

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Redes de Ingeniería

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/redes/index>

REDDES DE INGENIERÍA

ARTÍCULO REVISIÓN DE TEMA

Esquemas de calidad de servicio en redes Li-Fi enfocados en ambientes de quinta generación

Quality of service schemes in Li-Fi networks focus on 5th generation environments

Jesús Paternina¹ Octavio Salcedo²

Para citar este artículo: Paternina, J. y Salcedo, O. (2017). Esquemas de calidad de servicio en redes Li-Fi enfocados en ambientes de quinta generación. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 18-28, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.12056>.

Recibido: 23-mayo-2017 / Aprobado: 9-agosto-2017

Resumen

Este documento, corresponde a una validación de las necesidades que tienen las muy recientes redes Li-Fi con respecto a servicios en tiempo real, los cuales requieran calidad de servicio, apuntando a características propias de las futuras redes de quinta generación. Este trabajo sirvió de base para establecer el aseguramiento de calidad de este tipo de redes en una metodología que se describirá en detalle en una futura publicación.

Palabras clave: 5G, Li-Fi (*light fidelity*), VLC (*visible light communication*), VoIP.

Abstract

This paper corresponds to a validation of the needs of the very recent Li-Fi networks with respect to real-time services that require quality of service, pointing to features of future 5th generation networks. This work served as a basis to establish the quality assurance of this type of networks in a methodology that will be described in detail in a future publication.

Keywords: 5G, Li-Fi (*Light Fidelity*), VLC (*Visible Light Communication*), VoIP.

1. Candidato a magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Docente asociado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: jmpaterninad@udistrital.edu.co
2. Doctor en Ingeniería Informática por la Universidad Pontificia de Salamanca, España. Docente de planta en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: osalcedo@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Las necesidades de comunicación de los seres humanos han evolucionado a lo largo de la historia, conforme evoluciona la tecnología y los recursos que se proveen para la interacción de las sociedades. Desde aquellos remotos tiempos en los que un cable submarino conectaba a dos continentes, hasta las ahora sofisticadas y cada vez más elaboradas redes de comunicaciones basadas en internet, los esfuerzos en ingeniería han tenido que resolver muchos retos inherentes en los procesos de comunicaciones basados en el esquema de transmisión de un mensaje a través de un medio determinado; sin embargo, ahora este mensaje demanda muchos más requerimientos, complejizando de esta manera los algoritmos y metodologías que garanticen una verdadera experiencia del servicio excepcional [1].

El objeto de esta investigación son los servicios en tiempo real, normalmente conocidos como servicios de video llamada, voz sobre red IP, *streaming* e IoT, sobre redes Li-Fi en los futuros entornos de quinta generación, basados en los estudios de la 5G PPP *Architecture Working Group*; estos servicios en tiempo real requieren una infraestructura confiable y robusta, la cual ofrezca una completa satisfacción del usuario para el uso de aplicaciones y servicios que cada día aumentan de forma considerable en el panorama de tecnologías de usuario final. El uso de las aplicaciones está orientado a los usuarios individuales a través de redes sociales o apps con fines particulares, como WhatsApp o Skype, pero esto no excluye a los usuarios corporativos que cada vez requieren plataformas más eficientes, robustas y a la vez flexibles, como apoyo a su objeto de negocio. Es un hecho que la tecnología es el apalancamiento fundamental para el desarrollo económico de cualquier organización en cualquier industria, y qué mejor que las redes inalámbricas para proyectar el crecimiento de conectividad que se avecina, además de, lo mejor de todo, asegurarlo como una realidad.

Todo esto solo confirma la necesidad de evaluar las posibilidades de interconexión a través de redes pensando en las nuevas posibilidades, como en este caso las redes Li-Fi y su posible integración con escenarios proyectados hacia quinta generación.

No es un secreto que el espectro electromagnético está saturado para posibilidades de comunicaciones y nuevas tecnologías, pero son precisamente las nuevas redes, basadas en conceptos ópticos, las que ofrecen una muy buena alternativa para garantizar calidad de servicio que supla la alta demanda de usuarios que existen ahora y la que se estima para un futuro próximo. Aquí es cuando un concepto que se había utilizado para comunicaciones personales se reviste de especial importancia, este concepto es el de VLC (*visible light communication*). Las comunicaciones VLC están basadas en diodos emisores de luz que actúan como transmisores, proveyendo un enlace básico de comunicaciones de una sola vía; la luz LED ilumina sus propias atoceldas y transmite flujos de video en el *downlink* hacia múltiples terminales móviles [2], dependiendo de la topología implementada; así, la evolución natural de esta red básica personal y limitada era la red Li-Fi (*light fidelity*), en la cual se establece un robusto sistema de comunicaciones óptico multidireccional, integrado con un sistema de iluminación, perfecto para evolucionar junto con el esquema de las *smartcities* y las redes 3G, 4G y 5G de tendencia mundial. Una propuesta de este esquema se observa en la Figura 1.

ANTECEDENTES

Aspectos generales

Como se mencionó en el apartado anterior, el espectro de radiofrecuencia convencional está limitando las posibilidades de velocidad de los usuarios para aplicaciones del tipo de *internet of things*, por ejemplo. La integración entre las redes de comunicaciones del espectro convencional como las inalámbricas celulares o Wireless con redes ópticas de

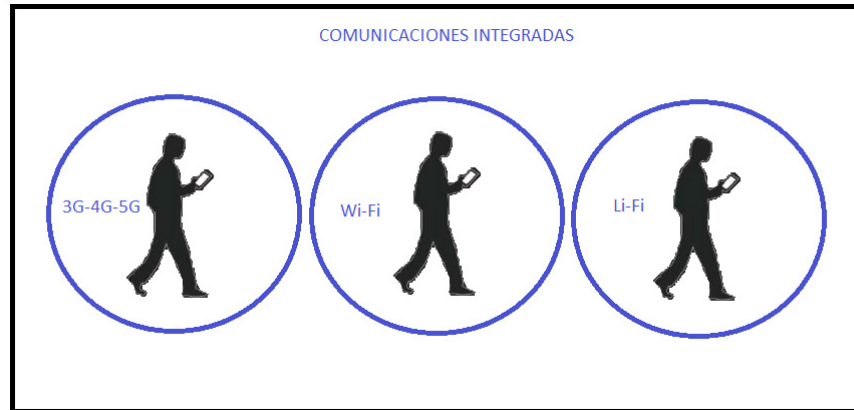


Figura 1. Un sistema integrado de comunicaciones.

Fuente: elaboración propia.

tipo Li-Fi, es cuestión de desarrollo de dispositivos y algoritmos de detección de redes; el balanceo de cargas pasa a ser de esta manera un concepto fundamental, donde la cohabitabilidad de dispositivos para tránsito entre diferentes redes lleva a plantearse en la comunidad científica algoritmos como el propuesto en [3], que permite autonomía en los usuarios con respecto a la selección de los equipos proveedores de control o *access point*, de acuerdo con sus necesidades.

En [4], se realiza un enfoque D2D sobre redes LTE para optimizar la operación del *uplink* y el *downlink* para situaciones de emergencia, asegurando la conectividad y pensando en las señales de video en tiempo real con QoS. El enfoque hacia las redes de emergencia orienta la investigación hacia una solución de clúster, en la que se busca que solo un celular que se llama "cabeza de cluster" tenga la posibilidad de comunicación con la estación base; el control hacia los demás cluster se realizara a través de este dispositivo, primando de esta manera su necesidad de comunicación orientado hacia la posibilidad de interconexión inmediata en situaciones de emergencia.

En [5], se realiza un análisis de servicios de video y la QoS aplicada a redes LTE; este tratamiento consta, básicamente, de un grupo de imágenes

que se codifican y se agrupan en tramas que posteriormente se transmitirán. No se realiza ningún tipo de marcado y las retransmisiones se efectúan cuando se vence algún tiempo de transmisión y no se recibe trama alguna; así, al no recibirse alguna trama, la métrica del sistema calcula cierta distorsión.

Es necesario discutir en este apartado acerca de las tendencias en redes orientadas específicamente a las *next generation networks* (NGN) desde el punto de vista de la movilidad. El legado de estas redes viene desde aquellas de cuarta generación como LTE y WiMAX, y las recomendaciones de la ITU con respecto a la calidad de servicio establecida desde las capas de transporte, aporta un punto de partida importante para aplicar condiciones de calidad de servicio en las redes *light Fidelity*; puntualmente, en estas redes de cuarta generación se presentan varios estudios de calidad de servicio que podrían ser punto de partida para futuras redes de quinta generación. Por otro lado, en [6] se propone un *framework* que provee una clasificación de tráfico óptimo para interoperabilidad, con unos buenos resultados en simulación para ambientes aislados; esto confirma que una buena base para el análisis de calidad de servicio en las redes Li-Fi está presente en estos estudios previos.

Concepto formal del balanceo de cargas aplicado a redes

El balanceo de cargas está presente desde hace décadas en la arquitectura de computadores, específicamente en la forma en que se distribuye *payload* (carga útil) entre un servidor a través de varios de sus recursos físicos; posteriormente, en redes de computadores, este concepto se adaptó a las necesidades de las interfaces con respecto al manejo dinámico del flujo de información, pero, básicamente, este concepto permite optimizar los recursos del sistema para obtener réditos en términos de rendimiento, tanto del procesamiento de la información como en los tiempos de respuesta y vida útil de los elementos físicos [7]. Desde el punto de vista de redes de distinta tecnología, este concepto permite que el usuario mantenga un nivel de servicio óptimo con la interoperabilidad de redes que detectarán el paso entre ellas, haciendo el proceso imperceptible para la aplicación que utiliza la infraestructura.

En sistemas de telecomunicaciones, algunos de los elementos de identificación de umbrales realizan un análisis de información con respecto a las métricas que ha almacenado, tomando posteriormente decisiones con base en la mejor ruta de tránsito; si sus métricas para múltiples enlaces son las mismas, el balanceo de cargas le permite al sistema manipularlas para obtener el mayor rendimiento en términos de tráfico de datos [8].

Perspectiva de redes de quinta generación

Antes de discutir acerca de las redes de quinta generación, es necesario tener presentes las redes anteriores; la tercera generación de redes y servicios, en su momento, llegó a ofrecer mejores oportunidades en cuanto al tipo de aplicaciones multimedia y servicios que se ajustaban a las necesidades de calidad de comunicaciones para usuario final. Las partes principales de los estándares estaban alineadas y los servicio 3G

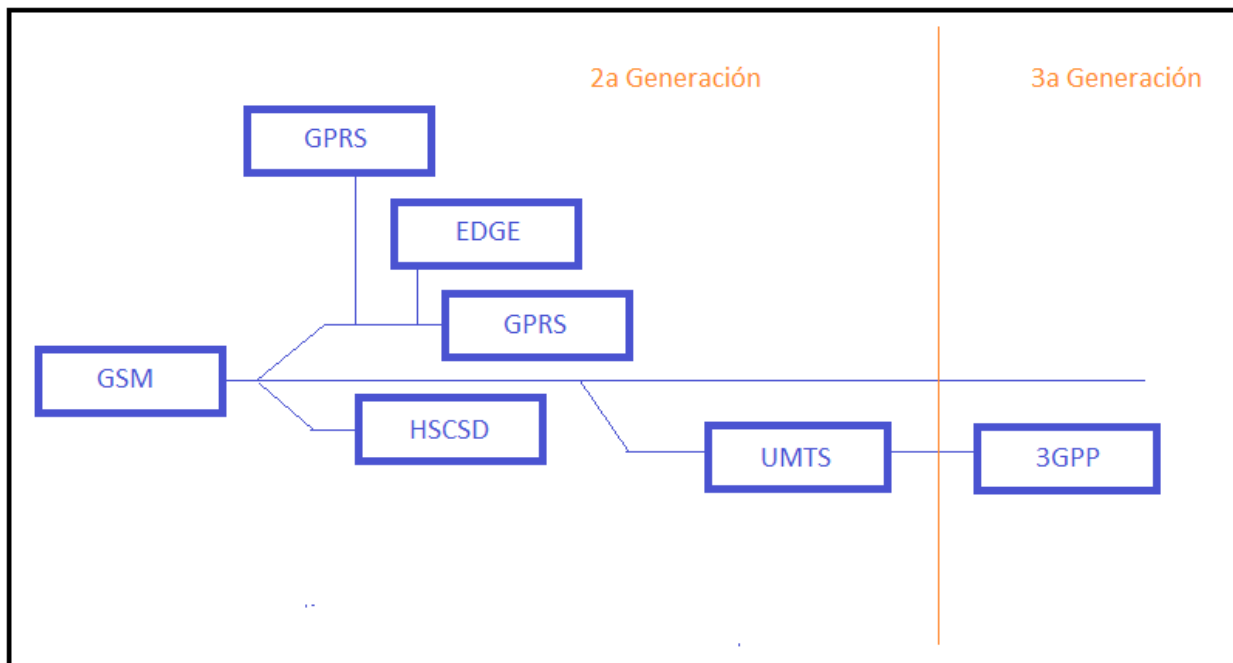


Figura 2. Evolución de escenarios hacia 3G.

Fuente: elaboración propia.

iniciaban, pero mientras ocurría la evolución 3G, algunos operadores seguían implementando soluciones interinas 2.5 G por un periodo de tiempo. Se presentaron varios escenarios de evolución de las redes 2G a las 3G que se muestran en la Figura 2, siendo de especial interés para este artículo la red GSM, que iniciaba con mayores posibilidades de ancho de banda [9].

En [10], se realiza una estimación de las capacidades que tendrán que soportar las redes móviles con respecto a la actualidad, planteando cifras por el orden de un aumento de mil veces con contar con los dispositivos de IoT, los cuales están cada vez más presentes dentro de las necesidades de los usuarios finales. Información relevante estima que el rango de frecuencias de trabajo para redes de quinta generación estarán por el orden de los 300 GHz como límite, integrándose en los pronósticos el umbral de frecuencias de las redes Li-Fi; adicionalmente, el aumento de la cantidad de dispositivos de interacción y aplicaciones de contenidos multimedia, permiten plantear para estas redes velocidades acorde con el ancho de banda planteado, es decir, por el orden de los GBps para los usuarios finales, con requerimientos de baja latencia y eficiencia en el tiempo de uso de los equipos. Este parámetro de latencia pasa a ser uno de los más importantes para el planteamiento de calidad de servicio en las redes Li-Fi.

Los patrones de direccionamiento se están adicionando por el incremento de dispositivos de internet de las cosas; esto se está presentando en los estándares para redes celulares y se estudia en detalle en [11]. Es aquí donde la interoperabilidad e intercambio de información entre aplicaciones exigen cambios importantes en las tecnologías; además, la estructura rígida de los modelos de datos está migrando hacia modelos dinámicos con las necesidades del mercado y usuarios. Otras áreas de estandarización en las que se observa un interés pronunciado, corresponden a la seguridad para IoT y conectividad para áreas amplias con baja potencia; se clasifican de esta manera cuatro grandes

tópicos en los que la investigación exige una migración hacia estándares: *networking* incluyendo 5G, interoperabilidad semántica, seguridad y conectividad para áreas amplias con baja potencia.

Integración de internet de las cosas (internet of things-IoT) y 5G

Las aplicaciones en las que el concepto de internet de las cosas puede integrarse con redes de nueva generación abarcan un espectro muy amplio; sin embargo, identificando nuevas tendencias y, en algunos casos, la relación con temas de sostenibilidad, es posible relacionar algunos casos relevantes que pueden aprovecharse y continuar evolucionando sobre redes de tipo Li-Fi.

Uno de los escenarios más importantes es el que se relaciona con las necesidades de la industria energética. Dadas las preocupaciones significativas con respecto a las emisiones de carbono de los combustibles fósiles, el calentamiento global y la crisis de la energía (todos estos temas de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente), los recursos energéticos distribuidos renovables (DER), se plantean como una solución consciente que necesita la integración con las redes inteligentes, lo que hará que el suministro de energía sea más fiable, disminuyendo de esta manera el costo adicional y las pérdidas de transmisión [12]. Uno de los principales desafíos técnicos en la planeación de un sistema de potencia, control y operación con DER, es la regulación de tensión en el nivel de distribución; este problema estimula el despliegue de sensores y ejecutores en redes inteligentes, con el fin de que la regulación de la tensión se puede controlar a un nivel aceptable. Aquí, el trabajo con redes de quinta generación es fundamental para optimizar el recurso ambiental e impulsar el uso de recursos renovables.

Se estima que a finales del 2020, 50 000 millones de dispositivos IoT se conectarán a las redes móviles, aumentando drásticamente el volumen de

datos circulando en estas redes a un ritmo muy alto en comparación con el tráfico convencional. No es un secreto que las redes de 4G han casi alcanzado el límite teórico de la cantidad de *bits* que pueden incluirse en una cantidad dada del espectro, por lo que algunos científicos han comenzado a buscar frecuencias más altas donde el uso de la radio es más ligero. Samsung ha estimado que los reguladores del gobierno podrían liberar hasta 100 GHz del espectro de ondas milimétricas para comunicaciones móviles, alrededor de 200 veces más que las redes móviles de la actualidad; este exceso de espectro permitiría canales de mayor ancho de banda y mayores velocidades de datos. Los productos inalámbricos que utilizan ondas milimétricas ya existen para las transmisiones con línea de vista fija, un nuevo estándar inalámbrico de interior conocido como WiGig pronto permitirá la transferencia de datos entre dispositivos multigigabit en una misma habitación [13].

Por otro lado, la demanda de espectro se ha incrementado dramáticamente con la llegada de modernas aplicaciones Wireless. El espectro compartido, considerado como un mecanismo crítico para redes 5G, se visualiza desde el punto de vista de la escasez de espectro y el alcance de velocidades de acceso altas, garantizando la calidad de servicio. Desde la perspectiva de redes licenciadas, la interferencia generada por todos los usuarios secundarios puede minimizarse; desde el punto de vista de redes secundarias, existe una necesidad de asignación de redes para usuarios secundarios que en términos generales se desea que reduzca interferencias, habilitando la interacción de un mayor número de usuarios secundarios. En la actualidad, es posible encontrar selecciones de redes y mecanismos de asignación de canales con el fin de incrementar los ingresos al acomodar usuarios secundarios sufriendo sus preferencias, mientras al mismo tiempo, se respetan las políticas del operador de la red primaria. Existen soluciones con respecto a la interferencia acumulada para usuarios licenciados y la cantidad que los usuarios deben

pagar por el uso de la red primaria, estas soluciones se enfocan en generar un precio bajo para usuarios secundarios con un QoS específico, sujeto a las restricciones de interferencia de la red disponible con canales libres; por otro lado, se usa el enjambre de partículas y una versión modificada del algoritmo genético para apoyar la solución del problema planteado anteriormente. [14]

En este escenario, se integra una red convencional RF con dispositivos Li-Fi, enmarcados dentro de comunicaciones de luz visible. Se diseñaron *access point* de tipo VLC con FPGA (*Fiel Programable Gate Array*) que finalmente proveerán una conexión a internet convencional.

Así, 5G no será un avance significativo con respecto a 4G. Las cuatro generaciones previas de tecnología celular han quebrado paradigmas en cuanto a su compatibilidad en retrospectiva; de hecho, 5G necesitaría un cambio de paradigma que incluya altas frecuencias de portadora con anchos de banda masivos, densidades de dispositivos extremas en las estaciones base y números de antenas sin precedentes. Sin embargo, a diferencia de las cuatro generaciones previas, la quinta generación será altamente integradora: se unirá cualquier interface de aire y espectro 5G con LTE y WiFi para proveer cobertura universal y experiencias de usuario casi sin límites. Para soportar esto, el *core* de la red deberá alcanzar altos niveles de flexibilidad e inteligencia, además, la regulación del espectro debe ser mejorada, junto a las eficiencias de costo y energía, que traerán consideraciones cada vez más críticas [15].

Por último, debe incluirse dentro de cualquier análisis de 5G la densificación de red como mecanismo clave para la evolución de las redes inalámbricas en la próxima década; la densificación de red incluye densificación sobre el espacio (despliegue denso de celdas pequeñas) y frecuencia (usando grandes porciones del espectro de radiofrecuencia en distintas bandas). La densificación espacial a gran escala, efectiva en términos de

costos se obtiene con redes autoorganizadas y el manejo eficiente de la interferencia entre celdas. Los beneficios de la densificación de red solo se pueden obtener si se complementa con tecnologías posteriores y se incluye el uso de receptores avanzados capaces de cancelar la interferencia [16].

TRABAJOS RELACIONADOS

Pruebas con sensores

El concepto *Wireless Sensors Networks* (redes de sensores inalámbricos), corresponde a una red autoconfigurable compuesta por un pequeño número de nodos sensores, distribuidos espacialmente y comunicados entre sí a través de señales de radio, para monitorear el mundo físico y controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes [17]. Estas redes, muy usadas en contextos agrícolas, tendrían un gran impacto con la integración de redes híbridas RF y Li-Fi.

Los dispositivos de este tipo de redes son muy compactos y utilizan unas baterías parecidas a las de los terminales celulares, lo que permite su distribución sin restricciones por la posibilidad de cargarse con paneles solares [17]. En una etapa inicial de reconocimiento de señales, esta tecnología puede ser de gran utilidad para evaluar el desempeño de la red en determinados sitios fijos, los cuales posteriormente serán validados sobre ubicaciones móviles.

Seguridad y vehículos

Unos de los procesos más relevantes en el tema de seguridad sobre redes inalámbricas es la identificación por radiofrecuencia; esta tecnología se utiliza para identificar un elemento, seguir su ruta de movimiento y calcular distancias gracias a una etiqueta especial que emite ondas de radio, la cual se adjunta o se encuentra incorporada al objeto.

La tecnología RFID permite la lectura de etiquetas, incluso cuando estas no se encuentran en una línea visual directa y puede, además, penetrar finas capas de materiales (pintura, nieve, etc.). La etiqueta de radiofrecuencia (transpondedor, etiqueta RFID) está formada por un chip conectado a una antena, ambos contenidos en un rótulo (etiqueta RFID o rótulo RFID). Un dispositivo lo lee y, luego, captura y transmite la información; para facilitar a los usuarios utilizar la RFID en múltiples aplicaciones que permitan etiquetar y revocar algunas aplicaciones de forma segura y de manera eficiente, un esquema de solicitud de revocación seguro RFID es propuesta en [18]. Los usuarios son anónimos por completo en el esquema. El esquema propuesto no solo permite ser utilizado en multiaplicación de etiquetas RFID, sino también ser utilizado en una sola aplicación etiqueta RFID; además, en comparación con otros sistemas existentes, el esquema proporciona un mayor nivel de seguridad y tiene una ventaja de rendimiento.

Una implementación de la tecnología del esquema es que con la adopción de la función de *hash* y un número aleatorio se genera el módulo correspondiente mediante el uso de un típico mecanismo de desafío-respuesta. El esquema propuesto reduce la sobrecarga de almacenamiento y proporciona un mayor nivel de seguridad, se garantiza una menor complejidad computacional y la etiqueta complejidad comunicación de todo el protocolo.

El esquema puede lograr el anonimato completo y facilitar a los usuarios utilizar la etiqueta RFID multiaplicación, además de revocar algunas aplicaciones de forma segura y eficiente de acuerdo con las necesidades reales de los usuarios. En comparación con otros sistemas existentes, el sistema propuesto proporciona un mayor nivel de seguridad y tiene una ventaja de rendimiento en términos de complejidad. Por último, el sistema propuesto se puede utilizar en la etiqueta RFID de múltiples aplicaciones para promover el desarrollo en 5G [19].

Es importante mencionar que el estándar IEEE.802.15.7, trata acerca de la comunicación VLC, definiendo arquitecturas de red, capa física y mecanismos de acceso al medio. Uno de los problemas principales de Li-Fi se presenta en los llamados terminales ocultos [18]; esto hace referencia a la pérdida de LOS (*line of sight*) cuando se presenta un obstáculo entre el transmisor y el receptor, o al ángulo de los lentes de recepción cuando es limitado. La forma de contrarrestar estos efectos es adoptando RTS/CTS (*request to send/clear to send*) o adoptando protocolos HT-free como MS-Aloha (el cual requiere una sincronización absoluta); sin embargo, no se identifica una solución estándar en la actualidad [20]. Actualmente, existen análisis acerca de la posibilidad de integración de sistemas de posicionamiento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) con redes Li-Fi, esto para aumentar la precisión en distancias, por ejemplo, entre dos vehículos [21]. La medición del tiempo diferencial de arribo (TDoA) se presenta con una técnica conocida como multilateración, que consiste en medir la diferencia en términos de distancia de estaciones con posiciones conocidas que emiten señales al mismo tiempo.

En la Figura 3, se muestra la interacción de multilateración en dos vehículos para integración entre redes VLC y GNSS con enfoque geométrico.

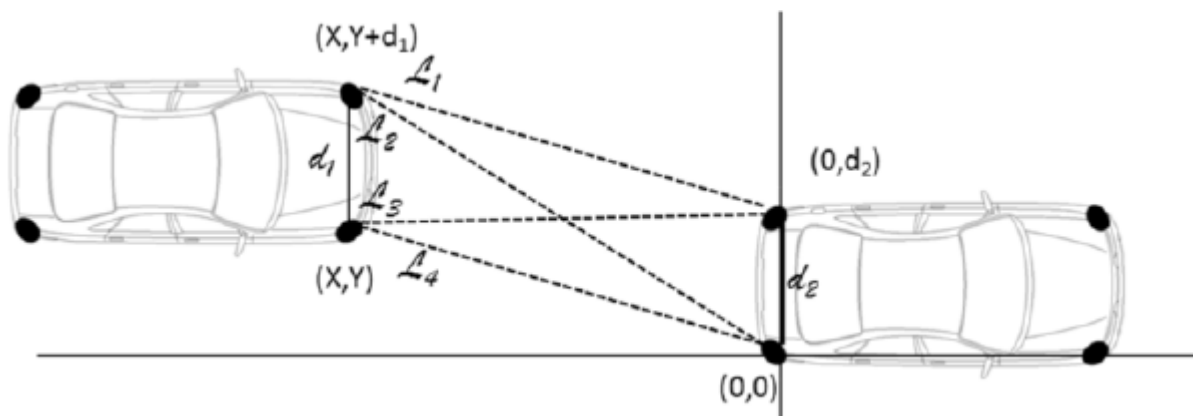


Figura 3. Geometría de multilateración.

Fuente: [18].

Escenarios de simulación

Es conocido que el *software* Matlab permite establecer escenarios primarios de simulación antes de plantear esquemas en soluciones open source como ns-2 o licenciadas como Opnet (Riverbed) o Estinet, por mencionar algunas; ejemplos de simulación en Matlab para redes de comunicaciones inalámbricas se encuentran en [22]. Adicionalmente, en [22] se integran diseños para una amplia gama de instrumentos de RF y dispositivos de radio de giro (DEG) definido por *software*; se muestra la posibilidad de verificar diseños en Matlab mediante el uso de señales de radio en vivo a través de la generación de forma de onda y pruebas en aire. Para efectos de este ejercicio, la simulación de extremo a extremo de los estándares WLAN y LTE permite determinar ciertos comportamientos que podrían equipararse para condiciones de redes físicas diferentes, esto permite determinar el rendimiento del sistema, cambiando los parámetros, incluyendo el ancho de banda, los modos MIMO, la modulación y el sistema de codificación.

Por último, durante la transmisión y recepción de señales de audio y vídeo en directo a través del aire, se determina todo el proceso de generación de forma de onda, la configuración de los parámetros de transmisión de la señal y de adquisición,

recuperación de datos IQ en Matlab y, finalmente, la medición y el análisis de los datos recibidos en Matlab y Simulink. Es claro que este esquema de configuración puede adaptarse a condiciones de redes Li-Fi desde el punto de vista de calidad del servicio, orientado a las características de ancho de banda y velocidades de transmisión de las futuras redes de quinta generación.

Para complementar los escenarios de simulación, se incluye dentro del análisis un cuadro comparativo con algunas de las herramientas de simulación más utilizadas en la comunidad científica, con el objetivo de establecer, de acuerdo con las necesidades puntuales de las redes de tipo li-Fi, cuál podría desarrollar de una mejor manera un esquema satisfactorio. Esta información se muestra en la Tabla 1.

CONCLUSIONES

Las posibilidades de desarrollo e investigación en materia de redes Li-Fi, teniendo en cuenta las tendencias de quinta generación, son generosas, ya que las perspectivas mundiales apuntan a un crecimiento importante del tráfico multimedia en

comunicaciones móviles, en especial *Device to Device*. Uno de los campos que lograron identificarse en el análisis realizado comprende los recursos energéticos distribuidos renovables, en línea con los proyectos sostenibles amables con el medio ambiente; esta línea de investigación, con la integración de conceptos de IoT, seguramente marcará caminos que permitan unir esfuerzos científicos para el uso de energías renovables con nuevas propuestas en redes de comunicaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se incluyen los *Wireless Sensors Networks* para la industria agrícola, que si bien no se perfila para un uso de redes de tipo Li-Fi, con los servicios proyectados para redes de quinta generación permitirán el análisis en tiempo de real de una mayor cantidad de información, muy valiosa no solo para el monitoreo de cultivos, sino también para la atención y prevención de desastres naturales. Por último, los escenarios de QoS para las nuevas redes ópticas, permiten identificar una posibilidad de mejorar los procesos desarrollados sobre redes 4G y WiMAX, como punto de partida para satisfacer las necesidades en las redes Li-Fi con entornos de quinta generación.

Tabla 1. Herramientas de simulación para escenarios Li-Fi.

| Herramienta | Observaciones |
|-------------------------|--|
| <i>Opnet (Riverbed)</i> | Requiere licencia y no permite modificación de librerías y protocolos. Tiene un tiempo de aprendizaje alto pero su robustez lo hace muy confiable. |
| NS-2 | No requiere licenciamiento. Tiene una comunidad de apoyo entusiasta. Permite modificación de protocolos y los cambios en modelos desde el punto de vista de codificación es muy ágil. Es confiable y altamente utilizado por la comunidad académica. |
| <i>Omnet ++</i> | No requiere licenciamiento. Es confiable y altamente utilizado por la comunidad académica. Configuración modular y programación basada en C++. Se requiere un esfuerzo importante para crear los escenarios de simulación, pero en foros especializados concuerdan en que es la herramienta más robusta. |
| <i>Estinet</i> | Requiere licencia. Tiene un tiempo de aprendizaje corto, pero no permite modificación de librerías. |

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] Savage Neil. *Li-Fi Gets ready to compete with Wi-Fi*. [En línea]. Disponible en: <http://spectrum.ieee.org>, 2014.
- [2] Jiang, J., Huo, Y., Jin F., Zhang, P., Wang, Z., Xu, Z., Haas, H. y Hanzo, L. "Video Streaming in the Multiuser Indoor Visible Light Downlink". *Univ. Of Sci. & Technol., Hefei, China. IEEE Access*, volume, 3, 2015.
- [3] Yunlu Wang, Xiping Wu and Harald Haas, " Distributed Load Balancing for Internet of Things by using Li-Fi and RF Hybrid Network". *IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC): Mobile and Wireless Networks*, 2012.
- [4] Fan, K., Gong, Y., Yintang, H. "RFID secure application revocation for IoT in 5G". *State Key Laboratory of Integrated Service Networks Xidian University Xi'an, China*, IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2015.
- [5] Elias Yaacoub, " On the Use of Device-to-Device Communications for QoS and Data Rate Enhancement in LTE Public Safety Networks". *IEEE Qatar Mobility Innovations Center (QMIC), Qatar Science and Technology Park, Doha, Qatar. Workshop on Visible Light Communications and Networking*, 2014. <https://doi.org/10.1109/WCNCW.2014.6934892>
- [6] Esmailpour, A., Victor, J. y Rodriguez, P. "Integrated QoS provisioning for unified LTE-WiMAX networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, The University of New Haven, West Haven, CT, USA. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2016.
- [7] Igbal, M. Ashraf; Saltz, Joel; Bokhari, Shahid. *Performance Tradeoffs in static and Dynamic strategies*, NASA, 1986.
- [8] CISCO, *How Does Load Balancing Work?*. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/5212-46.html>
- [9] Guo, Y., Antoniou, Z. y Dixit, S. "Resource management and quality of service in third generation wireless networks". *Nokia Res. Center, Espoo, Finland*. 2002. *IEEE Communications Magazine*, volume:39 , issue, 2.
- [10] Shilpa Talwar, Debabani Choudhury, Konstantinos Dimou, Ehsan Aryafar, Boyd Bangerter, Kenneth Stewart, "Enabling Technologies and Architectures for 5G Wireless". *IEEE Intel Corporation, Santa Clara, CA*, 2015.
- [11] Elloumi, O., Song, J., Ghamri-Doudane, Y. y Leung, V., "IoT _ M2M From Research To Standards The Next Steps". *IEEE communications Magazine*, 2015.
- [12] Rana, M., Li, L y Su, S. "Kalman Filter Based Microgrid State Estimation and Control Using the IoT with 5G Networks". Faculty of Engineering and Information Technology University of Technology, Sydney, Broadway, NSW 2007, Australia. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2015.7380989>
- [13] Rappaport T., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G., Schulz, J., Samimi, M. y Gutierrez, F. " Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!". 1NYU WIRELESS, Polytechnic Institute of New York University, New York, NY 11201, USA, *Advanced Technology Group Samsung Electronics America*. IEEE Access, 2013.
- [14] Ejaz, W., Ejaz, N., Kim, H., Anpalagan, A., Jo, M. y Hasan, N. "Network Selection and Channel Allocation for Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, Dhofar University, Salalah, Oman. IEEE Access*, Volume, 4, 2016.
- [15] Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.; Lozano, A.; Soong, A.; Zhang, J. y Andrews, J. "What Will 5G Be? ". *Univ. Of Texas at Austin, Austin, TX, USA. Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, volume:32, issue, 6, 2015.

- [16] Bhushan, N., Li, J., Malladi, D., Gilmore, R., Brenner, D., Damnjanovic, A., Sukhvasi, R., Patel, C. y Geirhofer, S. "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G". *Qualcom Technologies incorporated. IEEE Communications Magazine*, volume, 52, issue, 2, 2014.
- [17] Archila, D., Santamaría, F. "Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos". *Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja, Colombia, REVISTA DIGITAL TIA*, Volumen 2, número 1, julio-diciembre, 2013.
- [18] Scopigno, R., Autolitano, A., Acarman, T., Yaman, C. y Topsu, S. (2015) "The potential benefits of on-board Li-Fi for the cooperation among vehicles". Istituto Superiore Mario Boella, Multi-Layer Wireless Dept., Torino, Italy. 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). <https://doi.org/10.1109/ICTON.2015.7193411>
- [19] Houman Zarrincoub. 5G/LTE/WLAN: Waveform Generation, Simulation, Measurement and over the air Testing with MATLAB. [En línea]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/videos/5glte wlan-waveform-generation-simulation-measurement-and-over-the-air-testing-within-matlab-117661.html?requested-Domain=www.mathworks.com>, 2016
- [20] Arquitectura 5G. 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.w3ii.com/es/5g/5g_architecture.html
- [21] Zhu, H., Zhang, M., Wang, C., Guo, X. y Zhang, Y. "Design of a visible light Internet access system". *State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, 100876, China. Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2015.
- [22] Ejaz, W., Ejaz, N., Kim, H., Anpalagan, A., Jo, M. y Hasan, N. "Network Selection and Channel Allocation for Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, Dhofar University, Salalah, Oman. IEEE Access*, volume, 4, 2016.

