construir enlaces de comunicación bidireccionales, ambas partes tienen que estar integradas en una sola unidad transceptora. Es importante un adecuado desacoplamiento de las señales recibidas y transmitidas, por lo que se pueden utilizar diversas técnicas de multiplexación. Las variables a tener en cuenta en el diseño de este tipo de técnicas son el BW, latencia y velocidad de datos [72-73].

El sistema óptico del transmisor tiene que garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad ocular [74] y, al mismo tiempo, cumplir los requisitos de calidad de servicio (QoS, del inglés *Quality Of Service*). Esto puede suponer un reto cuando el transmisor es una fuente puntual. Por lo tanto, a menudo es deseable convertir la fuente puntual en una fuente ampliada que cambie las condiciones de seguridad ocular.

Uno de los principales retos de las redes móviles es que el terminal móvil cambia aleatoriamente de orientación. Además, el enlace entre el terminal móvil y el punto de acceso fijo puede estar obstruido. En un sistema que depende en gran medida de las condiciones de enlace de la LOS, hace que se convierta en un reto crítico. Una posible solución es la de proporcionar diversidad de enlace mediante múltiples transmisores activos simultáneamente cuya posición y posiblemente orientación sea diferente. Esto conduce al concepto de transmisores de diversidad angular [75-76].

En el lado del receptor, el reto es captar suficientes fotones para garantizar la correcta detección de la información transmitida. Lo idóneo sería que el receptor tuviera una gran superficie para que el sistema pudiera recoger un gran número de fotones. Sin embargo, un detector de gran superficie suele tener un BW bajo porque la gran superficie da lugar a un detector que tiene una gran impedancia. Por tanto, a menudo se utilizan unos dispositivos llamados concentradores, donde la máxima ganancia de concentración se rige por la conservación de la composición [77] y se calcula mediante la Ecuación 2.

$$G_{max} = \frac{n^2}{\sin^2(\theta)} \quad \text{EC.2}$$

Donde:

n es el índice de refracción del material del concentrador.

θ es su semiángulo.

Como se deduce de la ecuación anterior, si se desea una gran ganancia, θ debe ser pequeño. A esta limitación hay que añadir la relativa a la altura del concentrador, que suele ser de decenas de milímetros, lo que dificulta la integración de un dispositivo de este tipo en un teléfono móvil. De esta forma, el subsistema óptico del receptor ideal es plano; utiliza detectores pequeños; y permite un θ cercano a 90° para evitar una alineación estricta.

Recientemente se ha trabajado en concentradores ópticos, que es una tecnología candidata a superar estos retos [78]. El mismo grupo ha proporcionado un artículo de revisión sobre el diseño de *front-end* ópticos para OWCs de alta velocidad [79]. Además, se han llevado a cabo investigaciones muy interesantes sobre amplificadores de transimpedancia de ultra baja impedancia que conducen a mejoras significativas del BW [80]. Esto se debe a que la constante de tiempo dominante que determina el BW del dispositivo es un producto de la capacidad y la resistencia. Por ello, asegurar una baja resistencia es una dirección prometedora para reducir la constante de tiempo y aumentar el BW.

2.4.3. Modelos de canales

Un elemento importante del sistema es el canal óptico de propagación en el espacio libre. El diseño óptimo del transceptor depende de las características del canal. Dado que los objetos actúan como reflectores, un pulso enviado por el emisor llega al receptor a través de múltiples caminos retrasados. Esta situación se denomina propagación multitrayecto, que provoca ISI. Es decir, un símbolo transmitido se ve afectado por n símbolos anteriores. Este efecto tiene que ser eliminado mediante ecualización digital, o tiene que ser evitado mediante una selección adecuada de técnicas de transmisión.

Conjuntamente, es posible que no siempre haya un canal LOS. El receptor tiene que ser capaz de hacer frente a la situación de que sólo haya reflexiones. Luego, es importante conocer a fondo la potencia incluida en los trayectos reflejados (además de la potencia recibida en el trayecto LOS); y la dispersión temporal de las señales reflejadas.

Para el desarrollo de redes OWC es fundamental conocer la reflexión y la absorción en función de la longitud de onda de los objetos y materiales en los escenarios típicos de despliegue, como hogares, oficinas y fábricas. En [81] han estado al frente del desarrollo de modelos de canal para sistemas OWC. El mismo grupo ha proporcionado modelos de canal de referencia al grupo de estandarización IEEE 802.11bb. Esta norma es la primera que define los sistemas de redes inalámbricas basadas en la luz.

2.4.4. Técnicas de transmisión de datos

Como se ha comentado, el mecanismo de transmisión de datos predominante es el IM/DD. Dado que la señal óptica está limitada a ser estrictamente positiva y real, la teoría de Shannon no es aplicable y la capacidad del canal sigue siendo desconocida. Sin embargo, Hranilovic et al. (2020) fueron los primeros en desarrollar límites teóricos de información para estos sistemas [82]. El conocimiento de la distribución óptima de la señal es muy valioso para el diseño de técnicas óptimas de modulación.

Si bien IM/DD es la principal técnica de transmisión utilizada en OWC, es posible utilizar la transmisión coherente a cambio de aumentar la complejidad del transceptor. Actualmente, ha aumentado el número de trabajos sobre sistemas OWC coherentes. Esta es una dirección que también puede tomar este campo en el futuro.

La técnica de transmisión de datos más básica para los sistemas IM/DD es la codificación on-off (OOK, del inglés *On-Off Keying*). No obstante, OOK limita mucho la eficiencia del espectro, ya que en cada paso de la transmisión o uso del canal sólo se transmite un bit. Al estar el sistema limitado por el BW del dispositivo, se produce un uso muy deficiente de este. Sin embargo, OOK se beneficia de la simplicidad de la implementación y también es robusta frente a las no linealidades del dispositivo, sufriendo gravemente ISI cuando se despliega a altas velocidades de datos. Para ello, es conveniente utilizar técnicas de transmisión de datos que sean más eficientes desde el punto de vista del espectro, es decir, que transmitan múltiples bits por uso del canal al tiempo que aumenten la robustez frente a la propagación multitrayecto. Una de estas técnicas es OFDM, que envía símbolos simultáneamente en subcanales ortogonales. Esto se consigue utilizando la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT, del inglés *Inverse Fast Fourier Transformation*) en el transmisor y la FFT en el receptor. La transmisión en paralelo implica que el símbolo OFDM es mucho más largo que el retador máximo por trayectos múltiples. Así, cada subcanal puede transportar un símbolo de datos de un alfabeto de M símbolos en la que cada uno porta $\log_2(M)$ bits. Si bien el símbolo OFDM es bipolar, es necesario someter la señal a una corriente continua (DC, del inglés *Direct Current*) de polarización antes de exponerla al transmisor emisor de luz, que opera únicamente en el primer cuadrante y, por tanto, no puede aceptar señales negativas. Esta medida tiene un impacto negativo en la eficiencia energética, ya que la potencia de polarización de DC se desperdicia a menos que se utilice para otros fines, como la iluminación.

Por otro lado, aunque la iluminación puede ser deseable si un punto de acceso se combina con un dispositivo de iluminación, es ciertamente un inconveniente en un dispositivo móvil como un

smartphone. Así pues, se han desarrollado nuevas técnicas de modulación digital basadas en la transmisión de datos en varios flujos, o en capas, junto con la modulación por superposición y la detección iterativa [83].

Debido a la limitación del BW de los dispositivos, es primordial tener en cuenta otras dimensiones para la codificación de datos, en particular, la dimensión espacial y la longitud de onda. Las técnicas de *multiple-input multiple-output* (MIMO) aprovechan la dimensión espacial. Asimismo, hay dos técnicas fundamentales en los sistemas OWC: MIMO con imágenes y MIMO sin imágenes. La primera es muy poco tolerante al movimiento y, por tanto, es más adecuada para los sistemas de tipo FSO, mientras que MIMO sin imagen puede utilizarse en aplicaciones móviles. A pesar de que no suele estar garantizado que la matriz del canal MIMO sea siempre de rango completo, es necesario su uso para beneficiarse plenamente de las ganancias máximas de la multiplexación espacial. Al sufrir este tipo de sistemas una interferencia entre canales o diafonía, se han creado técnicas iterativas de cancelación de dichas interferencias para que puedan mitigar ese efecto, aunque si bien es cierto que requieren de una potencia de procesamiento computacional considerable [84].

Una técnica MIMO que ha despertado un gran interés en el mundo académico y en el de la industria es la modulación espacial [85]. Este tipo de modulación evita por completo las interferencias entre canales y, por tanto, da lugar a técnicas de decodificación MIMO de baja complejidad computacional [86].

2.4.5. Protocolos de control de acceso al medio

En las redes inalámbricas OWC, es esencial el soporte simultáneo de muchos terminales móviles desde un único punto de acceso (por ejemplo, una luz en el techo). Estos terminales pueden tener diferentes requisitos de servicio. Por ejemplo, en una fábrica, el retardo de la transmisión puede ser más importante que la velocidad máxima de datos. Por lo tanto, es importante desarrollar primero técnicas óptimas de acceso multiusuario que eviten las interferencias entre usuarios y logren una alta eficiencia espectral. Lo ideal es que la tasa de datos sumada de un punto de acceso sea mayor cuando soporta muchos usuarios en comparación con un escenario de un solo usuario. Una tecnología candidata a conseguirlo es el acceso multiusuario no ortogonal [87].

2.4.6. Mitigación de interferencias y apoyo a la movilidad

Una red inalámbrica se caracteriza por tener muchos puntos de acceso distribuidos espacialmente. Cada punto de acceso cubre una zona determinada. Si un dispositivo móvil entra en la zona de cobertura de un punto de acceso, el sistema realiza un cambio desde el punto de acceso al

que el móvil estaba previamente conectado al nuevo punto de acceso. Este proceso debe ser lo suficientemente rápido como para garantizar la prestación ininterrumpida del servicio inalámbrico. Si la cobertura de un punto de acceso es pequeña, el requisito de un intercambio rápido cobra especial importancia.

La principal ventaja de las redes ópticas inalámbricas (OWN, del inglés *Optical Wireless Network*) es que pueden generarse células muy pequeñas, en las que una de ellas está definida por el área de cobertura de un punto de acceso. Se trata de una ventaja muy importante porque el mismo recurso de transmisión puede reutilizarse muchas más veces en comparación con las células de gran superficie. Este principio de reducción de celdas es la razón principal en la comunicación por RF de las mejoras en la velocidad de transmisión de datos de los *smartphones* durante la última década. Ahora bien, la reducción continuada del tamaño de las celdas tiene un límite. Este límite se debe al aumento de las interferencias [88]. Si los puntos de acceso están demasiado espaciados, las señales transmitidas se solapan de forma significativa. Estas interferencias aumentan el ruido y, por tanto, reducen la relación señal/ruido, a veces hasta niveles en los que es imposible mantener un enlace de comunicación sin errores.

La ventaja de las OWN en comparación con las redes inalámbricas de RF es que el límite, en el que las interferencias se vuelven dominantes, es significativamente menor. Esto significa que se pueden generar células mucho más pequeñas mientras las interferencias se mantienen en niveles bajos. El motivo es que es mucho más fácil controlar espacialmente las ondas de luz que las de radio. Las microondas, por ejemplo, atraviesan paredes opacas. En cambio, las ondas de luz son completamente bloqueadas por los objetos opacos. Además, es posible limitar la cobertura utilizando simples lentes en un subsistema óptico. No obstante, debido a la propagación multitrayecto y a la orientación aleatoria de los dispositivos móviles, sigue habiendo interferencias en las OWN.

2.4.7. Redes y protocolos

Por último, la idea es que las OWN se integren a la perfección con las redes inalámbricas de RF existentes [89]. Se trata de un proceso evolutivo, ya que existen muchas tecnologías de redes inalámbricas de RF diferentes, como las redes de cuarta generación (4G) y de quinta generación (5G), así como el Wifi. La interoperabilidad entre estas redes se hace posible gracias al concepto de redes heterogéneas. Las OWN serán otra de esas tecnologías de red que se espera que se integren a la perfección. Sin embargo, esto requiere algoritmos dinámicos de gestión de redes.

Las redes definidas por SW (SDN, del inglés *Software-Defined Networking*) es una de estas tecnologías de gestión dinámica que se basa en los principios de virtualización y en el establecimiento de planos de control y planos de datos independientes. Las OVN deben diseñarse para soportar estos paradigmas, por lo que es necesario desarrollar agentes SDN a medida que actúen como intermediarios entre las propiedades específicas de las OVN y los mecanismos de transporte generales y los requisitos específicos de las aplicaciones. Estos agentes SDN traducirán estos requisitos genéricos a través del plano de control en configuraciones de red y cooperarán para garantizar que en todo momento se proporcione la conectividad óptima a un terminal móvil. Por ejemplo [90], un agente SDN inalámbrico óptico coopera con un agente WiFi para garantizar la gestión óptima de los flujos de datos. Esto, por ejemplo, podría significar que determinados usuarios sean atendidos por una red Wifi y por una red inalámbrica óptica simultáneamente mediante el protocolo de control de transmisión (TCP, del inglés *Transmission Control Protocol*). En este caso, se dirige los flujos de datos específicos basándose en las características de los respectivos enlaces de comunicación (RF y óptico).

CAPÍTULO 3: Optical Camera Communication

3.1. Introducción

Tal y como se ha comentado anteriormente, las VLC abarcan un campo de las OWC que tiene como objetivo reutilizar las luminarias LED presentes en las infraestructuras de iluminación actuales como transmisores ópticos. Sin embargo, a pesar de sus prometedoras capacidades, los productos que utilizan la tecnología VLC encuentran barreras de entrada al mercado debido a la necesidad de incorporar HW específico en los dispositivos de los usuarios. Como solución a este problema, se propone una nueva rama de VLC, conocida como OCC, que utiliza cámaras como receptores ópticos [91-92].

Es importante señalar que los sistemas basados en esta tecnología están destinados principalmente a una transmisión de baja velocidad, debido a la tasa de muestreo de la recepción, que viene determinada por el FR de la cámara, que suele estar en el rango de 30 a 60 *frames* por segundo (fps) con una resolución habitual de 1920 x 1080 píxeles. No obstante, con los recientes avances de las cámaras, para la misma resolución, la FR de las nuevas cámaras incluidas en los *smartphones* pueden alcanzar hasta 960 fps [93]. A diferencia de VLC, que utiliza un PD para procesar la intensidad óptica recibida, OCC se basa en la captura de la fuente mediante los sensores de imagen (IS, del inglés *Image Sensor*), es decir, un receptor de dos dimensiones que contiene millones de píxeles. De este modo, la velocidad de transmisión de datos de OCC se limita principalmente a kilobits o megabits por segundo, a diferencia de las velocidades de transmisión de varios gigabits en los sistemas VLC basados en PD [94].

Según lo comentado en el capítulo anterior, el estándar IEEE 802.15.7 se formuló inicialmente en 2011 para VLC sin tener en cuenta los receptores basados en IS [95]. Seguidamente, en 2014 se incluyó OCC en el estándar IEEE 802.15.7r1 [95], que fue gestionado por el grupo de tareas TG7r1 y cubrió espectros de luz más amplios, como el infrarrojo cercano (NIR) y el ultravioleta cercano.

Debido a la inclusión de casi todo el espectro óptico en la estandarización, existe una amplia gama de aplicaciones potenciales para OCC en el campo del IoT [91]. A nivel mundial, varias empresas, como el Instituto Fraunhofer Heinrich Hertz (Alemania), Intel (Estados Unidos), Panasonic (Japón), Casio (Japón), Huawei Technologies (China), el Instituto de Investigación en Electrónica y Telecomunicaciones (Corea), LG Electronics (Corea) y China Telecom (China), han estado trabajando en el desarrollo de aplicaciones OCC [96].

3.2. Descripción y características

La tecnología de OCC emplea una configuración de una o varias cámaras como receptores, que en la actualidad pueden encontrarse en la mayoría de los dispositivos móviles, como teléfonos, relojes inteligentes, ordenadores portátiles, tabletas, así como en vehículos y edificios [97]. Por ello, OCC puede emplear los dispositivos de iluminación LED y cámaras más baratos y disponibles en el mercado.

En OCC, la cámara captura imágenes/vídeos de las fuentes de luz, por ejemplo, un solo LED, múltiples LED y pantallas digitales, y extrae la información mediante el procesamiento de imágenes [98]. De este modo, las OCC basadas en cámaras pueden utilizarse tanto en entornos de interiores como exteriores para una serie de aplicaciones [94].

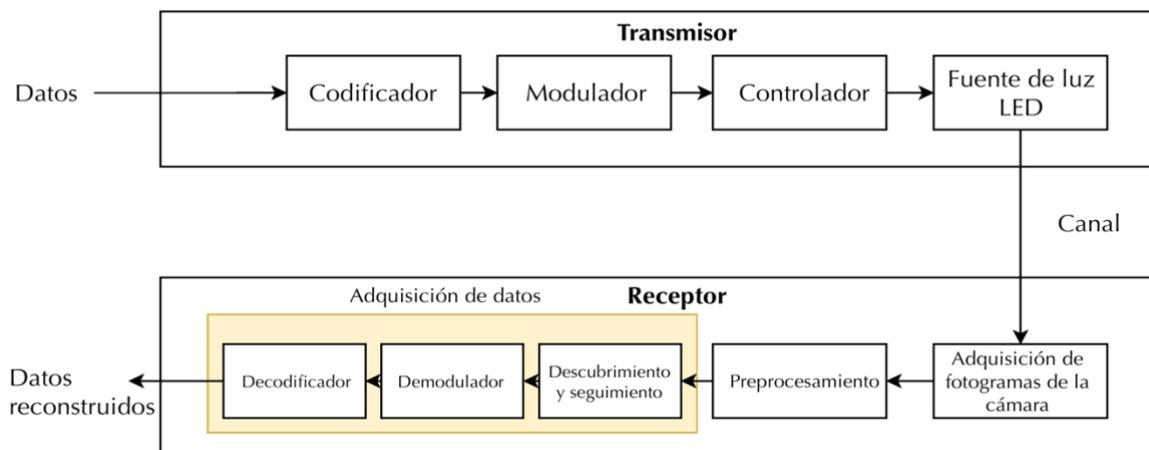


Figura 16. Diagrama de un sistema OCC [99].

Al igual que VLC, OCC se basa principalmente en el modo de LOS. Además, OCC ofrece una capa MIMO al extraer los datos de las múltiples fuentes de luz capturadas. Por lo tanto, por estas razones, OCC puede considerarse un subconjunto de VLC. Es interesante señalar que la capacidad MIMO de la cámara también puede aprovecharse para otras aplicaciones, como la estimación del alcance, la detección de formas, la detección de escenas, etc.

En lo que respecta al transmisor, las fuentes OCC tienen ciertas similitudes con las de VLC, como el uso de un controlador. Sin embargo, se diferencian principalmente en las estrategias de comunicación utilizadas y en el tamaño de la superficie de iluminación, que tiende a ser mayor para aumentar la velocidad de transmisión. La Figura 16 muestra el diagrama general del transmisor de un sistema OCC, compuesto por el codificador, el modulador, el controlador y la fuente LED. En

cuanto al receptor, el sistema de preprocesamiento y el sistema de adquisición de datos, formado por el demodulador y el decodificador.

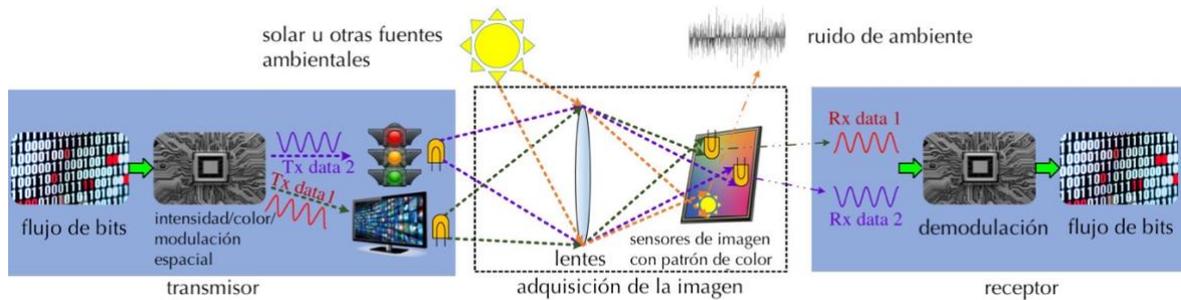


Figura 17. Principio de funcionamiento de un sistema OCC [100].

De igual forma, la Figura 17 muestra el principio básico de un sistema OCC. El flujo de bits puede modularse por intensidad, color o posición espacial según los requisitos de la aplicación. Los flujos de datos transmitidos desde varias fuentes de luz (por ejemplo, una pantalla o un semáforo) pueden captarse y distinguirse simultáneamente utilizando un sensor de imagen. Un sensor de imagen suele estar compuesto una matriz bidimensional de píxeles de PD para convertir la luz incidente capturada en una matriz de señales eléctricas. Normalmente, las salidas de los píxeles debidas a la luz solar o a las fuentes de luz ambiental sólo contienen componentes constantes de baja frecuencia en comparación con la generada por las fuentes de luz de señal útil.

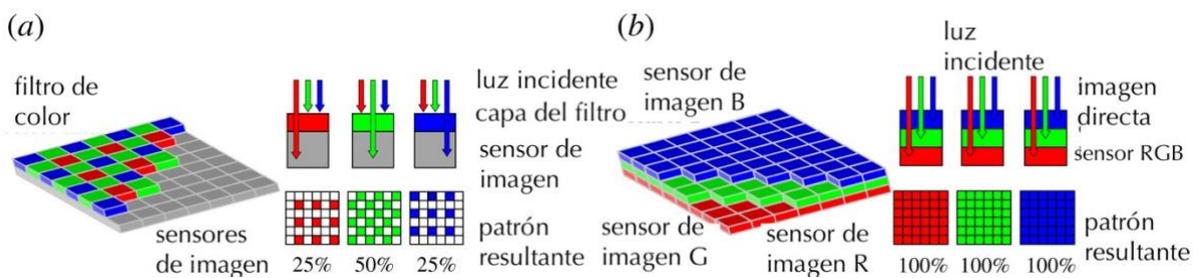


Figura 18. Filtros de color de un sensor de imagen. (a) Disposición Bayer. (b) Disposición Foveon X3 [100].

Para obtener imágenes en color, se suele colocar una matriz de filtros basada en el modelo de Bayer o en el patrón Foveon X3 sobre una matriz de sensores [101]. La Figura 18 (a) muestra el filtro de color basado en el modelo de Bayer, que contiene un 25%, 50% y 25% de filtros rojo, verde y azul, respectivamente. Mientras, la Figura 18 (b) muestra el filtro de color basado en el patrón Foveon X3, en el que los colores rojo, verde y azul pueden medirse directamente tras atravesar los filtros de color correspondientes. Esta configuración puede evitar la pérdida de información transmitida por la luz. Además, dado que un sensor de imagen puede distinguir múltiples fuentes de

luz simultáneamente debido a su resolución espacial, como se ilustra en la Figura 18, es un receptor óptico natural de múltiples elementos con canales multicolor para configuraciones de comunicación MIMO.

3.3. Transmisores y receptores OCC

Las cámaras y pantallas se encuentran cada vez más presentes en la vida cotidiana de la mayoría de los seres humanos y su número sigue creciendo exponencialmente con el tiempo. Asimismo, existen cámaras de vigilancia instaladas en calles, negocios y hasta la mayoría de las personas lleva consigo distintos dispositivos portátiles que integran y combinan ambas tecnologías.

3.3.1. Transmisores

Las tecnologías que permiten la visualización de la luz en un transmisor pueden clasificarse en fuentes puntuales de luz, como los LED, y pantallas luminosas, como las pantallas de cristal líquido (LCD, del inglés *Liquid Crystal Display*). En lo que respecta a las primeras, todas las aplicaciones se basan principalmente en los sistemas de iluminación existentes [102]. En cuanto a las segundas, los escenarios de aplicación se basan en una técnica de modulación por celdas [103] y en códigos como el código QR [104].

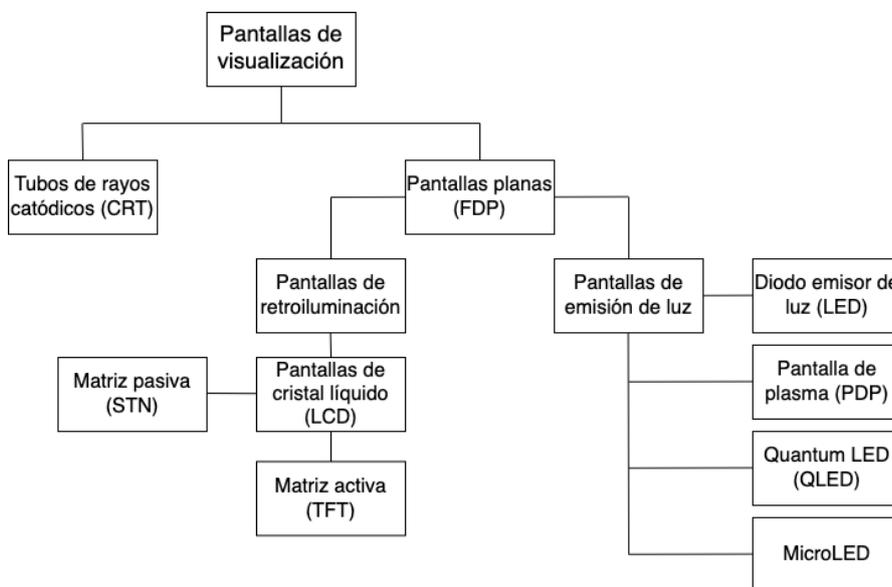


Figura 19. Esquema de las principales pantallas en el mercado [105].

De este modo, la principal fuerza impulsora del despliegue de las OCC son la amplia disponibilidad de los LED, incluidos los utilizadas para iluminación interior, semáforos, luces

traseras y delanteras de vehículos, luminarias laterales de las carreteras y la posibilidad de utilizar las cámaras de los dispositivos inteligentes para decodificar los datos modulados por los LED. Asimismo, los transmisores de OCC pueden ir desde las típicas pantallas LCD, pasando por las LED, hasta llegar a las QLED (del inglés, *Quantum-dot* LED). A modo de resumen, en la Figura 19 se muestra un esquema de las principales tecnologías utilizadas en las pantallas actuales.

3.3.2. Receptores

Como se ha comentado, el sistema OCC basado en la norma IEEE 802.15.7r1 pretende utilizar un IS y/o una cámara como receptor. Una cámara consta de una lente, un IS y un circuito de lectura. La lente proyecta la luz sobre el IS, que se compone de múltiples PD y detecta la radiación óptica (fotones) incidente. Mientras, la señal recibida por este proceso puede verse como píxeles individuales a través del IS. Cada píxel activado genera un voltaje proporcional al número de fotones que inciden en él. Al mismo tiempo, cada píxel está conectado a un circuito externo, donde a su vez, dicho circuito convierte la tensión del píxel en datos binarios.

Si hablamos de una cámara convencional, el objetivo proyecta la luz reflejada por una fuente de luz o de un objeto en el IS, respectivamente. El campo de visión diagonal (FOV, del inglés *Field Of View*) de la cámara viene determinado por la distancia focal del objetivo y el tamaño del sensor, como se ilustra en la Figura 20. Además, la distancia de trabajo define la distancia a la cual la cámara captura la imagen enfocada.

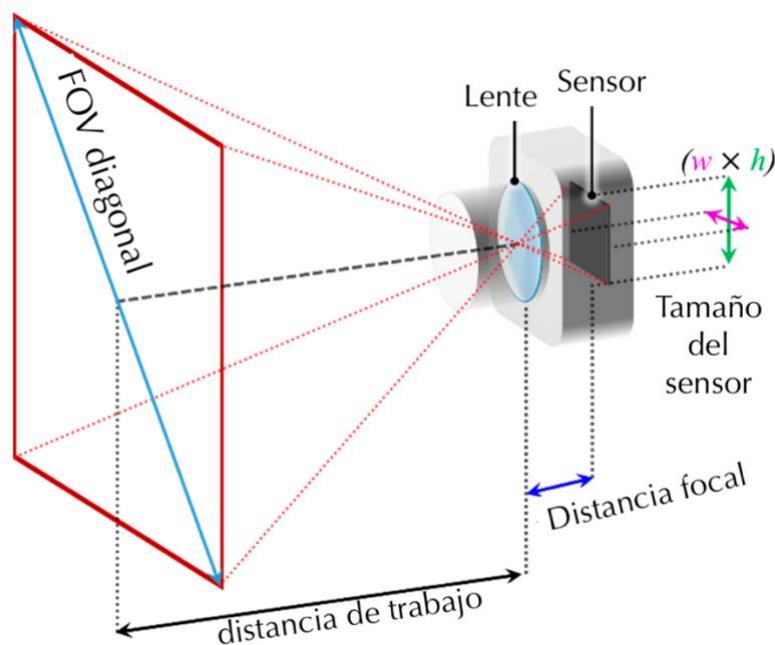


Figura 20. Campo de visión diagonal de una cámara [106].

Como se muestra en la Figura 17, la estructura típica de una cámara se compone de un conjunto de filtros de color (CFA, del inglés *Color Filter Array*) y una unidad de procesamiento (IPU, del inglés *Image Processing Unit*) [107]. Un CFA con un patrón de Bayer suele registrar información de color de la luz emitida en una configuración espacial [108]. Dicho patrón está estructurado en bloques de 2x2 (es decir, uno azul, uno rojo y dos verdes), que pueden tener diferentes disposiciones de BGGR, RGBG, GRGB o RGG. La razón de que haya más filtros verdes es que el ojo humano es más sensible a esta longitud de onda, por lo que se necesita más información sobre dicho color [109]. Seguidamente, la imagen es procesada por un procesador de imágenes que utiliza un algoritmo de interpolación cromática (conocida en inglés como *demosaicing*), para reconstruir los colores de la imagen de forma similar a la escena real, como se ilustra en la Figura 21. A continuación, la salida de la IPU se procesa para extraer la información de la imagen.

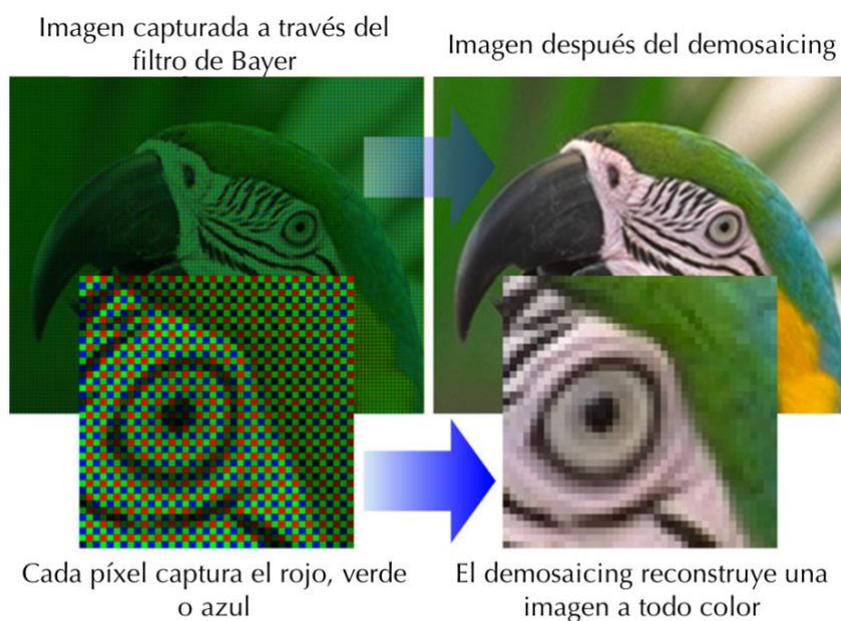


Figura 21. Ejemplo del proceso de demosaicing [106].

De forma análoga, el mecanismo de obturación interno de las cámaras determina la exposición de los píxeles en el IS. Actualmente, los dos principales tipos de IS en términos de arquitectura son el CCD (del inglés *Charge Coupled Device*) y CMOS (del inglés, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [110], tal y como se muestra en la Figura 22 (b). Tradicionalmente, los sensores CCD se han usado en aplicaciones donde se requieren datos de imagen de alta calidad, mientras que el desarrollo de la tecnología CMOS ha permitido que una gran cantidad de dispositivos dispongan de una cámara de un tamaño reducido.

Un sensor CCD tiene una dimensión física de mayor tamaño debido a la utilización de un convertidor analógico-digital (ADC, del inglés *Analog-to-Digital Converter*) relativamente mayor, en comparación con un IS CMOS [111]. Por ello, la tecnología CCD no se suele implementar en los dispositivos móviles, especialmente en los *smartphones*. En comparación con CCD, las cámaras CMOS ofrecen un menor consumo de energía, un IS más pequeño, una lectura más rápida, un menor coste y una mayor programabilidad.

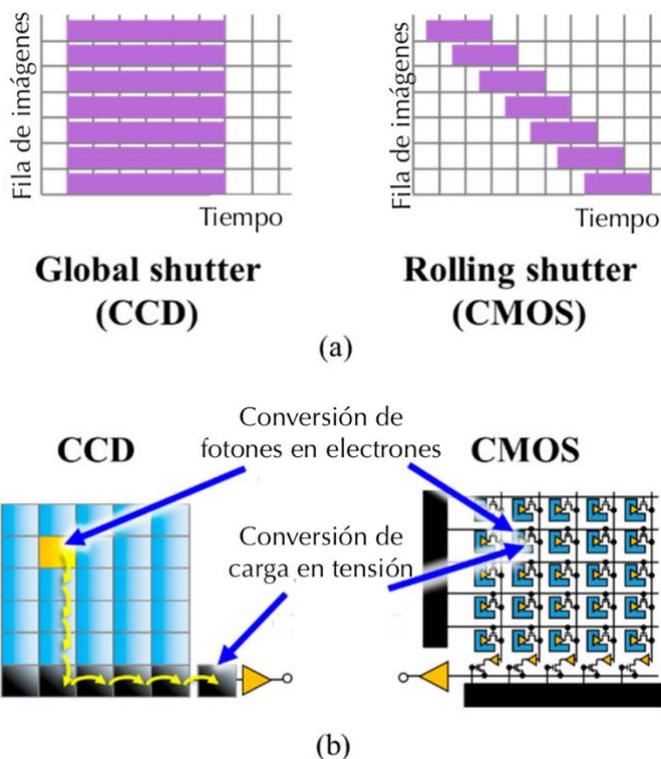


Figura 22. (a) Comparación entre el GS y el RS; (b) comparación estructural entre los sensores CCD y CMOS [106].

Por otra parte, según la exposición de los píxeles, las cámaras pueden clasificarse en dos categorías, las de obturador global (GS, del inglés *Global Shutter*) y la de obturador rodante (RS, del inglés *Rolling Shutter*), como se ilustra en la Figura 22 (a). GS suele emplear un IS de dispositivo de carga acoplada al CCD y muestra todos los píxeles por *frame* de forma simultánea. De forma análoga, las cámaras con RS suelen emplear IS con CMOS y escanean los píxeles de forma secuencial. A diferencia del caso del caso anterior, esto se consigue utilizando los métodos fila por fila o columna por columna, y con la exposición de una fila/columna a la vez [110]. Asimismo, los métodos de GS y RS tienen sus ventajas y desventajas. En la Tabla 2 se presenta una comparación entre estos dos métodos.

Tabla 2. Comparación entre Rolling y Global shutter [106].

Atributos	Rolling shutter con CMOS	Global shutter con CCD	
Exposición de píxeles	Expuestos secuencialmente	Todos los píxeles están expuestos al mismo tiempo	
Memoria a nivel de píxel	No es necesario	Necesario	
Número de transistores por píxel	Bajo	Alto	
Ruido de ambiente	Bajo	Alto	
Corriente oscura	Una corriente oscura baja da como resultado un ruido de píxel bajo	Una corriente oscura alta da como resultado un ruido de píxel alto	
Relación señal a ruido (SNR)	Alta	Relativamente baja	
	<i>Smear</i>	Si	Si, se produce un efecto <i>Smear</i> por contaminación lumínica parásita
Tipos de distorsión de imagen	<i>Skew</i>	Aparece en el movimiento horizontal dentro del FOV de la cámara	No
	<i>Wobble</i>	Aparece en el movimiento vertical dentro del FOV de la cámara	No
	Bandas PWM	Se produce cuando se obtienen imágenes en condiciones de iluminación rápida y cambiante	Generalmente no se ven afectados por la exposición parcial
En dispositivos inteligentes	Si	Extremadamente raro	

En el modo RS, el fotodiodo no recoge toda la luz al mismo tiempo. Por lo tanto, la imagen se genera fila por fila en los píxeles capturados. Esto significa que las diferentes líneas de píxeles de la imagen se llenan en diferentes ocasiones para obtener una intensidad de la señal luminosa del IS. El retraso permite registrar la estructura de la imagen en función del tiempo si el objetivo es lo suficientemente grande y la frecuencia de muestro de la fuente de luz es lo suficientemente rápida. Esta situación puede crear un problema de desenfoque en la imagen capturada.

De igual forma, en el modo GS, la captación de luz comienza y termina exactamente al mismo tiempo para todos los píxeles. Por lo tanto, todos los píxeles del conjunto de sensores

comienzan y terminan la exposición simultáneamente. Por lo tanto, todos los píxeles de la imagen obtienen información del sensor al mismo tiempo y durante la misma duración. Este mecanismo ofrece ventajas en cuanto a la capacidad de exposición en la captura de objetos en movimiento. Con respecto a los servicios multimedia, presenta una buena técnica para obtener imágenes de alta calidad. En los sistemas OCC, el mecanismo de GS presenta desventajas con respecto al rendimiento de la tasa de datos debido al estado único de la fuente de luz capturada en una imagen.

El mecanismo de GS sólo interpreta un único bit con una imagen. En cambio, en el caso de una cámara con RS se codifican múltiples bits de información. En consecuencia, la velocidad de transmisión de datos podría degradarse en la operación de GS. Sin embargo, teniendo en cuenta la topología MIMO, una cámara con GS tiene ventajas en términos de implementación y despliegue. A diferencia del modo RS, no existe ninguna restricción en cuanto a la distancia de enlace para lograr el máximo rendimiento en un modo GS. A modo de resumen, en la Figura 23 (a) se puede observar el periodo completo de captura de *frames* comprendidos en los periodos de exposición y de ahorro, mientras que en la Figura 23 (b) el periodo de ahorro se comprime haciendo un *pipeline* del tiempo de lectura en cada fila.

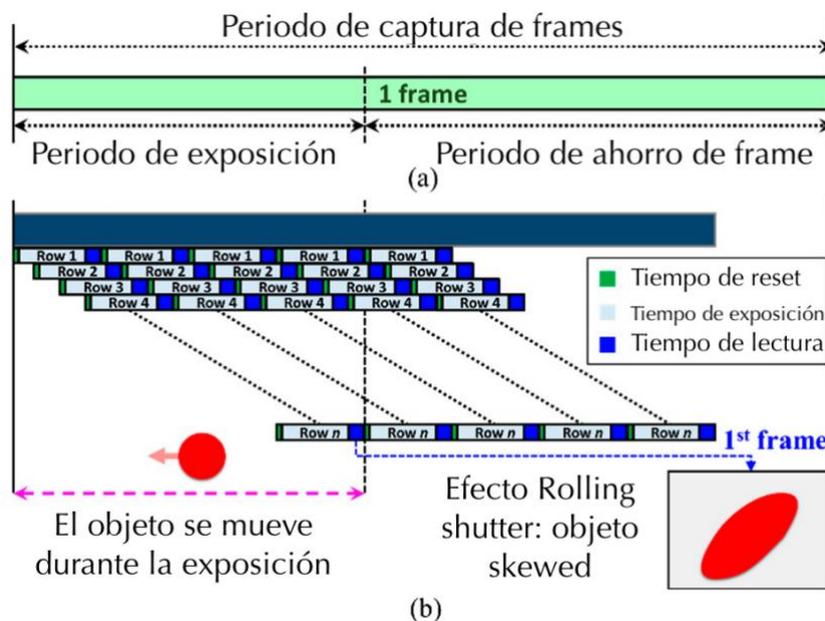


Figura 23. (a) Periodo de captura del frame; (b) distorsión RS que provoca un objeto skewed en el frame de captura [106].

De esta forma, debido a la fabricación de un ADC mucho más compacto para cada píxel, el sensor CMOS es la opción preferida hoy en día en comparación con los CCD relativamente más grandes. De igual forma, CMOS también se emplea para cámaras de alta velocidad con $FR > 1000$

fps, lo que no se puede conseguir con los sensores CCD debido a la lentitud de los ADC. De este modo, OCC sólo utiliza sensores CMOS, ya que se emplea ampliamente en la mayoría de los dispositivos móviles, incluidos los smartphones. Pueden tener un mecanismo GS o RS, dependiendo de los algoritmos de procesamiento de imágenes y de la tasa de transmisión. Por ejemplo [112], una cámara con una resolución de alta definición y una frecuencia de imagen de 60 fps que emplee el mecanismo GS puede muestrear 60 imágenes completas cada segundo. Por otro lado, la misma cámara con RS procesa filas individuales en cada *frame* por muestra, con lo que se obtiene una tasa de muestreo de 64.800 (60×1080) muestras por segundo.

3.4. Esquemas de modulación

Las modulaciones y los esquemas de codificación son los principales impulsores del rendimiento de los sistemas de comunicaciones. En OCC, donde se emplea una cámara como receptor para capturar imágenes en 2D del transmisor, los datos de información pueden ser utilizados para modular el color, la intensidad, las coordenadas espaciales y la forma de la fuente [93,98]. Cabe destacar que las opciones de modulación son limitadas, debido principalmente al número de cámaras. De esta manera, el transmisor trata de compensar el número de receptores que podrían emplearse. En OCC, hay varios factores que determinan los esquemas de modulación, como el tipo de IS, el t_E , el ISO, el procesamiento de la imagen, el tipo de transmisor y la percepción del ojo humano. A grandes rasgos, la modulación OCC puede clasificarse en cuatro grandes categorías: Modulación de muestreo de Nyquist (NSM, del inglés *Nyquist Sampling Modulation*), señalización de región de interés (RoI-S), cámara híbrida-PD y modulación basada en RS.

3.4.1. Modulación de muestreo de Nyquist

El principio de NSM se basa en limitar la velocidad de conmutación (R_S) del transmisor a un valor inferior o igual a 0.5 FR para cumplir con el teorema de muestreo de Nyquist, como se muestra en la Figura 24 [96]. Dado que FR se limita en la mayoría de los casos a 60 fps, la R_S del transmisor se fija generalmente en 30 Hz para este tipo de modulaciones. Además, debido a la baja R_S del transmisor que causa un parpadeo perceptible para el ojo humano, NSM generalmente utiliza una pantalla digital como transmisor en lugar de LEDs, ya que el parpadeo que produce la pantalla es menos molesto que el LED [113]. Por otro lado, en NSM no se utiliza un único LED de transmisión, ya que la velocidad de datos efectiva está limitada a ser inferior a 60 bps.

En NSM, el rendimiento de la transmisión de datos está limitado por la FR. Para aumentar la tasa de datos, se emplean esquemas de modulación multidimensional basados en colores, niveles de intensidad y formas repartidas por el espacio (coordenadas espaciales) [98].

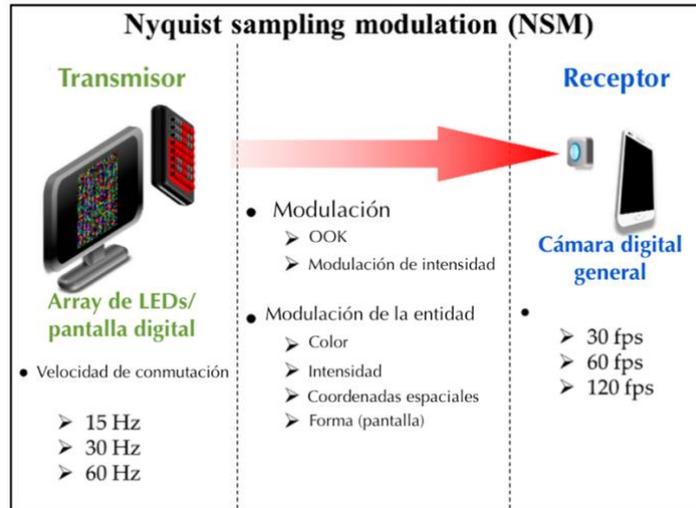


Figura 24. Modulación de muestreo Nyquist [106].

Los primeros estudios relacionados con NSM OCC basados en la visualización digital son los códigos PixNet y COBRA. PixNet [114] codifica los bits en el dominio de la frecuencia utilizando una modulación OFDM en 2D, ofreciendo así rendimientos del orden de varios Mbps limitando la transmisión a 5 Hz. En [115], se describe un código de color 2D mejorado, conocido como códigos COBRA (es decir, en forma de códigos QR de color, tal y como se muestra en la Figura 25), con el fin de optimizar la transmisión en tiempo real utilizando cinco y tres colores opcionales con una tasa de transmisión más alta de 10 Hz. Mientras, en [116] se investigó la sincronización entre la velocidad de fotogramas de la cámara y la velocidad de conmutación de los transmisores mediante LightSync.

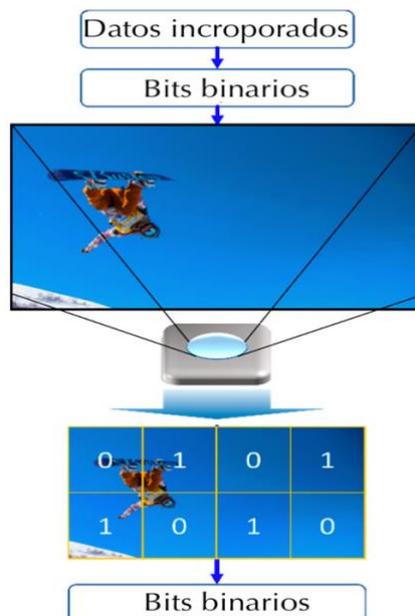


Figura 25. Marca de agua invisible para OCC [106].

3.4.2. Señalización de región de interés

RoI-S es una mejora de NSM que utiliza la región de interés (RoI, del inglés *Region Of Interest*) en el post-procesamiento de imágenes para reducir la porción de captura de imágenes [117-118]. La RoI reduce la resolución de la imagen que se procesa en el receptor y, por tanto, el método propuesto ofrece un tiempo de procesamiento más eficiente y rápido que el basado en NSM.

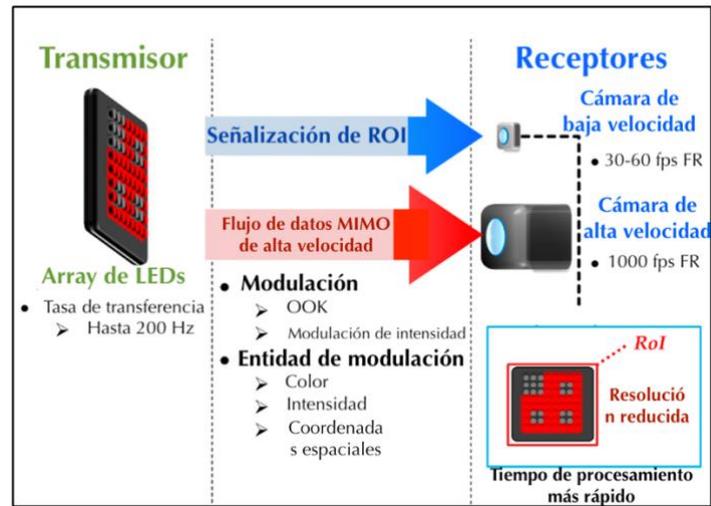


Figura 26. Señalización de la región de interés [106].

Esta técnica utiliza una cámara de baja velocidad para fijar el ROI, y luego lleva a cabo la recepción real utilizando una cámara de alta velocidad empleando el ROI previamente fijado. Es necesario que RoI-S utilice dos cámaras, ya que el método original es una vez finalizado la captura y la tasa ya no puede ser modificada posteriormente. La Figura 26 muestra que los flujos de baja y alta velocidad se utilizan para definir el ROI específico y transportar los datos actuales, respectivamente.

3.4.3. Modulación híbrida cámara-PD

Se ha propuesto una comunicación óptica híbrida cámara-PD conocida como IS de comunicación óptica (OCI). Este tipo de sistema emplea un LED, una cámara y un PD para proporcionar una respuesta considerablemente mejorada a la variación de la intensidad de la luz en comparación con los píxeles de las imágenes convencionales [119]. En OCI, la detección de la fuente de luz de las celdas de la imagen se realiza antes de establecer un enlace de comunicación y activar las celdas del PD. Además, se requiere la detección de RoI; sin embargo, no hay señalización y, por lo tanto, se requiere un algoritmo de RoI basado en CV.

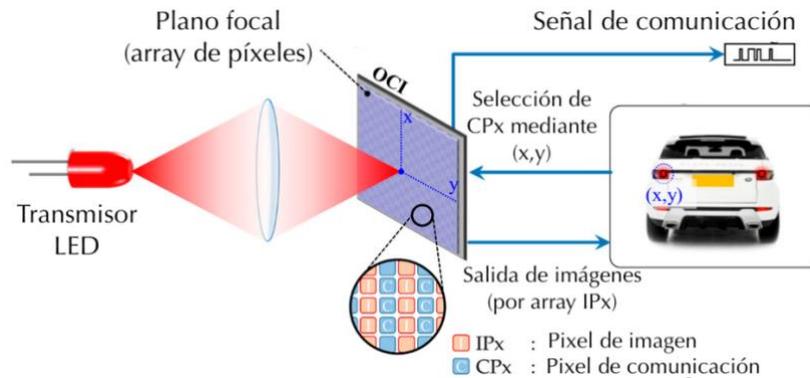


Figura 27. Funcionamiento básico de un sistema IS-OWC [106].

La Figura 27 ilustra el funcionamiento, donde se demostró experimentalmente un alcance de transmisión de 100 m. Este alcance se considera excepcionalmente grande para OCC y podría proporcionar un enorme BW de hasta 10 MHz debido al uso de celdas PD [120]. Desgraciadamente, el concepto de híbrido cámara-PD no es aplicable a los dispositivos móviles en general, ya que OCI está todavía en fase de prototipo y no está ampliamente disponible en el mercado. La ventaja de OCI es la provisión de una SNR significativamente mayor para las comunicaciones en tiempo real tanto en aplicaciones V2V como V2I en exteriores. Además, OCI también está prevista para el futuro de LiFi en interiores, ya que ofrece la ventaja de la separación espacial entre OCC y VLC, al mismo tiempo que satisface el requisito de velocidad de datos 5G.

3.4.4. OCC basado en Rolling Shutter

Para aumentar el rendimiento de los datos, en [121] se propuso un IS dedicado con una matriz PD incorporada. Su fabricación es demasiado compleja y aún no está disponible en el mercado. Sin embargo, adoptando el efecto RS de un IS basado en CMOS, es posible aumentar la tasa de datos de OCC. Este sistema es el segundo esquema comúnmente utilizado después del NSM, ya que la su implementación es práctica en cualquier cámara basada en CMOS, ampliamente disponible en el mercado. Además, la RS también se denomina demodulación de patrón RS debido a que se centra en la demodulación [122]. La Figura 28 muestra el proceso de RS en el que los datos se muestran secuencialmente por las filas de píxeles.

En RS, la frecuencia de muestreo es el producto de la FR por el número de filas de píxeles (es decir, la resolución vertical). Por ejemplo, con una cámara de 30 fps que tiene una resolución de FHD (1920×1080 píxeles), la RS muestrea cada fila de la imagen, lo que produce 30×1080 muestras en cada *frame*. Esto conduce a una tasa efectiva de 32,4 Kbps, por lo que cabría esperar que, en RS, la tasa de datos efectiva depende tanto del número de filas de la imagen como de la FR. Además, hay

que tener en cuenta que, en RS, la velocidad de muestreo de los LEDs del transmisor puede ser de 1 KHz o superior.

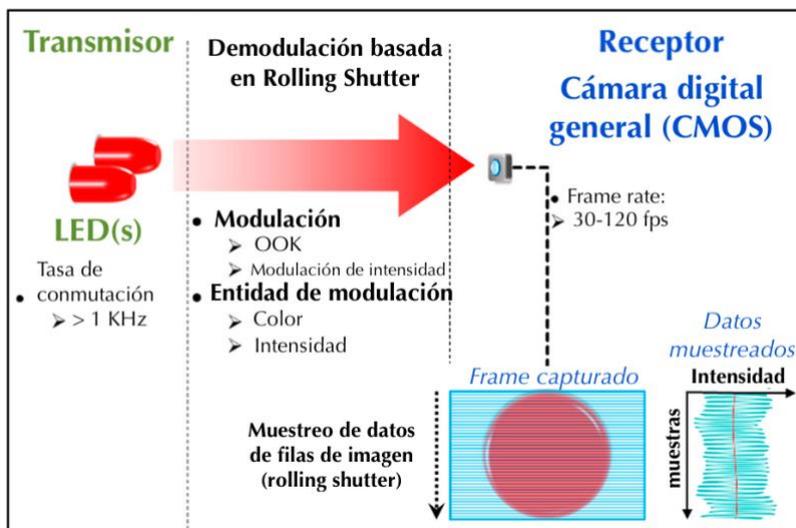


Figura 28. Proceso de demodulación basado en RS [106].

La anchura de las diferentes bandas de intensidad luminosa en el *frame* de captura es proporcional a la tasa de símbolos de los LEDs del transmisor y al t_E de la cámara. De esta forma, el ajuste de la frecuencia del transmisor afecta a la anchura de las bandas de intensidad capturadas, como se indica en la Figura 29.

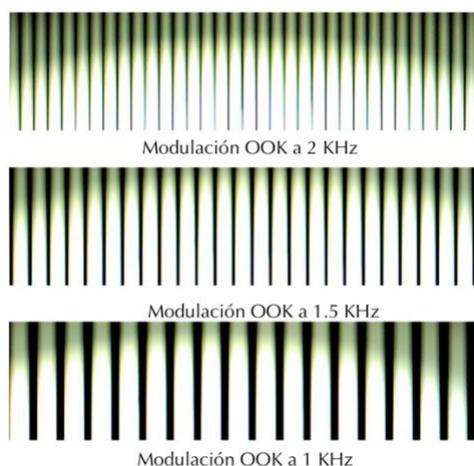


Figura 29. Frames capturados de la modulación OOK con diferentes frecuencias [106].

Sin embargo, en RS nos encontramos con los siguientes problemas: el efecto *blooming* y la demodulación de las franjas brillantes y oscuras. El primero hace referencia a la diferencia de intensidad de la luz entre la zona que rodea a la fuente de luz y el resto de la zona del fotograma

[123], mientras que el segundo [124] supone un reto debido a su alta fluctuación de datos y a una gran variación en la relación de extinción (ER, del inglés *Extinction Ratio*), es decir, un efecto *blooming* significativo, véase la Figura 30.

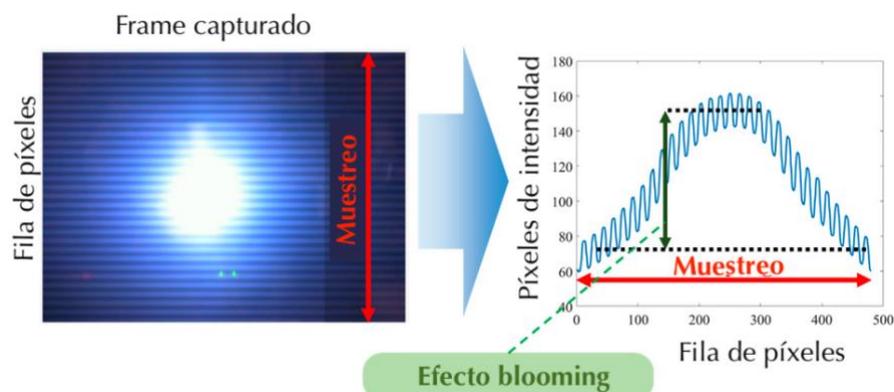


Figura 30. Efecto Blooming en RS-OCC [106].

Para mitigar el efecto *blooming*, se requiere un esquema de umbral adecuado para nivelar la intensidad a través de los *frames* capturados, de manera que se pueda aplicar un umbral binario preciso para demodular el flujo de bits capturado [125]. Existen varios esquemas de umbral basados en el procesamiento de imágenes, incluyendo el ajuste de curvas polinómicas de tercer orden, el método iterativo [126] y el método adaptativo rápido [127].

3.5. Aplicaciones

Las atractivas características de los receptores de IS impulsan una gran cantidad de investigaciones y aplicaciones para realizar nuevas formas de detección, comunicación, etc. Un sistema comercial de posicionamiento por luz visible basado en cámaras puede proporcionar una alta precisión de posicionamiento y está libre de interferencias electromagnéticas en comparación con un sistema de posicionamiento convencional basado en RF. Las comunicaciones de V2V, de V2I y de vehículo a peatón (V2C) pueden realizarse mediante OCC en un sistema de transporte inteligente (ITS, del inglés *Intelligent Transportation System*).

3.5.1. Esquemas interiores

Los esquemas OCC para interiores son los más destacables, ya que la mayoría de las aplicaciones previstas entre los casos de uso enumerados en la estandarización son para entornos interiores [128]. Los casos de uso para los esquemas de interior incluyen el código de color LED, las aplicaciones D2D y de retransmisión, la señalización digital [129], los servicios de exposición o de

tienda [130] y los servicios de aviación [131]. Se plantea una nueva versión combinada de estos casos de uso para sistemas más complejos, como las fábricas, las oficinas y los hogares inteligentes, como parte de las soluciones de la 4ª Revolución Industrial. En esta sección se describen varias aplicaciones de OCC para destacar la versatilidad de los sistemas de OCC en interiores.

En el ámbito del movimiento a través cámaras [132], se propuso una OCC combinada con detección de movimiento que se muestra en la Figura 31. El principio principal de este concepto se basa en la naturaleza de la captura de imágenes en el receptor, donde las diferencias entre *frames* adyacentes pueden utilizarse para detectar el movimiento del objeto, como por ejemplo un dedo que apunta. La detección de movimiento funciona conjuntamente con OCC a través de la selección de RoI. Hay que tener en cuenta que el esquema de detección de movimiento está previsto como una función de control adicional en OCC para su uso en hogares y oficinas inteligentes.



Figura 31. Esquema de movimiento sobre la cámara [106].

Una de las aplicaciones OCC más atractivas puede ser la de las comunicaciones D2D que emplean NSM. En [112], ilustrado en la Figura 32, se investigó un enlace VLC para smartphones (SVLC) que empleaba un receptor basado en una cámara para comunicaciones D2D de corto alcance. En este esquema, el receptor capturaba los datos de la pantalla del transmisor y utilizaba un algoritmo robusto para la detección. Al igual que un código de barras 2D dinámico, SVLC ofrece la posibilidad de transferir una cantidad importante de datos simplemente mostrándolos en la pantalla de un dispositivo inteligente. Se logró una velocidad de datos de 112,5 Kbps con una sola modulación de color. SVLC tiene el potencial de ofrecer una velocidad de datos superior, de ~300 Kbps, utilizando una modulación basada en RGB. A pesar de su limitada distancia de transmisión de 15 cm, SVLC es preferible para las transacciones financieras basadas en D2D.

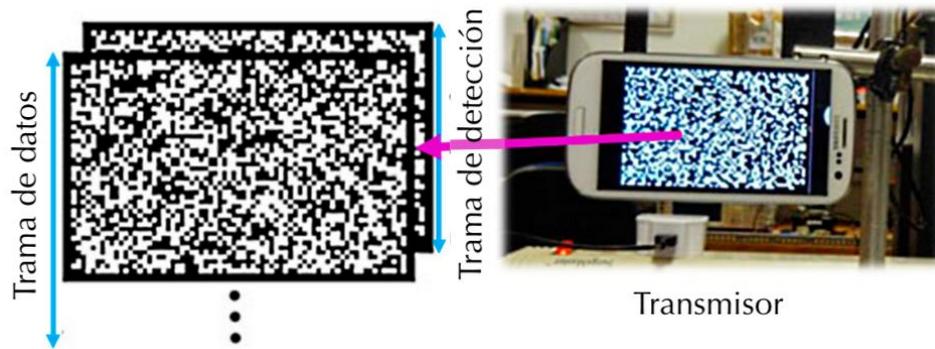


Figura 32. Transmisor basado en pantalla para SVLC [106].

En los últimos años se ha observado un creciente interés por los sistemas de posicionamiento en interiores (IPS, del inglés *Indoor Positioning Systems*). Hoy en día, existen varios IPS, como la identificación por radiofrecuencia (RFID), la banda ultraancha (UWB) y Wi-Fi [133-135]. Sin embargo, estos sistemas sufren interferencias electromagnéticas de RF y son costosos. Tanto la cámara como el PD pueden utilizarse como receptores para detectar las señales de luz modulada de los LED. Los IPS basados en OCC se han investigado ampliamente para aplicaciones de IoT. El IPS basado en OCC para el posicionamiento 2D y 3D ofrece una serie de ventajas, incluyendo una alta precisión de posicionamiento (es decir, menos de centímetros), sin licencia, sin interferencias y de bajo coste, ya que utiliza la información 2D del receptor basada en la cámara. El esquema de posicionamiento basado en OCC también se considera más práctico, ya que puede implementarse directamente en las cámaras frontales de los *smartphones* [136, 137], tal y como se muestra en la Figura 33.

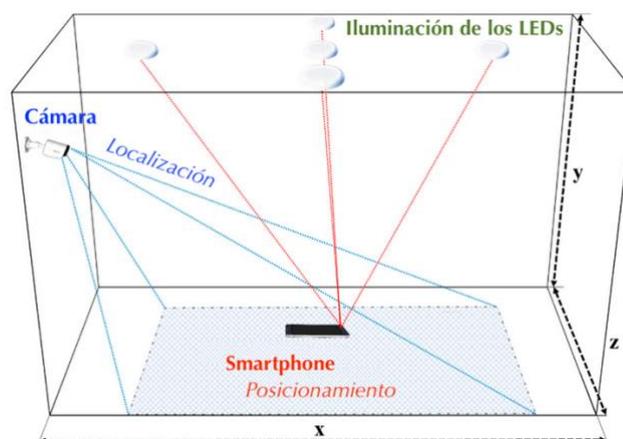


Figura 33. Esquema de posicionamiento en interiores para OCC [106].

Por ejemplo, Philips Lighting lanzó un IPS basado en OCC, que funciona junto con el concepto de Bluetooth de baja energía [138]. Demostró la viabilidad de OCC como un IPS

inalámbrico complementario para ser adoptado en IoT y, más concretamente, en entornos interiores con fines comerciales. Cabe señalar que la solución OCC [139] no puede implementarse para un uso de larga duración similar al de las redes de sensores inalámbricas, ya que el consumo medio de energía de los dispositivos con capacidad OCC es de aproximadamente 3,5 W [140].

3.5.2. Esquemas exteriores

Las principales aplicaciones de OCC en exteriores son las *smart cities* para las comunicaciones V2V, V2I y las comunicaciones submarinas y marítimas [141]. En las comunicaciones V2V y V2I, la separación espacial es la principal ventaja de un receptor basado en IS, como se muestra en la Figura 34.

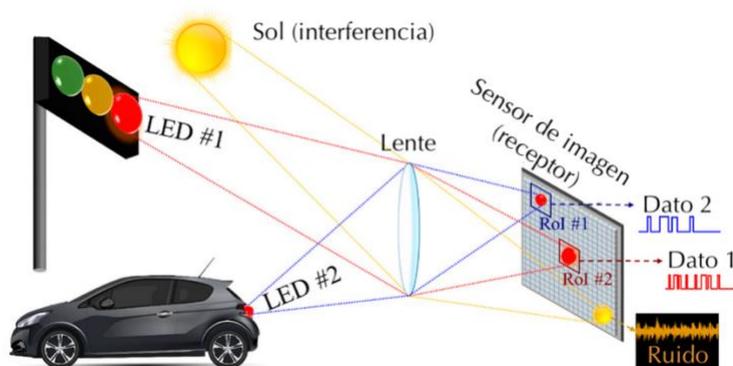


Figura 34. Separación espacial de múltiples fuentes mediante un sensor de imagen [142].

Dado que tanto el transmisor como el receptor se mueven en entornos exteriores, los esquemas de modulación más populares para OCC son NSM de alta velocidad, RoI-S y cámara-PD híbrida que utilizan sensores OCI. El post-procesamiento de la imagen RoI se utiliza predominantemente en los esquemas de OCC en exteriores para separar los transmisores de las interferencias y ruidos producidos por la luz, como la solar, mejorando así la SNR e interferencia.

El parpadeo de los transmisores basados en LEDs en las comunicaciones V2V y V2I está regulado para que sea imperceptible al ojo humano, lo que implica que la FR de la cámara debe ser superior a 100 fps [143]. Sin embargo, dado que las cámaras de alta velocidad y alto coste no se utilizan en los vehículos, un sensor OCI es un avance importante en OCC para este tipo de aplicaciones. OCI ofrece la doble ventaja de la separación espacial de la cámara y el mayor BW del receptor basado en PD, ofreciendo así una velocidad de datos práctica de 10-55 Mbps en aplicaciones vehiculares.

Las comunicaciones subacuáticas y marítimas también se contemplan dentro de la actividad de estandarización de OCC; sin embargo, es necesario realizar más estudios para investigar todo su potencial. En [144] se ha presentado una investigación experimental inicial de un enlace OCC con un receptor basado en una cámara en comparación con el VLC basado en PD. En entornos submarinos con altos grados de absorción y dispersión, la visibilidad de los LEDs no se ve afectada significativamente. Por lo tanto, la cámara puede captar las fuentes de luz que se transmiten a mayores distancias en comparación con los receptores basados en PD. Se ha logrado una distancia de transmisión de 1 m a una velocidad de datos de ~100 bps con una considerable limitación de la velocidad de datos debido a una baja velocidad de *frames* de la cámara de 30 fps.

3.6. Potencial y desafíos

Aunque OCC muestra un gran potencial en una serie de aplicaciones, todavía existen retos críticos que limitan la implementación práctica. Por ejemplo, la mayoría de las cámaras comerciales tienen una frecuencia de imagen que oscila entre 30 fps y varios cientos de fps, lo que se traduce en una velocidad de datos inferior a varios bps/píxel según el teorema de muestreo de Nyquist. Además, la transmisión a baja frecuencia por parte de una fuente LED para que coincida con la baja velocidad de frames del sensor no es aceptable para la iluminación y puede ser detectada por el ojo humano. Por otra parte, el bloqueo del enlace óptico por los edificios y la atenuación de la señal por la lluvia y la niebla degradan gravemente la calidad de la comunicación. Por lo tanto, en esta sección, se resumen algunas tecnologías clave para superar las limitaciones de la tasa de *frames* reducida o la inestabilidad de la tasa de *frames*. De esta forma, en la Tabla 3 se enumeran algunas ventajas y limitaciones importantes de los sistemas OCC.

Tabla 3. Principales ventajas y limitaciones de OCC [106].

Ventajas	Limitaciones
Comunicación sin interferencias	Bloqueo del enlace óptico
Alta calidad de SNR	Baja tasa de datos
No es necesario un procesamiento complejo de la señal	Parpadeo de la luz
Estable frente a los cambios en las distancias de comunicación	

3.6.1. Potencial tecnológico

En base a lo que se ha publicado sobre OCC, está claro que el uso de receptores basados en cámaras hace que la comunicación sea mucho más versátil como tecnología inalámbrica complementaria a las soluciones inalámbricas existentes basadas en RF. En esta sección del documento se exponen varios desarrollos potenciales que podrían suponer nuevos avances dentro del campo de OCC.

- **Avances en el HW de las cámaras.** Se prevé que la velocidad de *frames* de las cámaras aumente en un futuro cercano, debido a los recientes avances en la nanotecnología de los IS [145]. Además, la resolución de las cámaras también está aumentando progresivamente, de acuerdo con las demandas del mercado y el desarrollo de los IS en la industria de los dispositivos inteligentes.
- **Asistencia de la red neuronal.** Los desarrollos de las cámaras para su uso en *smartphones* y otros dispositivos móviles también pueden ser en realidad aumentada (AR, del inglés *Augmented Reality*) y realidad mixta (MR, del inglés *Mixed Reality*). Además, la implementación del procesamiento inteligente de imágenes mediante inteligencia artificial (IA) se ha convertido en un método destacado en los *smartphones*, que contará con el apoyo de servicios en línea como Google [146].
- **Desarrollo de múltiples cámaras.** La disponibilidad de múltiples cámaras en los teléfonos inteligentes en los últimos cinco años también ha proporcionado oportunidades y beneficios adicionales para OCC, incluyendo varios FOV, diferentes sensibilidades de luz y resoluciones para los receptores. Estas características darán lugar a un área de cobertura más amplia, un mayor rango de sensibilidad para varios espectros de luz, mayores detalles de imagen, mayor robustez frente al ruido y mayores velocidades de datos en los sistemas OCC.
- **Modulación avanzada y medio de comunicación.** Los esquemas de modulación complejos (incluidos los multiniveles y las multiportadoras), así como las tecnologías WDM, pueden utilizarse para aumentar el rendimiento de los datos en los sistemas OCC [147]. Asimismo, las cámaras con mayor resolución y el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes más potentes mejorarán la eficacia y la solidez de OCC.
- **Navegación automatizada en interiores.** Tanto la movilidad como la cobertura son importantes en OCC, ya que los dispositivos móviles rara vez son estáticos en entornos interiores y exteriores. La mayoría de los estudios sobre OCC se han centrado en cámaras

estáticas y enlaces de comunicación tipo LOS. Sin embargo, los estudios descritos en las secciones anteriores han mostrado varias posibles implementaciones de esquemas OCC con una cámara dinámica y un enlace tipo NLOS.

- **Más allá del 5G.** Existe un cierto desarrollo masivo de las tecnologías inalámbricas más allá de las actuales redes inalámbricas 5G [148]. La OCC, que utiliza tanto la luz visible como NIR, forma parte del futuro sistema de comunicación previsto en los estándares 5G y 6G. Esto se debe a que el rango de frecuencias entre 100 GHz a 3 THz, incluyendo la luz visible y NIR, se consideran bandas de comunicación prometedoras para sistemas de comunicación inalámbrica de nueva generación.

3.6.2. Retos y desafíos

Aunque se observa un gran potencial y futuras aplicaciones para OCC, hay una serie de retos que no se han abordado completamente o que sólo se han estudiado de forma parcial, y que necesitan más investigación para hacer de OCC una tecnología inalámbrica más práctica para las futuras aplicaciones emergentes en el contexto de las sociedades inteligentes. Al igual que en el apartado anterior, en esta sección del documento se exponen varias limitaciones a las que se enfrenta el campo de OCC.

- **Sincronización.** El principio intrínseco del funcionamiento de OCC se basa en una topología de difusión sin que se proporcione información de retorno durante la transmisión [98]. La sincronización es, por tanto, una cuestión difícil que debe abordarse por dos razones principales: el muestreo se lleva a cabo de forma aleatoria en una cámara, es decir, puede tener lugar durante cualquier símbolo de la señal transmitida, lo que conlleva un aumento de la tasa de error de símbolo y diferentes periodos de muestreo de *frames* (es decir, periodos de ahorro de fotogramas) para las cámaras. La Tabla 4 muestra algunos ejemplos de los FR de varias cámaras para la misma resolución FHD y una FR 30 fps.

Tabla 4. Frame rate de la cámara en varios dispositivos [106].

Dispositivo	FR medio (fps)	Mínimo (fps)	Máximo (fps)
Samsung <i>Smartphone</i> (SHV-N916L)	29.656	15.77	31.44
LG <i>Smartphone</i> (F700L)	29.97	22.85	30.13
Sony <i>Smartphone</i> (G8141)	30.00	29.654	30.36
Thinkpad <i>webcam</i> (Sunplus IT)	30.00	20.819	31.94

Microsoft webcam (HD-3000)	29.87	23.09	30.80
----------------------------	-------	-------	-------

- **Eficiencia de la tasa de datos.** El procesamiento de imágenes forma parte de los retos de OCC en relación con la propia naturaleza de la funcionalidad que poseen las cámaras para capturar imágenes [149]. La carga de procesamiento aumenta linealmente con la resolución de la cámara, que es crucial para resolver los detalles de la imagen capturada. Además, no se puede alcanzar la tasa de datos teórica de la OCC, ya que no todos los píxeles del IS están expuestos a fuentes de luz independientes al mismo tiempo.
- **Distorsión de la lente de la cámara.** El uso de un objetivo en una cámara con una distancia focal que no se corresponde con el tamaño del IS, introduce distorsiones ópticas en la imagen capturada [150]. Estas distorsiones pueden ser de barril, de cojín y de bigote, como se ilustra en la Figura 35.

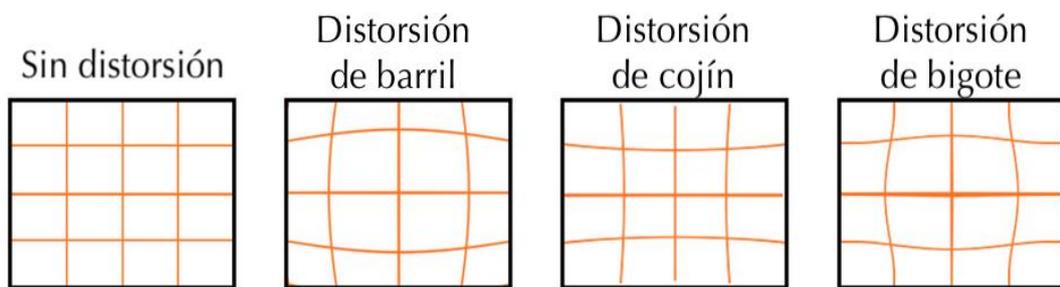


Figura 35. Distorsiones causadas por varias lentes [106].

- **Formatos de modulación sin parpadeo.** Algunos esquemas de modulación, como un OOK NRZ (no retorno a cero) de baja velocidad, pueden dar lugar a parpadeos. Para la modulación sin parpadeo, se han descrito varios esquemas en la literatura. Los esquemas de modulación OCC basados en RS, como el UPSOOK (sincronización on-off con desplazamiento de fase submuestreada), pueden verse como cintas oscuras y brillantes en grandes superficies. Para solucionar este problema, se debe adoptar la señalización diferencial. En otras palabras, tras la sustracción de tramas, sólo quedan las regiones oscuras o brillantes bajo el pretexto de que el transmisor y la cámara están sincronizados en el dominio de la frecuencia.
- **Formatos de modulación de orden superior.** Dado que los vehículos se mueven a una velocidad relativamente alta en las comunicaciones V2V, es necesario que los paquetes transmitidos sean cortos y se capten instantáneamente en la recepción, antes de que la escena cambie significativamente. Por lo tanto, dado que la velocidad de datos es fija, se pueden

emplear esquemas de modulación de alto orden y multiportadora para mantener el tamaño del paquete lo más corto posible, asegurando así los paquetes recibidos con una baja probabilidad de error.

CAPÍTULO 4: Sensores de visión neuromórficos

4.1. Introducción

Gracias al sistema nervioso humano se han creado durante las últimas décadas innumerables métodos de computación aplicados en diversos sistemas de IA [151, 152]. Nace así la “ingeniería neuromórfica” a finales de la década de 1980, en la que los sistemas electrónicos pueden imitar la arquitectura neuronal de los sistemas nerviosos para mejorar la eficiencia del procesamiento de la información [153, 154]. Actualmente, las aplicaciones neuromórficas se llevan a cabo mediante la integración digital basada en transistores o en dispositivos emergentes. Sin embargo, se enfrentan a un importante reto en las integraciones a gran escala, ya que normalmente se utilizan varias decenas de transistores para realizar la función de una neurona [155].

A diferencia de los IS tradicionales, los sensores de visión neuromórficos sólo producen eventos si detectan cambios en la intensidad de la luz. Esto les permite tener un flujo de salida eficiente al excluir los datos redundantes e incluir sólo los cambios. Además, su arquitectura permite muestrear cada píxel a frecuencias muy altas, por ejemplo, el sensor DAVIS es capaz de muestrear a 333,3 kHz por píxel [156]. Tal es la importancia de esta tecnología en la industria y la investigación [157, 158], que Samsung ha anunciado recientemente que un IS basado en eventos, el DVS.

Los IS basados en eventos son extremadamente sensibles al ruido de actividad de fondo (BA, del inglés *Background Activity*) producido por el ruido temporal y las corrientes de fuga de la unión [159, 160]. El ruido BA se produce cuando la salida de un píxel cambia bajo una iluminación constante. Asimismo, este ruido puede eliminarse mediante filtros de correlación espaciotemporal [161].

4.2. Principio de funcionamiento

La visión basada en eventos es, con mucho, la modalidad más avanzada en cuanto a tecnología y aplicaciones basadas en eventos, y por ello ocupa la mayor parte del espacio en la sección de estudio de este capítulo.

4.2.1. Sistema visual humano

El sistema visual humano está formado principalmente por el ojo, el nervio óptico y la corteza visual del cerebro, tal y como se muestra en la Figura 36 (a). La información visual pasa primero por

el cristalino, y luego es percibida y procesada por la retina del ojo humano, y la información extraída atraviesa el nervio óptico y finalmente es procesada en la corteza visual.

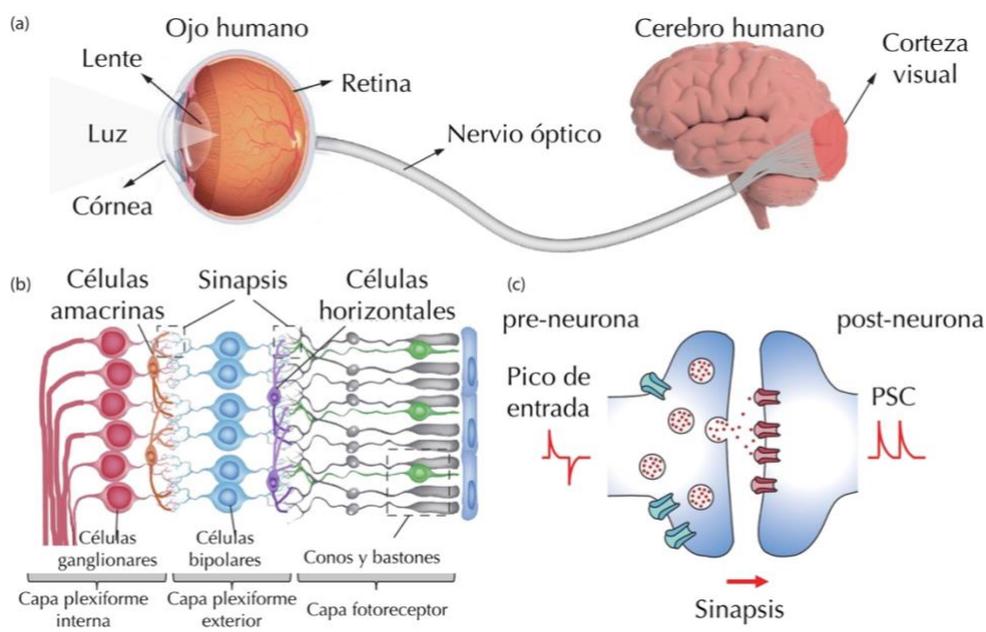


Figura 36. (a) la composición del sistema visual humano, (b) la estructura multicapa de la retina, y (c) sinapsis [162].

Una de las principales funciones de la retina es extraer las características clave de la información visual de entrada mediante operaciones de procesamiento, cuyo objetivo es descartar los datos visuales redundantes y acelerar sustancialmente el procesamiento posterior en el cerebro, como el reconocimiento y la interpretación de patrones [163].

Como se ilustra en la Figura 36 (b), la retina es una estructura compleja que consta de tres capas primarias: la capa fotorreceptora, la capa plexiforme externa y la capa plexiforme interna [164]. En la retina existen más de 50 tipos de células diferentes, como los fotorreceptores, las células bipolares y las células ganglionares. Los fotorreceptores (por ejemplo, los conos para el reconocimiento del color y la visión nítida, y los bastones para la visión en condiciones de poca luz) transforman las señales visuales en potencia eléctrica, mientras que las células bipolares y las células ganglionares sirven para dar forma a las señales de entrada, que pueden acelerar la percepción en el cerebro. Las células bipolares pueden dividirse en células *ON* y células *OFF*. Las primeras codifican los cambios espaciotemporales de luminosidad y las segundas los de oscuridad. Las células bipolares y ganglionares pueden dividirse a su vez en dos grupos diferentes: las células con respuestas más sostenidas y las células con respuestas más transitorias. De esta forma, existen al menos dos vías paralelas: la magno-celular, en la que las células son sensibles a los cambios temporales de la escena, y la parvo-celular, en la que las células son sensibles a las formas de la escena [165].

La sinapsis es una estructura especializada ubicada dentro de la retina que permite a una neurona pasar señales químicas o eléctricas a otra neurona (véase la Figura 36 (c)). Posee una especial plasticidad, denominada plasticidad sináptica, que es el mecanismo fundamental del proceso de memoria y aprendizaje del sistema nervioso. En general, dicha plasticidad puede dividirse en dos partes fundamentales: la plasticidad a corto plazo (STP, del inglés *Short-Term Plasticity*) y a largo plazo (LTP, del inglés *Long-Term Plasticity*) [166, 167]. La STP es un cambio temporal en la conexión sináptica y decae rápidamente a su estado original después de eliminar el pico externo. En cambio, la LTP es una transformación a largo plazo en la conexión sináptica y es crucial para la memoria y el aprendizaje.

En definitiva, la retina humana tiene una bioestructura jerárquica para la conectividad entre neuronas con distintas funcionalidades y permite la detección y el preprocesamiento simultáneo de la información visual. La simulación sus estructuras y funcionalidades constituye una forma prometedora y eficaz de conseguir un sensor de visión de bajo consumo y alta eficiencia en el procesamiento de imágenes.

4.2.2. Dynamic Vision Sensor

Para implementar un sensor de visión viable basado en las funciones de la vía magno-celular en la retina, los investigadores propusieron el DVS [168]. Los sensores DVS sólo producen dos tipos de eventos, *ON* y *OFF*. Estos eventos tienen la forma de un evento de dirección que se genera localmente por el sensor. Cada uno de los eventos incluye la posición X , la posición Y , la polaridad y el tiempo. De esta forma, para codificar toda la información de los eventos para el flujo de salida, los sensores DVS utilizan el protocolo *Address Event Representation* (AER) [169] para crear un array de valores para cada evento como se indica en la Ecuación 3.

$$e(p, x, y, t) \tag{EC.3}$$

Donde:

p es la polaridad o dirección del cambio de la intensidad de la luz.

x es el número de columnas.

y es el número de filas.

t es la marca de tiempo.

De esta forma, un sistema DVS genera un evento siempre que se cumpla con la condición de la Ecuación 4.

$$\log\left(\frac{I_{t_i}(x,y)}{I_{t_{i-1}}(x,y)}\right) \begin{matrix} ON \\ OFF \end{matrix} \geqslant C \quad \text{EC.4}$$

Donde:

C es un umbral que es constante durante la duración de la operación.

$I_{t_i}(x,y)$ es la intensidad en la ubicación del píxel (x,y) correspondiente a un evento que ocurre en el instante de tiempo t_i .

Como indica la Ecuación 4, los eventos se asocian a una polaridad ON cuando la diferencia de intensidades logarítmicas es mayor que el umbral y OFF si está por debajo. De esta manera, cuando no se cumple ninguna de las dos desigualdades no se genera ningún evento.

A diferencia de sus homólogas basadas en fotogramas, las cámaras basadas en eventos no están controladas por señales de control y temporización creadas artificialmente sin relación con la fuente de la entrada visual. En este caso, los eventos se generan cuando se producen cambios significativos de la luminancia relativa a nivel de píxel, como se muestra en la Figura 37.

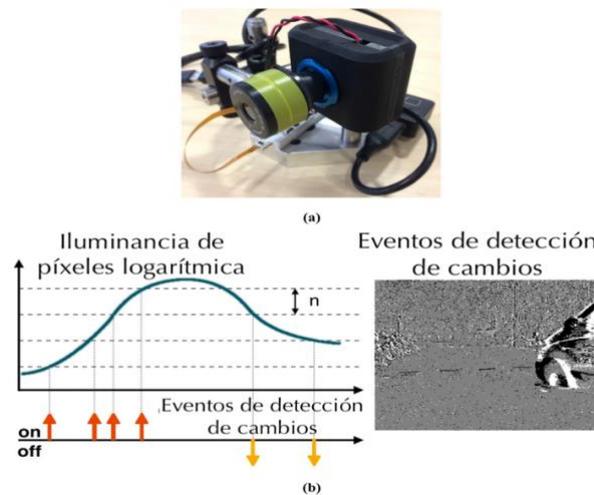


Figura 37. (a) Cámara basada en eventos y (b) principio de funcionamiento de la detección de eventos [170].

La Figura 37 (a) muestra un ejemplo de cámara basada en eventos con una lente monitorizada variable controlada a 100 Hz. Mientras, la Figura 37 (b) muestra el principio de funcionamiento de la detección por eventos de una cámara de estas características, donde los cambios relativos de luminancias superiores a un umbral n predefinido generan eventos ON/OFF cuando hay un cambio positivo/negativo del contraste. Además, los eventos emitidos por los sensores se muestran en el

plano focal como un *frame* para su visualización con puntos negros representando los eventos *OFF*, mientras que los puntos blancos representan los eventos *ON*.

Dado que la salida visual tiene la forma de un AER y codifica la información visual en la dimensión temporal con una precisión de microsegundos (μs). En cuanto se detecta un cambio de luminancia, se inicia el proceso de comunicación del evento *off-chip*. El proceso se ejecuta con una baja latencia, del orden de $1 \mu\text{s}$, lo que garantiza que el momento en que se lee un evento desde la cámara representa intrínsecamente el momento en que se detecta un cambio de contraste. De esta forma, sabiendo que $e(x, y, p, t)$ es un evento que ocurre en el momento t en la ubicación espacial $(x, y)^T$. Un cambio de contraste positivo dará lugar a un evento *ON* ($p = +1$) y un cambio de contraste negativo dará lugar a un evento *OFF* ($p = -1$). El umbral n a partir del cual un cambio de contraste es lo suficientemente alto como para desencadenar un evento se ajusta en función de la escena. De esta forma, las fluctuaciones de intensidad más pequeñas no generan ningún evento y no se registran. Esto reduce la carga de datos y permite un procesamiento en línea de alta velocidad a la resolución nativa del sensor.

DVS emula una retina simplificada en tres capas (Figura 38 (a)) para realizar una abstracción del flujo de información a través de las células fotorreceptoras, bipolares y ganglionares. La fotocorriente es codificada logarítmicamente por el circuito fotorreceptor y la tensión de salida V_p . El circuito de diferenciación amplifica los cambios con alta precisión y la salida V_{diff} . Los comparadores comparan el V_{diff} con los umbrales globales que están desplazados de la tensión de reajuste para detectar los cambios crecientes y decrecientes. Si V_{diff} es mayor que el umbral, se genera un evento *ON* u *OFF*.

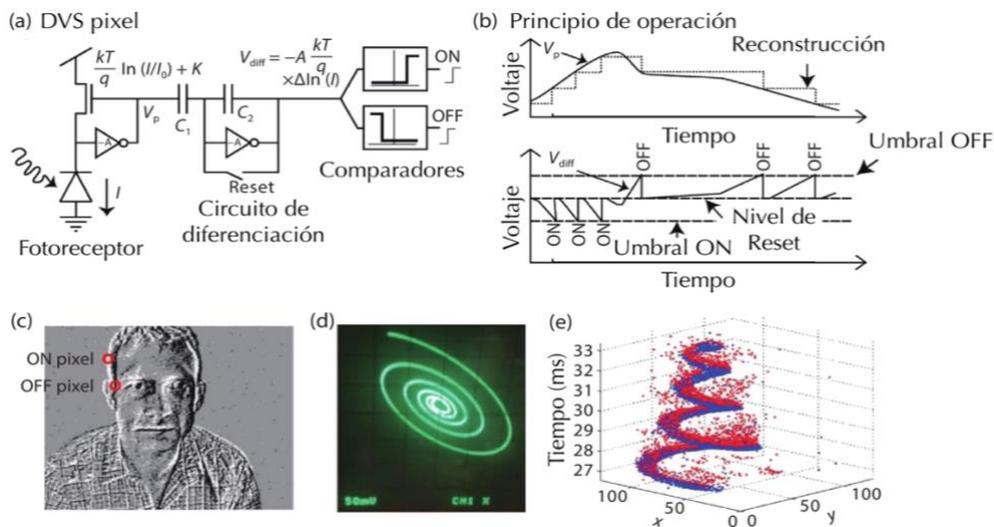


Figura 38. (a) Esquema abstracto de píxeles del DVS, (b) principio de funcionamiento, (c) respuesta de un array DVS a una persona, (d) matriz DVS sobre una espiral de 500 Hz y (e) secuencia continua de eventos [162].

La Figura 38 (b) muestra el mecanismo de funcionamiento, mientras que la Figura 38 (c) ilustra la respuesta de un conjunto de píxeles DVS a una escena natural de una persona moviéndose en el campo de visión del sensor. Los eventos son recogidos a lo largo de decenas de milisegundos (ms) y se muestran como una sola imagen mapeada con eventos *ON* y *OFF*. Mientras, las Figura 38 (d) y (e) representan un ejemplo de un conjunto de DVS que observan un punto luminoso en una pantalla de un osciloscopio que se mueve en un patrón de espiral a la frecuencia de 500 Hz, maestrando el funcionamiento rápido y de alta resolución temporal de la respuesta a los eventos.

El DVS es sensible a la dinámica de la escena y responde directamente a los cambios, es decir, al contraste temporal con un píxel individual. En comparación con los IS basados en fotogramas, la ganancia del DVS es notable en términos de resolución temporal. Otros parámetros, como el rango dinámico dentro de la escena, también se benefician en gran medida del enfoque inspirado en el sistema humano. Asimismo, DVS es adecuado para las aplicaciones de visión artificial, que implican la detección y el análisis del movimiento a alta velocidad, el seguimiento de objetos y el reconocimiento de patrones.

Aunque a lo largo de este proyecto se usa un sistema DVS, existen más sistemas como el ATIS o el DAVIS [171, 172]. Por ello, en la Tabla 5 se comparan los tres sensores de visión neuromórfica representativos basados en la tecnología convencional CMOS.

Tabla 5. Comparación de tres retinas de silicona representativas [162].

Parámetro	DVS	ATIS	DAVIS
Función principal	Detección de eventos de contraste temporal asíncrono	DVS + Medición de la intensidad de cada evento	DVS + Imagen síncrona
Ruido	2.1%	0.25%	3.5%
Complejidad de píxeles	26 transistores, 3 tapas, 1 fotodiodo	77 transistores, 3 tapas, 2 fotodiodos	47 transistores, 3 tapas, 1 fotodiodo
Consumo de energía (mW)	24	50-175	5-14
Resolución	128x128	304x304	240x180
Tamaño del píxel (μm^2)	40x40	30x30	18.5x18.5
Latencia (μs)	15	4	3
Rango dinámico	120 dB	125 dB	130 dB

Fecha de publicación	2008	2011	2013
Aplicación	Escenas dinámicas	Vigilancia	Escenas dinámicas

Sin embargo, las limitaciones comunes de estas tecnologías son un circuito muy complejo, una gran área de píxeles y un bajo factor de ocupación. Los sensores de visión neuromórficos convencionales se han aplicado a diversas aplicaciones de CV y robótica, pero siguen enfrentándose a los retos de un bajo nivel de integración, un alto consumo de energía y la latencia.

4.2.3. Background Activity

El ruido de BA se produce por el ruido térmico y las corrientes de fuga de la unión que actúan sobre los interruptores conectados a los nodos flotantes [173]. Estos eventos deterioran la calidad de los datos y utilizan un BW de comunicación y un procesamiento innecesario. La diferencia entre los eventos BA y los de actividad real de un píxel es que los eventos BA carecen de correlación temporal con los eventos próximos a él, a diferencia de los eventos reales que tienen una correlación temporal con los eventos de sus vecinos espaciales. De esta manera, utilizando esta diferencia, el ruido BA puede filtrarse detectando los eventos generados por un píxel sin la correlación espaciotemporal con los eventos generados por los píxeles vecinos y el suyo propio píxel.

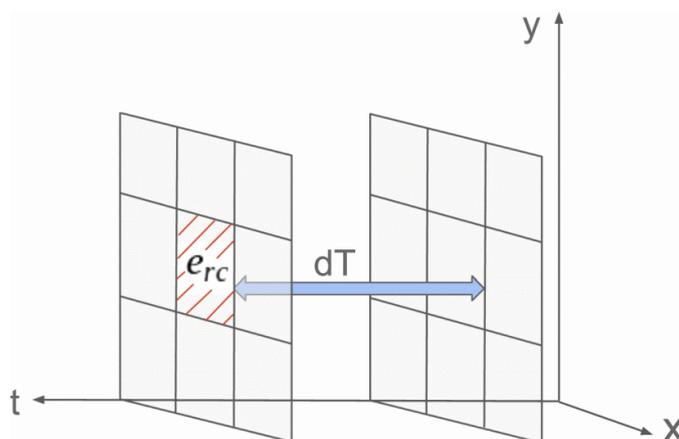


Figura 39. Principio del filtro de correlación espaciotemporal. Un evento puede pasar el filtro si tiene correlación con sus vecinos espaciales dentro de una ventana temporal dT [174].

Un filtro de este tipo es un filtro de correlación espaciotemporal. Para procesar un evento, un filtro espaciotemporal busca en la vecindad espacial del evento con marcas de tiempo más cercanas a un dT de la marca de tiempo del suceso de procesamiento, como se ilustra en la Figura 39. Si existe un suceso con una marca de tiempo más cercana al dT a la marca de tiempo del evento de procesamiento, dicho evento puede pasar el filtro. En caso contrario, el evento de procesamiento

será filtrado. Este principio puede formularse como sigue en la Ecuación 5. No obstante, para implementar un filtro de tales características es necesario una celda de memoria por píxel para almacenar la marca de tiempo más reciente.

$$e(p, x, y, t) \text{ is not BA } |t - t_{ij}| < dT \quad \text{EC.5}$$

$$s. t. |i - x| \leq 1 \wedge |j - y| \leq 1$$

Donde:

e es el evento de procesamiento.

t_{ij} es la marca de tiempo del evento más reciente en columna i y fila j , excluyendo el evento de procesamiento.

4.3. Comparación con los sensores convencionales

El sensor de visión neuromórfico es una nueva modalidad de detección pasiva y un sensor sin fotogramas con una serie de ventajas sobre las cámaras tradicionales. En los sistemas de imagen convencionales, las unidades de detección y procesamiento están separadas físicamente, lo que provoca un elevado consumo de energía debido al movimiento de datos entre las unidades de detección y las de cálculo, limitando en gran medida sus aplicaciones con la creciente demanda de procesamiento de bajo consumo y en tiempo real. De esta manera, inspirándose en las características de bajo consumo y alta eficiencia del ojo humano, se han realizado muchos trabajos sobre la emulación de las funciones de este con dispositivos y circuitos semiconductores, como la retina de silicio [175, 176], los sensores de visión de memoria optoelectrónica de acceso aleatorio (ORAM) [177], los sensores de visión de red neural (NN, del inglés *Neural Network*) [178] y los sensores de visión de forma hemisférica [179].

Los sensores de imagen actuales se basan en la tecnología de semiconductores de CCD y CMOS, tal y como se ha comentado en capítulos anteriores. Su funcionamiento consta de un conjunto de IS bidimensionales para percibir las entradas de información del entorno externo como imágenes digitales, una unidad de memoria para almacenar la información visual capturada y una unidad de procesamiento para ejecutar algoritmos de visión por ordenador para tareas de procesamiento, como el reconocimiento y el seguimiento de objetos [180]. Estos sensores son accionados por una sincronización de señales digitales creadas artificialmente, adquiriendo la información visual como una serie de *frames*. Asimismo, la información visual cuantificada en el dominio del tiempo a un FR predeterminado no está relacionada con la dinámica presente en el mundo real. Cada fotograma guardado transmite la información de todos los píxeles, aunque la información no haya cambiado desde la última adquisición [181].

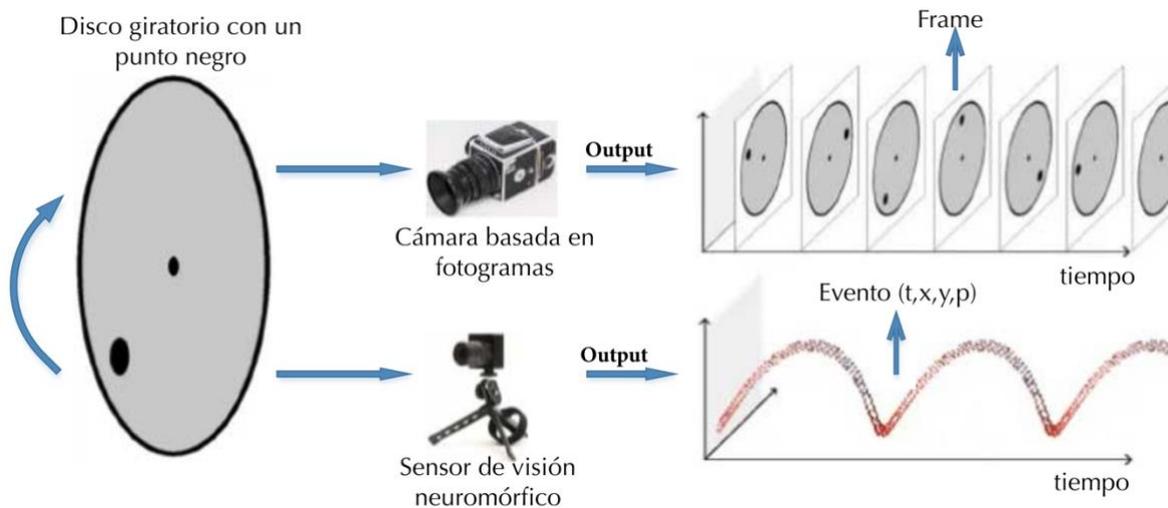


Figura 40. Visualización de la salida de un sensor de visión neuromórfico y una cámara estándar [182].

Los IS convencionales se enfrentan a grandes limitaciones derivadas del funcionamiento basado en fotografías. Una baja frecuencia de *frames* da lugar a la pérdida de información, mientras que una alta frecuencia da lugar inevitablemente a demasiados datos redundantes. Esta deficiencia se hace muy evidente en las aplicaciones con gran cantidad de datos y sensibles al retardo, como el control de motores de alta velocidad, la navegación de robots autónomos, etc. De igual forma, estos sensores generan una gran cantidad de datos redundantes a partir de la adquisición de información visual basada en *frames*. La gran cantidad de información visual suele convertirse a un formato digital y se pasa a una unidad de cómputo para el procesamiento de imágenes. El movimiento de datos entre los sensores y la unidad de procesamiento provoca retardos, mayores necesidades de BW y un elevado consumo de energía. A modo de conclusión, se muestra en la Figura 40 una comparación del funcionamiento entre las cámaras estándar basadas en fotografías y los sensores de visión neuromórficos. Asimismo, se sigue la misma lógica para la Tabla 6.

Tabla 6. Características de frames vs eventos [183].

Características de la visión basada en <i>frames</i>	Características de la visión basada en eventos
Registra los datos al mismo tiempo	Funciona de forma asíncrona
Arquitectura predefinida	Mayor rango dinámico y bajas latencias
La arquitectura adquiere grandes volúmenes de datos provocando un submuestreo	Opera sobre las intensidades de brillo y adquiere sólo la dinámica de la escena
Alta redundancia	Mínima redundancia
Los fotogramas continuos aumentan la latencia	Activación inteligente de los píxeles

4.4. Procesamiento de los eventos

Una de las cuestiones clave del cambio de paradigma que plantean las cámaras de eventos es cómo extraer información significativa de los datos de los eventos para cumplir una tarea determinada. Se trata de una pregunta muy amplia, ya que la respuesta depende de la aplicación.

Las cámaras de eventos adquieren la información de forma asíncrona y dispersa, con alta resolución temporal y baja latencia. Por lo tanto, el aspecto temporal, especialmente la latencia, desempeña un papel esencial en la forma de procesar los eventos. Dependiendo del número de eventos que se procesen simultáneamente, pueden distinguirse dos categorías: métodos que operan evento por evento, en los que el estado del sistema puede cambiar ante la llegada de un solo evento, consiguiendo así una latencia mínima, y métodos que operan sobre grupos o paquetes de eventos, que introducen cierta latencia. Sin tener en cuenta las consideraciones de latencia, los métodos basados en grupos (es decir, ventanas temporales) de eventos pueden seguir proporcionando una actualización del estado a la llegada de cada suceso si la ventana se desliza por un suceso. Por lo tanto, la distinción entre ambas categorías es más sutil: un suceso por sí solo no proporciona suficiente información para la estimación, por lo que se necesita información adicional, en forma de eventos pasados o conocimientos extra.

Ortogonalmente, dependiendo de cómo se procesen los eventos, podemos distinguir entre enfoques basados en modelos y enfoques sin modelos (por ejemplo, basados en datos y ML). Suponiendo que los eventos se procesen en un marco de optimización, otra clasificación se refiere al tipo de objetivo o función de pérdida utilizada: geométrica, temporal o fotométrica.

4.4.1. Representación de eventos

Los eventos se procesan y a menudo se transforman en representaciones alternativas que facilitan la extracción de información significativa para resolver una tarea determinada. A continuación, se repasan las representaciones más populares de los datos basados en eventos. Varias de ellas surgen de la necesidad de agregar la poca información que transmiten los eventos individuales en ausencia de conocimientos adicionales. Algunas representaciones son simples transformaciones de datos hechas a mano, mientras que otras son más elaboradas.

- **Eventos individuales.** Son utilizados por los métodos de procesamiento evento por evento, como los filtros probabilísticos y las redes neuronales. El filtro tiene información adicional, construida a partir de eventos pasados o dada por conocimientos adicionales, que se fusiona con el evento entrante de forma asíncrona para producir una salida [184].

- **Paquete de eventos.** Los eventos espaciotemporalmente vecinos se procesan juntos para producir una salida. Esta representación conserva la información precisa de la marca de tiempo y la polaridad. La elección del tamaño apropiado del paquete es crítica para satisfacer las suposiciones del algoritmo, que varía con la tarea [185, 186].
- **Imagen de eventos o histograma 2D.** Los eventos en una vecindad espaciotemporal se convierten de forma sencilla en una imagen que puede ser alimentada por algoritmos de CS basados en imágenes. Algunos algoritmos pueden funcionar a pesar de las diferentes características estadísticas de los fotogramas de eventos y de las imágenes reales. De esta manera, dichos histogramas pueden proporcionar una tasa de muestreo basada en la actividad [187] para los métodos de acumulación y para el cálculo del flujo.
- **Superficie temporal.** Una TS (del inglés *Time Surface*) es un mapa 2D en el que cada píxel almacena un único valor temporal. De este modo, los eventos se convierten en una imagen cuya intensidad es una función del historial de movimiento en esa ubicación, con valores mayores que corresponden a un movimiento más reciente. En ellas se exponen de forma explícita la rica información temporal de los eventos y pueden actualizarse de forma asíncrona [188].
- **Voxel Grid.** Es un histograma espaciotemporal (3D) de eventos, en el que cada voxel representa un píxel y un intervalo de tiempos concretos. Esta representación conserva mejor la información temporal de los eventos al evitar que se colapsen en una cuadrícula 2D [189].
- **Conjunto de puntos 3D.** Los eventos en una vecindad espaciotemporal se tratan como puntos en el espacio 3D. Así, la dimensión temporal se convierte en geométrica. Es una representación dispersa, y se utiliza en métodos de procesamiento geométrico basados en puntos, como el ajuste de planos [190] o PointNet [191].
- **Conjunto de puntos en el plano imagen.** Los eventos se tratan como un conjunto variable de puntos 2D en el plano de la imagen. Son una representación popular entre los primeros métodos de seguimiento de formas basados en el desplazamiento de la media [192], donde los eventos proporcionan los únicos datos necesarios para el seguimiento de patrones de bordes.
- **Imagen con compensación de movimiento.** Es una representación que depende no sólo de los eventos, sino también de la hipótesis de movimiento. La idea de la compensación de

movimiento es que, a medida que un borde se mueve en el plano de la imagen, desencadena eventos en los píxeles que atraviesa; el movimiento del borde puede estimarse deformando los eventos a un tiempo de referencia y maximizando su alineación, produciendo una imagen nítida de eventos deformados [193].

4.4.2. Métodos para el procesamiento de los eventos

Los sistemas de procesamiento de eventos constan de varias etapas: preprocesamiento (adaptación de la entrada), procesamiento central (extracción y análisis de características) y postprocesamiento (creación de la salida). Las representaciones de eventos de la sección 4.4.1 pueden ocurrir en diferentes etapas: por ejemplo, en [194] se utiliza un paquete de eventos en el preprocesamiento, y las imágenes de eventos compensadas por el movimiento son la representación interna en la etapa de procesamiento central.

Los métodos utilizados para procesar los eventos están influenciados por la elección de la representación y la plataforma de HW disponible. Estos tres factores se influyen mutuamente. Es lógico utilizar representaciones densas y diseñar algoritmos en base a que se ejecuten en procesadores estándar (por ejemplo, CPU o GPU). Los principales métodos por eventos son los filtros (deterministas o probabilísticos) y las SNN (del inglés *Spiking Neuronal Networks*). Para los eventos procesados en paquetes también hay muchos métodos: extractores de características hechos a mano, redes neuronales profundas (DNNs, del inglés *Deep Neuronal Network*), etc. A continuación, se repasan algunos de los métodos más comunes.

- **Métodos basados en eventos.** Los filtros deterministas, como las convoluciones (espaciotemporales) y los filtros de BA, se han utilizado para la reducción de ruido, la extracción de características [195], la reconstrucción de imágenes [196], y el filtrado de brillo [197], entre otras aplicaciones. Estos métodos se basan en la disponibilidad de información adicional, que puede ser proporcionada por eventos anteriores o por sensores adicionales. Seguidamente, cada evento entrante se compara con dicha información y el desajuste resultante proporciona información para actualizar el estado del filtro. Seguidamente, cada evento entrante se compara con dicha información y el desajuste resultante proporciona información para actualizar el estado del filtro. Los filtros son una clase predominante de métodos para el procesamiento evento por evento porque manejan datos asíncronos, proporcionando así una latencia de procesamiento mínima, preservando las características del sensor, y agregan información de múltiples fuentes pequeñas.

- **Métodos para grupos de eventos.** Dado que cada suceso contiene poca información y está sujeto a ruido, a menudo se procesan varios sucesos juntos para obtener una SNR suficiente para el problema considerado [198]. Los métodos para grupos de sucesos utilizan las representaciones anteriores para reunir la información contenida en los sucesos con el fin de estimar las incógnitas del sistema, normalmente sin requerir datos adicionales. Por lo tanto, los eventos se procesan de forma diferente según su representación.
- **Métodos de *Deep Learning* (DL).** Consisten en una DNN. Algunos ejemplos de aplicaciones son la clasificación [199], la reconstrucción de imágenes [200], la predicción del ángulo de dirección [201], y la estimación del flujo óptico [202]. Estos métodos se diferencian principalmente en la representación de la entrada y en las funciones de pérdida optimizadas durante el entrenamiento. Se han utilizado varias representaciones, como imágenes de eventos, TSs, *Volxel grids* o conjuntos de puntos.
- **Compensación del movimiento.** Es una técnica utilizada para estimar los parámetros del movimiento que mejor se ajustan a un grupo de eventos. Tiene un modelo de deformación en tiempo continuo que permite explotar la alta resolución temporal de los eventos, y por tanto se aleja de los algoritmos convencionales basados en imágenes.

4.5. **Sistemas y aplicaciones basados en eventos**

Desde que se propusieron, estos dispositivos han encontrado su camino en muchas y diferentes aplicaciones. En esta sección se ofrece una revisión de las aplicaciones de los sistemas de visión basados en eventos. Asimismo, se muestra en la Figura 41 un pequeño resumen de las distintas posibilidades de esta tecnología.

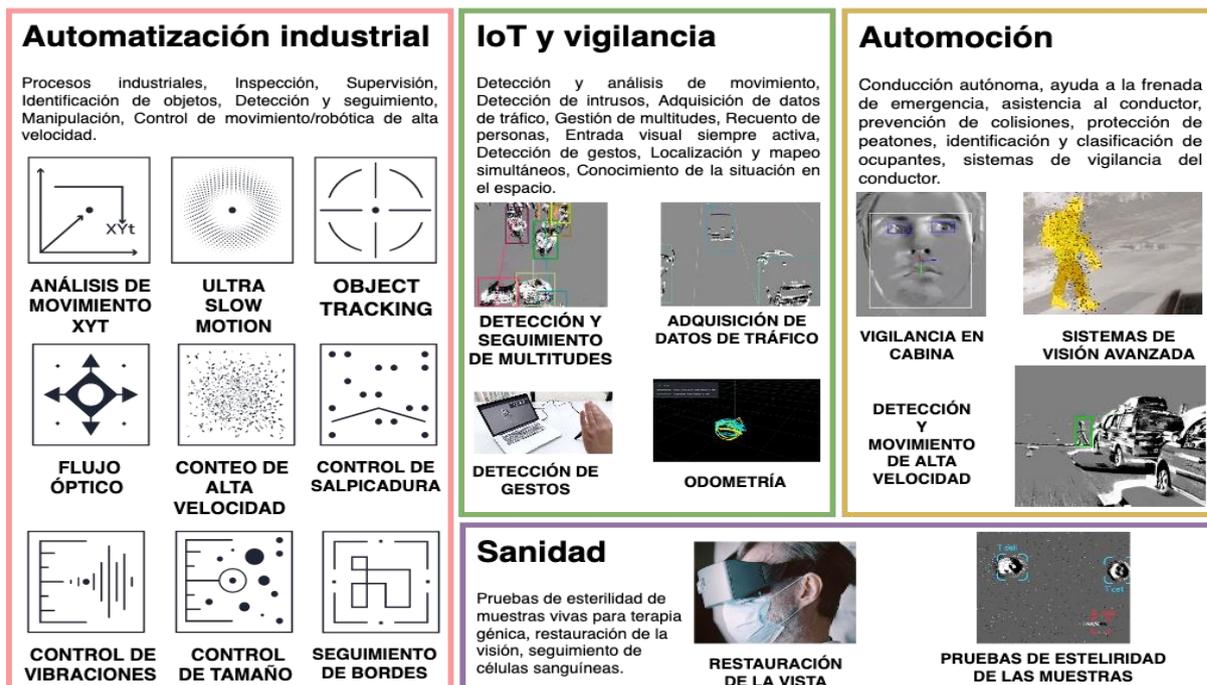


Figura 41. Distintas aplicaciones de la tecnología neuromórfica [203].

4.5.1. Seguimiento

Podría decirse que, debido a la naturaleza de estos sensores, el seguimiento es la aplicación más sencilla de implementar en cámaras DVS. El seguimiento con algoritmos de visión artificial es una tarea computacionalmente cara. Sin embargo, como las cámaras DVS sólo transmiten cambios en las imágenes, son idóneas para el seguimiento de objetos en movimiento. Por esta razón, entre todas las aplicaciones, el mayor número de investigaciones se realiza para el seguimiento. En esta sección del documento se exponen varias aplicaciones relacionadas con el seguimiento.

- **Seguimiento de objetos.** En [204, 205] se presenta un sistema neuromórfico jerárquico para el seguimiento de objetos, en el que dos capas de procesamiento trabajan en cascada para detectar primero los objetos en movimiento y luego rastrearlos con trayectorias cruzadas.
- **Seguimiento de satélites y conocimiento de la situación espacial.** Se aprovecha el amplio rango dinámico de una cámara basada en eventos para rastrear satélites utilizando un telescopio terrestre a plena luz del día [206].
- **Seguimiento en estéreo.** La mayoría de los algoritmos de seguimiento utilizan una cámara DVS que proporciona una representación 2D del entorno. Algunos trabajos han tratado de

emplear dos cámaras para poder construir un mapa 3D, lo que se traduce en un mejor sistema de seguimiento. Por ejemplo, en [207] el objetivo fue el seguimiento de personas en 3D.

- **Seguimiento de coches.** En [208] se ha diseñado un sistema de visión embebido para el seguimiento de coches que ofrece una resolución de tiempo en ms.
- **Robótica.** En muchas aplicaciones robóticas, la agilidad de los robots está limitada por su canal de detección. En [209] se utiliza una cámara DVS para el seguimiento de la postura del robot con el fin de aumentar su agilidad, demostrando que el rendimiento del seguimiento no se ve afectado por el movimiento.

4.5.2. Clasificación

Una de las principales aplicaciones de las cámaras basadas en eventos es la clasificación. Entre los primeros estudios que utilizaron una cámara basada en eventos para la clasificación se encuentra el de Schraml [210], en el que se propone un algoritmo para la clasificación de peatones que hace uso de métricas de densidad y distancia para agrupar eventos asíncronos generados por el movimiento de la escena.

4.5.3. Reconocimiento

El reconocimiento de objetos es uno de los principales campos de la visión artificial y, como nueva tecnología, las cámaras basadas en eventos se han abierto camino en este campo. Las redes de sensores de cámaras son un tipo red de cámaras en un entorno que capturan y procesan colectivamente la información visual. Debido al número de cámaras, estos sistemas requieren una gran potencia de cálculo. En [211], se diseña un algoritmo de reconocimiento de patrones para una red de cámaras basada en eventos con el fin de identificar signos de la mano. Por otro lado, en [212], se propone otro algoritmo de reconocimiento de gestos de la mano que reconoce tres gestos en el juego de piedra, papel y tijera. Asimismo, en [213], se utiliza una cámara y un procesador basado en eventos con un millón de neuronas con picos para el reconocimiento de gestos humanos.

4.5.4. Detección

Los informes publicados sobre el uso de cámaras basadas en eventos para la detección siguen siendo comparativamente escasos. En [214] se propone un algoritmo de detección de rostros en el que se desarrolla un modelo basado en patrones para los eventos. El sistema diseñado es capaz de reconstruir 2000 fotogramas por segundo. En cambio, en [215], se proponen dos arquitecturas de

redes neuronales para la detección de objetos, donde una red integra los eventos en la superficie y la otra utiliza capas convolucionales para explotar la escasez de eventos de la cámara. Asimismo, en [216], se diseña una implementación en FPGA del modelo de células ganglionares de la retina que detecta objetos en movimiento. Los autores utilizan este procesamiento en conjunto con un DVS para extrapolar información sobre la posición del objeto.

4.5.5. Localización y odometría

La localización rápida es crucial en muchas aplicaciones como la conducción y las maniobras, que las cámaras tradicionales rara vez pueden proporcionar. Debido a su velocidad de muestreo, las cámaras basadas en eventos son muy adecuadas para la localización y la odometría. Entre los primeros esfuerzos para utilizar cámaras basadas en eventos para la localización se encuentra Weikersdorfer y Conradt [217], que emplea un filtro de seguimiento de partículas de condensación y demuestra un rendimiento robusto con un bajo coste computacional. Otro trabajo [218], propone un método de localización y mapeo que ofrece un rendimiento en tiempo real utilizando HW convencional.

Las cámaras basadas en eventos tienen un gran potencial para la odometría, ya que pueden rastrear el movimiento de forma rápida y con precisión, sin desenfoque ni cuantificación. Sin embargo, se necesitan nuevos algoritmos para explotar la característica del sensor. La primera investigación que utiliza cámaras basadas en eventos en la odometría es la de Kueng [219] y Mueggler [220], en la que las características se detectan en los fotogramas en escala de grises y luego se rastrean utilizando el flujo de eventos. A continuación, estas características se introducen en un algoritmo de odometría.

4.5.6. Sistemas de transporte

Los algoritmos de visión artificial se utilizan ampliamente en los sistemas de transporte. La necesidad de un procesamiento de baja latencia favorece a los algoritmos basados en eventos. En [221] se describe un sistema de visión para contar vehículos simultáneamente en hasta cuatro carriles de una autopista. Los autores informan de un recuento de vehículos rápido, de bajo consumo y robusto. En otro estudio [222], se describe un sistema de clasificación de vehículos en tiempo real en coches y camiones, que alcanza una precisión superior al 90%.

4.5.7. Salud

En los últimos años, la CV ha encontrado muchas aplicaciones en el ámbito de la asistencia sanitaria. Entre los primeros esfuerzos se encuentra el trabajo publicado por Fu [223] en el que se diseña un sistema de visión para detectar caídas fortuitas en aplicaciones de atención domiciliaria a personas mayores. En comparación con los métodos basados en fotogramas, el sistema informa de una caída con una resolución temporal diez veces mayor y muestra un 84% más de eficiencia en el BW al transmitir los eventos de caída. Igualmente, en [224] se diseña un dispositivo de movilidad portátil para ayudar a los ciegos a desplazarse y evitar objetos. Además, utilizando una cámara DVS, se puede diseñar un sistema que puede utilizarse como prótesis de retina o aumento de la visión [225].

4.5.8. Industria

Muchas aplicaciones industriales requieren una frecuencia de muestreo muy alta. Por ejemplo, la monitorización de una turbina con miles de revoluciones por minuto supone un gran reto para los sistemas de visión basados en fotogramas. En [226] se diseña un sistema de vídeo de vigilancia basado en DVS para entornos industriales de gran velocidad, que monitoriza una máquina con una pieza giratoria a 6.000 rpm (revoluciones por minuto), con buenos resultados.

4.6. Potencial de la tecnología

Las cámaras basadas en eventos ofrecen numerosas ventajas potenciales resumidas en esta sección [227].

- **Alta resolución temporal.** La monitorización de los cambios de intensidad es muy rápida en circuitos analógicos, y la lectura de los eventos es digital con un reloj de 1 MHz. De esta forma, los eventos se detectan y se marcan con una resolución de μs . Por lo tanto, las cámaras de eventos pueden capturar movimientos muy rápidos, sin sufrir el desenfoque de movimiento típico de las cámaras basadas en fotogramas.
- **Baja latencia.** Cada píxel funciona de forma independiente y no es necesario esperar un t_E global del fotograma. En cuanto se detecta el cambio, se transmite. De ahí que las cámaras de eventos tengan una latencia mínima de unos 10 μs en laboratorio, y menos de un μs en el ámbito real.

- **Bajo consumo.** Dado que las cámaras de eventos sólo transmiten los cambios de luminosidad y, por tanto, eliminan los datos redundantes, la energía sólo se utiliza para procesar los píxeles que cambian. La mayoría de las cámaras utilizan alrededor de 10 mW y hay prototipos que consumen incluso menos. Los sistemas de cámaras de eventos integrados en los que el sensor está directamente conectado a un procesador han mostrado un consumo de energía a nivel de sistema (es decir, detección más procesamiento) de 100 mW o menos.
- **Alto rango dinámico.** El altísimo rango dinámico de las cámaras de eventos (>120 dB) supera notablemente los 60 dB de las cámaras de alta calidad basadas en fotogramas, lo que las hace capaces de adquirir información con la luz de la luna hasta la luz del día. Esto se debe a que los fotorreceptores de los píxeles funcionan en escala logarítmica y cada píxel trabaja de forma independiente, sin esperar a un GS. Al igual que las retinas de los seres humanos, los píxeles del DVS pueden adaptarse tanto a estímulos muy oscuros como muy luminosos.

4.7. Limitaciones y desafíos

Las cámaras basadas en eventos representan un cambio de paradigma en la adquisición de información visual. Por ello, plantean el reto de diseñar métodos novedosos (algoritmos y HW) para procesar los datos adquiridos y extraer información de ellos con el fin de desbloquear las ventajas de la cámara [227].

- **Diferente salida espaciotemporal.** La salida de este tipo de cámaras es totalmente diferente a la de las cámaras estándar. Los eventos son asíncronos y espacialmente dispersos, mientras que las imágenes son síncronas y densas. Por ello, los algoritmos de visión basados en fotogramas y diseñados para secuencias de imágenes no son directamente aplicables a los datos de eventos.
- **Diferentes sensores fotométricos.** A diferencia de la información en escala de grises que proporcionan las cámaras estándar, cada evento contiene información binaria del cambio de brillo. Los cambios de luminosidad no sólo dependen del brillo de la escena, sino también del movimiento relativo actual y pasado entre la escena y la cámara.
- **Ruido y efectos dinámicos.** Todos los sensores de visión son ruidosos debido al ruido de disparo inherente a los fotones y al ruido de los circuitos de los transistores. Esta situación

es especialmente grave en el caso de las cámaras de eventos, donde el proceso de cuantificación del contraste temporal es complejo y no se ha caracterizado completamente.

Por lo tanto, los nuevos métodos deben replantear la naturaleza espaciotemporal, fotométrica y estocástica de los datos de los eventos. Esto plantea las siguientes preguntas: ¿Cuál es la mejor manera de extraer información de los eventos relevantes para una tarea determinada? y ¿Cómo se pueden modelar el ruido y los efectos no ideales para extraer mejor la información significativa de los eventos?

CAPÍTULO 5: Diseño del sistema

5.1. Justificación y objetivos del modelo

El ojo humano comparte pocos aspectos con una cámara de vídeo convencional. Desde su creación hace 150 años, todas las herramientas de vídeo convencionales han representado el movimiento capturando un número fijo de fotogramas cada segundo. Visualizadas rápidamente, estas imágenes crean una ilusión de movimiento continuo. Desde el *flip book* hasta la cámara de cine, la ilusión se hizo cada vez más convincente, pero su estructura básica nunca cambió.

Sin embargo, para un ordenador esta representación del movimiento resulta poco útil, ya que la cámara está ciega entre cada fotograma, perdiendo información sobre los objetos en movimiento. Incluso cuando la cámara está grabando, cada una de sus imágenes “instantáneas” no contiene la información sobre el movimiento de los elementos de la escena. Peor aún, dentro de cada imagen se registran repetidamente los mismos objetos de fondo irrelevantes, lo que genera un exceso de datos pocos útiles. De esta manera, nace la visión neuromórfica basada en eventos, que es un nuevo sector tecnológico que se encuentra en una rápida expansión. Esta tecnología promete ventajas en diferentes aspectos como el rendimiento del sensor, la baja latencia, la resolución temporal y el amplio rango dinámico.



Figura 42. Sobremuestreo vs submuestreo [228].

Utilizar un esquema de lectura de eventos asíncrono significa que los eventos se comunican desde la matriz de píxeles hasta un receptor anfitrión a través de un protocolo de comunicación *handshake* sin reloj. Cuando se detectan varios eventos nuevos mientras se está comunicando un evento anterior se consideran simultáneos y se comunican en un orden determinado por un sistema de arbitraje. Estos eventos simultáneos se suelen marcar con un *timestamp* durante la lectura, por lo que es posible que no compartan el mismo. Las principales ventajas de un esquema de lectura de eventos asíncrono son su bajo consumo de energía y su baja latencia de lectura, ambas sólo si la tasa de detección de eventos es inferior a la velocidad máxima de lectura.

La Figura 42 muestra un vídeo de un golfista haciendo un *swing*. Un sensor convencional aplica una frecuencia de imagen arbitraria a toda la escena, por ejemplo, de 30 fps. La información importante es el *swing* del palo y el movimiento de la bola, pero, irónicamente, el sensor se pierde parte de esta información mientras realiza repetidamente un amplio inventario del cielo, los árboles y la hierba que hay detrás de él. De esta forma, los sistemas de visión basados en eventos perciben la vitalidad de la escena y pasan por alto lo irrelevante. Producen hasta 1000 veces menos datos que un sensor convencional, al tiempo que consiguen una resolución temporal superior a 10 kfps. Asimismo, al eludir las limitaciones inherentes a la CV convencional, la visión basada en eventos está irrumpiendo en la tecnología actual en campos como los vehículos autónomos, la IA y el DL, la automatización industrial, el IoT, la seguridad, la vigilancia y la atención sanitaria, entre otros.

El presente TFM abre una nueva línea de investigación con gran potencial en aspectos de transferencia tecnológica. Como se comentó, las cámaras DVS aún no han sido estudiadas adecuadamente como receptores OWC, y las posibilidades de contribuir a este nuevo tema son prácticamente infinitas. El objetivo es proporcionar los fundamentos teóricos y evaluar la viabilidad y las posibles aplicaciones de comunicaciones de las cámaras DVS, más concretamente, para las comunicaciones OCC. No obstante, el desarrollo de esta tecnología puede tener un impacto significativo en varias aplicaciones comentadas a continuación.

- **Investigación marina.** Las cámaras DVS pueden proporcionar capacidades de vigilancia de largo alcance en instalaciones de acuicultura en alta mar o de monitorización centralizada de recipientes de producción de biomasa a nivel industrial utilizando los sistemas de iluminación.
- **Cambio climático.** Las cámaras basadas en eventos pueden servir como tecnología de apoyo para las soluciones de vigilancia medioambiental.

- **Sistemas de transporte inteligente.** Los vehículos autónomos pueden integrar cámaras DVS, y su uso puede proporcionar una mayor seguridad y comunicación V2X.
- **Economía digital.** Se ha demostrado que OCC es una tecnología eficiente que puede proporcionar tanto comunicaciones como localización. Los dispositivos DVS pueden mejorar el rendimiento de la tasa de datos de la OCC manteniendo la capacidad de posicionamiento. Este aumento del rendimiento puede aprovecharse para la futura 6G, por ejemplo, para proporcionar apoyo al cambio utilizando dispositivos dotados de luz.

Se pretende investigar el uso de cámaras DVS como receptores OWC, donde atendiendo a las características ya mencionadas de estos, el sistema diseñado deberá de cubrir los siguientes aspectos técnicos (AT).

- **AT1.** Diseñar e implementar mecanismos eficientes de procesamiento de flujos DVS para poder aplicar la máxima velocidad de datos alcanzables de este tipo de cámaras.
- **AT2.** Caracterizar el límite experimental de las cámaras DVS para enlaces interiores mientras reciben información a la máxima velocidad posible y evaluar las métricas resultantes.
- **AT3.** Integrar este tipo de cámaras en un sistema OWC funcional basado en enlaces de interiores.

5.2. Limitaciones y soluciones del modelo

La tecnología investigada se basa en los mismos principios que OCC en términos de propagación. Sin embargo, existen diferencias significativas en el funcionamiento de las cámaras basadas en eventos tras la conversión optoelectrónica. Otra de sus diferencias es que este tipo de cámaras carecen de una caracterización de las comunicaciones. Por ello, el principal objetivo de este proyecto es el de generar un modelo adecuado para diseñar enlaces en diferentes escenarios.

Debido a la falta de estandarización de esta tecnología, a la hora de diseñar un sistema OCC que implemente una comunicación basada en DVS, se deberán de tener en cuenta los siguientes objetivos (OBJ) para realizar una comunicación rápida y fiable.

- **OBJ1.** La comunicación basada en DVS supera a OCC en términos de BW máximo alcanzable, manteniendo las capacidades inherentes de la multiplexación por división espacial.
- **OBJ2.** Los esquemas DVS basados en MIMO que utilizan pequeñas fuentes de luz mejoran el rendimiento en términos de BW máximo alcanzable. El tamaño del emisor puede tener un efecto perjudicial en la velocidad de datos alcanzable.
- **OBJ3.** Las cámaras DVS pueden proporcionar una comunicación de alta velocidad de datos en interiores.
- **OBJ4.** La principal desventaja de un esquema de lectura de eventos asíncrono es su limitada velocidad máxima de lectura. Las cámaras basadas en eventos generan un flujo de datos que incluye la posición del evento, una marca de tiempo y la dirección del evento. En la actualidad, no se dispone de ningún emisor de eventos adecuado para las comunicaciones, por lo que se investigan diferentes enfoques en este proyecto.

Finalmente, para superar estas limitaciones se propone un nuevo paradigma de diseño para una comunicación OCC basada en cámaras de eventos, motivados por la carencia de estandarización y canal de comunicación.

5.3. Descripción del algoritmo propuesto

El objetivo de este proyecto, tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, es el de diseñar una comunicación entre una cámara basada en eventos y un LED. La idea clave de la propuesta es explotar las características de este tipo de cámaras basadas en la visión humana para crear un canal de comunicaciones de alta velocidad.

La Figura 43 muestra el diseño del sistema seguido. La salida de una cámara de eventos es una secuencia de sucesos digitales de velocidad de datos variables, en la que cada evento representa un cambio de intensidad determinado por los estímulos presentes en la escena. Cada píxel memoriza la intensidad del registro cada vez que envía un evento, y vigila continuamente si se produce un cambio de suficiente magnitud respecto a este valor memorizado. Cuando el cambio supera un umbral, la cámara envía un evento que se transmite con la ubicación (x, y) , el tiempo y la polaridad de 1 bit (es decir, aumento de intensidad *ON* o disminución *OFF*). Los eventos se transmiten desde la matriz de píxeles y luego fuera de la cámara utilizando un bus de salida digital compartido mediante el uso de AER.

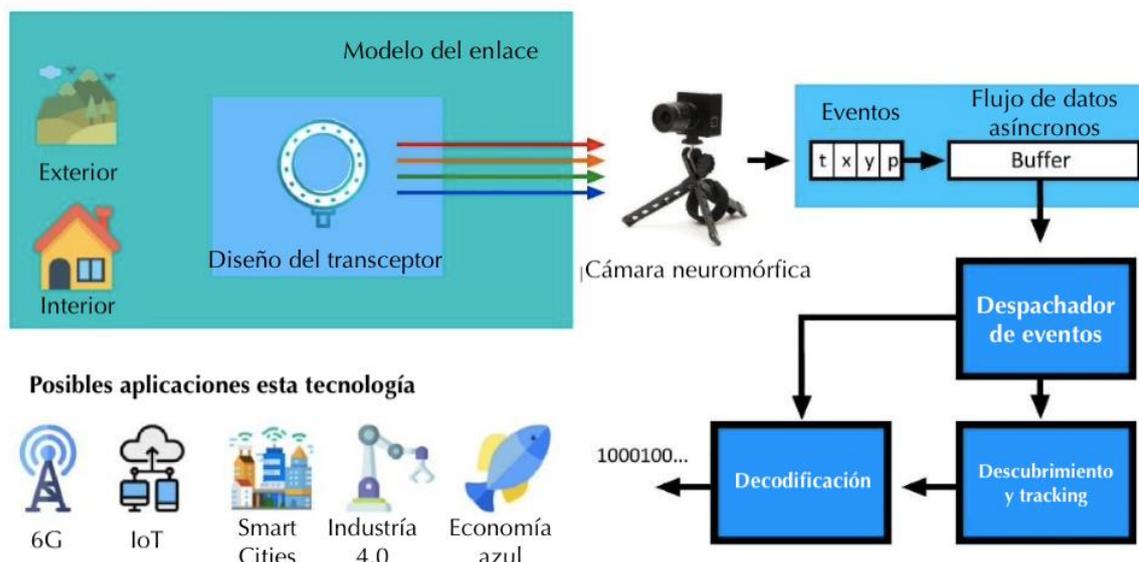


Figura 43. Diseño esquemático del sistema.

Las cámaras de eventos son sensores impulsados por datos: su salida depende de la cantidad de movimiento o cambio de brillo en la escena. Cuanto más rápido es el movimiento, más eventos por segundo se generan, ya que cada píxel adapta su tasa de muestreo del modulador a la tasa de cambio de la señal de intensidad del registro que monitoriza. Los eventos se registran con una resolución de μs y se transmiten con una latencia inferior a un ms, lo que hace que estos sensores reaccionen rápidamente a los estímulos visuales. Mientras, el despachador de eventos crea una lista de tiempos y polaridades para cada xy para detectar donde se produce la transmisión.

5.4. Arquitectura del sistema

El sistema transmisor consta de un diodo LED verde conmutado que se encuentra conectado a un generador de funciones (GF) Agilent 33220A [229] y es alimentado por una fuente de alimentación (FA) Agilent E3620A [230]. En el extremo de la transmisión, un ordenador portátil da instrucciones al GF para que genere una señal cuadrada con una amplitud de 0 a 5 voltios (V) con una frecuencia que irá variando por cada medida. La conexión entre el ordenador y el GF se realiza mediante un socket utilizando la familia de conexiones SCPI (del inglés *Standard Commands for Programmable Instruments*) para la programación de la interfaz remota. Es un lenguaje de comandos basado en ASCII que utiliza una estructura jerárquica, también conocida como sistema de árbol. Asimismo, mediante esta conexión y la generación de una subred entre ordenador y GF es posible la comunicación entre ambos dispositivos. Seguidamente, el circuito LED se encuentra conectado a un transistor tipo MOSFET (IRF840A [231]), el cuál actúa como un interruptor por tensión. El LED se encontrará conectado tanto al GF para variar su frecuencia de conmutación y a la FA para

suministrarle energía. A modo de resumen, la Figura 44 muestra el flujo de trabajo seguido en cuestión.

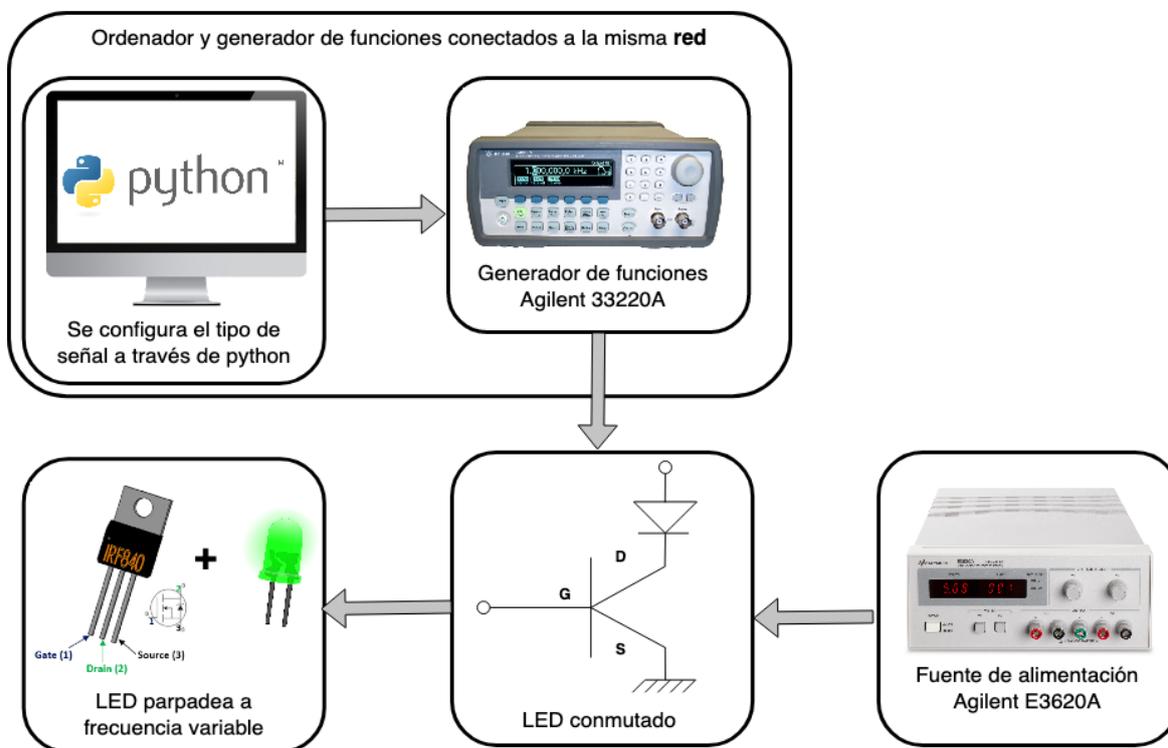


Figura 44. Diseño del transmisor.

A diferencia del transmisor, el sistema receptor utiliza una cámara DVS modelo DVXplorer DXA00100 [232] de la empresa Inivation. Es un sensor DVS de producción en serie con tecnología BSI de 90 nm con una salida de eventos con resolución VGA y rango dinámico de hasta 110 dB, latencia inferior a 1 ms, resolución temporal de 200 μ s y rendimiento de hasta 165 millones de eventos por segundo. Asimismo, el DVXplorer tiene conectores en la parte trasera. Un conector USB 3.0 para datos y alimentación, y dos puertos de sincronización para sincronizar la cámara con otras cámaras o dispositivos de disparo externos. En la

Figura 45 se muestra la cámara que se va a utilizar en el CAPÍTULO 6: Validación experimental.



Figura 45. Cámara DVXplorer [232].

Asimismo, la Tabla 7 muestra las principales características del modelo DVXplorer.

Tabla 7. Características de la cámara DVXplorer [232].

Salida de eventos	
Resolución espacial	640x480
Resolución temporal	200 μ s (precisión efectiva, evento único)
Latencia típica	< 1ms
Rendimiento máximo	165 MEPS (del inglés <i>Minimum Energy Performance Standard</i>)
Rango dinámico	Aproximadamente 90 dB (3-100k lux con el 99,9% de los píxeles responden al 27,5% de contraste Aproximadamente 110 dB (0,3-100k lux con el 50% de los píxeles responden al 80% de contraste)
Sensibilidad de contraste	13% (con un 50% de píxeles que responden), 27,5% (con un 99,9% de píxeles que responden)
Salida de frames	
	La cámara no emite <i>frames</i> de intensidad. Sin embargo, se pueden reconstruir imágenes de intensidad similares a partir de la salida de eventos mediante el SW DV.
IMU (del inglés <i>Inertial Measurement Unit</i>)	
	6 ejes (giroscopio + acelerómetro), velocidad de muestreo de hasta 8 kHz
Sincronización multicámara	
	Admite la sincronización temporal de varias cámaras mediante la conexión en cadena y la inyección de eventos externos
Otros atributos	
Dimensiones	H 40 x W 60 x D 25
Peso	100 g sin lentes
Montura del objetivo	Montaje CS
Conectores	Puerto USB 3.0 micro B con tornillos de bloqueo, conectores de entrada y salida de sincronización totalmente aislados

Consumo de energía	<150 mA @ 5 VDC (USB)
Tecnología del sensor	90 nm BSI (del inglés, <i>BackSide Illumination</i>) CMOS
Distancia entre pixel (μm)	9 μm
Tensión de alimentación del sensor	1,2 V, 1,8 V y 2,8 V
Certificaciones	Certificación CE

Donde:

MEPS hace referencia a una especificación que contiene una serie de requisitos de rendimiento para un dispositivo que utiliza energía y que limita efectivamente la cantidad máxima de energía que puede consumir un producto al realizar una tarea determinada.

IMU o unidades de medición inercial, pueden medir diversos factores, como la velocidad, la dirección, la aceleración, la fuerza específica, la velocidad angular, etc.

BSI se trata de una revisión de los diseños de sensores tradicionales que aumenta la eficiencia de captación de luz del sensor para ofrecer una mayor sensibilidad, menos ruido y una mejor calidad de imagen en general.

De igual forma que en el sistema transmisor, la Figura 46 muestra el diseño del sistema receptor.

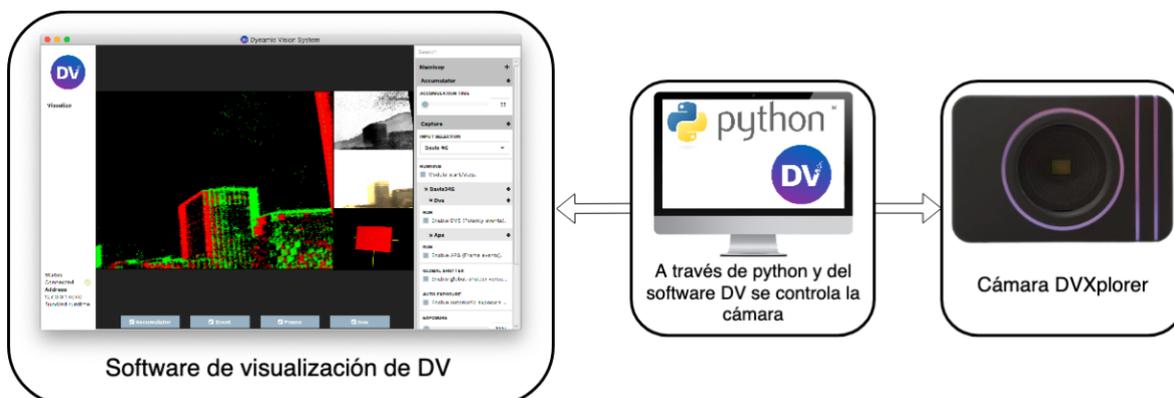


Figura 46. Sistema receptor.

En este caso, la cámara se conecta al ordenador mediante USB y se controla con el SW de visualización de DV y por ficheros de Python para la extracción de los eventos. DV [233] es un kit de desarrollo de SW de visión neuromórfica avanzado y fácil de usar, utilizado por miles de desarrolladores en cientos de instituciones de todo el mundo, que consta de 3 capas (véase la Figura 47).

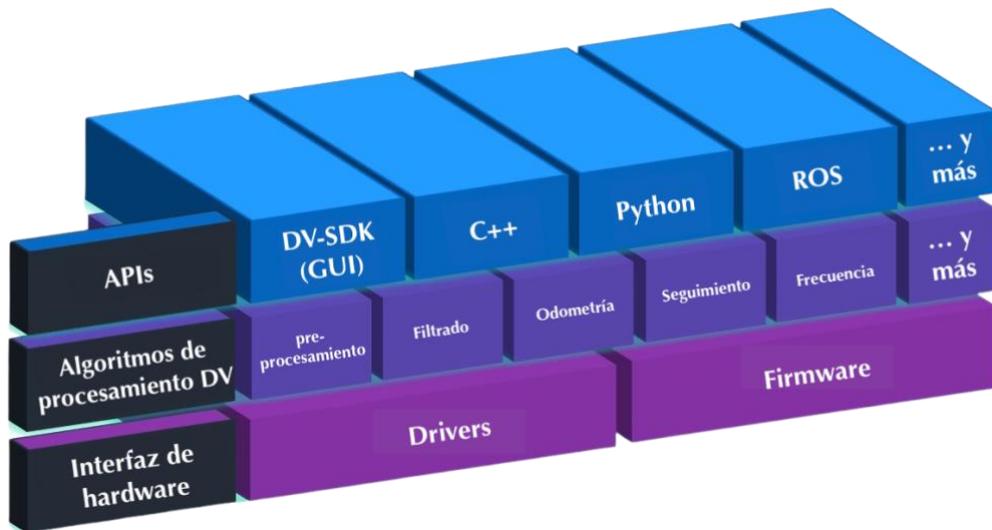


Figura 47. Capas del kit de desarrollo de DV software [233].

Finalmente, la arquitectura del sistema queda definida en la Figura 48, donde la conexión entre cámara y ordenador se realiza mediante USB y entre ordenador y GF vía Ethernet.

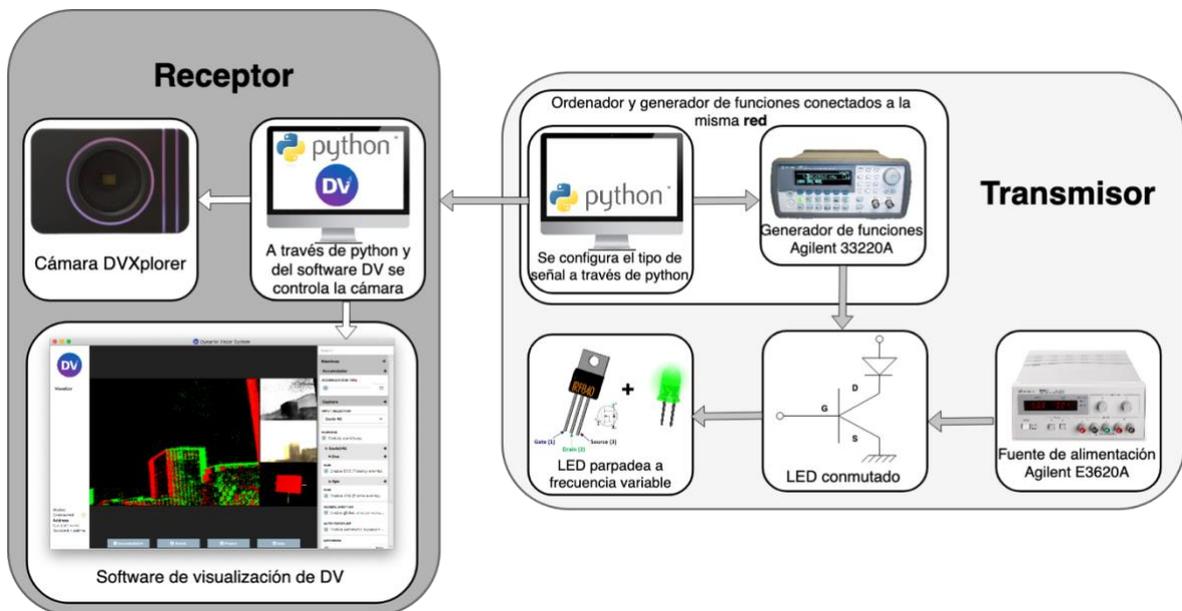


Figura 48. Arquitectura del sistema.

5.5. Implementación

La implementación de los algoritmos utilizados queda reflejada en el ANEXO. En dicha sección se pueden encontrar las funciones principales del transmisor y receptor usados en el sistema.

En primer lugar, como se observa en la Figura 49, mediante el archivo “*def_instrumentation.py*” se crea un *socket* para establecer una petición desde el ordenador hasta el GF. Seguidamente, el *socket* se conecta a la IP del GF porque comparte una subred privada con el ordenador, y una vez establecida la conexión se realiza la petición de una señal cuadrada de 0 a 5 V de amplitud y a una frecuencia dada.

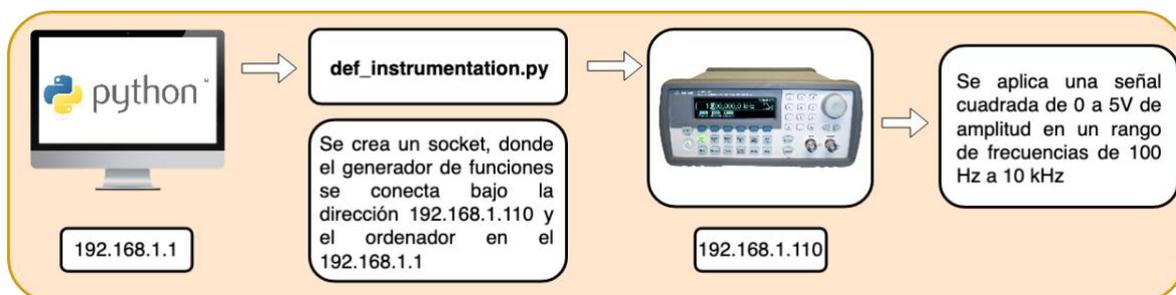


Figura 49. Primera parte del diseño (*def_instrumentation.py*).

En segundo lugar, el archivo “*def_measureFreq.py*” es el encargado de conectar la cámara DVXplorer con el SW de visualización de DV. La conexión se realiza mediante una conexión IP y un puerto de acceso dados por el programa. Tal y como se muestra en la Figura 50, es necesario realizar una configuración previa en el SW de DV, donde se añade módulo tipo servidor TCP y se conecta la salida de eventos de la cámara con la entrada de dicho módulo.

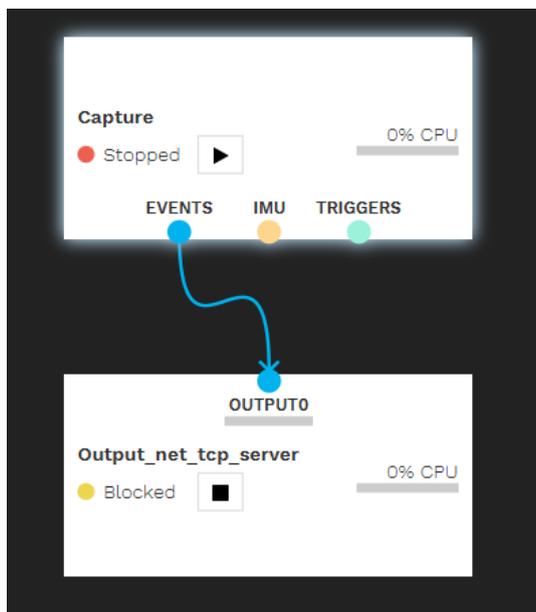


Figura 50. Configuración del software DV.

Igualmente, en este archivo se crean los *arrays* de datos que van a ser medidos, como las posiciones *xy*, la marca de tiempo y la polaridad, a través de los eventos capturados por la cámara. De esta manera, la comunicación se realiza entre dos procesos utilizando una *pipe* (tubería), enviando los datos necesarios para la realización de las medidas, como la carpeta, el nombre del archivo y la duración de la medida. Finalmente, el evento es capturado y se genera un archivo tipo *csv* con los valores correspondientes. El flujo de trabajo es el seguido en la Figura 51.

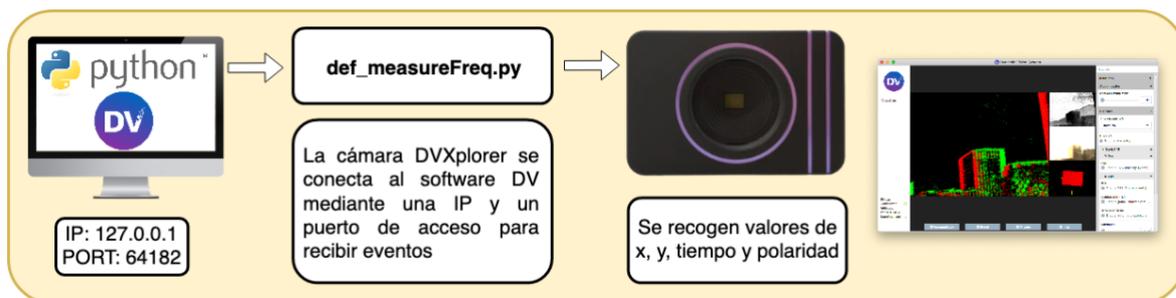


Figura 51. Segunda parte del diseño (*def_measureFreq.py*).

En tercer lugar, en el archivo “*extract_data.py*” convergen los archivos anteriores, actuando este como un *main*. Se establecen los valores de frecuencia de 100 Hz a 10 kHz y los valores de distancia de 0.25 a 3 m para la realización de las medidas. Asimismo, debido a que se usa una *pipe*, se crea un proceso padre y un proceso hijo que hace referencia a ambos extremos de la tubería, donde el padre envía los datos que va a recibir el proceso hijo. Posteriormente, se llama a la función “*def_instrumentation*” y “*measureFreq*” para establecer la frecuencia de medida y se establece el tiempo de medición a 10 segundos por frecuencia. El flujo de trabajo queda definido en la Figura 52.

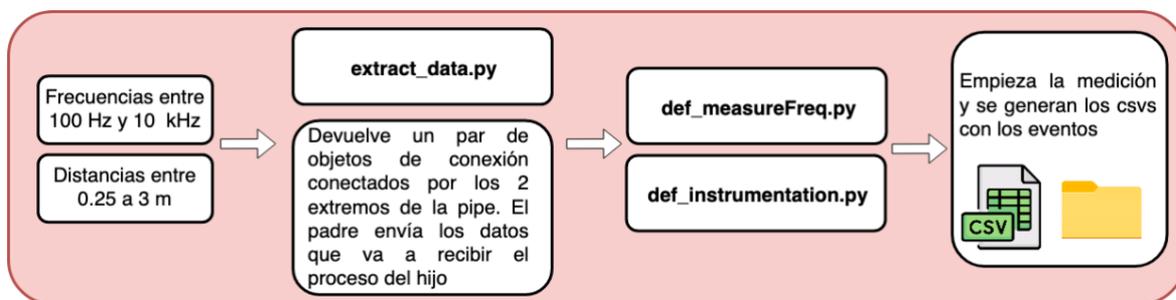


Figura 52. Tercera parte del diseño (*extract_data.py*).

Finalmente, la Figura 53 recoge a modo de resumen el flujo de trabajo del diseño.

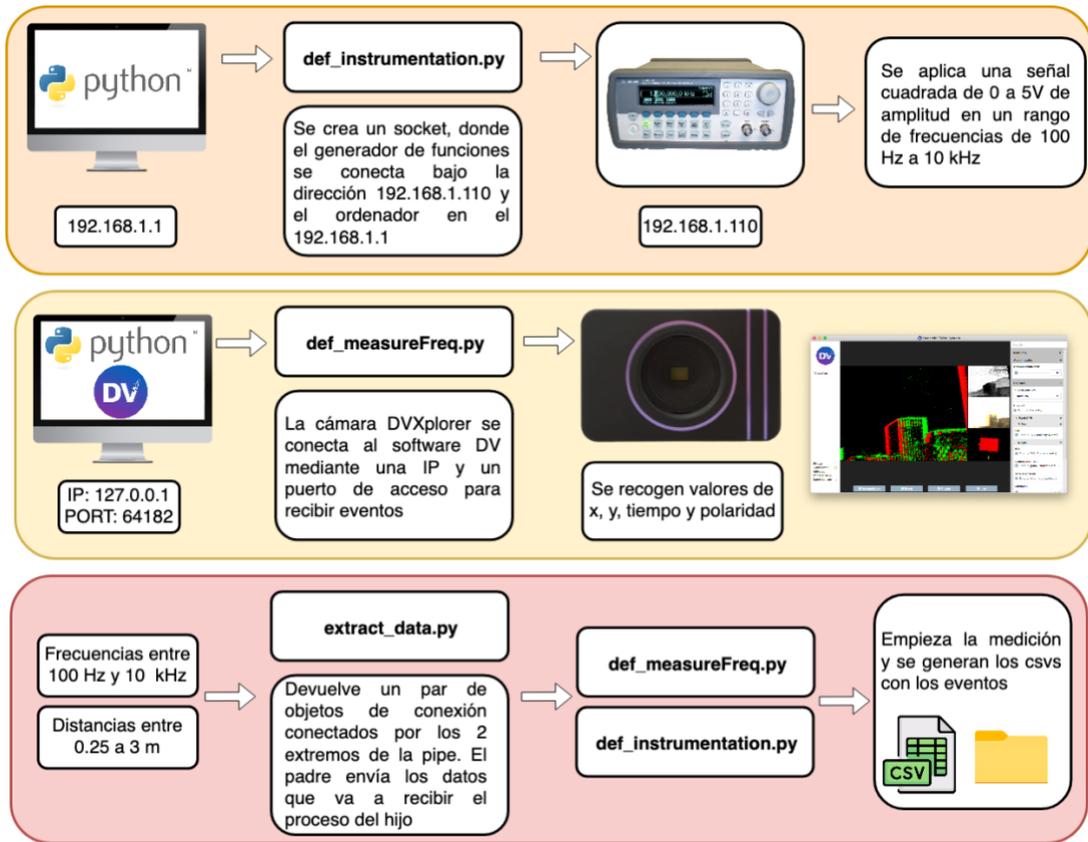


Figura 53. Flujo de trabajo completo.

CAPÍTULO 6: Resultados experimentales

6.1. Objetivos de la validación

El objetivo de estos experimentos es el de la evaluación del número de eventos por segundo para cada distancia y frecuencia, al mismo tiempo que se obtiene la forma de onda detectada.

6.2. Configuración experimental

En esta sección se explica el entorno de pruebas usado para la demostración de la funcionalidad de los algoritmos propuestos en el capítulo anterior. Dentro de los trabajos llevados a cabo, se incluye un escenario de experimentación del funcionamiento del sistema, que se realiza sobre la configuración que se muestra en la Figura 54, donde en un inicio la cámara se encuentra situada a 0.25 m del LED, alcanzando con el aumento de las medidas una distancia de 3 m.

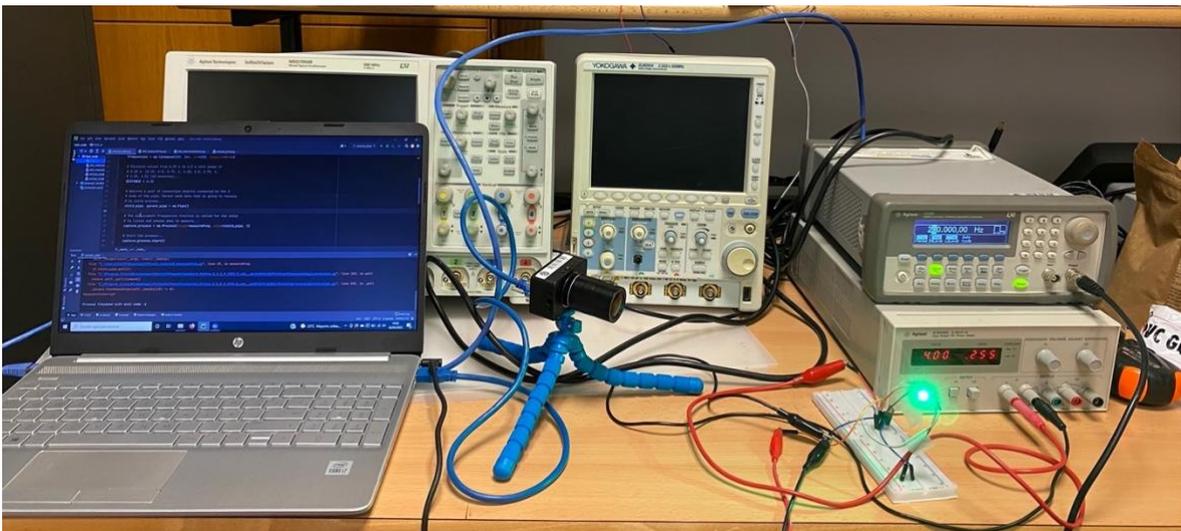


Figura 54. Ejemplo de la configuración experimental.

En este experimento se realizaron 7 medidas. Durante cada medida se obtuvieron los eventos para 4 frecuencias comprendidas entre los 100 Hz y los 10 kHz. Como resultado de ello se obtuvieron 28 archivos para su posterior análisis, en los que cada medida tuvo una duración de 10 segundos. Asimismo, todas las medidas se realizaron bajo las mismas condiciones de iluminación en una cámara oscura, como se muestra en la Figura 55 y con sus respectivas formas de onda por cada frecuencia, como se observa en la Figura 56 (señal aplicada al LED).

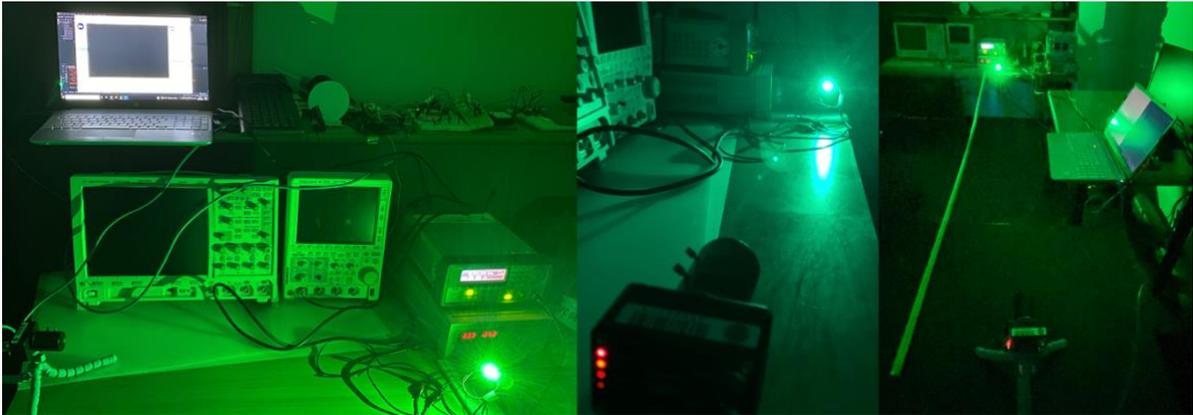


Figura 55. Medidas en cámara oscura.

De la figura anterior se puede observar el uso de una FA para dar corriente al LED de la *protoboard*, un GF usado para aplicar el tipo de señal y el cambio de frecuencia del experimento, un portátil encargado de la conexión entre los dispositivos y de guardar las medidas resultantes y, por último, una cámara basada en eventos (resolución de 640x480) montada en un trípode para asegurar la menor cantidad de error en la medición de la distancia entre el cámara y LED.

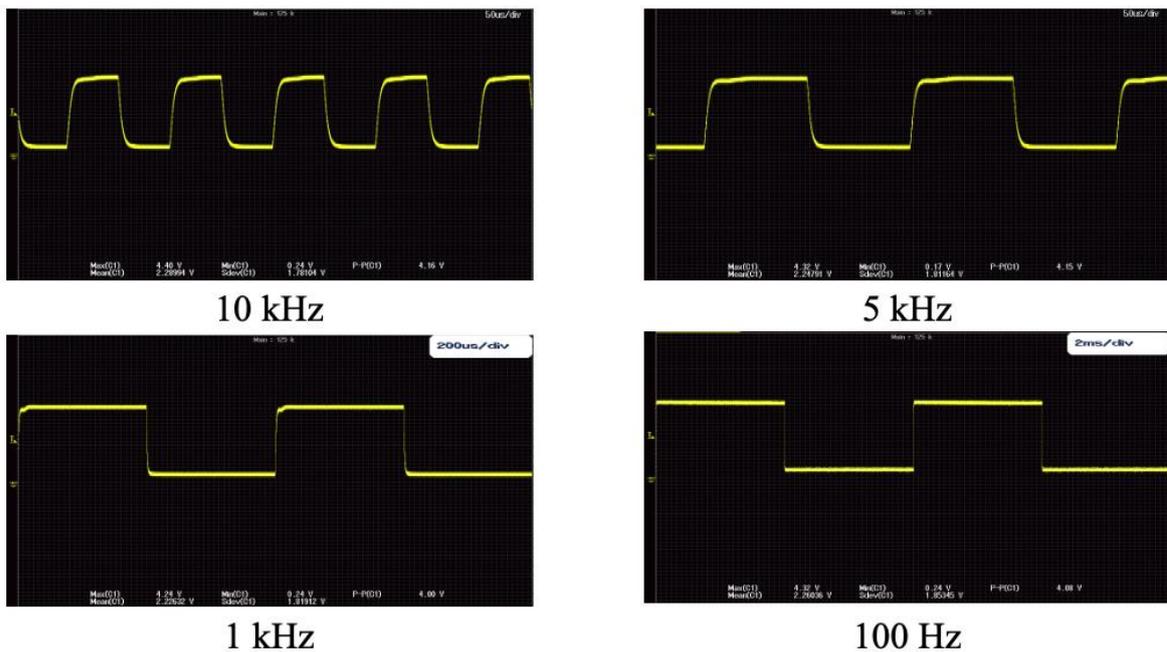


Figura 56. Señales cuadradas 5 Vpp a diferentes frecuencias.

Las medidas fueron capturadas en un formato *csv* con la información de la posición *xy*, el tiempo y la polaridad del evento. Además, debido al tipo de experimento es necesario realizar una calibración previa de la cámara, ya que la información de interés se obtiene de las diferencias entre los niveles de intensidad del LED al conmutar a una frecuencia determinada (flancos de subida y de

bajada). Simplemente es necesario enfocar la lente para captar de mejor forma el LED como calibración previa de la cámara.

6.3. Descripción de los experimentos

El motivo principal de los experimentos fue detectar el píxel de mayor energía para comprobar donde resulta la transmisión más efectiva y el efecto que tiene sobre la cámara que el emisor se proyecte en un área de mayor o menor tamaño. Para ello, es necesario el cálculo del número de eventos por segundo en función de la distancia y de la frecuencia (valores obtenidos en eventos por segundos), y el valor medio del píxel para modelar la forma de onda resultante. Por ello, el análisis de los datos se divide en dos partes diferenciadas.

6.3.1. Número de eventos por segundo

Tal y como se ha comentado, para comprobar el efecto del emisor sobre la cámara es necesario calcular el número de eventos por segundo para cada distancia y frecuencia. Todo el procedimiento se lleva a cabo mediante el script de Python “*events_per_second.py*”, donde se calculan el $time[-2]$ y el $len(time)/(time[-2] - time[0])$, que hacen referencia a tiempo de la medida y al número de eventos.

6.3.2. Forma de onda detectada

Haciendo uso de la función de Python “*high_power_pixel.py*” se obtiene el píxel de mayor energía, donde este valor hace referencia donde se produce la transmisión del LED. Se realiza una media de las posiciones de los píxeles xy , obteniendo un vector de posición que accede a los *arrays* de tiempo y de polaridad para generar la función de onda. Además, al igual que en el apartado anterior, las medidas se realizan tanto para distancia como para frecuencia. Así, de esta manera, al ejecutar el *script* se obtienen los valores en formato *csv* para el conjunto de frecuencias y un conjunto de gráficas, donde el eje X hace referencia a la distancia y el eje Y a eventos por segundo. Gracias a este conjunto de datos se puede demostrar cuando la transmisión resulta efectiva y cuando no.

6.4. Análisis de los datos

Una vez explicado el procedimiento de obtención de los resultados se procede a su posterior análisis. En este apartado se exponen las principales conclusiones de la metodología seguida en el apartado anterior. De igual forma, este apartado estará dividido en dos subapartados.

6.4.1. Análisis del número de eventos por segundo

A lo largo de apartado se exponen las diferentes tablas para cada distancia y frecuencia. En primer lugar, se presentan los datos de los eventos por distancia con sus principales frecuencias.

Tabla 8. Valores de eventos por distancia para 0.25 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662055423432790	2.278157859411
1000	1662055512462790	0.628186467218895
5000	1662055570432790	0.334385874486326
10000	1662055608462790	0.238181371204532

Tabla 9. Valores de eventos por distancia para 0.5 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662058884732800	4.69545469711292
1000	1662058857342800	1.5839245955556
5000	1662058792662790	0.388830191519885
10000	1662058702802780	0.247601146277658

Tabla 10. Valores de eventos por distancia para 1 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662056037262780	0.923299007161182
1000	1662055999912790	0.417207607788051
5000	1662055966962770	0.282371638425456
10000	1662055921242770	0.228351832917442

Tabla 11. Valores de eventos por distancia para 1.5 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662058274192750	0.369998378806058
1000	1662058206422790	0.316361927199085
5000	1662058099572790	0.277205569952964
10000	1662058063102790	0.222848811418998

Tabla 12. Valores de eventos por distancia para 2 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662056445802790	0.80873862038881
1000	1662056591382790	0.426970828897246
5000	1662056639702790	0.289133079820149
10000	1662056708982760	0.236826987723336

Tabla 13. Valores de eventos por distancia para 2.5 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662057442772790	0.7363617152479
1000	1662057515302790	0.413553122576364
5000	1662057545202790	0.306629156515352
10000	1662057601022780	0.234339180837938

Tabla 14. Valores de eventos por distancia para 3 m.

Frecuencia (Hz)	Timestamp	Eventos por segundo
100	1662057011772760	0.591165674188668
1000	1662057051732790	0.38096538899547
5000	1662057112022790	0.2928813645926
10000	1662057216612800	0.242546306167123

De la Tabla 8 hasta la Tabla 14 se extrae que a medida que aumenta la frecuencia se obtienen peores resultados en cuanto a eventos por segundo debido a que la cámara se adapta a los estímulos producidos por las altas frecuencia, detectando únicamente los eventos de polaridad 1. Por otro lado, para distancias cercanas al metro se obtienen los mejores valores de eventos por segundo. De esta forma, al encontrarse la cámara a una distancia lo suficiente alejada del LED se obtienen los eventos reales y no los producidos por ruido de fondo, y al estar lo suficientemente cerca es capaz de detectar el LED en su totalidad sin destellos producidos por los altos niveles de intensidad. Además, el aumento de la frecuencia no influye en exceso, ya que al estar a una distancia cercana la cámara es capaz de integrar la mayor parte de los eventos con polaridad 0 y 1 sin llegar a saturarla. Mientras, a medida que aumenta la distancia se observan en el resto de medidas se obtienen peores valores debido a que la diferencia de las polaridades ON y OFF no generan un cambio notable en la intensidad, suficiente como para que la cámara sea capaz de detectar una variación (superar el umbral) y generar un evento del suceso.

Si observamos la Figura 57 de forma general, se obtienen los mejores resultados para los valores de 100 Hz, ya que es el caso ideal en el que, al ser una frecuencia tan baja, tanto el ojo humano como la cámara DVS son capaces de detectar el parpadeo del LED. En definitiva, se observa una clara tendencia lineal decreciente de los resultados de los eventos obtenidos con el aumento de la distancia y de la frecuencia, logrando los peores resultados para los 3 metros y 10 kHz. Por otra parte, para esta medida, se obtiene la mejor visualización del LED (sin destellos o deformaciones), como se observa en la Figura 63.

Asimismo, en la Tabla 15 se observa a modo de conclusión la polaridad de los eventos capturados de bajada y de subida (polaridad 0 y 1).

Tabla 15. Polaridad de los eventos detectados.

Distancia (m)	Frecuencia (Hz)	Eventos de bajada	Eventos de subida
0.25	100	6481	2026
	1000	10771	10468
	5000	9072	12379
	10000	2689	15068
0.5	100	5365	1991
	1000	10478	10442
	5000	10161	13000
	10000	2537	16149
1	100	6250	1005
	1000	14125	7195
	5000	9287	12505
	10000	0	13588
1.5	100	5810	949
	1000	10498	10182
	5000	9372	12709
	10000	0	19163
2	100	5403	948
	1000	10763	10457
	5000	8382	12773
	10000	0	17256
	100	6468	1588
	1000	14121	6338

2.5	5000	8224	14191
	10000	0	16252
3	100	1244	6417
	1000	14262	6758
	5000	9482	12652
	10000	0	13950

De la tabla anterior se observa que para algunas distancias no se detectan eventos de bajada. Se debe al *bias* aplicado por el SW de visualización y de grabación que controla la cámara. Este concepto hace referencia a los circuitos electrónicos analógicos que suelen estar parametrizados por corrientes o tensiones que se mantienen estables durante el funcionamiento de la grabación, donde dichas corrientes o tensiones son las denominadas *bias*.

El sensor utilizado en la medición contienen generadores de polarización programables digitalmente que pueden variar en varios órdenes de magnitud (desde μA a fA). Estas corrientes producen voltajes que se pueden distribuir en un chip para polarizar muchos circuitos a la vez, como los píxeles. De esta manera, al tener el generador de polarización en el chip permite eliminar los efectos de la variación de proceso, tensión y temperatura entre chips.

De igual forma que el ojo humano, la cámara en distancias cercanas es capaz de detectar tanto los flancos de subida como de bajada en cualquiera de las frecuencias (hasta medio metro), pero a medida que se aleja de la fuente transmisora de luz comienza a perder información debido a que se acomoda a la dinámica de la escena. A raíz de las similitudes que comparte con el sistema de visión humano es por lo que no detecta los flancos de bajada en altas frecuencias como 10 kHz.

6.4.2. Análisis de la forma de onda detectada

En este apartado se obtiene la forma de onda a raíz de los datos obtenidos en el subapartado anterior. En primer lugar, se observa desde la Figura 57 hasta la Figura 63 las distintas visualizaciones del SW DV referido a cada frecuencia y distancia.

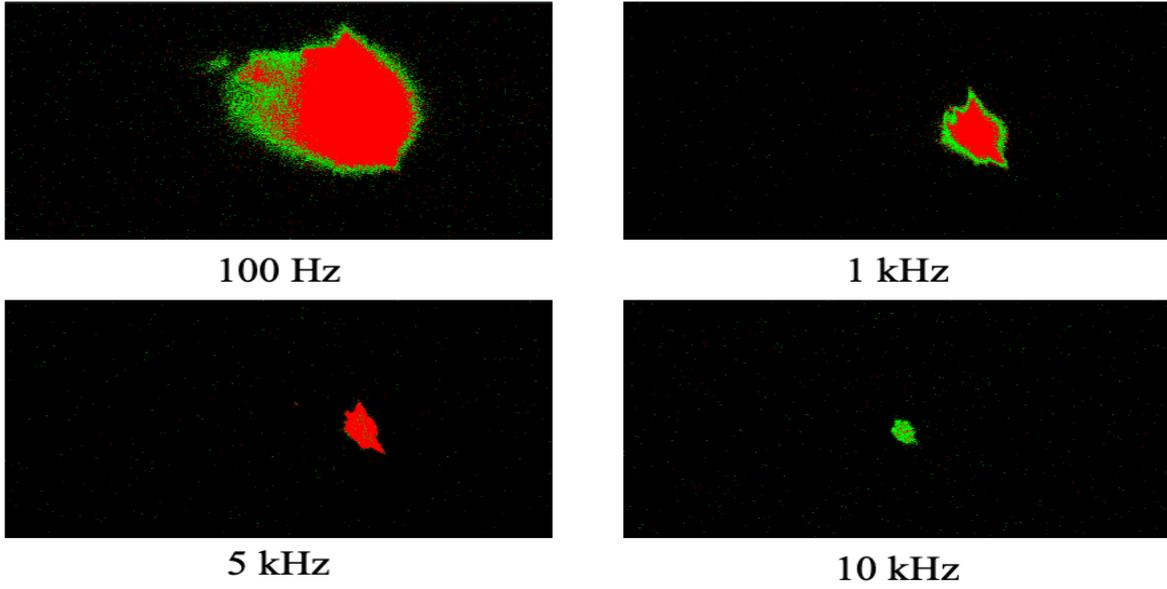


Figura 57. Visualización de DV para 0.25 m por frecuencia.

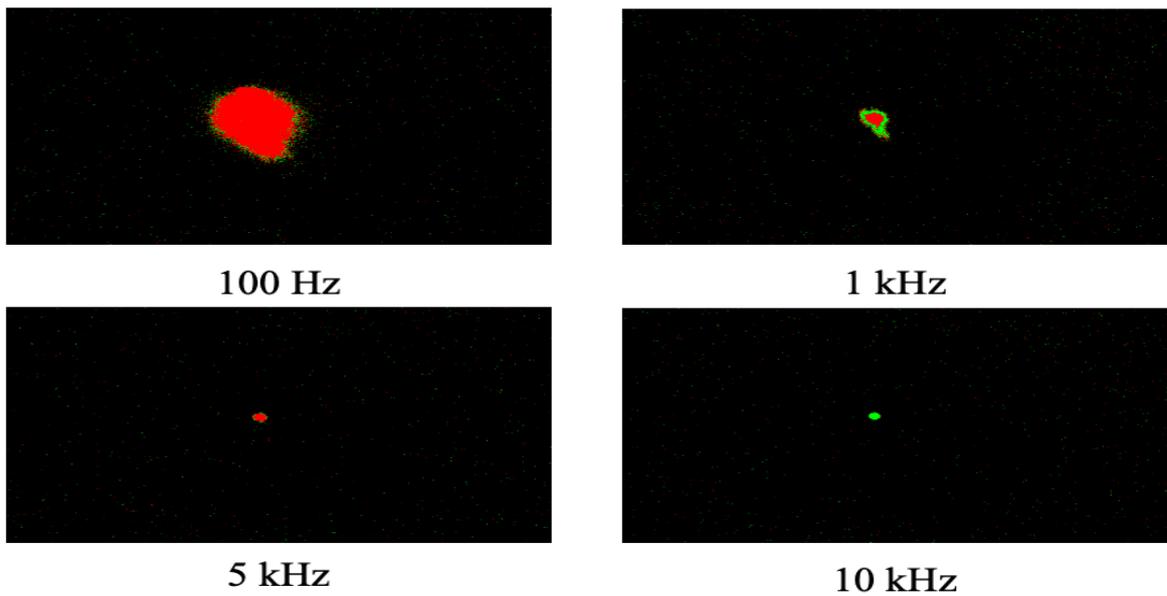


Figura 58. Visualización de DV para 0.5 m por frecuencia.

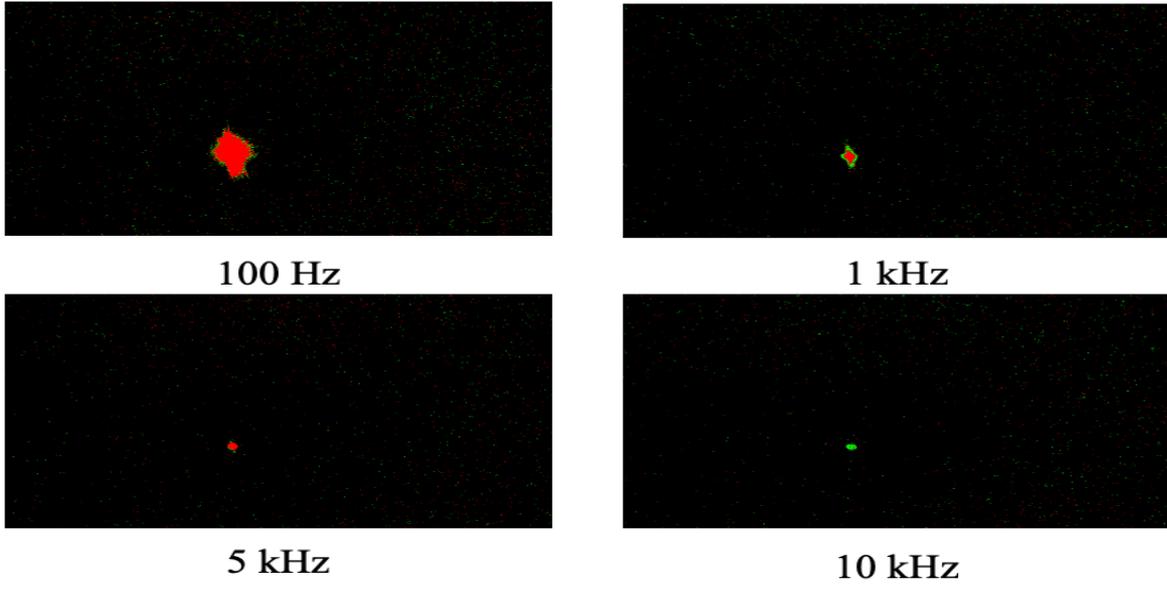


Figura 59. Visualización de DV para 1 m por frecuencia.

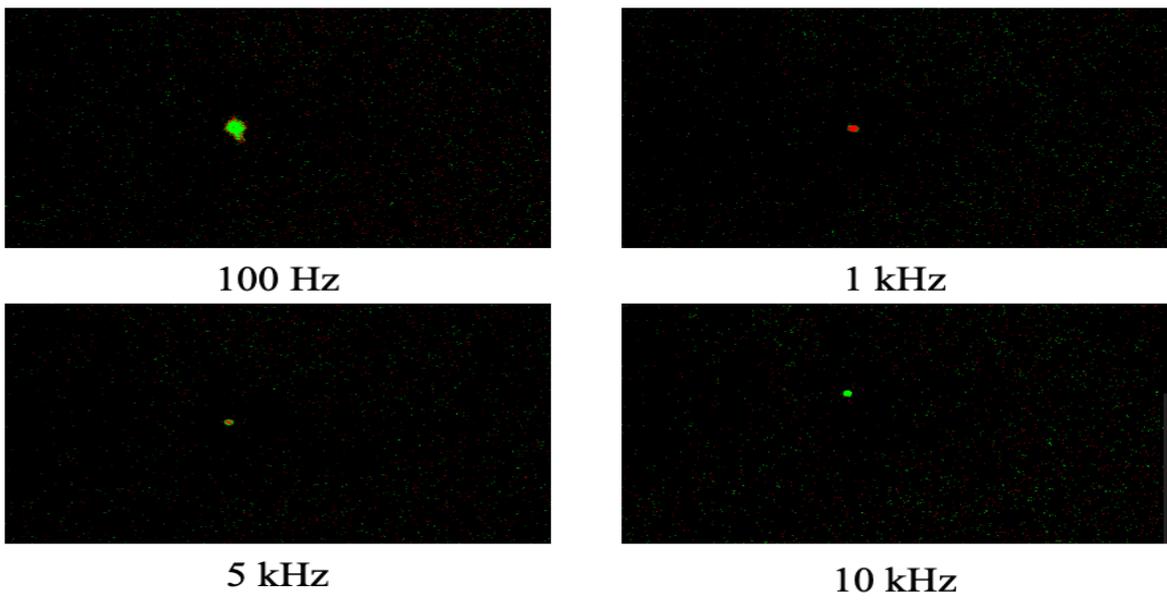


Figura 60. Visualización de DV para 1.5 m por frecuencia.

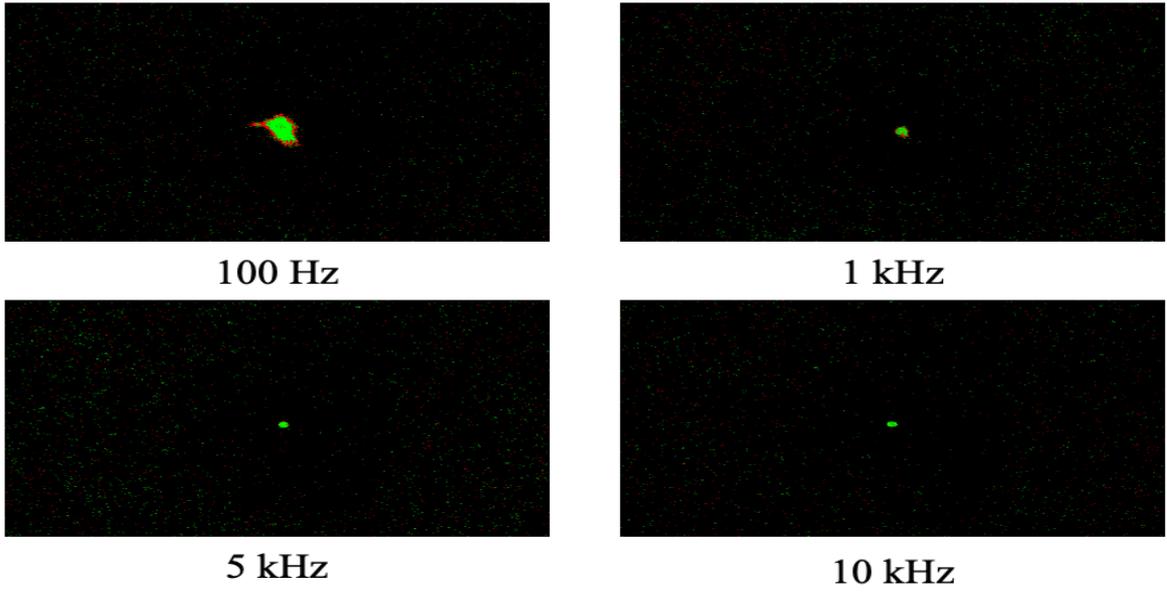


Figura 61. Visualización de DV para 2 m por frecuencia.

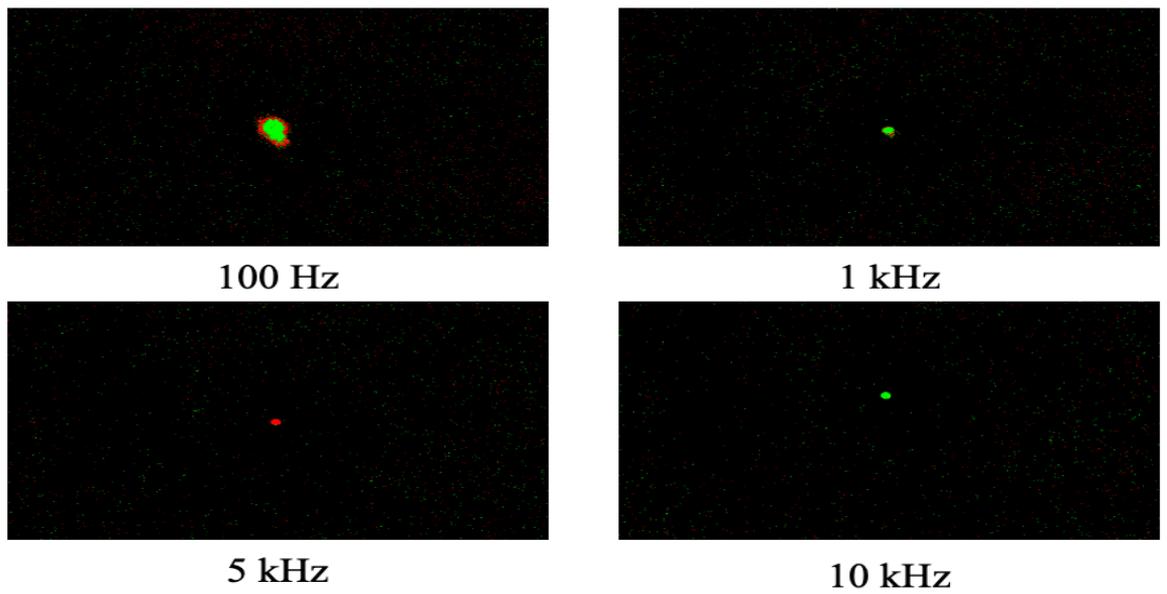


Figura 62. Visualización de DV para 2.5 m por frecuencia.

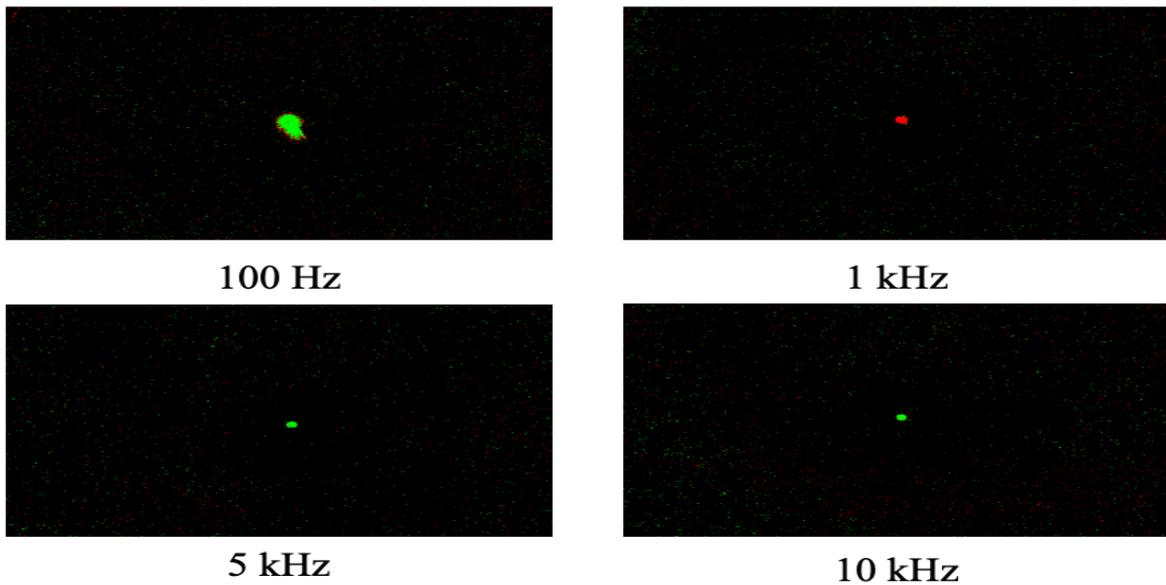


Figura 63. Visualización de DV para 3 m por frecuencia.

Se puede observar de las figuras anteriores las diferencias de colores verdes y rojos en las medidas por frecuencia y por distancia, donde los verdes equivalen a los flancos de subida (polaridad 1) y los rojos a los flancos de bajada (polaridad 0). Además, se extrae también que a medida que aumenta la frecuencia el haz de luz se hace más pequeño y más directivo. Mientras, para las medidas de 100 Hz se obtienen valores mucho mayores debido a que hay más energía reflejada debido a que el LED parpadea a una frecuencia mayor. Por ejemplo, para la medida de 100 Hz a 0.25 metros (30 fps) se reciben 17 millones de eventos por segundo. Para distancias y frecuencias inferiores se obtiene un área de cobertura mucho mayor, pero con mayor ruido residual. Por otro lado, para la medida de 10 kHz a 1.5 metros se reciben 232 mil eventos por segundo. Esta diferencia se debe a la distancia y a la frecuencia de funcionamiento, ya que para distancias y frecuencias superiores se obtiene la silueta del LED claramente diferenciada del posible ruido de fondo. Esto se debe a que el LED parpadea a una velocidad a la que la cámara se acostumbra (simulando el comportamiento del ojo humano) donde los eventos ON y OFF se producen tan rápidos que la cámara no es capaz de captarlos, mientras que para frecuencias más pequeñas la diferencia de estos estados se hace mayor en el tiempo.

Seguidamente, para representar los eventos por distancia se han tenido en cuenta 3 tipos de frecuencias: bajas (100 Hz), intermedias (1 y 5 kHz) y altas (10 kHz), donde el eje X hace referencia al tiempo y el Y a la polaridad del evento.

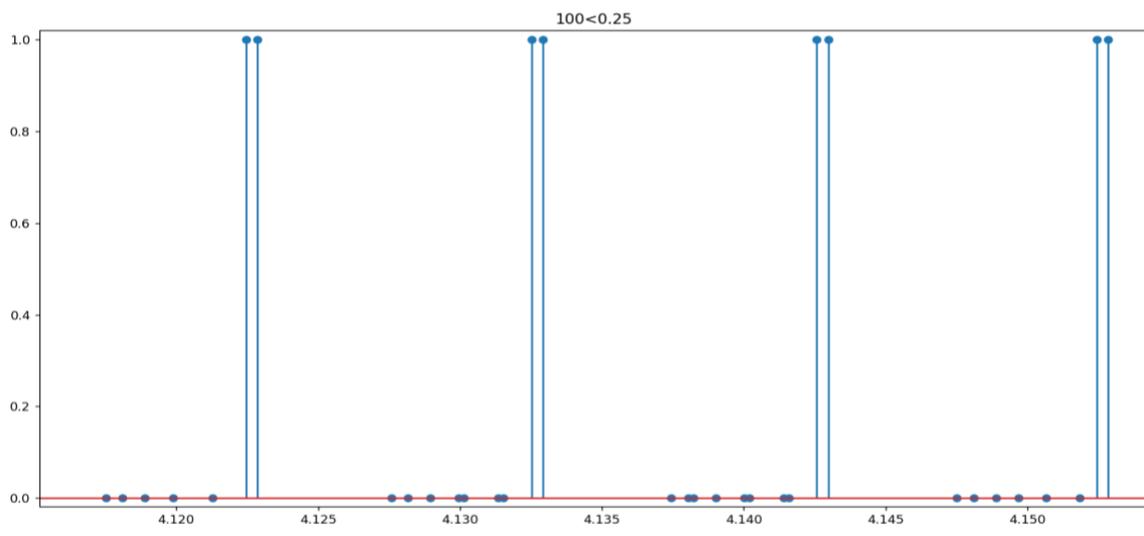


Figura 64. Forma de onda de 100 Hz a 0.25 m.

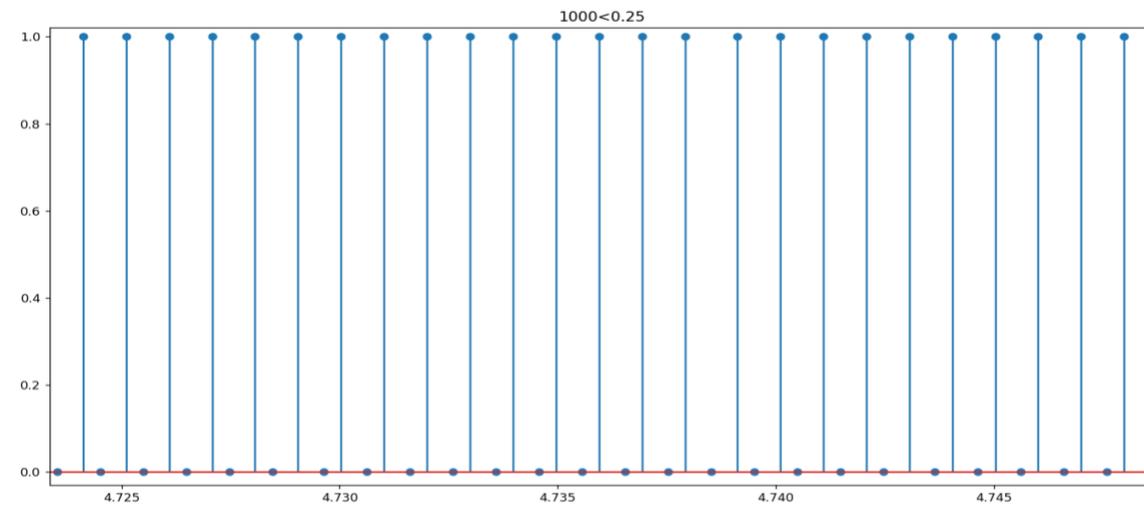


Figura 65. Forma de onda de 1 kHz a 0.25 m.

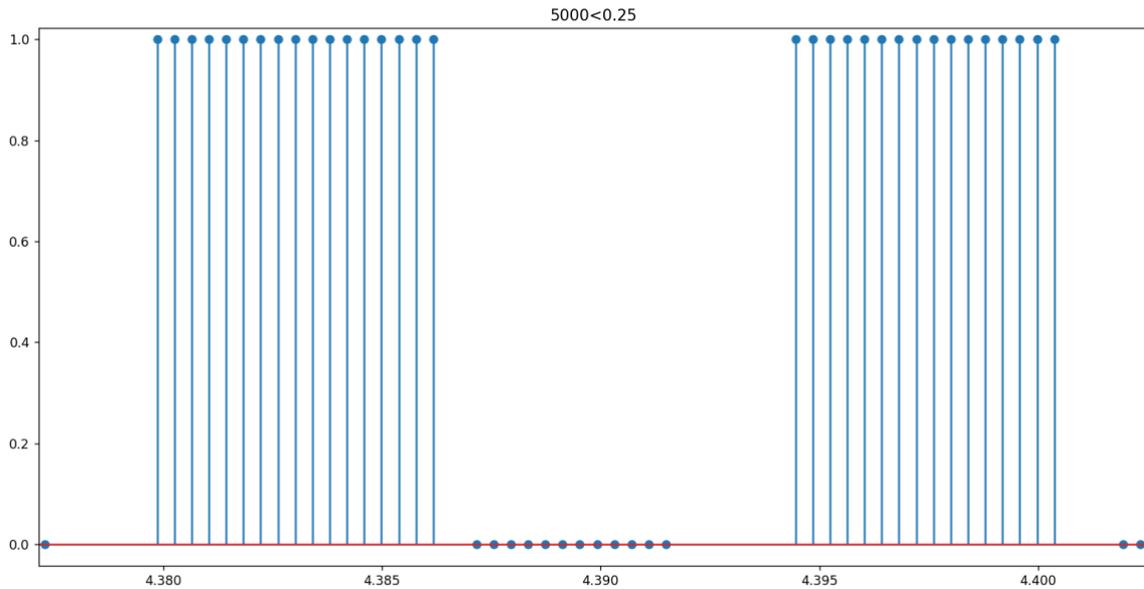


Figura 66. Forma de onda de 5 kHz a 0.25 m.

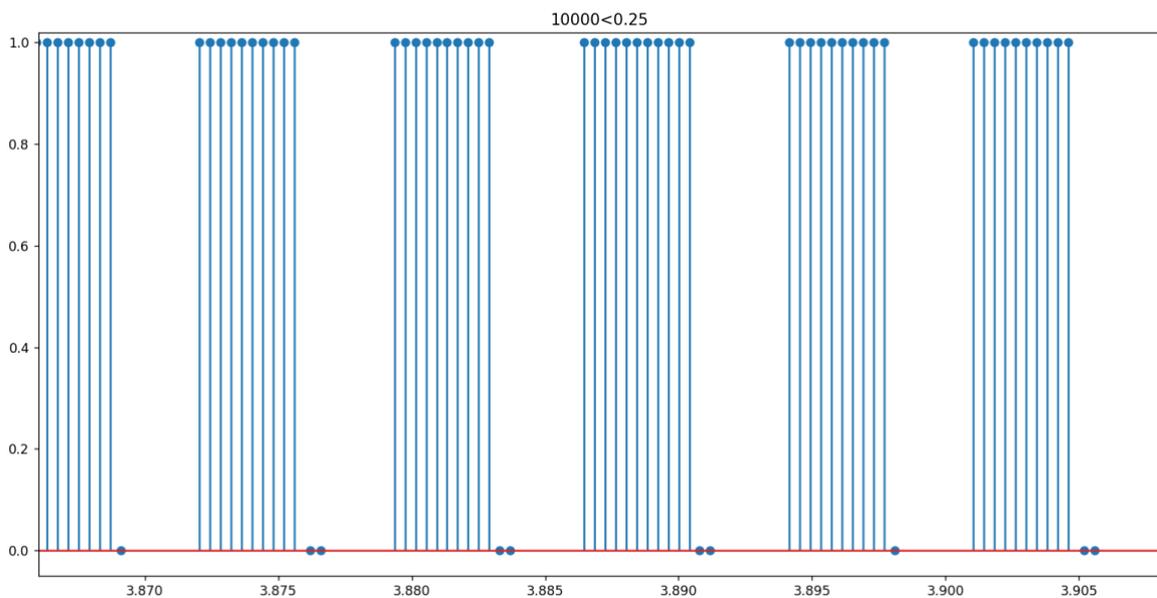


Figura 67. Forma de onda de 10 kHz a 0.25 m.

Para las medidas de 0.25 m (de la Figura 64 a la Figura 67) se observa para todas las frecuencias los flancos de subida y de bajada claramente diferenciados, obteniéndose los mejores resultados para las frecuencias intermedias. Además, se observa una ligera tendencia de la señal cuadrada que en un inicio se capturó de la Figura 56. La razón por la cual no es del todo visible en el resto de frecuencias (caso ideal el de la Figura 66 a 5 kHz) es debido al funcionamiento del píxel de DVS. Para entender su funcionamiento es necesario conocer la electrónica analógica detrás del circuito del sensor.

En la Figura 68 se muestra un diagrama abstracto del píxel de DVS, donde se divide en tres etapas. La primera es la del fotorreceptor, donde se encuentra una etapa de amplificación para estabilizar la tensión en el fotodiodo y crear una señal de tensión proporcional al logaritmo de la intensidad de la luz. En la segunda etapa se encuentra el circuito de diferenciación, donde se desecha la componente continua (DC) de la señal luminosa cada vez que se restablece, de modo que la señal resultante no contiene información sobre el nivel absoluto de iluminación. Finalmente, la tercera etapa de comparadores se encarga de detectar los cambios en la señal luminosa y produce eventos digitales (ON significa que la luz se vuelve más brillante y OFF que se atenúa).

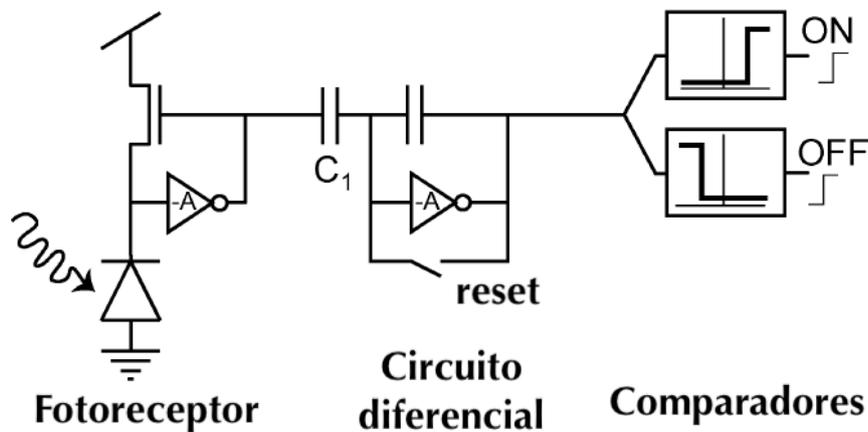


Figura 68. Esquemático del circuito de un píxel DVS [234].

A raíz de la naturaleza del píxel de DVS se explica el porqué de la existencia de figuras donde se producen muchos eventos de subida y pocos de bajada o viceversa.

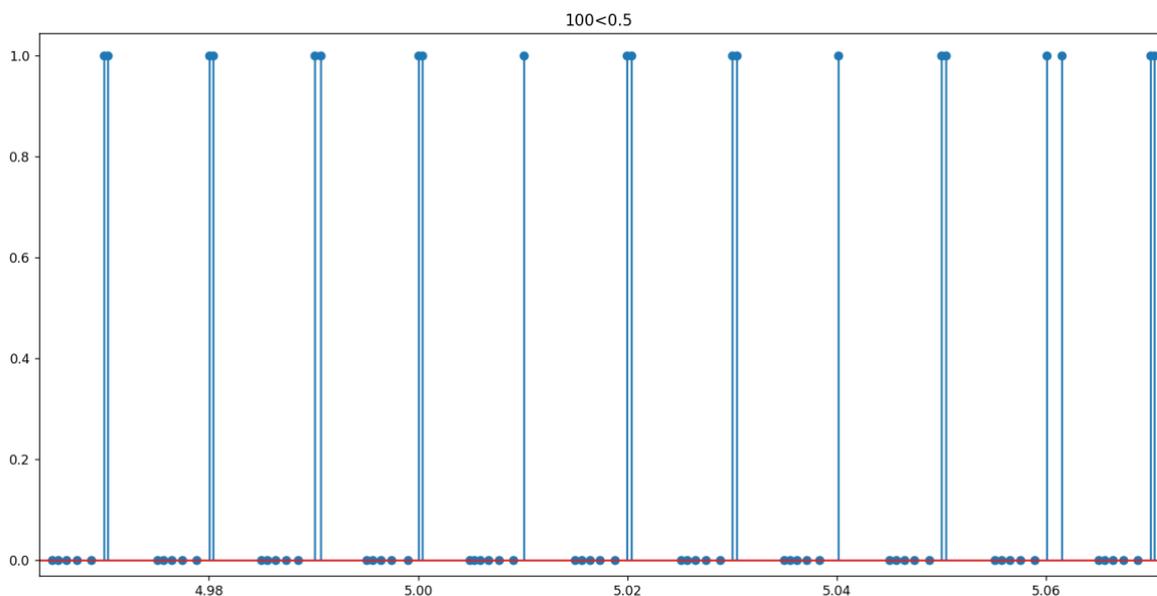


Figura 69. Forma de onda de 100 Hz a 0.5 m.

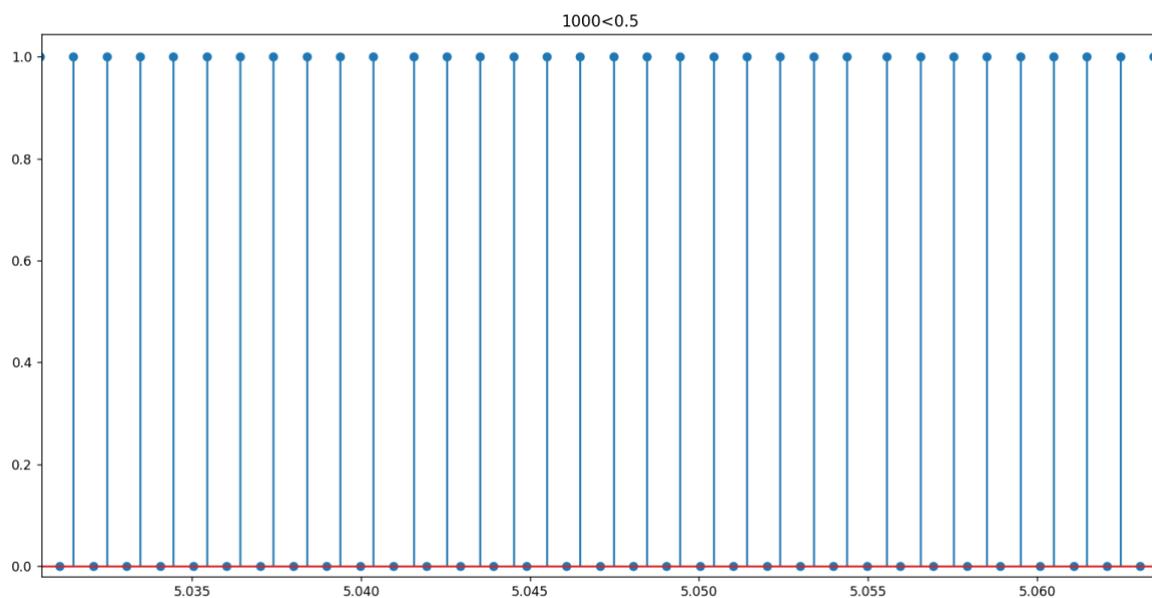


Figura 70. Forma de onda de 1 kHz a 0.5 m.

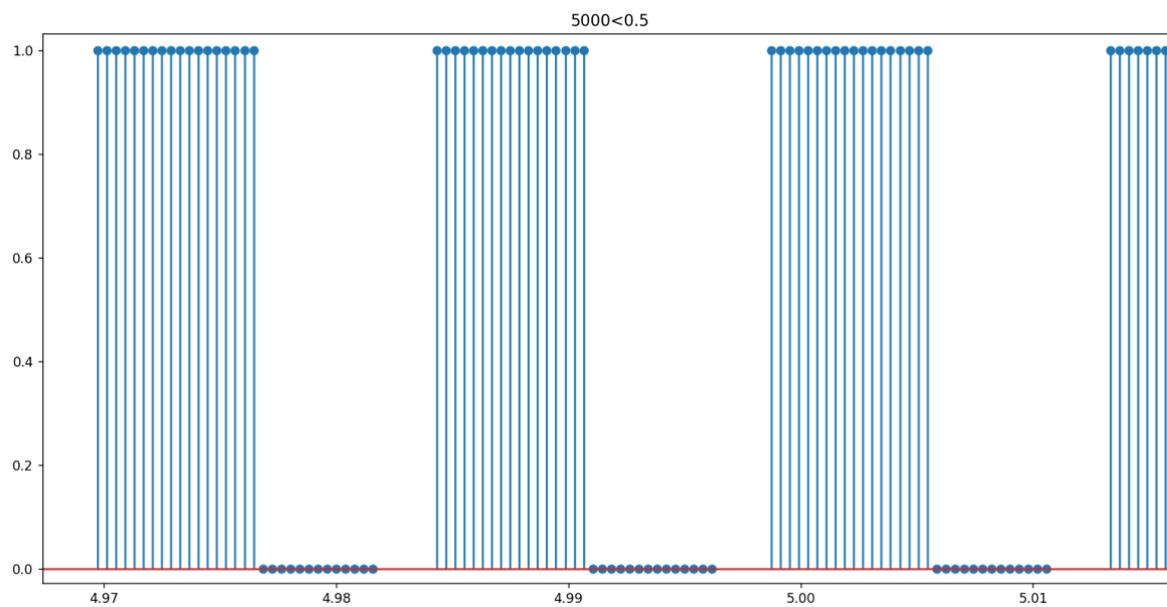


Figura 71. Forma de onda de 5 kHz a 0.5 m.

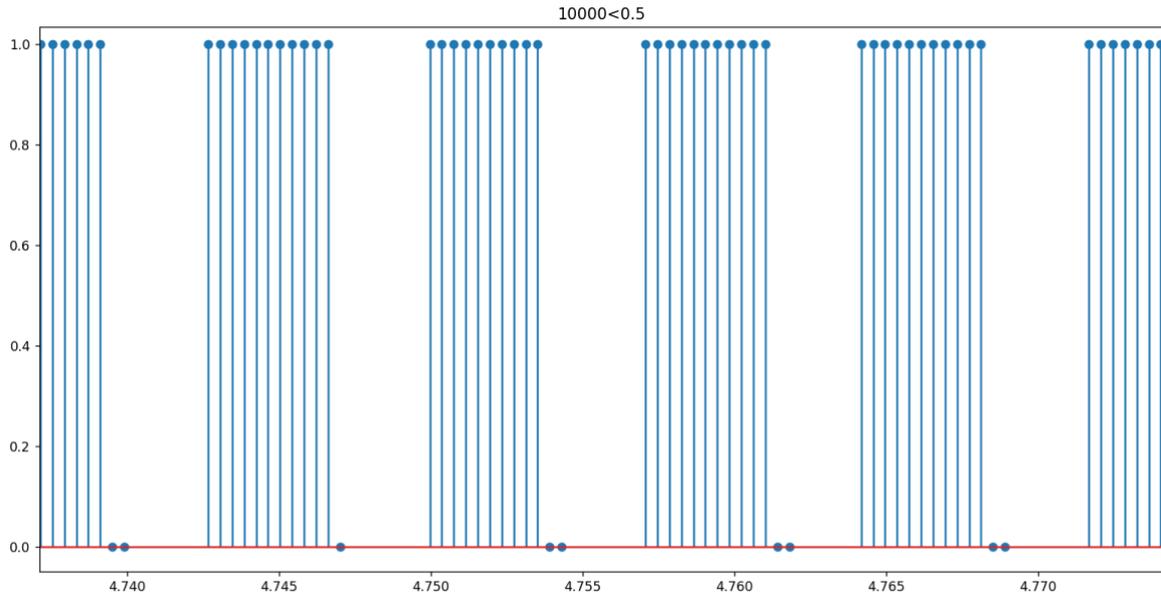


Figura 72. Forma de onda de 10 kHz a 0.5 m.

De igual forma que en la medida anterior, para las medidas de la Figura 69 a la Figura 72 el *bias* controla el amplificador de la primera etapa, y limita la velocidad con la que la salida de la primera etapa puede responder a los cambios (situaciones de muchas polaridades a 0 o 1 seguidas). Un cambio instantáneo en la iluminación provoca un cambio en la señal relacionada con la luz que tarda un tiempo finito en reajustarse. Este tiempo finito es variable (de μs a ms) y depende de dos factores: del nivel de iluminación y del fotorreceptor. De esta forma, pueden existir situaciones en las medidas en las que el BW del píxel sea bajo para frecuencias altas y le cueste más encontrar los eventos de bajada, mientras que para frecuencias bajas se muestrea lo suficientemente rápido como para detectar las oscilaciones del LED. Sin embargo, también responderá a ruidos electrónicos de mayor frecuencia, por lo que producirá más eventos de ruido, especialmente en los eventos de bajada. Finalmente, siguiendo la linealidad de las medidas y al igual que en la distancia anterior (0.25 m) los mejores resultados se obtienen para las frecuencias intermedias (1 kHz – 5 kHz).

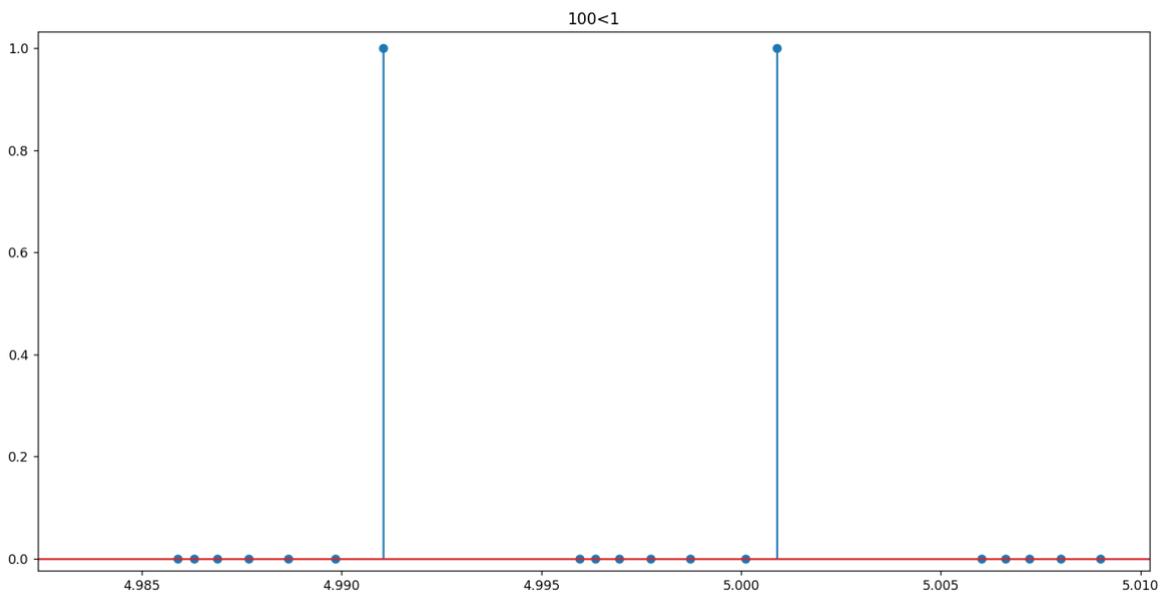


Figura 73. Forma de onda de 100 Hz a 1 m.

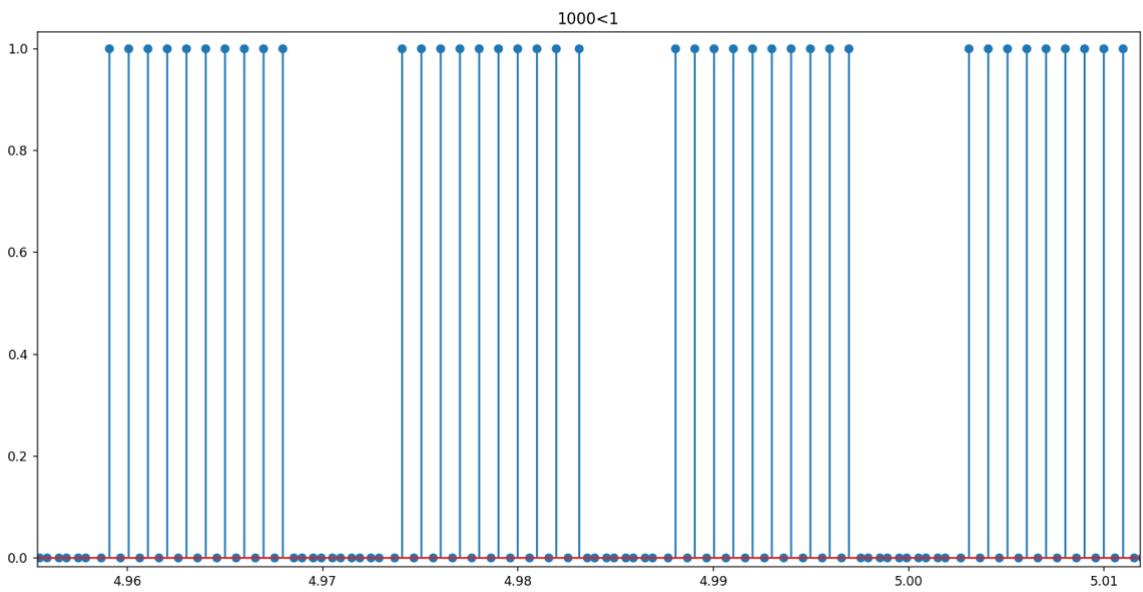


Figura 74. Forma de onda de 1 kHz a 1 m.

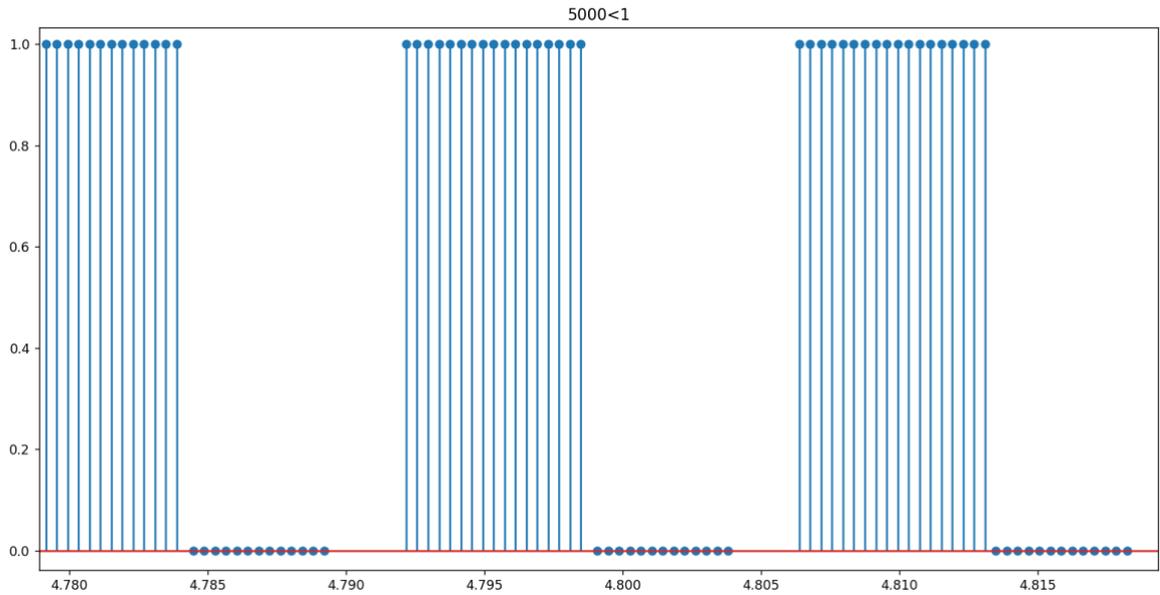


Figura 75. Forma de onda de 5 kHz a 1 m.

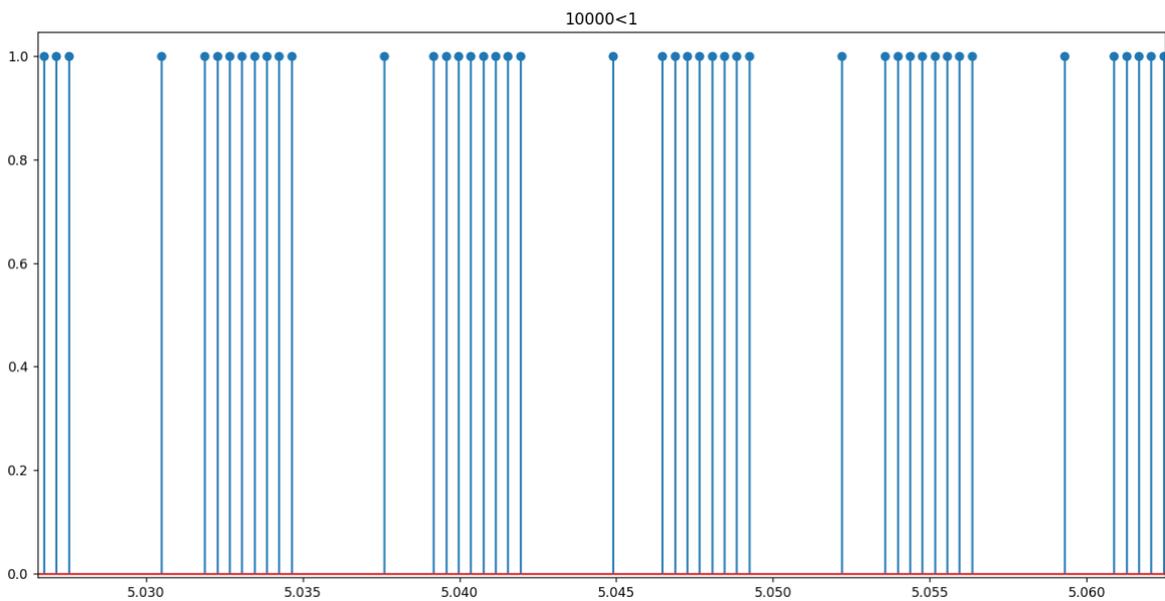


Figura 76. Forma de onda de 10 kHz a 1 m.

A lo largo de las medidas existen situaciones donde no existe un cambio de iluminación tan elevados donde los umbrales ON y OFF puedan producir eventos claramente diferenciados. Cuando el píxel se reinicia, la salida de la segunda etapa a los comparadores fija un valor (corriente hipotética) y una vez que la señal relacionada con la luz del LED cambia, este valor también lo hace. Si hay más luz, el valor aumenta y si hay menos luz, el valor se reduce. El cambio de este valor es proporcional al cambio de iluminación, multiplicado por la ganancia del amplificador.

La polarización ON define el nivel de corriente en el que se producirá un evento de subida. Este debe ser siempre mayor que la diferencia del *bias*, y la relación entre los dos define el cambio necesario en el nivel de luz para que se produzca un evento. Por ejemplo, si ON es 10 veces mayor que la diferencia del *bias*, entonces un aumento del 50% en la iluminación debería desencadenar un evento, es decir, el 50% de cambio relativo expresado como porcentaje.

De esta misma forma, la polarización OFF define el nivel de corriente al que el píxel produce un evento OFF. Este debe ser siempre inferior a la diferencia del *bias*, y el porcentaje de cambios entre los dos define el cambio de nivel de luz necesario para producir un evento de bajada. Lo que ocurre en algunos casos donde no se generan eventos de bajada o no coinciden con el número de eventos esperado se debe al desajuste entre ON y OFF, momento en el que el sensor deja de funcionar debido a que ambos umbrales se acercan demasiado.

Al igual que ocurre en las medidas anteriores, los mejores datos se consiguen para las frecuencias intermedias, donde se obtiene la forma de la señal cuadrada. Además, tal y como se veía de las medidas anteriores de 10 kHz, se observa una tendencia a la desaparición de los eventos de bajada por lo comentado anteriormente llegando a 1 metro sin estos.

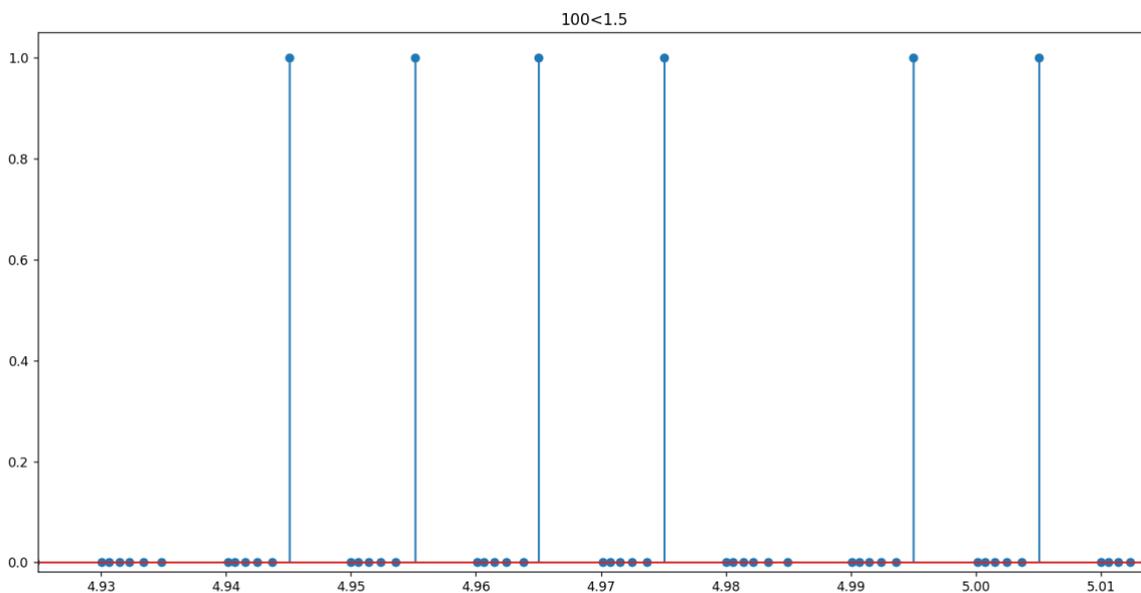
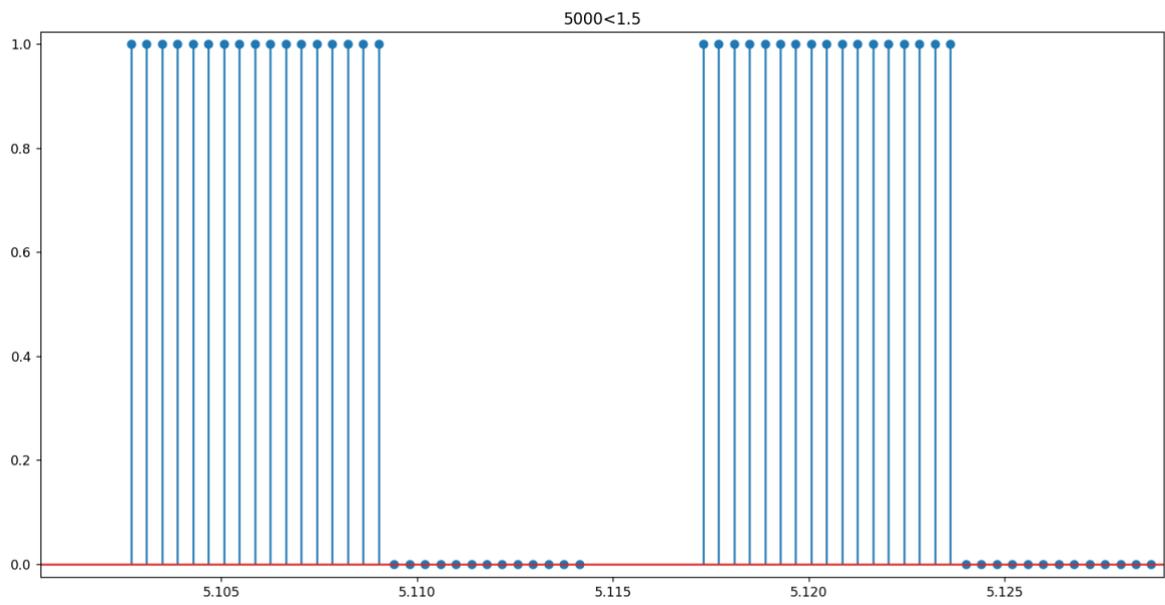
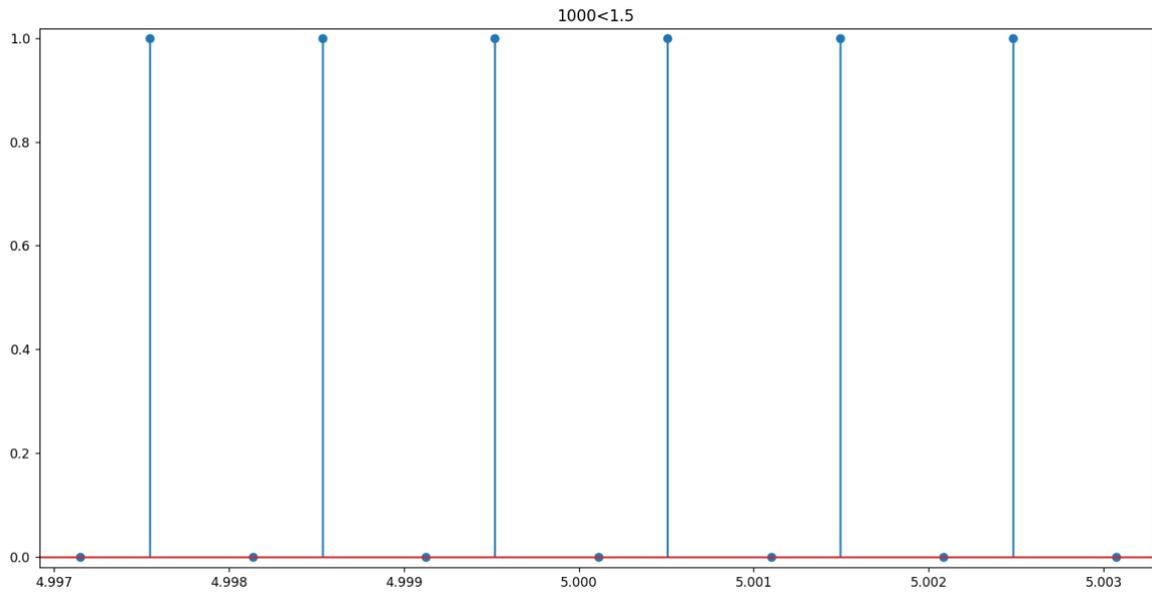


Figura 77. Forma de onda de 100 Hz a 1.5 m.



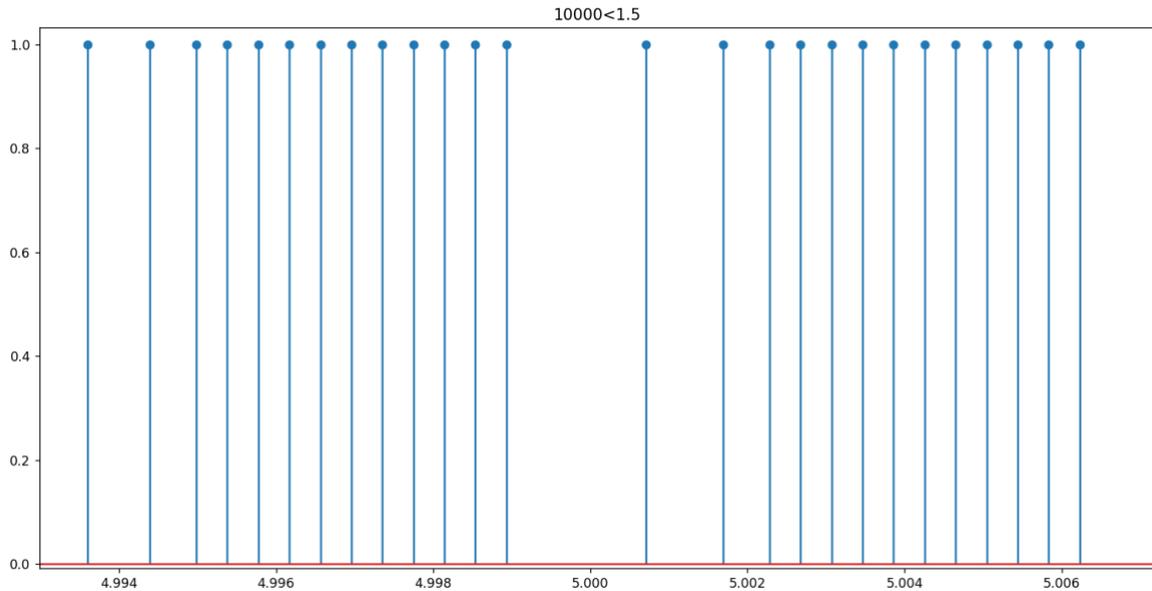


Figura 80. Forma de onda de 10 kHz a 1.5 m.

Tal y como ocurre en el resto de medidas, hay situaciones donde se mezclan muchos eventos de bajada o de subida y no se recupera correctamente del todo la señal cuadrada. Idealmente la cámara recibe un evento por respuesta al cambio de luz, pero existen situaciones donde se producen más de un evento cuando se produce un gran cambio en la cantidad de iluminación de un píxel. Debido a que las velocidades de los circuitos de la primera y segunda etapa pueden modificarse de forma independiente, se considera el ejemplo mostrado en la Figura 81.

Por ejemplo, para un aumento instantáneo de luz lo suficientemente grande como para producir tres cambios de umbral, dada la elección de los sesgos que controlan los umbrales se produce un retroceso mostrado en la parte de iluminación. En el primer escenario se parte con una iluminación rápida y una respuesta lenta del diferencial. La etapa 1 se adapta rápidamente al nivel de iluminación, mientras que la etapa 2 tarda más. Para cuando produce su primer pico, la salida de la etapa 1 ya lo ha hecho y no hay más cambios que detectar. En el segundo escenario, el DVS comienza con una iluminación con aumento lento y una respuesta diferencial rápida. De esta forma, la etapa 1 tarda mucho tiempo en adaptarse al nuevo nivel de iluminación y en este tiempo, la etapa 2 es capaz de disparar y reiniciarse 3 veces produciendo tres picos de ON. Por otro lado, el tercer escenario es similar al segundo, salvo que se ha fijado un nivel más bajo, que da lugar a un periodo refractario más largo. De esta manera, la etapa 2 produce su primer evento rápidamente en respuesta a la lenta subida de la etapa 1, pero luego tiene que esperar hasta que se complete su reinicio. En este tiempo se pierde parte de la subida de la salida de la etapa 1, por lo que al final sólo producen dos picos en respuesta al cambio.

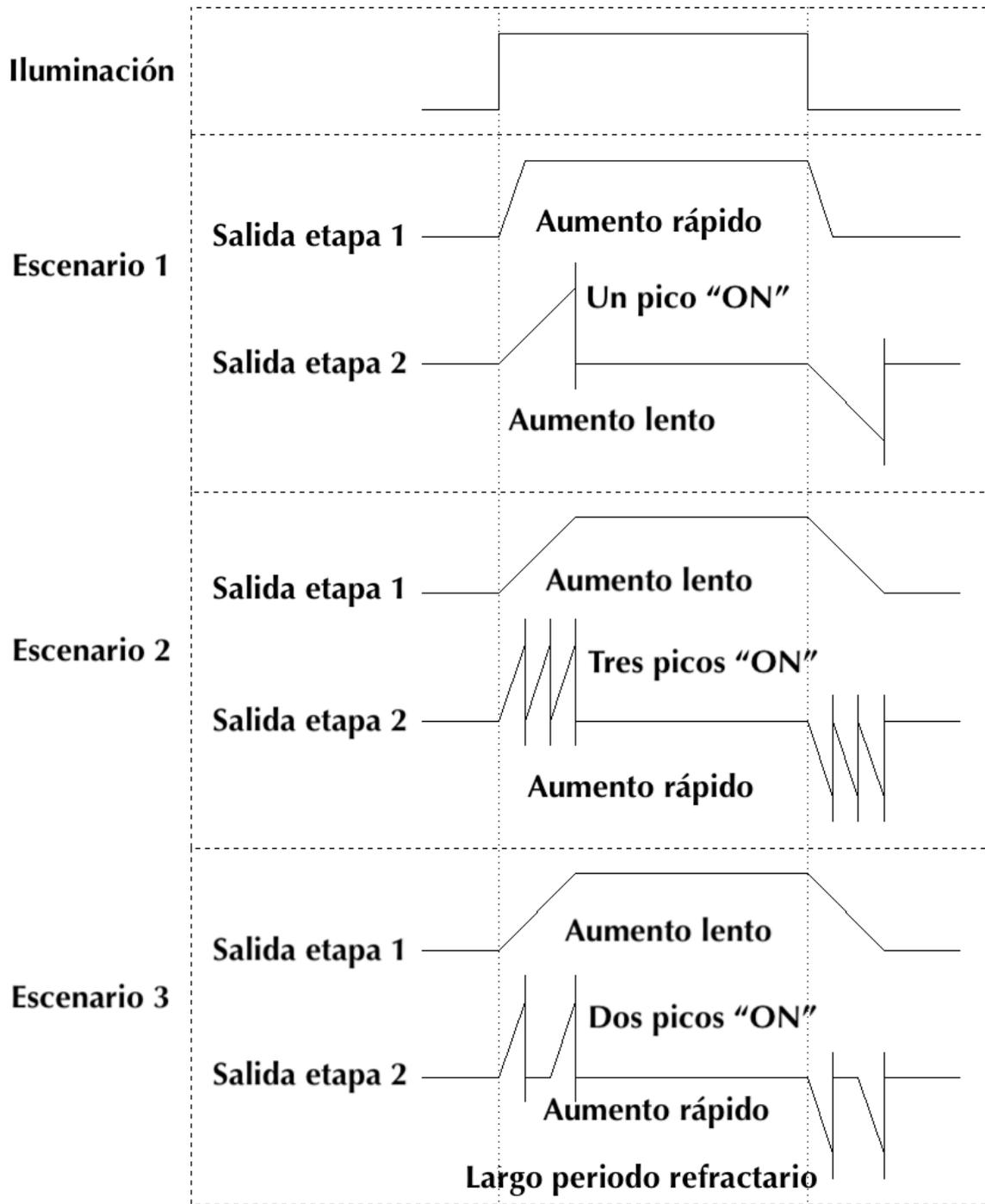


Figura 81. Situación con más de un evento por cambio de luminosidad [234].

En definitiva, a partir de las medidas de 1 metro en adelante se dejan de recibir polarizaciones OFF para las medidas de 10 kHz por lo comentado anteriormente y la producción de muchos eventos en el chip causa un retraso que se ve en las figuras anteriores, como el tercer escenario. Así, el tiempo hasta el pico, el retraso en la comunicación y el periodo refractario se suman al periodo del píxel, del que se deriva su BW.

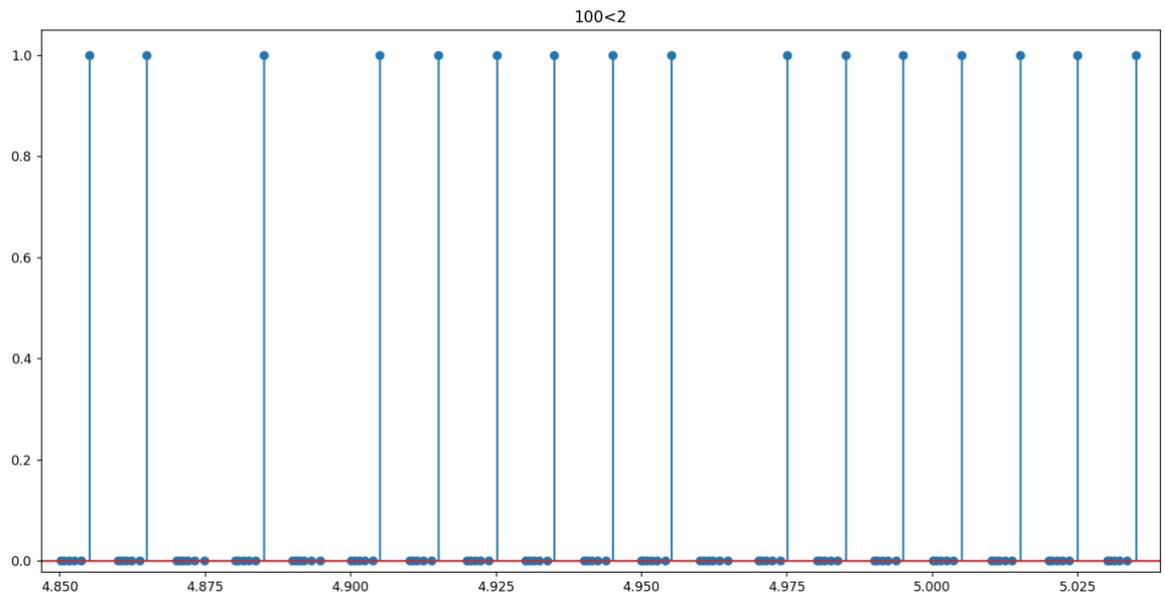


Figura 82. Forma de onda de 100 Hz a 2 m.

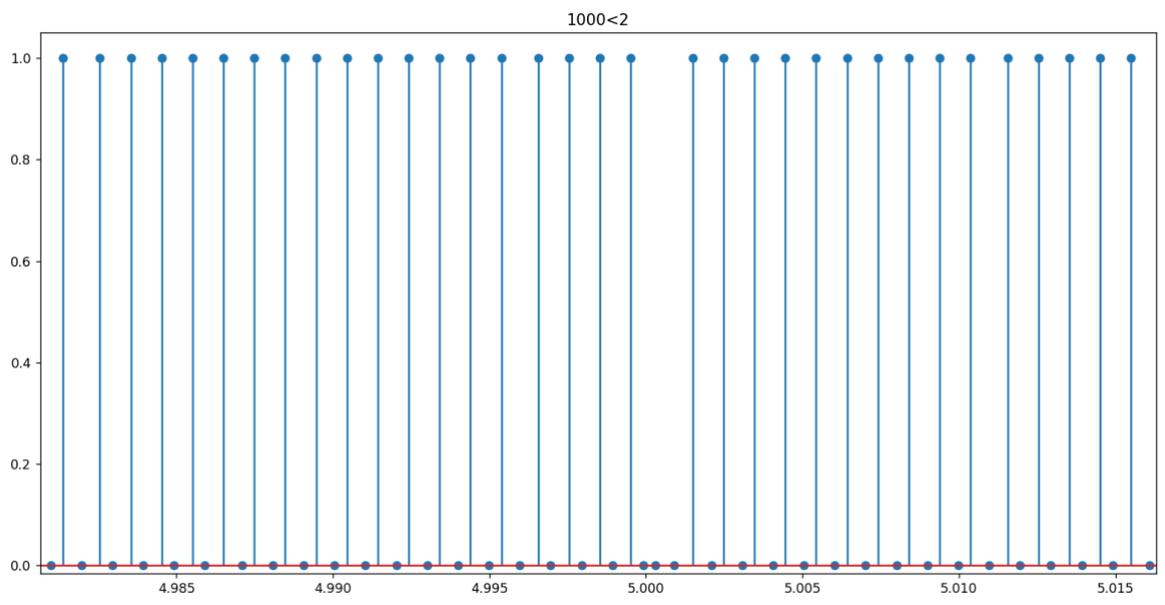


Figura 83. Forma de onda de 1 kHz a 2 m.

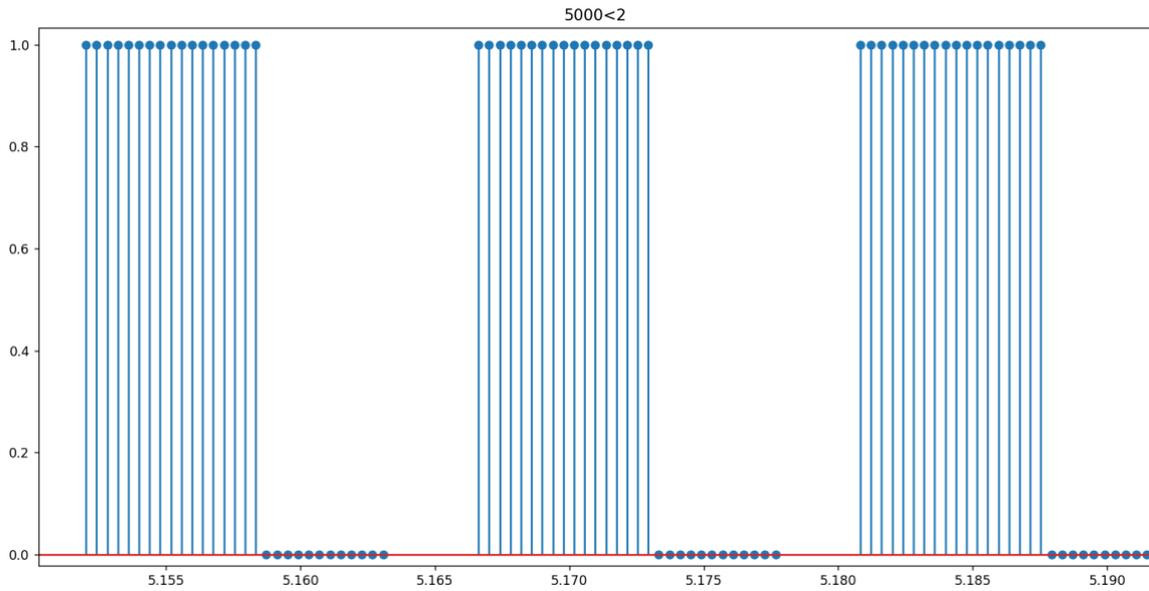


Figura 84. Forma de onda de 5 kHz a 2 m.

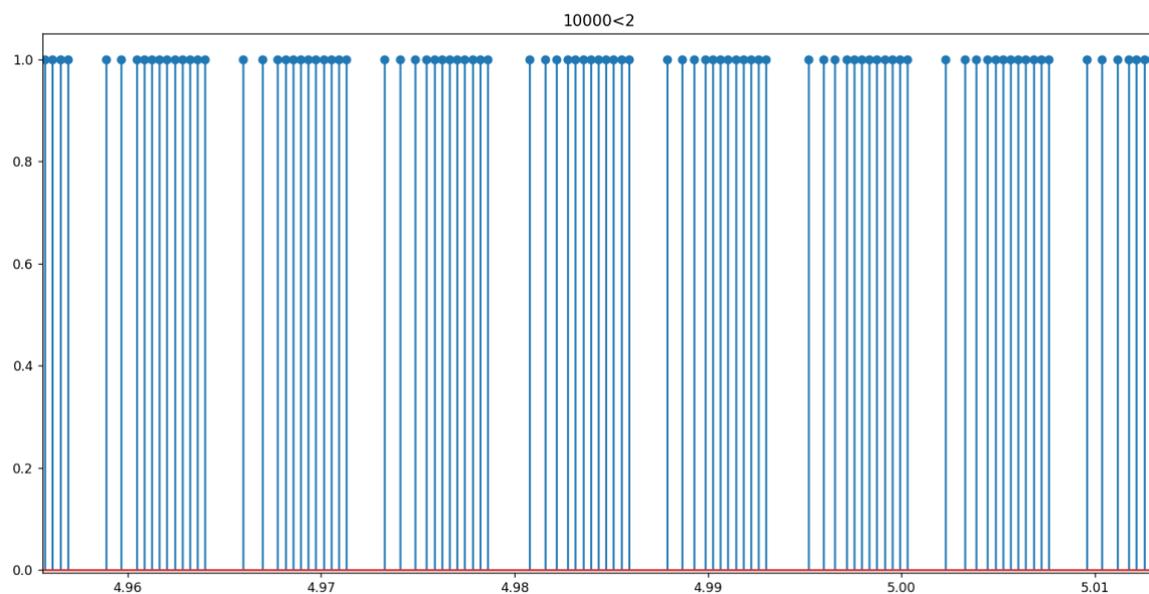


Figura 85. Forma de onda de 10 kHz a 2 m.

Siguiendo la misma línea que las medidas anteriores, a medida que aumenta la frecuencia desaparece la polaridad OFF de los flancos de bajada. Tal y como se ha comentado, esto es así por culpa de que la cámara se acostumbra a estar en niveles tan altos, que cuando aparece un nivel bajo no es detectado por esta. Además, la distancia es un factor discriminante para este suceso, ya que en las primeras medidas si eran detectables la polaridad OFF. Además, los mejores datos se obtienen para la señal medida a 5 kHz.

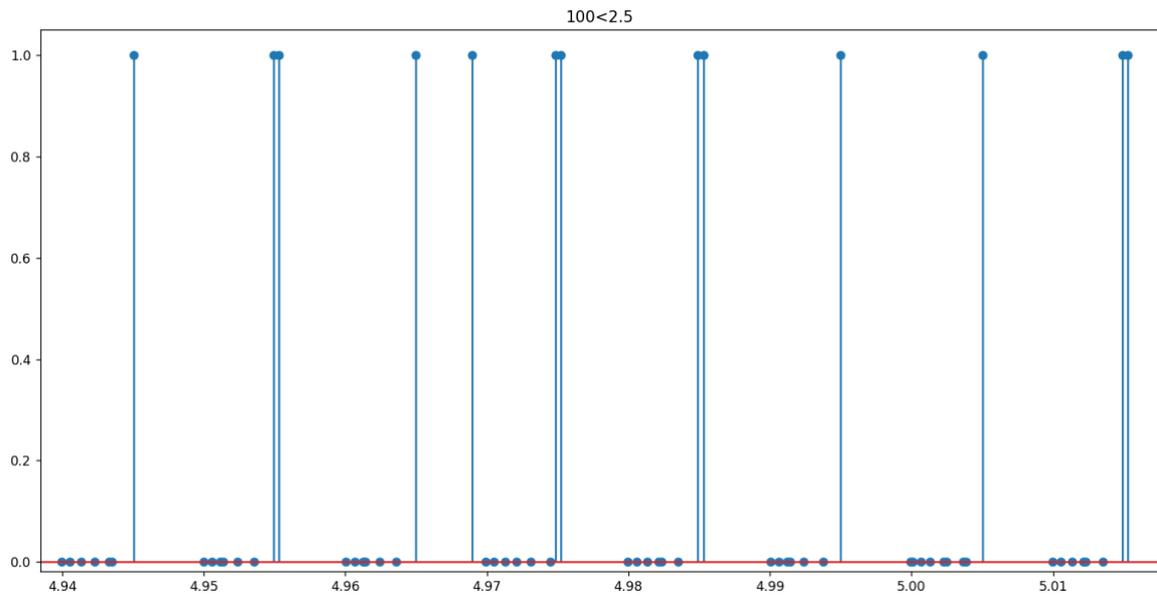


Figura 86. Forma de onda de 100 Hz a 2.5 m.

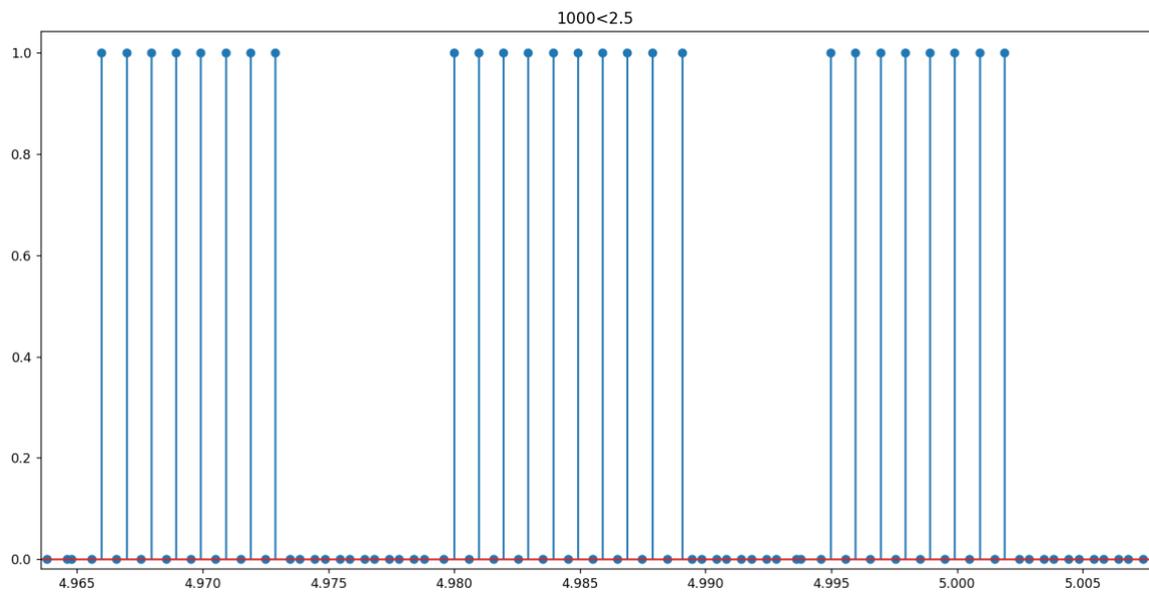


Figura 87. Forma de onda de 1 kHz a 2.5 m.

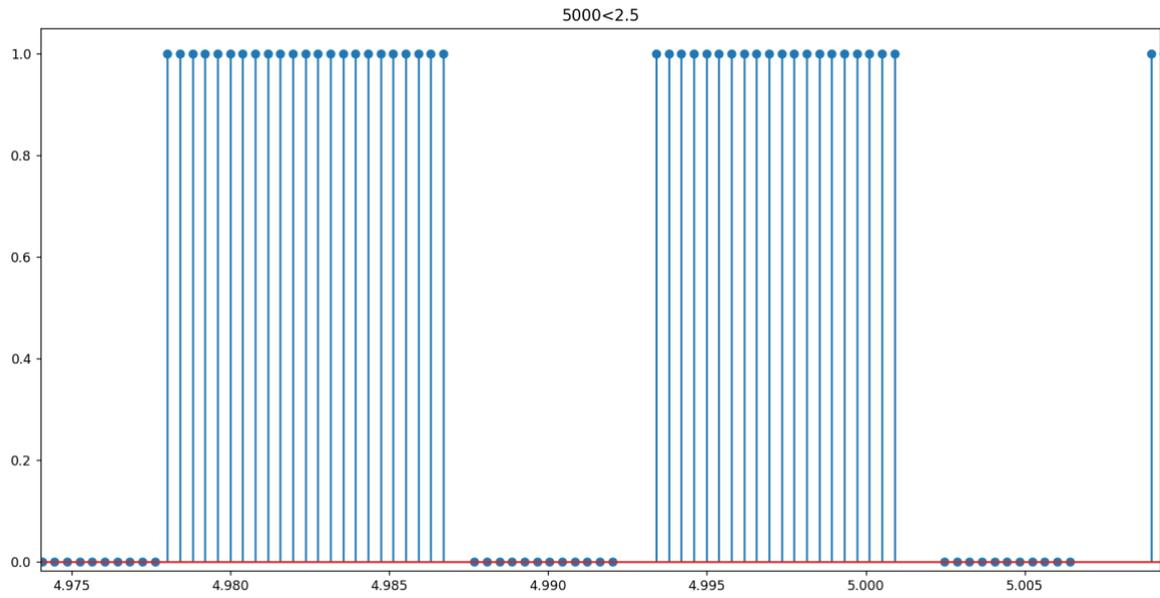


Figura 88. Forma de onda de 5 kHz a 2.5 m

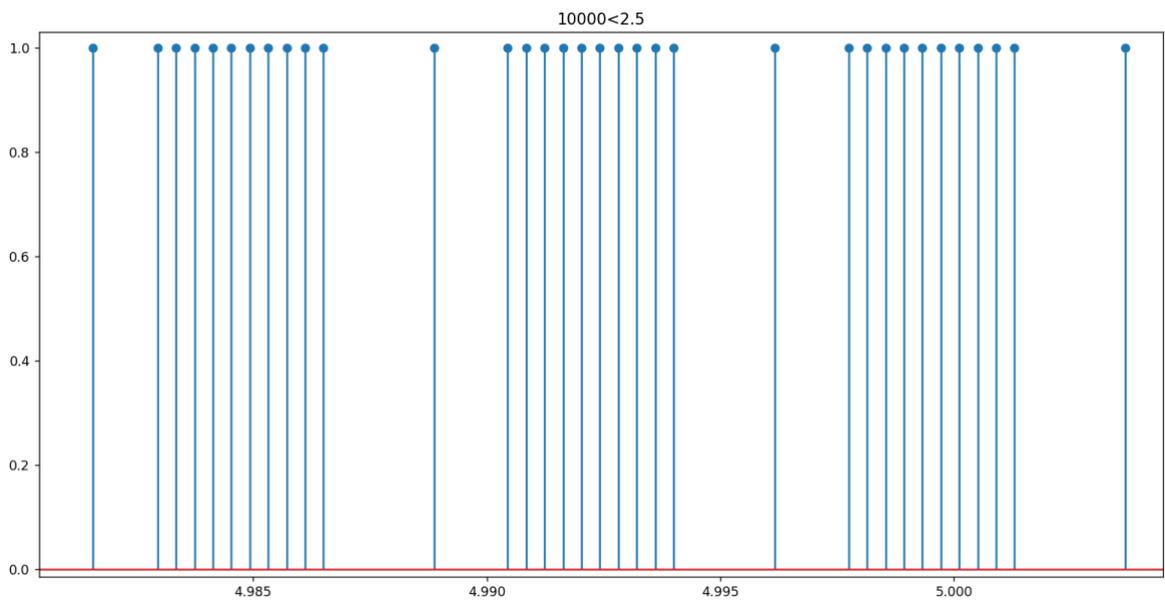


Figura 89. Forma de onda de 10 kHz a 2.5 m.

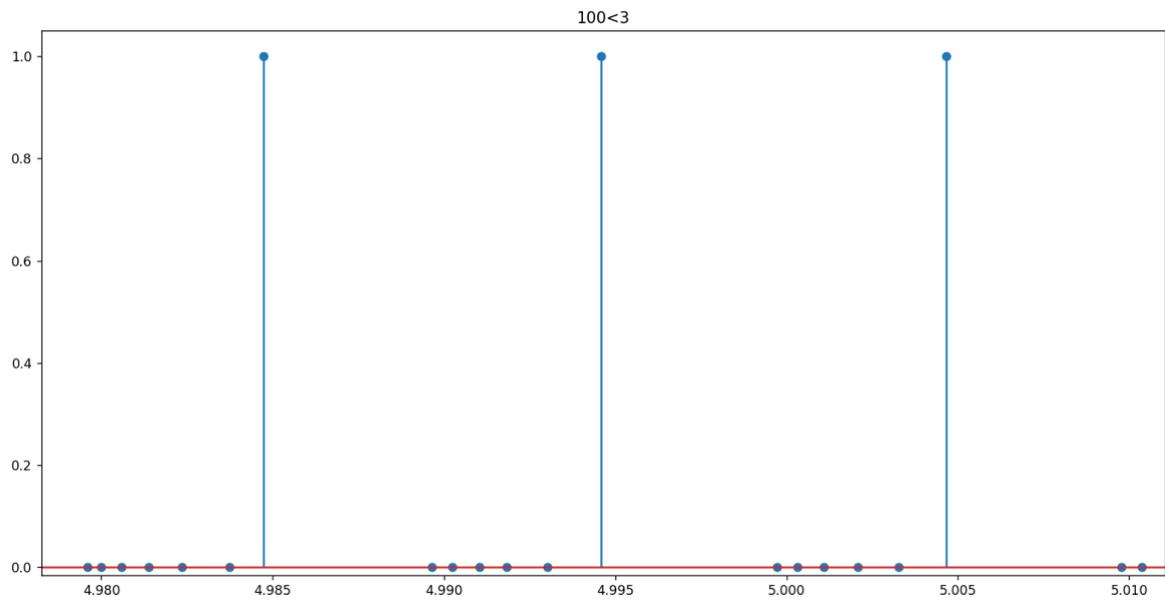


Figura 90. Forma de onda de 100 Hz a 3 m.

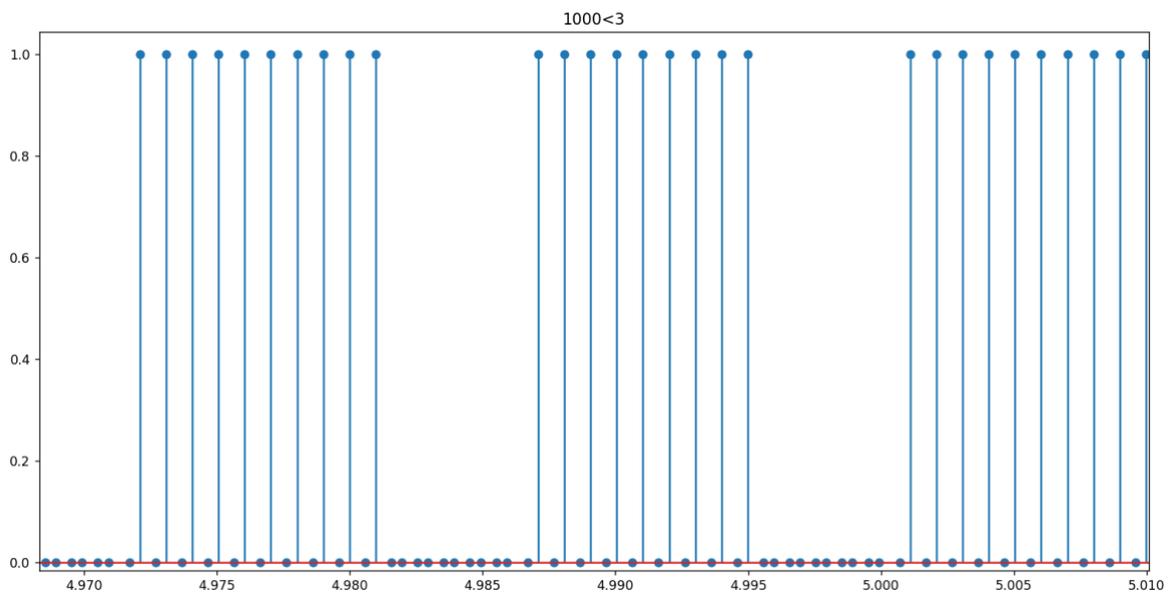


Figura 91. Forma de onda de 1 kHz a 3 m.

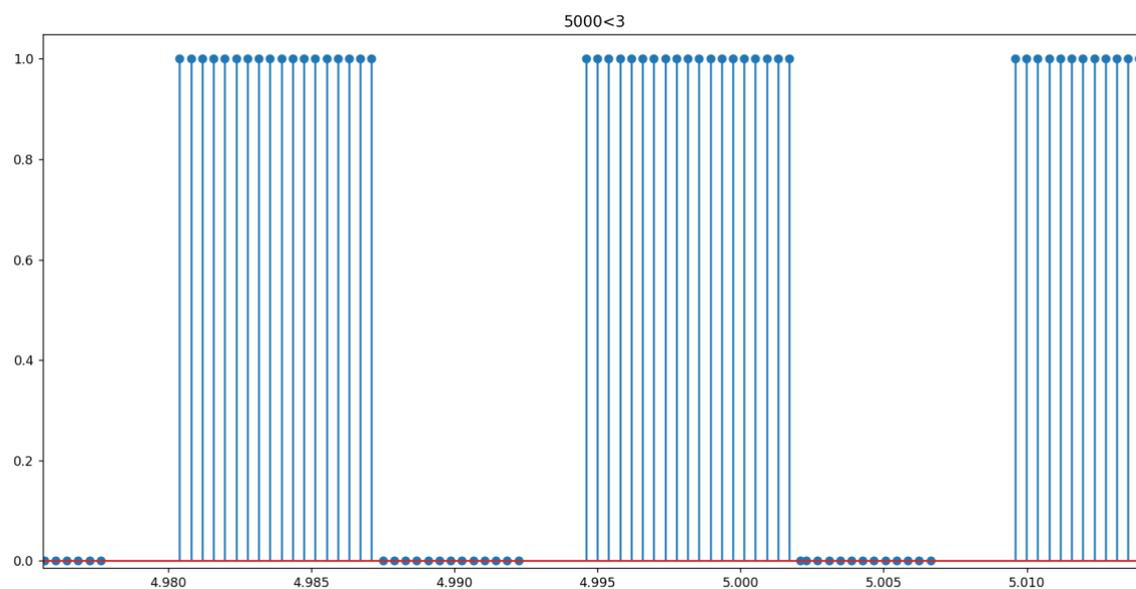


Figura 92. Forma de onda de 5 kHz a 3 m.

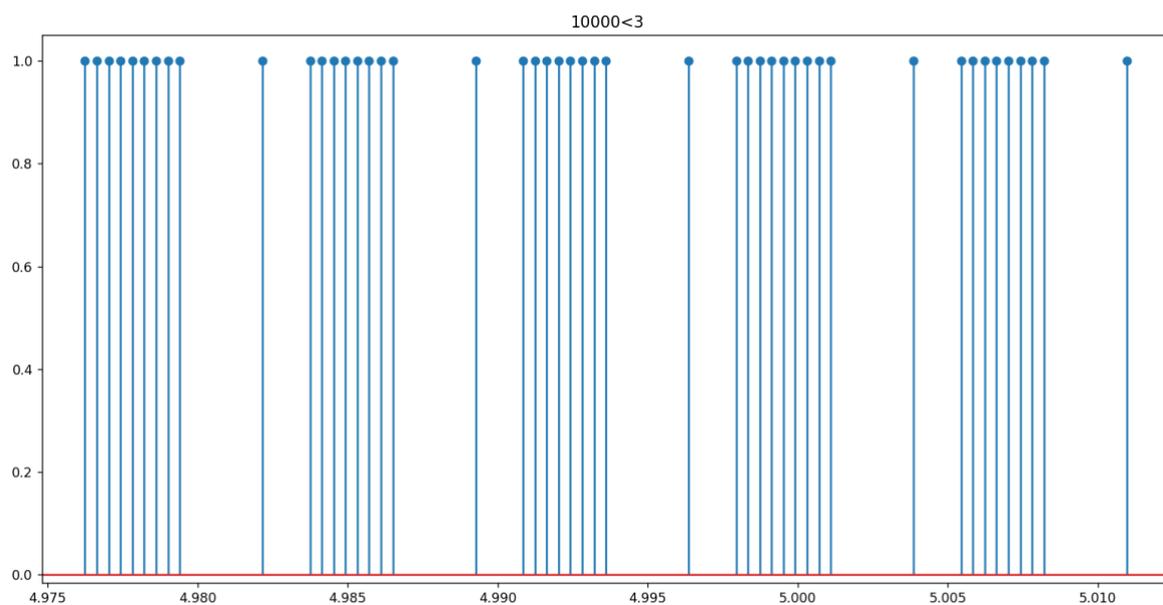


Figura 93. Forma de onda de 10 kHz a 3 m.

Tanto para 2.5 como para 3 m los datos son muy parecidos. Se sigue sin recibir polaridades tipo OFF debido a lo comentado en figuras anteriores y los mejores resultados los siguen obteniendo las frecuencias intermedias. Asimismo, podemos observar algunas de estas mismas gráficas en el lado continuo y ver sus diferencias de la Figura 94 hasta la Figura 101.

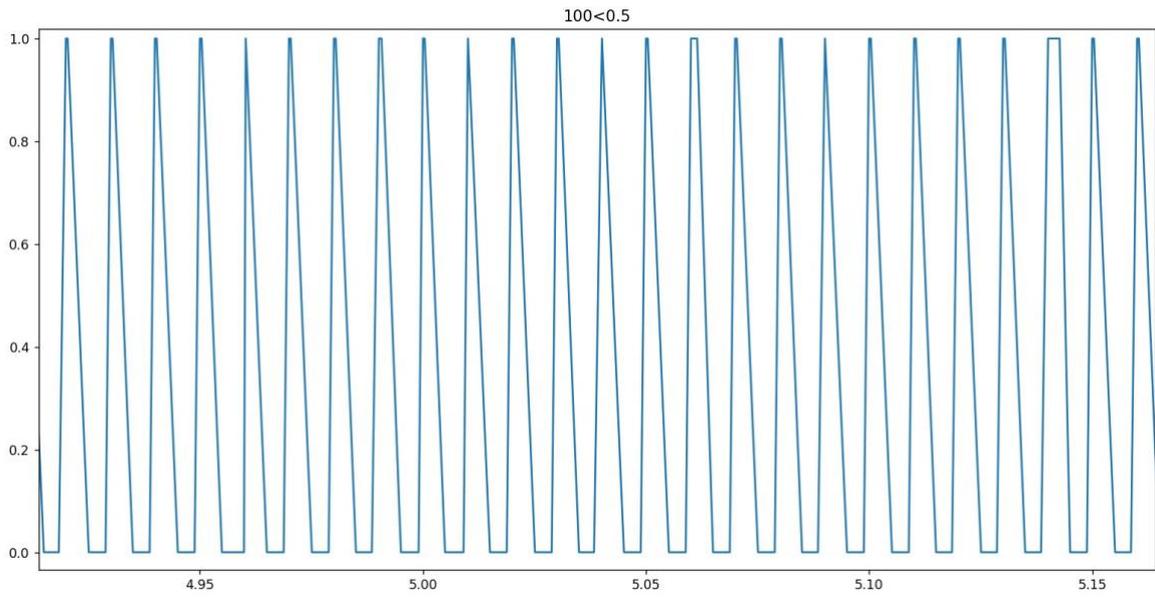


Figura 94. Forma de onda continua de 100 Hz a 0.5 m.

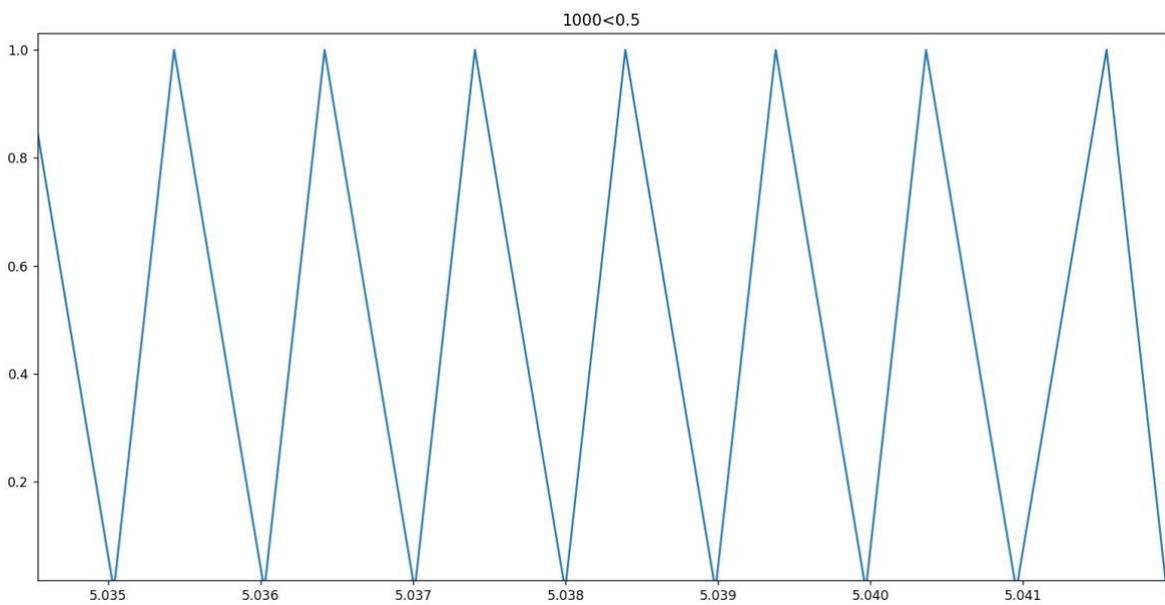


Figura 95. Forma de onda continua de 1 kHz a 0.5 m.



Figura 96. Forma de onda continua de 5 kHz a 0.5 m.

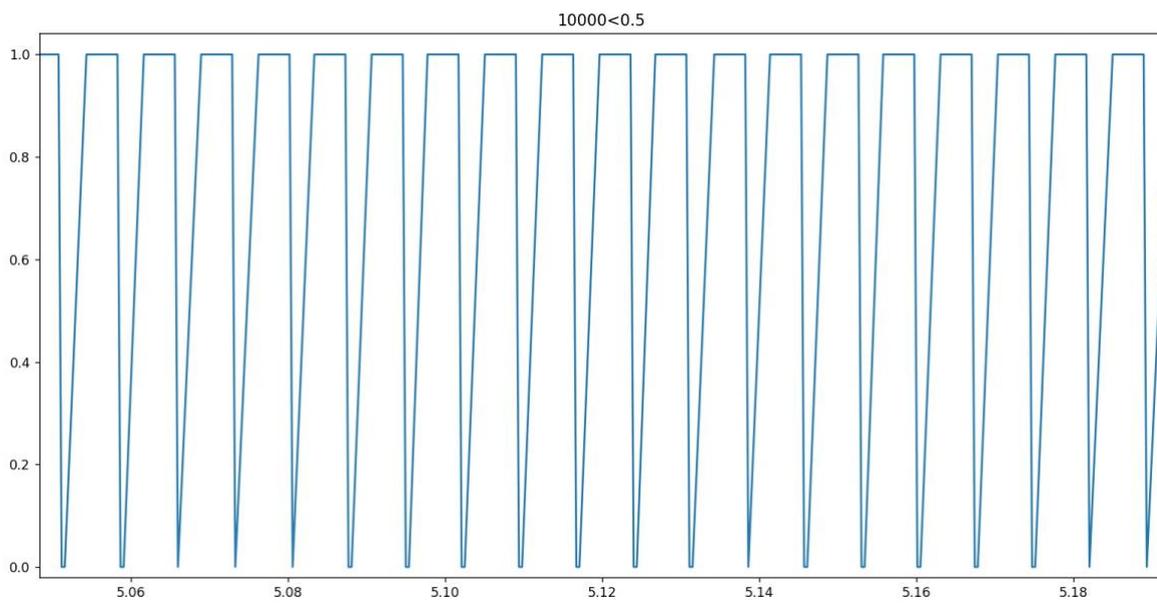


Figura 97. Forma de onda continua de 10 kHz a 0.5 m.

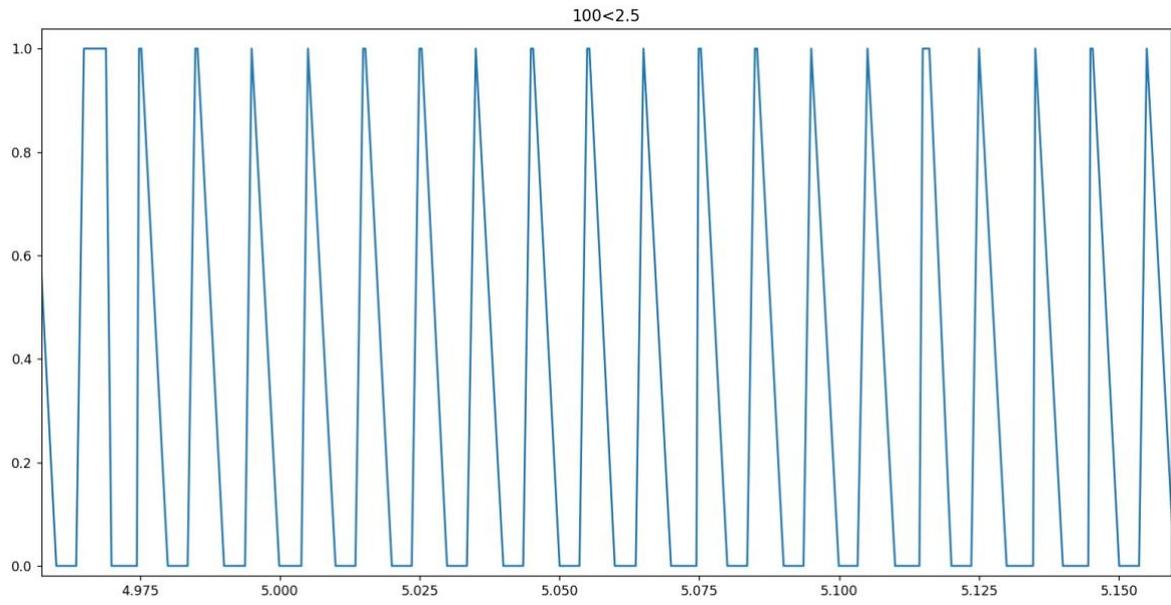


Figura 98. Forma de onda continua de 100 Hz a 2.5 m.

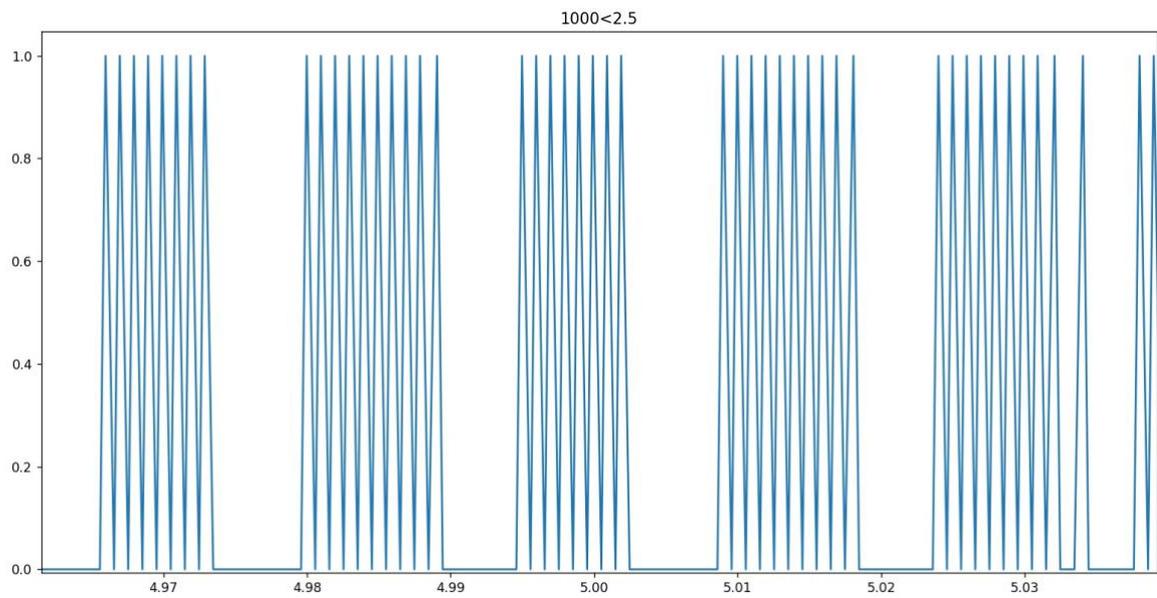


Figura 99. Forma de onda continua de 1 kHz a 2.5 m.

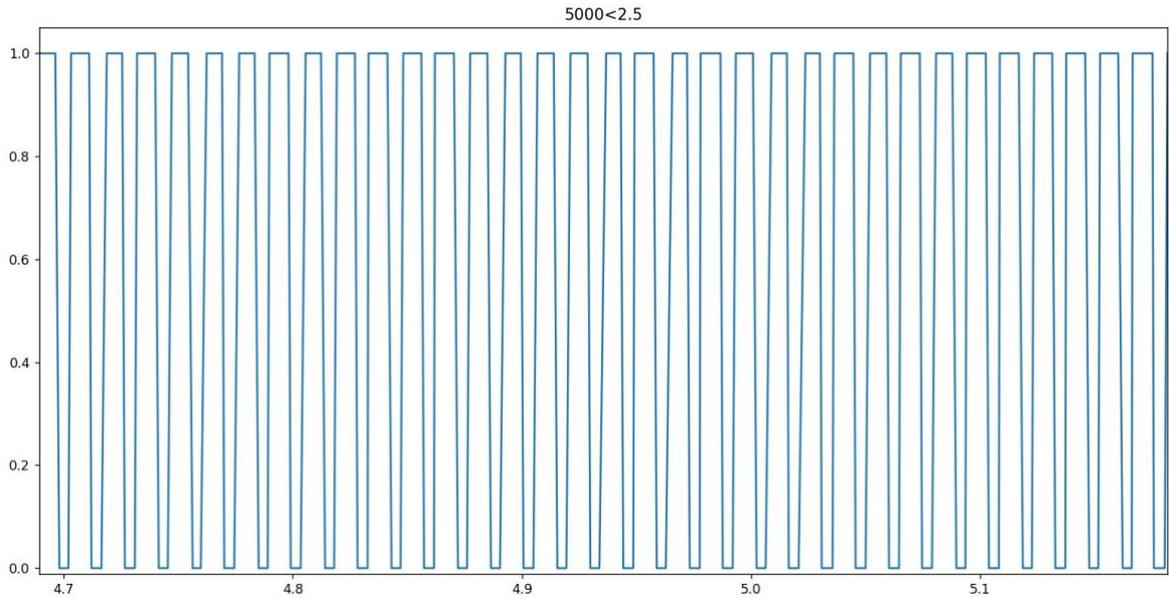


Figura 100. Forma de onda continua de 5 kHz a 2.5 m.

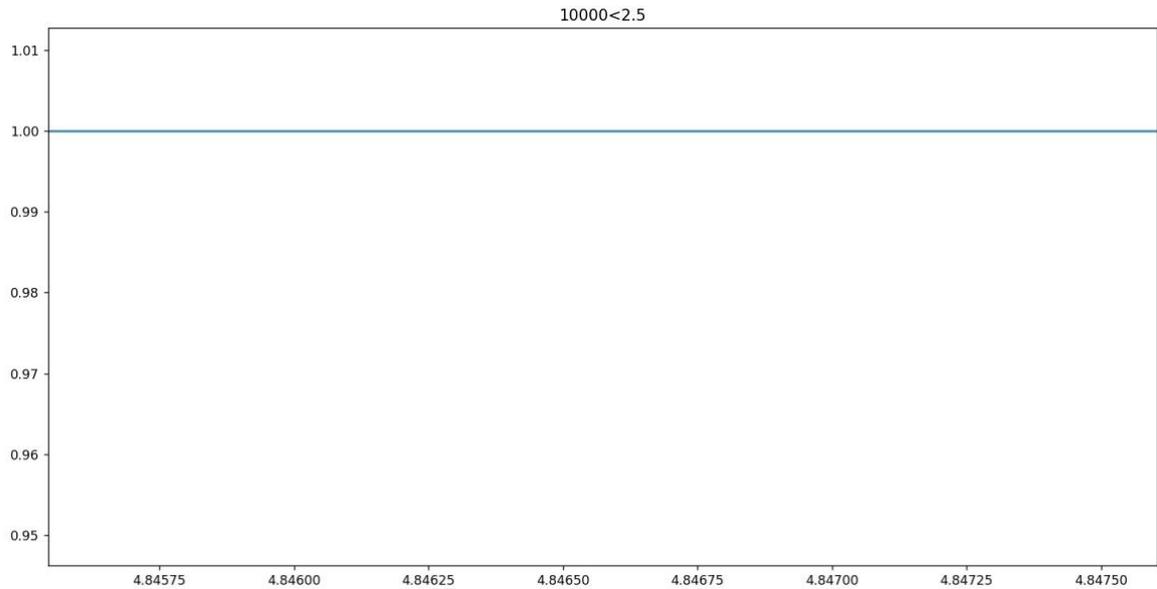


Figura 101. Forma de onda continua de 10 kHz a 2.5 m.

De esta manera se observa que para la medida de 0.5 metros se obtienen unos valores adecuados y esperables después de ver su forma onda discreta. Al pasar del dominio discreto al continuo la señal cuadrada se convierte en una sinusoidal, pero al estar los eventos tan cercanos en el tiempo por la frecuencia aplicada, no le da tiempo a la señal para terminar de formarse, pero mantiene la tendencia sinusoidal. Además, debido a los umbrales de ON y OFF, la curva se aplana por ambos lados (0 y 1). Por otro lado, para la medida de 2.5 metros se observan valores similares como en la anterior medida, pero con la salvedad de que en la frecuencia de 10 kHz no hay eventos. Este resultado es esperable ya que, como se ha mencionado en los apartados anteriores, no se reciben polaridades OFF (el sistema no recibe eventos por encima de 10 kHz).

En definitiva, el número de eventos depende de la frecuencia a la que se encuentra la señal, que depende de su derivada. En la psicofísica de la visión humana existe un concepto llamado *flicker* o fusión de parpadeo, que consiste en la frecuencia crítica a la que un estímulo luminoso intermitente parece completamente estable para el observador humano medio. De esta manera, la cámara DVS, al igual que el ojo humano se adapta a estos cambios de altas frecuencias e integra todos los eventos de subida en la forma de onda, haciendo imperceptible el cambio de señal de ON a OFF. Asimismo, para una tasa de muestreo menor (como ocurre para las medidas de 100 Hz) se diferencian claramente ambas polaridades en la derivada de la señal y la cámara es capaz de integrar el evento al completo.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1. Revisión de los objetivos

Los objetivos de este TFM han sido el estudio del comportamiento de los enlaces basados en DVS en interiores y el estudio de la viabilidad del desarrollo de receptores ópticos basados en cámaras DVS. Estos fueron llevados a cabo con la implementación de un algoritmo de Python, donde el sistema propuesto permite mecanismos eficientes de procesamiento de flujos DVS para explotar la velocidad de datos alcanzable de este tipo de cámaras a través de diferentes configuraciones de distancia y de frecuencia. El diseño propuesto aprovecha la propiedad de las cámaras basadas eventos que emiten cambios de brillo a nivel de píxel en lugar de frames de intensidad como ocurre con las cámaras tradicionales. Además, este tipo de cámaras ofrece diferentes ventajas como un rango dinámico mejorado, ausencia de desenfoque de movimiento y una latencia del orden de μs . Asimismo, aunque es una tecnología altamente novedosa y basada en la visión humana, no había sido debidamente estudiada con fines de comunicación, pero resulta ser un claro candidato para una amplia gama de enlaces OWC, presentando un nuevo paradigma sobre el modo en que se adquiere y procesa la información visual dinámica.

7.2. Conclusiones del análisis de los resultados

Se han realizado 2 tipos de medidas entre las que encontramos el cálculo del número de eventos por segundo y la forma de onda detectada. Se ha validado donde se encuentra el píxel de mayor energía y su valor asociado demostrando donde se produce la transmisión de datos del LED. Asimismo, se ha demostrado el efecto que se tiene sobre la cámara que el emisor se proyecte en un área de mayor o menor tamaño, obteniendo los mejores resultados para las primeras medidas de distancia y de frecuencias intermedias, resultando las frecuencias altas las peores para la recepción de eventos, llegando a ser imposible la recepción de eventos a frecuencias superiores a 10 kHz.

A partir de las especificaciones de la cámara DVS y de los resultados experimentales, demostramos que hay dos factores clave que influyen en el rendimiento de la comunicación. En primer lugar, la salida de una cámara DVS sólo se genera cuando hay un cambio en la intensidad de la luz y, por lo tanto, la forma de onda transmitida debe incorporar un cambio lo suficientemente grande como para activar los eventos en múltiples píxeles de la cámara. En segundo lugar, una cámara DVS tiene una limitación en el número máximo de eventos soportados, y por lo tanto la forma de onda transmitida debe minimizar su número de cambios para lograr un alto rendimiento. De esta manera, existen casos en los resultados obtenidos en los que los datos no se asemejan con lo esperado y esto se debe a que

el LED se encuentra muy cerca o la frecuencia de conmutación es demasiado alta, llegando al límite del BW del dispositivo.

7.3. Impacto del uso de cámaras DVS

A raíz de las conclusiones del análisis de los resultados se puede concluir en que este tipo de cámaras pueden ser utilizadas en aplicaciones de tiempo real como la robótica -donde el funcionamiento en condiciones de iluminación no controladas, la latencia y la potencia son importantes-, seguimiento y reconocimiento de objetos, odometría visual, monitorización de largo alcance en instalaciones de acuicultura en alta mar (investigación marina), monitorización ambiental (cambio climático), seguridad y comunicación entre infraestructuras y vehículos (sistemas de transporte inteligentes), etc. Además, en relación con las comunicaciones por luz se ha demostrado que OCC es una tecnología eficiente que puede proporcionar tanto comunicaciones como localización, pero los dispositivos DVS pueden mejorar el rendimiento de la tasa de datos de OCC manteniendo la capacidad de posicionamiento gracias al uso de la óptica de formación de imágenes. Este aumento puede aprovecharse para los fines del 6G, por ejemplo, para proporcionar apoyo al traspaso mediante dispositivo habilitados por luz (economía digital). De esta manera, este proyecto abre la veda a una tecnología con un amplio campo de investigación en crecimiento, donde se espera que aparezcan muchas más aplicaciones a medida que las cámaras basadas en eventos se difundan ampliamente en la sociedad.

7.4. Limitaciones del estudio

La salida de este tipo de cámaras se compone de una secuencia de eventos asíncronos en lugar de imágenes de intensidad real, con lo que no se pueden aplicar los algoritmos de visión tradicionales, por lo que se necesitan nuevos algoritmos que exploten la alta resolución temporal y la naturaleza asíncrona del sensor. Además, al ser una tecnología tan novedosa no hay referencias al respecto sobre técnicas a seguir, por lo que resulta difícil su estudio e implementación en los actuales sistemas de comunicaciones. Además, el sistema diseñado no soporta frecuencias de 10 kHz y superiores y es necesario una diferencia de iluminación abundante y un tiempo de recepción adecuado para que la cámara procese un evento y no múltiples mezclados entre sí. De esta forma, la frecuencia de conmutación del LED y la distancia de la medida protagonizan un papel crucial en el diseño del sistema.

CAPÍTULO 8: Pliego de condiciones

8.1. Introducción

En este capítulo, se procede a indicar los requisitos de HW de los equipos, herramientas SW e infraestructura empleadas para el desarrollo de este TFM.

8.2. Requisitos Hardware

Para el desarrollo del presente proyecto se han empleado una serie de herramientas HW que se detallan a continuación.

- **Ordenador portátil HP 15-DW1004NS.** Usado para instalar el SW de visualización y control de la cámara DV, ejecutar la lógica implementada a través del entorno de programación de Python y el procesamiento de las medidas de eventos.
- **Fuente de alimentación.** Con múltiples salidas en una unidad compacta suministra tensión eléctrica al diodo LED.
- **Generador de funciones.** Se encarga de generar una forma de onda con unas características específicas para controlar el parpadeo del diodo LED.
- **Kit DVXplorer.** Cámara basada en eventos de alta resolución usada para el entorno de pruebas. El kit contiene un micro-USB 3.0, la lente y el trípode. Se utiliza de receptor en el entorno de pruebas.
- **Protoboard.** PCB usada para el entorno de pruebas, donde se conecta el diodo LED conmutado.
- **Diodo LED verde.** Dispositivo que emite el paso de corriente y que al ser polarizado emite un haz de luz verde. Se utiliza de transmisor en el entorno de pruebas.
- **Transistor MOSFET IRF840A.** Elemento utilizado para realizar la conmutación del LED entre la FA y el GF.
- **Cable Ethernet.** Usado para establecer comunicación entre el GF y el ordenador.

- **Cables BNC bifurcado.** Utilizados para unir la FA y el GF a la *protoboard*.
- **Cables Dupont.** Se usan para conectar cualquier parte de la *protoboard*.

8.3. Requisitos Software

Las herramientas SW empleadas son las detalladas a continuación.

- **DV.** SW usado para el control, visualización y procesamiento de la cámara basada en eventos.
- **Microsoft Office 16.** Conjunto de aplicaciones ofimáticas destinadas a la creación, edición y almacenamiento de información. Se ha usado para la redacción y elaboración de este TFM.
- **Visual Studio Code (VSC).** Editor de código fuente usado para la implementación de la lógica computacional a través de Python.
- **Sistema operativo (SO) Windows 10.** Sistema operativo bajo el cual se ha realizado todo el proyecto.

8.4. Infraestructura

La infraestructura necesaria para la implementación de este TFM se detalla a continuación.

- **Cámara oscura.** Para proporcionar un aislamiento de las interferencias de luz durante el entorno de pruebas.

Las Palmas de Gran Canaria a 4 de septiembre de 2022

Fdo.: Alberto Ramos Monagas

CAPÍTULO 9: Presupuesto

9.1. Introducción

En este capítulo se estima el presupuesto del proyecto en base a las recomendaciones y pautas establecidas por el COITT en el 2008. De esta forma, el presupuesto se desglosa en distintas secciones en las que se han separado los costes asociados al desarrollo de este. Estos costes se dividen en:

- Recursos materiales.
- Recursos humanos.
- Amortización.
- Redacción del documento.
- Derechos del visado del COITT.
- Gastos de tramitación y envío.
- Aplicación de impuestos y presupuesto final.

9.2. Recursos Materiales

Nos referimos a recursos materiales como la agrupación de gastos que vienen dados por el uso de los recursos de HW y SW, que a su vez pueden tener costes asociados por el requerimiento de licencias para su uso.

La forma de estimar el coste final será mediante la amortización (Ecuación 7), donde se estipula un periodo de 4 años presuponiendo un sistema de amortización lineal. Para su cálculo, no se toma en consideración el valor de mantenimiento y el valor residual de los elementos al transcurrir su vida útil. El coste final solo tendrá en cuenta el periodo de uso de cada uno de los componentes durante el transcurso del TFM.

$$C_f = \frac{V_{ad} - V_{res}}{A_u} \quad \text{EC.7}$$

Donde:

C_f es el coste final.

V_{ad} es el valor de adquisición.

V_{res} es el valor residual.

A_u son los años de vida útil.

Como el presente proyecto tiene una duración de 300 horas distribuidas de manera aproximada en 4 meses, y este periodo es inferior a los 4 años del coste estipulado de amortización, dicho coste será el derivado de los 4 meses en los que se desarrolla el proyecto.

9.1. Recursos Software

Para la realización de este TFM se dispusieron de los siguientes recursos SW mostrados en la Tabla 16. El coste final dependerá del tiempo de utilización de cada uno de ellos durante el periodo de trabajo correspondiente, considerándose 3 años como la vida útil para cada uno de ellos.

Tabla 16. Coste de los recursos software.

Recursos Software				
Descripción	Tiempo	Valor de adquisición	Amortización anual	Coste final
SO Windows 10	4 meses	145.00 €	48.33 €	12.08 €
Microsoft Office	4 meses	67.00 €	23.33 €	5.58 €
VSC	4 meses	0.00 €	0.00 €	0.00 €
DV	2 meses	0.00 €	0.00 €	0.00 €
Total:		212.0 €	71.66 €	17.66 €

Por consiguiente, el coste final para equipos SW es de DIECISIETE EUROS CON SESENTA Y SEIS CÉNTIMOS (17.66 €).

9.2. Recursos Hardware

Entre los recursos HW empleados para el desarrollo de este proyecto se tiene en cuenta que los equipos fueron adquiridos antes de la realización de este TFM, más concretamente, por el laboratorio de fotónica del IDeTIC. Se considera que la vida útil de las cámaras y del ordenador usado es de 6 años, mientras que la del GF y FA de 5 años. Por otro lado, para los elementos de menor valor se considera una vida útil de 1 año. El resultado de los costes asociados a los recursos materiales HW son los que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Coste de los recursos hardware.

Recursos Hardware				
Descripción	Tiempo	Valor de adquisición	Amortización anual	Coste final
Ordenador portátil HP	4 meses	770.0 €	128.33 €	32.08 €
Kit DVXplorer	2 meses	3900.0 €	650.0 €	325.0 €
Fuente de alimentación	2 meses	816.59 €	163.61 €	81.80 €
Generador de funciones	2 meses	2769.69 €	553.93 €	276,96 €
Protoboard	2 meses	3.19 €	3.19 €	1.59 €
Diodo LED	2 meses	0.75 €	0.75 €	0.37 €
Transistor IRF840A	2 meses	8.69 €	8.69 €	4.34 €
Cable Ethernet	2 meses	2.67 €	2.67 €	1.33 €
Cables BNC	2 meses	19.36 €	19.36 €	9.68 €
Cables Dupont	2 meses	2.53 €	2.53 €	1,26 €
Total:		8290.28 €	1533.06 €	855.19 €

De igual forma, siguiendo el mismo procedimiento del apartado anterior, el coste final para equipos HW es de OCHOSIENTOS CINCUENTA Y CINCO EUROS CON DIECINUEVE CÉNTIOS (855.19 €).

9.3. Recursos Humanos

Se definen como costes de recursos humanos aquellos asociados al proyectado. Para calcular dicho coste se tiene en cuenta que se han sido empleados 4 meses a media jornada por parte del empleado en tareas de estudio previo, integración, realización de medidas y documentación de los resultados. Además, el proyecto se desarrolla dentro del entorno de investigación de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), siguiendo el tipo de tarifa correspondiente al personal con cargo de investigador técnico (máster) según la tabla de contrataciones de personal con cargos de proyectos, programas, convenios y contratos correspondientes al BOULPGC de julio de 2021 [235]. Por lo tanto, el coste a tiempo completo (7.5 horas diarias) es el que se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Coste de los recursos humanos.

Recursos Humanos			
Personal	Coste total mensual	Tiempo	Total
Ingeniero	1801.02 €	4 meses	7204.08 €

Por ende, el coste total de recursos humanos es de SIETE MIL DOSCIENTOS CUATRO EUROS CON 8 CÉNTIMOS (7204.08 €).

9.3. Redacción del documento

El importe de la redacción del proyecto se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$R = 0.07 \cdot P \cdot C_n \quad \text{EC.8}$$

Donde:

P es el presupuesto del proyecto.

C_n es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto. En este caso, el coeficiente está fijado a 1.00 para presupuestos menores a 30.050 €.

En la Tabla 19 se muestra el presupuesto calculado hasta el momento, donde los costes derivados de redacción del documento se obtienen sustituyendo los valores de la Ecuación 8.

Tabla 19. Presupuesto parcial.

Recurso	Coste
Recursos Materiales HW	855.19 €
Recursos Materiales SW	17.66 €
Recursos Humanos	7204.08 €
Total:	8076.93 €

Sustituyendo valores:

$$R = 0.07 \cdot 8076.93 \cdot 1.00 = 565.38 \text{ €} \quad \text{EC.8}$$

Por lo tanto, el coste libre de impuestos derivados de la redacción del proyecto asciende a los QUINIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS (565.38 €).

9.4. Derechos del visado del COITT

Para proyectos de carácter general [236], los gastos de visado del COITT se tarifican mediante la siguiente expresión:

$$R = 0.006 \cdot P_1 \cdot C_1 + 0.003 \cdot P_2 \cdot C_2 \quad \text{EC.9}$$

Donde:

P_1 es el presupuesto general del proyecto.

P_2 es el presupuesto de ejecución material que corresponde a la obra civil.

C_1 es el coeficiente reductor correspondiente a P_1 .

C_2 es el coeficiente reductor correspondiente a P_2 .

Por lo dicho anteriormente, el coeficiente C_1 está fijado a 1.00. En este caso, para el desarrollo de este proyecto no se ha requerido obra civil, por lo que, el valor de P_2 es de 0.00 €. Finalmente, el valor del presupuesto P_1 se calcula sumando los costes de las secciones anteriores. Dichos costes vienen incluidos en la Tabla 20.

Tabla 20. Presupuesto con el coste de redacción.

Recurso	Coste
Recursos Materiales HW	855.19 €
Recursos Materiales SW	17.66 €
Recursos Humanos	7204.08 €
Redacción del documento	565.38 €
Total:	8642.31 €

Se sustituyen los valores en la Ecuación 9:

$$R = 0.007 \cdot 8642.31 \cdot 1,00 = 604.96 \text{ €} \quad \text{EC.9}$$

El coste por derecho de visado asciende hasta los SEISCIENTOS CUATRO EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS (604.96 €).

9.5. Gastos de tramitación y envío

Para documentos de carácter general [236] visados por vía telemática, tienen un coste de seis euros con un céntimo (6.01 €).

9.6. Presupuesto total

El presupuesto final con todos los apartados desglosados en la Tabla 21 asciende a la cuantía de NUEVE MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y TRES EUROS CON VEINTIOCHO CÉNTIMOS (9253.28 €). A esta cantidad se le suma el Impuesto General Indirecto Canario (IGIC, equivalente a un 7%), obteniéndose el coste total del trabajo presentado.

Tabla 21. Presupuesto total.

Presupuesto Final	
Partidas	Totales
Recursos Materiales	
- Recursos HW	855.19 €
- Recursos SW	17.66 €
Recursos Humanos	7204.08 €
Total parcial:	8076.93 €
Redacción del documento	565.38 €
Visado del COITT	604.96 €
Gastos de tramitación y envío	6.01 €
Total:	9253.28 €
IGIC (7%)	647.72 €
Total tras impuestos:	9901 €

El presupuesto total de este TFM asciende a NUEVE MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y UN EUROS.

Las Palmas de Gran Canaria a 4 de septiembre de 2022

Fdo.: Alberto Ramos Monagas

BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA

- [1]. Cisco Corporation, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2018, 2014.
- [2]. Parth H. Pathak, Xiaotao Feng, Pengfei Hu, y Prasant Mohapatra. (2015). “Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges”. IEEE Communications surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 4, Fourth Quarte, 2047-2077.
- [3]. Chowdhury, M. Z., Hasan, M. K., Shahjalal, M., Hossan, M. T., & Jang, Y. M. (2020). Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 22(2). <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2966855>.
- [4]. Rahman, M. T., Bakibillah, A. S. M., Parthiban, R., & Bakaul, M. (2020). Review of advanced techniques for multi-gigabit visible light communication. IET Optoelectronics, 14(6). <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2019.0120>.
- [5]. Milovancev, D., Vokic, N., Hubel, H., & Schrenk, B. (2020). Gb/s Visible Light Communication With Low- Cost Receiver Based on Single-Color LED. Journal of Lightwave Technology, 38(12). <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2994974>.
- [6]. Li, M. (2018). On Performance of Optical Wireless Communication With Spatial Multiplexing Towards 5-G. IEEE Access, 6. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2837145>.
- [7]. An, L., Shen, H., Wang, J., Zeng, Y., & Ran, R. (2020). Energy Efficiency Optimization for MIMO Visible Light Communication Systems. IEEE Wireless Communications Letters, 9(4). <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2958802>.
- [8]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (4 de marzo de 2009). IEEE 802.15 WPANTM Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication. Recurso digital: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>.
- [9]. I. Corporativa, “Lifi, Internet a la velocidad de la luz,” Iberdrola. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/tecnologia-lifi>.
- [10]. Md. Shahjalal, Moh. Khalid Hasan, Mostada Zaman Chowdhury, y Yeong Min Jang, (2019). “Future Optical Camera Communication Based Applications and Opportunities for 5G and Beyond”. Department of Electronics Engineering, Kookmin University, Scoul, Korea. IEEE ICAIIC 2019.
- [11]. N. T. Le, M. A. Hossain, and Y. M. Jang, “A survey of design and implementation for optical camera communication,” Signal Process. Image Commun. 53, 95–109 (2017).
- [12]. Z. Ghassemlooy, P. Luo, and S. Zvanovec, “Optical Camera Communications,” in Optical Wireless Communications: An Emerging Technology, M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, and E. Udvary, eds. (Springer, 2016), pp. 547–568.

- [13]. Le, N. T., Ifthekhar, M. S., Jang, Y. M., & Saha, N. (2015). Survey on optical camera communications: challenges and opportunities. *IET Optoelectronics*, 9(5). <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2014.0151>.
- [14]. Cossu, G., Sturniolo, A., & Ciaramella, E. (2020). Modelization and Characterization of a CMOS Camera as an Optical Real-Time Oscilloscope. *IEEE Photonics Journal*, 12(6). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3032951>.
- [15]. "Explain like I'm five: Optical Camera Communications," Cristo JV. [Online]. Available: <https://cristojv.com/explain-like-im-five-optical-camera-communications.html>.
- [16]. Lichtsteiner, P., Posch, C., & Delbruck, T. (2008). A 128× 128 120 dB 15 μs Latency Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43(2). <https://doi.org/10.1109/JSSC.2007.914337>.
- [17]. "Specifications -current models," Inivation.com. [Online]. Available: <https://inivation.com/wp-content/uploads/2021/08/2021-08-iniVation-devices-Specifications.pdf>.
- [18]. Belbachir, A. N., Hofstatter, M., Litzemberger, M., & Schon, P. (2011). High-Speed Embedded-Object Analysis Using a Dual-Line Timed-Address-Event Temporal-Contrast Vision Sensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(3). <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2095390>.
- [19]. Saighi, S., & Chiodelli, L. (2019). Ultra-Low Power Event-Based Camera for Autonomous Vehicle. *Smart Systems Integration; 13th International Conference and Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems*, 1–2.
- [20]. Dong, S., Bi, Z., Tian, Y., & Huang, T. (2019). Spike Coding for Dynamic Vision Sensor in Intelligent Driving. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2872984>.
- [21]. D. Liang, R. Kreiser, C. Nielsen, N. Qiao, Y. Sandamirskaya and G. Indiveri, "Neural State Machines for Robust Learning and Control of Neuromorphic Agents," in *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 679-689, Dec. 2019, doi: 10.1109/JETCAS.2019.2951442.
- [22]. Suh, Y., Choi, S., Ito, M., Kim, J., Lee, Y., Seo, J., Jung, H., Yeo, D.-H., Namgung, S., Bong, J., Yoo, S., Shin, S.-H., Kwon, D., Kang, P., Kim, S., Na, H., Hwang, K., Shin, C., Kim, J.-S., ... Park, Y. (2020, October). A 1280×960 Dynamic Vision Sensor with a 4.95-μm Pixel Pitch and Motion Artifact Minimization. *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9180436>.
- [23]. R. Baldemair et al., "Evolving wireless communications: Addressing the challenges and expectations of the future", *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 24-30, Mar. 2013.

- [24]. A. K. Majumder, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel" in *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, New York, NY, USA:Springer-Verlag, pp. 57-108, 2008.
- [25]. S. Arnon, J.R. Barry, G.K. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal (Eds.): *Advanced Optical Wireless Communication*, Cambridge University Press, July 2012.
- [26]. A. Mahdy and J. S. Deogun, "Wireless optical communications: A survey", *Proc. IEEE WCNC*, pp. 2399-2404, 2004.
- [27]. J. R. Barry, J. M. Kahn, E. A. Lee and D. G. Messerschmitt, "High-speed nondirective optical communication for wireless networks", *IEEE Netw.*, vol. 5, no. 6, pp. 44-54, Nov. 1991.
- [28]. M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications—An emerging technology", *Proc. 16th ICTON*, pp. 1-7, Jul. 2014.
- [29]. Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu and J. Cheng, "Emerging Optical Wireless Communications-Advances and Challenges," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 1738-1749, Sept. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2458511.
- [30]. M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam and Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819-9840, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792419R.
- [31]. A. Burton, H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, E. Bentley and C. Botella, " Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4 \times 4 MIMO ", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 9, pp. 945-948, Mar. 2014.
- [32]. C. B. Naila, K. Wakamori, M. Matsumoto, A. Bekkali and K. Tsukamoto, "Transmission analysis of digital TV signals over a radio-on-FSO channel", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 8, pp. 137-144, Aug. 2012.
- [33]. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on free space optical communication: A communication theory perspective", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, 4th Quart. 2014.
- [34]. J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, Feb. 1997.
- [35]. A. K. Majumder, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel" in *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, New York, NY, USA:Springer-Verlag, pp. 57-108, 2008.
- [36]. R. M. Sova et al., "80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal", *Proc. SPIE*, vol. 6304, 2006.
- [37]. P. A. Haigh et al., "Exploiting equalization techniques for improving data rates in organic optoelectronic devices for visible light communications", *J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 19, pp. 3081-3088, Oct. 2012.

- [38]. K. Tsukamoto, A. Hashimoto, Y. Aburakawa and M. Matsumoto, "The case for free space", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, no. 5, pp. 84-92, Aug. 2009.
- [39]. D. Bykhovsky and S. Arnon, "Multiple access resource allocation in visible light communication systems", *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1594-1600, Apr. 2014.
- [40]. *Visible Light Communication*, Cambridge, U.K.:Cambridge Univ. Press, Feb. 2015.
- [41]. R. F. Karlicek, "Smart lighting—Beyond simple illumination", *Proc. IEEE Photon. Soc. Summer Top. Meet. Ser.*, pp. 147-148, 2012.
- [42]. R. V. Steele, "The story of a new light source", *Nat. Photon.*, vol. 1, no. 1, pp. 25-26, Jan. 2007.
- [43]. Y. Arimoto, "Compact free-space optical terminal for multi-gigabit signal transmissions with a single-mode fiber", *Proc. SPIE Free-Space Laser Commun. Technol. XXI*, 2009.
- [44]. A. Boucouvalas, P. Chatzimisios, Z. Ghassemlooy, M. Uysal and K. Yiannopoulos, "Standards for indoor optical wireless communications", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 24-31, Mar. 2015
- [45]. T. Kishi, H. Tanaka, Y. Umeda and O. Takyu, "A high-speed LED driver that sweeps out the remaining carriers for visible light communications", *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 239-249, Jan. 2014.
- [46]. IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication, Mar. 2015, [online] Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>.
- [47]. P. A. Haigh et al., "Development of a visible light communications system for optical wireless local area networks", *Proc. ComComAp Conf.*, pp. 351-355, 2012.
- [48]. S. G. Wilson, M. Brandt-Pearce, Q. Cao and M. Baedke, "Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 9, pp. 1901-1910, Sep. 2005.
- [49]. A. Burton, H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, E. Bentley and C. Botella, " Experimental demonstration of 50-Mb/s visible light communications using 4 x 4 MIMO ", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, no. 9, pp. 945-948, Mar. 2014.
- [50]. S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*, Cambridge, U.K.:Cambridge Univ. Press, Mar. 2015.
- [51]. M. Ayyash et al., "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: Concepts opportunities and challenges", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, Feb. 2016.
- [52]. S. Li, A. Pandharipande and F. M. J. Willems, "Unidirectional visible light communication and illumination with LEDs", *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 23, pp. 8617-8626, Dec. 2016.
- [53]. W. Yuanquan and C. Nan, "A high-speed bi-directional visible light communication system based on RGB-LED", *China Commun.*, vol. 11, no. 9, pp. 40-44, Mar. 2014.

- [54]. H. Haas, L. Yin, Y. Wang and C. Chen, "What is LiFi?", *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, Mar. 2016.
- [55]. M. Vasuja, A. Mishra, U. S. Chauhan, D. Chandola and S. Kapoor, "Image Transmission Using Li-Fi", *Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, 2018.
- [56]. K. T. Swami and A. A. Moghe, "A Review of LiFi Technology," *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAIE51050.2020.9358340.
- [57]. R. Kizer, A. Mantica, N. McNeill, J. Tobin and S. Jones, "Li-fi-an-overview-part-1-purpose-and-function", *IEEE Internet Policy Newsletter*, June 2018, [online] Available: <https://internetinitiative.ieee.org/newsletter/june-2018/>.
- [58]. R. Shanmugasundaram, S. P. Vadanam and V. Dharmarajan, "Li-Fi Based Automatic Traffic Signal Control for Emergency Vehicles", in *Second International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications (ICAECC)*, 2018.
- [59]. R. Mahendran, "Integrated LiFi (Light Fidelity) for smart communication through illumination", *International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, pp. 53-56, 2016.
- [60]. D. Kedar and S. Arnon, "Urban optical wireless communication networks: The main challenges and possible solutions", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 5, pp. S2-S7, May 2004.
- [61]. R. Paudel, Z. Ghassemlooy, H. Le-Minh and S. Rajbhandari, "Modelling of free space optical link for ground-to-train communications using a Gaussian source", *IET Optoelectron.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-8, Feb. 2013.
- [62]. J. Fadlullah and M. Kavehrad, "Indoor high-bandwidth optical wireless links for sensor networks", *J. Lightw. Technol.*, vol. 28, pp. 3086-3094, Nov. 2010.
- [63]. W. Ke, S. A. Nirmalathas, C. Lim and E. Skafidas, "Ultra-broadband optical wireless communication system with single channel imaging receiver and multi-mode fiber for personal area networks", *Proc. Int. Top. Meet. MWP*, pp. 76-79, 2012.
- [64]. D. Liwei, L. Fang, Z. Yu and W. Yongjin, "The demonstration of wireless access via visible light communications", *Proc. Int. Conf. WCSP*, pp. 1-4, 2013.
- [65]. Harald Hass, Jaafar Elmirghani, Ian White. 2020 Optical wireless communication, doi.org/10.1098/rsta.2020.0051.
- [66]. O'Brien DC, Zeng L, Le-Minh H, Faulkner G, Walewski JW, Randel S. 2008 Visible light communications: challenges and possibilities. In *IEEE 19th Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, France, 15–18 September 2008, pp. 1–5. IEEE.

- [67]. Huang X, Wang Z, Shi J, Wang Y, Chi N. 2015 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver. *Opt. Express* 23, 22034, doi:10.1364/OE.23.022034.
- [68]. Bian R, Tavakkolnia I, Haas H. 2019 15.73 Gb/s visible light communication with off-the-shelf LEDs. *J. Light. Technol.* 37, 2418–2424, doi:10.1109/JLT.2019.2906464.
- [69]. H. Haas, J. Elmirghani, and I. White, “Optical wireless communication,” *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 378, no. 2169, p. 20200051, 2020.
- [70]. Burla M et al. 2019 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics. *APL Photonics* 4, 056106, doi:10.1063/1.5086868.
- [71]. Oh CW, Cao Z, Mekonnen KA, Tangdiongga E, Koonen AMJ. 2017 Low-crosstalk full-duplex all-optical indoor wireless transmission with carrier recovery. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 29, 539–542, doi:10.1109/LPT.2017.2664584.
- [72]. Wang K, Nirmalathas A, Lim C, Skafidas E. 2011 4×12.5 Gb/s WDM optical wireless communication system for indoor applications. *IEEE J. Light. Technol.* 29, 1988–1996, doi:10.1109/JLT.2011.2155622.
- [73]. British Standards Institution (BSI), Std. 2014 Safety of laser products. Equipment classification and requirements. BS EN 60 825-1.
- [74]. Taylor MT, Hranilovic S. 2013 Angular diversity approach to indoor positioning using visible light. In *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2013*, Atlanta, GA, 9–13 December 2013, pp. 1093–1098. IEEE.
- [75]. Chen Z, Basnayaka DA, Haas H. 2017 Space division multiple access for optical attocell network using angle diversity transmitters. *J. Light. Technol.* 35, 2118–2131, doi:10.1109/JLT.2017.2670367.
- [76]. O'Brien D et al. 2014 Visible light communications: improving data rate, link margin and field of view. In *IEEE Photonics Conf., IPC 2014.*, San Diego, CA, 12–16 October 2014. IEEE.
- [77]. Collins S, O'Brien DC, Watt A. 2014 High gain, wide field of view concentrator for optical communications. *Opt. Lett.* 39, 1756, doi:10.1364/OL.39.001756.
- [78]. O'Brien D, Rajbhandari S, Chun H. 2020 Transmitter and receiver technologies for optical wireless. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190182, doi:10.1098/rsta.2019.0182.
- [79]. Kassem A, Darwazeh I. 2019 A high bandwidth modified regulated cascode TIA for high capacitance photodiodes in VLC. In *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, Sapporo, Japan, 26–29 May 2019, pp. 1–5. IEEE.
- [80]. Miramirkhani F, Uysal M. 2020 Channel modelling for indoor visible light communications. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190187, doi:10.1098/rsta.2019.0187.
- [81]. Chaaban A, Hranilovic S. 2020 Capacity of optical wireless communication channels. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190184, doi:10.1098/rsta.2019.0184.

- [82]. Lowery AJ. 2020 Spectrally efficient optical orthogonal frequency division multiplexing. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190180, doi:10.1098/rsta.2019.0180.
- [83]. Wang Z, Chen J. 2020 Networked multiple-input-multiple-output for optical wireless communication systems. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190189, doi:10.1098/rsta.2019.0189.
- [84]. Wen M, Zheng B, Kim KJ, Di Renzo M, Tsiftsis TA, Chen KC, Al-Dhahir N. 2019 A survey on spatial modulation in emerging wireless systems: research progresses and applications. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 37, 1949–1972, doi:10.1109/JSAC.2019.2929453.
- [85]. Cogalan T, Haas H, Panayirci E. 2020 Optical spatial modulation design. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190195, doi:10.1098/rsta.2019.0195.
- [86]. Ding Z, Yang Z, Fan P, Poor HV. 2014 On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users. *IEEE Signal Process. Lett.* 21, 1501–1505, doi:10.1109/LSP.2014.2343971.
- [87]. Abdalla I, Rahaim MB, Little TDC. 2020 Interference in multi-user optical wireless communications systems. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190190, doi:10.1098/rsta.2019.0190.
- [88]. Haas H, Yin L, Chen C, Videv S, Parol D, Poves E, Alshaer H, Islam MS. 2020 Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi. *J. Opt. Commun. Netw.* 12, A190–A203, doi:10.1364/JOCN.12.00A190.
- [89]. Alsulami OZ, Alahmadi AA, Saeed SOM, Mohamed SH, El-Gorashi TEH, Alresheedi MT, Elmoghani JMH. 2020 Optimum resource allocation in optical wireless systems with energy-efficient fog and cloud architectures. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20190188, doi:10.1098/rsta.2019.0188.
- [90]. Shahjalal, M.; Hasan, M.K.; Chowdhury, M.Z.; Jang, Y.M. Future Optical Camera Communication Based Applications and Opportunities for 5G and beyond. In *Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2019, Okinawa, Japan, 11–13 February 2019*.
- [91]. N. Saeed, S. Guo, K.-H. Park, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Optical camera communications: Survey, use cases, challenges, and future trends,” *arXiv [eess.IV]*, 2018.
- [92]. Haruta, T.; Nakajima, T.; Hashizume, J.; Umebayashi, T.; Takahashi, H.; Taniguchi, K.; Kuroda, M.; Sumihiro, H.; Enoki, K.; Yamasaki, T.; et al. 4.6 A 1/2.3inch 20Mpixel 3-layer stacked CMOS. In *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 5–9 February 2017*.
- [93]. Nguyen, T.; Islam, A.; Yamazato, T.; Jang, Y.M. Technical Issues on IEEE 802.15.7m Image Sensor Communication Standardization. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 213–218.
- [94]. Saha, N.; Ifthekhar, M.; Shareef, N.; Le, T.; Jang, Y.M. Survey on optical camera communications: Challenges and opportunities. *IET Optoelectron.* 2015, 9, 172–183.

- [95]. IEEE. IEEE 802.15.7-2011—IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. IEEE Standards Association. 6 September 2011. Available online: https://standards.ieee.org/standard/802_15_7-2011.html.
- [96]. Nguyen, T.; Islam, A.; Hossain, M.T.; Jang, Y.M. Current Status and Performance Analysis of Optical Camera Communication Technologies for 5G Networks. *IEEE Access* 2017, 5, 4574–4594.
- [97]. Ghassemlooy, Z.; Popoola, W.; Rajbhandari, S. *Optical Wireless Communications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2013.
- [98]. Le, N.T.; Hossain, M.A.; Jang, Y.M. A Survey of Design and Implementation for Optical Camera Communication. *Signal Process. Image Commun.* 2017, 53, 95–109.
- [99]. A. Mederos-Barrera, C. Jurado-Verdu, V. Guerra, J. Rabadan, and R. Perez-Jimenez, “Design and Experimental Characterization of a Discovery and Tracking System for Optical Camera Communications,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 2925, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21092925.
- [100]. W. Liu and Z. Xu, “Some practical constraints and solutions for optical camera communication,” *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 378, no. 2169, p. 20190191, 2020.
- [101]. Wang Z, Wang Q, Huang W, Xu Z. 2017 Visible light communications: modulation and signal processing. New York, NY: John Wiley & Sons.
- [102]. R.D. Roberts, Undersampled frequency shift ON-OFF keying (UFSOOK) for camera communication (CamCom), in: *Proceeding of Wireless and Optical Communication Conference*, May 2013, pp. 645–648.
- [103]. Ashwin Ashok, Marco Gruteser, Narayan Mandayam, Kristin Dana, Characterizing multiplexing and diversity in visual MIMO in: *Proceeding of the 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, Mar. 2011, pp. 1–6.
- [104]. Q. Wang, M. Zhou, K. Ren, T. Lei, J. Li, Z. Wang, RainBar: robust application-driven visual communication using color barcodes, in: *Proceeding of IEEE the 35th International Conference on Distributed Computing Systems*, July 2015, pp. 537–546.
- [105]. A. Ramos Monagas, “Sistema de codificación esteganográfica para comunicaciones OCC,” 2020 <http://hdl.handle.net/10553/75764>.
- [106]. Cahyadi WA, Chung YH, Ghassemlooy Z, Hassan NB. Optical Camera Communications: Principles, Modulations, Potential and Challenges. *Electronics*. 2020; 9(9):1339. <https://doi.org/10.3390/electronics9091339>.
- [107]. Gamal, A.E.; Eltoukhy, H. CMOS Image Sensors. *IEEE Circuits Devices Mag.* 2005, 21, 6–20.
- [108]. Celebi, M.E.; Lecca, M.; Smolka, B. Image Demosaicing. In *Color Image and Video Enhancement*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 13–54.

- [109]. Tanaka, M. Give Me Four: Residual Interpolation for Image Demosaicing and Upsampling; Tokyo Institute of Technology: Tokyo, Japan, 2018; Available online: <http://www.ok.sc.e.titech.ac.jp/~mtanaka/research.html>.
- [110]. Meroli, S. Stefano Meroli Lecture: CMOS vs CCD Pixel Sensor. 17 August 2005. Available online: Meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html.
- [111]. Chen, Z.; Wang, X.; Pacheco, S.; Liang, R. Impact of CCD camera SNR on polarimetric accuracy. *Appl. Opt.* 2014, 53, 7649–7656.
- [112]. Boubezari, R.; Minh, H.; Ghassemlooy, Z.; Bouridane, A. Smartphone Camera Based Visible Light Communication. *J. Lightwave Technol.* 2016, 34, 4121–4127.
- [113]. Iizuka, N. CASIO Response to 15.7r1 CFA. March 2015. Available online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0173-01-007a-casioresponse-to-15-7r1-cfa.pdf>.
- [114]. Perli, S.D.; Ahmed, N.; Katabi, D. PixNet: Interference-free wireless links using LCD-camera pairs. In *Proceedings of the MobiCom ACM*, New York, NY, USA, 20–24 September 2010.
- [115]. Hao, T.; Zhou, R.; Xing, G. COBRA: Color barcode streaming for smartphone system. In *Proceedings of the MobiSys ACM*, Ambleside, UK, 25–29 June 2012.
- [116]. Hu, W.; Gu, H.; Pu, Q. LightSync: Unsynchronized visual communication over screen-camera links. In *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, New York, NY, USA, 30 September–4 October 2013.
- [117]. Nguyen, T.; Islam, A.; Jang, Y.M. Region-of-interest signaling vehicular system using optical camera communications. *IEEE Photonics J.* 2017, 9, 1–20.
- [118]. Yuan, W.; Dana, K.; Varga, M.; Ashok, A.; Gruteser, M.; Mandayam, N. Computer vision methods for visual MIMO optical system. In *Proceedings of the 2011 Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Colorado Springs, CO, USA, 20–25 June 2011.
- [119]. Itoh, S.; Takai, I.; Sarker, M.Z.; Hamai, M.; Yasutomi, K.; Andoh, M.; Kawahito, S. BA CMOS image sensor for 10 Mb/s 70 m-range LED-based spatial optical communication. In *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference*, San Francisco, CA, USA, 7–11 February 2010.
- [120]. Takai, I.; Ito, S.; Yasutomi, K.; Kagawa, K.; Andoh, M.; Kawahito, S. LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications. *IEEE Photonics J.* 2013, 5, 6801418.
- [121]. Yu, P.; Anastassopoulos, V.; Venetsanopoulos, A.N. Pattern classification and recognition based on morphology and neural networks. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 1992, 17, 58–64.
- [122]. Wang, W.C.; Chow, C.W.; Wei, L.; Liu, Y.; Yeh, C.H. Long distance non-line-of-sight (NLOS) visible light signal detection based on rolling-shutter-patterning of mobile-phone camera. *Opt. Express* 2017, 25, 10103–10108.

- [123]. Chen, C.; Chow, C.; Liu, Y.; Yeh, C. Efficient demodulation scheme for rollingshutter-patterning of CMOS image sensor based visible light communications. *Opt. Express* 2017, 25, 24362–24367.
- [124]. Liang, K.; Chow, C.; Liu, Y. Mobile-phone based visible light communication using region-grow light source tracking for unstable light source. *Opt. Express* 2016, 24, 17505–17510.
- [125]. Liu, Y.; Chow, C.; Liang, K.; Chen, H.; Shu, C.; Chen, C.; Chen, S. Comparison of thresholding schemes for visible light communication using mobile-phone image sensor. *Opt. Express* 2016, 24, 1973–1978.
- [126]. Gonzales, R.; Woods, R. *Digital Image Processing*; Pearson: Tennessee, TN, USA, 2002.
- [127]. Wellner, P. Adaptive thresholding for the digital desk. Xerox 1993, EPC-1993-110, 1–19.
- [128]. Cha, J. IEEE 802 Optical Wireless Communication (IEEE 802 OWC Technology Trends and Use Cases). In *Proceedings of the IEEE Blockchain Summit Korea*, Seoul, Korea, 7–8 June 2018.
- [129]. Chow, C.; Shiu, R.; Liu, Y.; Liao, X.; Lin, K. Using advertisement light-panel and CMOS image sensor with frequency-shift-keying for visible light communication. *Opt. Express* 2018, 26, 12530–12535.
- [130]. Ifthekhar, M.; Saha, N.; Jang, Y.M. Neural network based indoor positioning technique in optical camera communication system. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Busan, Korea, 27–30 October 2014.
- [131]. Kuraki, K.; Kato, K.; Tanaka, R. ID-Embedded LED Lighting Technology for Providing Object-Related Information. January 2016. Available online: <http://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol52-1/paper12.pdf>.
- [132]. Teli, S.; Cahyadi, W.; Chung, Y. Optical Camera Communication: Motion Over Camera. *IEEE Commun. Mag.* 2017, 55, 156–162.
- [133]. Rida, M.E.; Liu, F.; Jadi, Y. Indoor Location Position Based on Bluetooth Signal Strength. In *Proceedings of the International Conference on Information Science and Control Engineering IEEE*, Shanghai, China, 24–26 April 2015.
- [134]. Yang, C.; Shao, H. WiFi-based indoor positioning. *IEEE Commun. Mag.* 2015, 53, 150–157.
- [135]. Huang, C. Real-Time RFID Indoor Positioning System Based on Kalman-Filter Drift Removal and Heron-Bilateration Location Estimation. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2015, 64, 728–739.
- [136]. Kuo, Y.; Pannuto, P.; Hsiao, K.; Dutta, P. Luxapose: Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light. In *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, Maui, HI, USA, 7–11 September 2014.

- [137]. Brena, R.F.; García-Vázquez, J.P.; Galván-Tejada, C.E.; Muñoz-Rodríguez, D.; Vargas-Rosales, C.; Fangmeyer, J.J. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *J. Sens.* 2017, 2017.
- [138]. Philips Lighting (Signify), Enabling the New World of Retail: A White Paper on Indoor Positioning. 2017. Available online: <http://www.lighting.philips.com/main/inspiration/smart-retail/latest-thinking/indoor-positioning-retail>.
- [139]. Carroll, A.; Heiser, G. An analysis of power consumption in a smartphone. In Proceedings of the 2010 USENIX Conference on USENIX Annual Technical Conference, Boston, MA, USA, 22–25 June 2010.
- [140]. Bekaroo, G.; Santokhee, A. Power consumption of the Raspberry Pi: A comparative analysis. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech), Balaclava, Mauritius, 3–6 August 2016.
- [141]. Akram, M.; Aravinda, L.; Munaweera, M.; Godaliyadda, G.; Ekanayake, M. Camera based visible light communication system for underwater applications. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, 15–16 December 2017.
- [142]. Takai, I.; Andoh, M.; Yasutomi, K.; Kagawa, K.; Kawahito, S. Optical Vehicle-to-Vehicle Communication System Using LED Transmitter and Camera Receiver. *IEEE Photonics J.* 2014, 6, 1–14.
- [143]. Yamazato, T.; Takai, I.; Okada, H.; Fujii, T.; Yendo, T.; Arai, S. Image-Sensor-Based Visible Light Communication for Automotive Applications. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52, 88–97.
- [144]. Akram, M.; Godaliyadda, R.; Ekanayake, P. Design and analysis of an optical camera communication system for underwater applications. *IET Optoelectron.* 2019, 14, 10–21.
- [145]. Wikichip. Wikichip Semiconductor & Computer Engineering. Wikimedia Foundation. 12 January 2019. Available online: <https://en.wikichip.org/wiki/hisilicon/kirin/970>.
- [146]. iClarified. Google Uses Machine Learning to Improve Photos App. 13 October 2016. Available online: <http://www.icularified.com/57301/google-uses-machine-learning-to-improve-photos-app>.
- [147]. Nguyen, T.; Thieu, M.; Jang, Y. 2D-OFDM for Optical Camera Communication: Principle and Implementation. *IEEE Access* 2019, 7, 29405–29424.
- [148]. Rappaport, T.S.; Xing, Y.; Kanhere, O.; Ju, S.; Madanayake, A.; Mandal, S.; Alkhateeb, A.; Trichopoulos, G.C. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond. *IEEE Access* 2019, 7, 78729–78757.

- [149]. Liu, Y. Decoding mobile-phone image sensor rolling shutter effect for visible light communications. *Opt. Eng.* 2016, 55, 016103.
- [150]. Drew Gray Photography. Distortion 101—Lens vs. Perspective. Drew Gray Photography. 8 November 2014. Available online: <http://www.drewgrayphoto.com/learn/distortion101>.
- [151]. G. Palm, “Warren McCulloch and Walter Pitts: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,” in *Brain Theory*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, pp. 229–230.
- [152]. G. Clark, “The organization of behavior: A neuropsychological theory. D. O. Hebb. John Wiley And Sons, Inc., New York, 1949, 335 pages, 19 illustrations, 288 references” *J. Comp. Neurol.*, vol. 93, no. 3, pp. 459–460, 1950.
- [153]. C.-S. Poon and K. Zhou, “Neuromorphic silicon neurons and large-scale neural networks: challenges and opportunities,” *Front. Neurosci.*, vol. 5, p. 108, 2011.
- [154]. M. A. C. Maher, S. P. Deweerth, M. A. Mahowald and C. A. Mead, "Implementing neural architectures using analog VLSI circuits," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 643-652, May 1989, doi: 10.1109/31.31311.
- [155]. P. A. Merolla et al., “Artificial brains. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” *Science*, vol. 345, no. 6197, pp. 668–673, 2014.
- [156]. C. Sulzbachner, M. Humenberger, Á. Srp, and F. Vajda, “Optimization of a neural network for computer vision based fall detection with fixed-point arithmetic,” in *Neural Information Processing*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 18–26.
- [157]. A. Linares-Barranco, F. Gómez-Rodríguez, V. Villanueva, L. Longinotti and T. Delbruck, "A USB3.0 FPGA event-based filtering and tracking framework for dynamic vision sensors", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 2417-2420, 2015.
- [158]. A. Rios-Navarro, E. Cerezuela-Escudero, M. M. A. Jimenez-Fernandez, G. Jimenez-Moreno and A. Linares-Barranco, "Live demonstration: Real-time motor rotation frequency detection by spike-based visual and auditory AER sensory integration for FPGA", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 1907-1907, 2015.
- [159]. H. Liu, C. Brandli, S. Liu and T. Delbruck, "Design of a spatiotemporal correlation filter for event-based sensor", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 722-725, 2015.
- [160]. H. Tian, "Noise analysis in CMOS image sensors", 2000.
- [161]. A. Pooresmaeili, G. M. Cicchini, M. C. Morrone, and D. Burr, “Spatiotemporal filtering and motion illusions,” *J. Vis.*, vol. 13, no. 10, p. 21, 2013.
- [162]. F. Liao, F. Zhou, and Y. Chai, “Neuromorphic vision sensors: Principle, progress and perspectives,” *J. Semicond.*, vol. 42, no. 1, p. 013105, 2021.
- [163]. T. Gollisch and M. Meister, “Eye smarter than scientists believed: neural computations in circuits of the retina,” *Neuron*, vol. 65, no. 2, pp. 150–164, 2010.

- [164]. R. H. Masland, "The fundamental plan of the retina," *Nat. Neurosci.*, vol. 4, no. 9, pp. 877–886, 2001.
- [165]. D.-I. "dan" Cho and T.-J. Lee, "A review of bioinspired vision sensors and their applications," *Sens. Mater.*, 2015.
- [166]. Z.-H. Tan, R. Yang, K. Terabe, X.-B. Yin, X.-D. Zhang, and X. Guo, "Synaptic metaplasticity realized in oxide memristive devices," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 377–384, 2016.
- [167]. H. Yu, J. Gong, H. Wei, W. Huang, and W. Xu, "Mixed-halide perovskite for ultrasensitive two-terminal artificial synaptic devices," *Mater. Chem. Front.*, vol. 3, no. 5, pp. 941–947, 2019.
- [168]. P. Lichtsteiner and T. Delbruck, "A 64x64 aer logarithmic temporal derivative silicon retina," in *Research in Microelectronics and Electronics*, 2005 PhD, 2005.
- [169]. M. Mahowald, *An Analog VLSI System for Stereoscopic Vision*, Berlin, Germany:Springer, 2012.
- [170]. Haessig, G., Berthelon, X., Ieng, SH. et al. A Spiking Neural Network Model of Depth from Defocus for Event-based Neuromorphic Vision. *Sci Rep* 9, 3744 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40064-0>.
- [171]. C. Posch, D. Matolin and R. Wohlgenannt, "A QVGA 143dB dynamic range asynchronous address-event PWM dynamic image sensor with lossless pixel-level video compression," 2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC), 2010, pp. 400-401, doi: 10.1109/ISSCC.2010.5433973.
- [172]. C. Brandli, R. Berner, M. Yang, S. Liu and T. Delbruck, "A 240 × 180 130 dB 3 μs Latency Global Shutter Spatiotemporal Vision Sensor," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 10, pp. 2333-2341, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSSC.2014.2342715.
- [173]. H. Tian, B. Fowler and A. Gamal, "Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 1, pp. 92-101, 2001.
- [174]. A. Khodamoradi and R. Kastner, "\$O(N)\$O(N)-Space Spatiotemporal Filter for Reducing Noise in Neuromorphic Vision Sensors," in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 15-23, 1 Jan.-March 2021, doi: 10.1109/TETC.2017.2788865.
- [175]. Posch C, Serrano-Gotarredona T, Linares-Barranco B et al 2014 Retinomorphc event-based vision sensors: bioinspired cameras with spiking output *Proc IEEE* 102 1470.
- [176]. Steffen L, Reichard D, Weinland J et al 2019 Neuromorphic stereo vision: A survey of bio-inspired sensors and algorithms *Front Neurobot* 13 28.
- [177]. Zhou F, Zhou Z, Chen J et al 2019 Optoelectronic resistive random-access memory for neuromorphic vision sensors *Nat Nanotechnol* 14 776.
- [178]. Mennel L, Symonowicz J, Wachter S et al 2020 Ultrafast machine vision with 2D material neural network image sensors *Nature* 579 62.

- [179]. Gu L, Poddar S, Lin Y et al 2020 A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina Nature 581 278.
- [180]. Kim Y, Chortos A, Xu W et al 2018 A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve Science 360 998.
- [181]. Posch C 2012 Bio-inspired vision J Instru 7 C01054.
- [182]. G. Chen et al., "Neuromorphic vision based multivehicle detection and tracking for intelligent transportation system," J. Adv. Transp., vol. 2018, pp. 1–13, 2018.
- [183]. "Neuromorphic/event-based vision systems: A key for autonomous future," Vehicle Telematics, ADAS, Connected and Autonomous Vehicle, 06-Jan-2022. [Online]. Available: https://www.telematicswire.net/neuromorphic-event-based-vision-systems-a-key-for-autonomous-future/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=neuromorphic-event-based-vision-systems-a-key-for-autonomous-future.
- [184]. F. Paredes-Vallés, K. Y. W. Scheper and G. C. H. E. de Croon, "Unsupervised learning of a hierarchical spiking neural network for optical flow estimation: From events to global motion perception", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 42, no. 8, pp. 2051-2064, Aug. 2020.
- [185]. C. Reinbacher, G. Munda and T. Pock, "Real-time panoramic tracking for event cameras", Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Photography, pp. 1-9, 2017.
- [186]. E. Mueggler, G. Gallego, H. Rebecq and D. Scaramuzza, "Continuous-time visual-inertial odometry for event cameras", IEEE Trans. Robot., vol. 34, no. 6, pp. 1425-1440, Dec. 2018.
- [187]. M. Liu and T. Delbruck, "Adaptive time-slice block-matching optical flow algorithm for dynamic vision sensors", Proc. Brit. Mach. Vis. Conf., pp. 1-12, 2018.
- [188]. Y. Zhou, G. Gallego, H. Rebecq, L. Kneip, H. Li and D. Scaramuzza, "Semi-dense 3D reconstruction with a stereo event camera", Proc. Eur. Conf. Comput. Vis., pp. 242-258, 2018.
- [189]. P. Bardow, A. J. Davison and S. Leutenegger, "Simultaneous optical flow and intensity estimation from an event camera", Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., pp. 884-892, 2016.
- [190]. R. Benosman, C. Clercq, X. Lagorce, S.-H. Ieng and C. Bartolozzi, "Event-based visual flow", IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., vol. 25, no. 2, pp. 407-417, Feb. 2014.
- [191]. Y. Sekikawa, K. Hara and H. Saito, "EventNet: Asynchronous recursive event processing", Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., pp. 3882-3891, 2019.
- [192]. B. Kueng, E. Mueggler, G. Gallego and D. Scaramuzza, "Low-latency visual odometry using event-based feature tracks", Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 16-23, 2016.
- [193]. G. Gallego, H. Rebecq and D. Scaramuzza, "A unifying contrast maximization framework for event cameras with applications to motion depth and optical flow estimation", Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., pp. 3867-3876, 2018.

- [194]. G. Gallego and D. Scaramuzza, "Accurate angular velocity estimation with an event camera", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 632-639, Apr. 2017.
- [195]. T. Brosch, S. Tschechne and H. Neumann, "On event-based optical flow detection", *Front. Neurosci.*, vol. 9, Apr. 2015.
- [196]. C. Scheerlinck, N. Barnes and R. Mahony, "Continuous-time intensity estimation using event cameras", *Proc. Asian Conf. Comput. Vis.*, pp. 308-324, 2018.
- [197]. C. Reinbacher, G. Graber and T. Pock, "Real-time intensity-image reconstruction for event cameras using manifold regularisation", *Proc. Brit. Mach. Vis. Conf.*, pp. 1-12, 2016.
- [198]. J. Kogler, C. Sulzbachner, M. Humenberger and F. Eibensteiner, "Address-event based stereo vision with bio-inspired silicon retina imagers" in *Advances in Theory and Applications of Stereo Vision*, Rijeka, Croatia:InTech, pp. 165-188, 2011.
- [199]. I.-A. Lungu, F. Corradi and T. Delbruck, "Live demonstration: Convolutional neural network driven by dynamic vision sensor playing RoShamBo", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 1-1, 2017.
- [200]. L. Wang, I. S. M. Mostafavi, Y.-S. Ho and K.-J. Yoon, "Event-based high dynamic range image and very high frame rate video generation using conditional generative adversarial networks", *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 10073-10082, 2019.
- [201]. J. Binas, D. Neil, S.-C. Liu and T. Delbruck, "DDD17: End-to-end DAVIS driving dataset", *Proc. ICML Workshop Mach. Learn. Auton. Veh.*, pp. 1-9, 2017.
- [202]. C. Ye, A. Mitrokhin, C. Parameshwara, C. Fermüller, J. A. Yorke and Y. Aloimonos, "Unsupervised learning of dense optical flow depth and egomotion with event-based sensors", *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems (IROS)*, 2020.
- [203]. "Event-based vision applications," *PROPHESSEE*, 10-Feb-2021. [Online]. Available: <https://www.prophesee.ai/event-based-vision-applications/>.
- [204]. F. Gómez-Rodríguez, L. Miró-Amarante, M. Rivas, G. Jimenez, and F. Diaz-del-Rio, "Neuromorphic real-time objects tracking using address event representation and silicon retina," in *Advances in Computational Intelligence*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 133–140.
- [205]. A. Linares-Barranco, F. Gómez-Rodríguez, V. Villanueva, L. Longinotti and T. Delbrück, "A USB3.0 FPGA event-based filtering and tracking framework for dynamic vision sensors," *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 2417-2420, doi: 10.1109/ISCAS.2015.7169172.
- [206]. G. Cohen et al., "Event-based sensing for space situational awareness," *J. Astronaut. Sci.*, vol. 66, no. 2, pp. 125–141, 2019.

- [207]. S. Schraml, A. N. Belbachir, N. Milosevic and P. Schön, "Dynamic stereo vision system for real-time tracking," Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2010, pp. 1409-1412, doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537289.
- [208]. M. Litzenberger et al., "Embedded vision system for real-time object tracking using an asynchronous transient vision sensor," in 2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop, 2006.
- [209]. A. Censi, J. Strubel, C. Brandli, T. Delbruck and D. Scaramuzza, "Low-latency localization by active LED markers tracking using a dynamic vision sensor," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 891-898, doi: 10.1109/IROS.2013.6696456.
- [210]. S. Schraml, A. N. Belbachir and N. Brändle, "A real-time pedestrian classification method for event-based dynamic stereo vision," 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops, 2010, pp. 93-99, doi: 10.1109/CVPRW.2010.5543775.
- [211]. T. Teixeira, E. Culurciello, J. H. Park, D. Lymberopoulos, A. Barton-Sweeney and A. Savvides, "Address-event imagers for sensor networks: evaluation and modeling," 2006 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2006, pp. 458-466, doi: 10.1145/1127777.1127847.
- [212]. E. Y. Ahn, J. H. Lee, T. Mullen and J. Yen, "Dynamic vision sensor camera based bare hand gesture recognition," 2011 IEEE Symposium On Computational Intelligence For Multimedia, Signal And Vision Processing, 2011, pp. 52-59, doi: 10.1109/CIMSIVP.2011.5949251.
- [213]. A. Amir et al., "A low power, fully event-based gesture recognition system," in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, pp. 7243–7252.
- [214]. S. Barua, Y. Miyatani and A. Veeraraghavan, "Direct face detection and video reconstruction from event cameras," 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2016, pp. 1-9, doi: 10.1109/WACV.2016.7477561.
- [215]. M. Cannici, M. Ciccone, A. Romanoni, and M. Matteucci, "Asynchronous convolutional networks for object detection in neuromorphic cameras," in 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2019, pp. 0–0.
- [216]. D. P. Moeys, T. Delbrück, A. Rios-Navarro and A. Linares-Barranco, "Retinal ganglion cell software and FPGA model implementation for object detection and tracking," 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2016, pp. 1434-1437, doi: 10.1109/ISCAS.2016.7527520.
- [217]. D. Weikersdorfer and J. Conradt, "Event-based particle filtering for robot self-localization," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012, pp. 866-870, doi: 10.1109/ROBIO.2012.6491077.

- [218]. D. Weikersdorfer, R. Hoffmann, and J. Conradt, "Simultaneous localization and mapping for event-based vision systems," in *Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 133–142.
- [219]. B. Kueng, E. Mueggler, G. Gallego and D. Scaramuzza, "Low-latency visual odometry using event-based feature tracks," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, pp. 16-23, doi: 10.1109/IROS.2016.7758089.
- [220]. E. Mueggler, H. Rebecq, G. Gallego, T. Delbruck, and D. Scaramuzza, "The event-camera dataset and simulator: Event-based data for pose estimation, visual odometry, and SLAM," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 142–149, 2017.
- [221]. M. Litzenberger et al., "Embedded vehicle counting system with 'silicon retina' optical sensor," in *AIP Conference Proceedings*, 2006.
- [222]. G. Gritsch, M. Litzenberger, N. Donath and B. Kohn, "Real-Time Vehicle Classification using a Smart Embedded Device with a 'Silicon Retina' Optical Sensor," 2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2008, pp. 534-538, doi: 10.1109/ITSC.2008.4732575.
- [223]. Z. Fu, T. Delbruck, P. Lichtsteiner and E. Culurciello, "An Address-Event Fall Detector for Assisted Living Applications," in *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 88-96, June 2008, doi: 10.1109/TBCAS.2008.924448.
- [224]. V. S. Ghaderi, M. Mulas, V. F. S. Pereira, L. Everding, D. Weikersdorfer and J. Conradt, "A wearable mobility device for the blind using retina-inspired dynamic vision sensors," 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015, pp. 3371-3374, doi: 10.1109/EMBC.2015.7319115.
- [225]. N. Gaspar, A. Sondhi, B. Evans and K. Nikolic, "A low-power neuromorphic system for retinal implants and sensory substitution," 2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2016, pp. 78-81, doi: 10.1109/BioCAS.2016.7833729.
- [226]. F. Perez-Peña, A. Morgado-Estevez, R. J. Montero-Gonzalez, A. Linares-Barranco and G. Jimenez-Moreno, "Video surveillance at an industrial environment using an address event vision sensor: Comparative between two different video sensor based on a bioinspired retina," *Proceedings of the International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications*, 2011, pp. 1-4.
- [227]. G. Gallego et al., "Event-Based Vision: A Survey," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44, no. 1, pp. 154-180, 1 Jan. 2022, doi: 10.1109/TPAMI.2020.3008413.
- [228]. "What is event-based vision?" PROPHESEE, [Online]. Available: <https://www.prophesee.ai/2019/07/28/event-based-vision-2/>.

- [229]. “Generador de funciones Keysight Technologies 33220A, onda sinusoidal de 1μHz → 20MHZ,” Rs-online.com. [Online]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/generadores-de-funciones/6672597>.
- [230]. Keysight, “E3620 series bench power supply,” Keysight. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/products/dc-power-supplies/bench-power-supplies/e3620-series-bench-power-supply-35-50w.html>.
- [231]. “IRF840A Datasheet (PDF) - international rectifier,” Alldatasheet.com. [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68312/IRF/IRF840A.html>.
- [232]. D. Lite, “Specifications -current models,” Inivation.com. [Online]. Available: <https://inivation.com/wp-content/uploads/2020/09/2020-09-16-DVS-Specifications.pdf>.
- [233]. C. Aerne, “DV Software,” iniVation. [Online]. Available: <https://inivation.com/dvp/dvsoftware/>.
- [234]. “Advanced configurations user guide iniVation AG / inivation-docs,”GitLab. [Online]. Available: https://gitlab.com/inivation/inivation-docs/blob/master/Advanced%20configurations/User_guide_-_Biasing.md.
- [235]. ULPGC, Boletín Oficial de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2021. [Online]. Available: https://www.ulpgc.es/sites/default/files/ArchivosULPGC/boulpgc/BOULPGC/boulpgc_1_julio_2021.pdf.
- [236]. COIT, Derechos de visado 2021, 2021. [Online]. Available: https://www.coit.es/sites/default/files/20210204_tarifas_2021_visado.pdf.

ANEXOS

A.1. Código utilizado

A.1.1. def_instrumentation.py

Tabla 22. Código de def_instrumentation.py.

```
# Imports...
import socket
import time

def instrumentation(freq):

    # Create a new socket using the given address family
    # (AF_INET) and the type (SOCK_STREAM)...
    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)

    # Connect to a remote socket to the to function
    # generator address...
    s.connect(('192.168.1.110', 5025))

    # Request with a square signal at the given frequency
    # with an amplitude of 0 to 5V...
    query = f'APPL:SQU {freq}, 5, 0 \n'
    print(query)

    # Send data to the socket. Returns the number of bytes sent...
    s.send(bytes(query, 'utf8'))
    time.sleep(1)
```

A.1.2. events_per_second.py

Tabla 23. Código de events_per_second.py.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import os

FREQUENCIES = 100 #1000, 5000, 10000
DISTANCE = 3 #0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
name_folder = str(DISTANCE) + '_m'
freq_path = os.getcwd() + '/measures/freq_measures'
event_path = os.getcwd() + '/measures/events_per_second_measures'
x = []
y = []
time = []
pol = []

for freq in FREQUENCIES:
    freq_file = 'freq ' + str(freq) + ' Hz.csv'
```

```

data = pd.read_csv(freq_path+'/'+name_folder+'/'+freq_file)
x = data['x']
y = data['y']
time = data['time'].to_list()
pol = data['pol']
var1 = time[-2]
var2 = len(time) / (time[-2] - time[0])
table = {"time[-2]": var1, "len(time) / (time[-2] - time[0])":
var2}
data = pd.DataFrame(table, index=[0])
event_file = 'freq_' + str(freq) + '_Hz_events.csv'
data.to_csv(event_path+'/'+name_folder+'/'+event_file, index=False)
print("Filename has been saved: " + event_file)

```

A.1.3. def_measureFreq.py

Tabla 24. Código de def_measureFreq.py.

```

# Imports...
import numpy as np
import pandas as pd
import time
from dv import NetworkEventInput

def measureFreq(child_pipe):
    # IP and port to connect the camera to the software...
    dv_address = '127.0.0.1'
    dv_port = 64812

    # Create the arrays of the data to be measured...
    x = []
    y = []
    timestamps = []
    polarities = []

    # Camera event input is connected...
    net_event_input = NetworkEventInput(address=dv_address,
port=dv_port)

    # Value initialization...
    time_to_save = 0
    go_ahead = False
    start = 0
    folder = filename = ''

    for event in net_event_input:
        # There is any data available to be read...
        if child_pipe.poll():
            # Return an object sent from the other end of
            # the connection and it reads...
            command_obj = child_pipe.recv()

            # Values needed for measurement...
            folder = command_obj['folder']
            filename = command_obj['filename']
            time_to_save = command_obj['time_to_save']

            # 10-second timer starts...

```

```

    go_ahead = True
    start = time.time()

    # Arrays are cleaned
    x = []
    y = []
    timestamps = []
    polarities = []

    # The measurement is continued if the save time has not
    # been exceeded and the boolean is set to true...
    if time.time() - start < time_to_save and go_ahead:
        # Captured values are added to the appropriate arrays...
        timestamps.append(np.float64(event.timestamp))
        x.append(np.int16(event.x))
        y.append(np.int16(event.y))
        polarities.append(np.int16(event.polarity))
    elif go_ahead:
        # The captured values are saved in a csv file and in
        # the working directory...
        data = pd.DataFrame({'x': x, 'y': y, 'time': timestamps,
'pol': polarities})
        data.to_csv(folder + '/' + filename)
        go_ahead = False

```

A.1.4. high_power_pixel.py

Tabla 25. Código de high_power_pixel.py.

```

import numpy as np
import pandas as pd
import math
import os
from dv import AedatFile
import matplotlib
from matplotlib import pyplot as plt

# matplotlib.use('Qt5Agg')

distances = [0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3]

frequencies = [100, 1000, 5000, 10000]

base_url = 'measures_v2'

container = np.zeros(shape=(len(distances), len(frequencies)))
avg_freq = np.zeros(container.shape)

for row, d in enumerate(distances):
    d_str = f'{int(d) if math.modf(d)[0] == 0 else d}_m'
    files = os.listdir(f'{base_url}/{d_str}')

    for col, f in enumerate(frequencies):
        file = list(filter(lambda x: f'{f}_Hz' in x, files))[0]

        with AedatFile(f'{base_url}/{d_str}/{file}') as fd:
            events = np.hstack([packet for packet in
fd['events'].numpy()])
            times = events['timestamp']

```

```

        container[row, col] = (len(times) - 1)/(times[-2] -
times[0])

        x = events['x']
        y = events['y']
        pol = events['polarity']

        x_median = int(np.median(x))
        y_median = int(np.median(y))

        pos = (x == x_median) & (y == y_median)

        t = (times[pos] - times[pos][0])/1e6
        pols = pol[pos]

        plt.plot(t, pols)
        plt.title(str(f) + '<' + str(d))
        plt.show()
        print(len(pols[pols==0]), len(pols[pols==1]))

plt.plot(container[:,1]) # 1: 100, 2: 1k, 3: 5k, 4: 10k
plt.xlabel('dist')
plt.ylabel('events')
plt.title('100 kHz' + '< All distances ')
plt.show()

```

A.1.5. extract_data.py

Tabla 26. Código de extract_data.py.

```

# Imports...
import time
import numpy as np
import def_instrumentation
from def_measureFreq import measureFreq
import os
import multiprocessing as mp

if __name__ == '__main__':

    # Frequencies values from 100 Hz to 10 kHz with jumps
    frequencies = [100, 1000, 5000, 10000]

    # Distance values from 0,25 m to 2,5 m with jumps of
    # 0,25 m: [0.25, 0.5, 1, 1.5, 2,2.5, 3] (7 measures)...
    DISTANCE = 3

    # Returns a pair of connection objects connected by the 2
    # ends of the pipe. Parent send data that is going to receive
    # by Child process...
    child_pipe, parent_pipe = mp.Pipe()

    # The measurement frequencies function is called for the child
    # to listen and choose when to measure...
    capture_process = mp.Process(target=measureFreq, args=(child_pipe,
))

    # Start the process...
    capture_process.start()

```

```

# Creation of the route according to the distance and
# the creation of the directory...
name_folder = os.path.join(os.getcwd(), str(DISTANCE)+'_m')
if not os.path.exists(name_folder):
    os.mkdir(name_folder)
print("Directory '% s' has been created" % name_folder)

for freq in frequencies:
    print("Start new measure: " + str(freq))
    # Format file: 'freq_4000_Hz.csv'...
    file = 'freq_' + str(freq) + '_Hz.csv'

    # Frequency-based instrumentation controller...
    def_instrumentation.instrumentation(str(freq))

    # Send an object to the other end of the connection to
    # start the measure with the custom name folder filename
    # and the time to save...
    parent_pipe.send({'folder': name_folder, 'filename': file,
'time_to_save': 10})

    # For safety reasons, we allow time between measures...
    time.sleep(14)
    print("Measure completed: " + str(freq))

```