

VLC: transmitir datos usando luz LED

Abstract—La comunicación por luz visible, conocida como VLC, permite transmitir información mediante variaciones rápidas en la intensidad luminosa de una fuente LED. Estas variaciones son imperceptibles para el ojo humano, pero pueden ser detectadas por un receptor óptico. Este artículo explica, desde una perspectiva divulgativa, cómo una luminaria puede actuar simultáneamente como fuente de iluminación y como medio de comunicación, destacando sus ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones en minería subterránea.

I. Introducción

La comunicación por luz visible, conocida como VLC por sus siglas en inglés, es una tecnología que permite transmitir información utilizando luz emitida por LEDs. Aunque normalmente se asocia la iluminación únicamente con visibilidad, una luminaria también puede funcionar como un medio de comunicación. El principio general consiste en variar la intensidad luminosa de un LED a alta velocidad. Estas variaciones pueden representar información digital y ocurren a una frecuencia suficientemente rápida como para no ser percibidas por el ojo humano. Sin embargo, un receptor óptico sí puede detectar esos cambios y transformarlos nuevamente en una señal eléctrica [1].

En este sentido, VLC permite que una misma infraestructura cumpla dos funciones: iluminar un espacio y transmitir datos. Esta característica resulta especialmente atractiva en ambientes donde ya existe iluminación artificial permanente, como túneles, galerías, laboratorios o espacios industriales.

II. Principio de funcionamiento

Un sistema VLC básico está formado por un transmisor óptico, un canal de propagación y un receptor. El transmisor utiliza una fuente LED cuya intensidad luminosa se modula según la información que se desea enviar [1].

En aplicaciones digitales simples, la modulación puede representar estados lógicos mediante encendido y apagado, o mediante variaciones controladas de intensidad. De esta forma, los datos eléctricos se convierten en variaciones ópticas que viajan a través del espacio.

El canal de propagación corresponde al medio físico por donde se desplaza la luz. En condiciones ideales, existe línea de vista directa entre el LED transmisor y el receptor. También pueden existir reflexiones útiles, aunque estas dependen de la geometría del entorno y de las superficies presentes.

Finalmente, el receptor utiliza un fotodetector para convertir las variaciones de luz en una señal eléctrica. Luego, esta señal debe acondicionarse para recuperar la información original [1].



Fig. 1. Montaje experimental VLC con luminaria LED, fuentes de alimentación y receptor óptico utilizado para validar la transmisión mediante luz visible.

III. Transmisor y receptor

En el extremo transmisor, el elemento principal es el LED. Para que este pueda transmitir datos, se requiere un circuito de control capaz de modificar su corriente de operación de acuerdo con la señal de entrada. En implementaciones experimentales, esta señal puede provenir de una interfaz digital como UART, generada por un microcontrolador.

El circuito de transmisión suele incluir una etapa de potencia, ya que los LEDs de alta intensidad requieren corrientes superiores a las que puede entregar directamente un microcontrolador. Por esta razón, se utilizan componentes de conmutación, como MOSFETs, que permiten controlar la corriente del LED sin exponer directamente la etapa lógica a altas potencias [2].

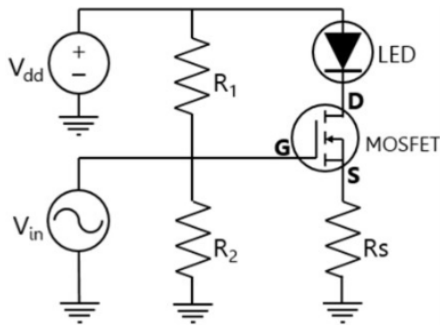


Fig. 2. Etapa transmisora VLC con MOSFET para modular la corriente del LED mediante una señal de entrada.

En el extremo receptor, el fotodetector convierte la potencia óptica recibida en una señal eléctrica. Esta señal puede ser débil o contener componentes no deseadas, por lo que normalmente se requiere amplificación, filtrado y comparación.

El filtrado permite reducir componentes lentas o ruido asociado a la luz ambiente, mientras que el comparador puede actuar como un umbral de decisión para reconstruir una señal digital. Así, las variaciones luminosas recibidas se transforman nuevamente en datos eléctricos interpretables por un microcontrolador u otro sistema de procesamiento.

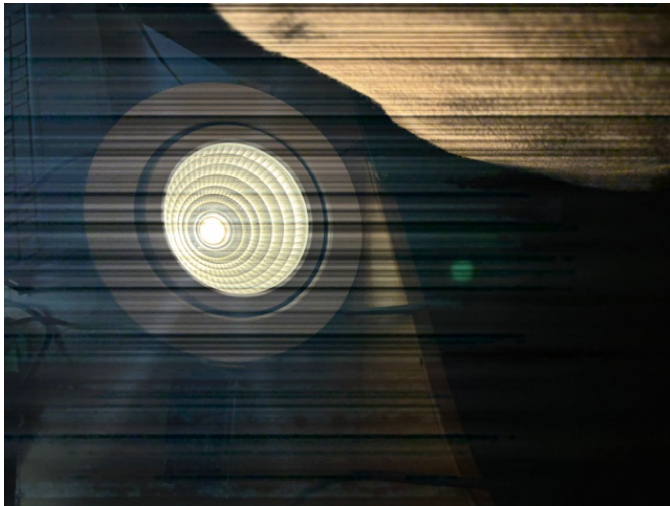


Fig. 3. Fuente LED empleada como transmisor óptico, cuya intensidad luminosa puede modularse para transportar información.

IV. Ventajas de VLC

Una de las principales ventajas de VLC es que no utiliza radiofrecuencia. Esto permite operar en entornos donde las señales RF pueden estar restringidas, saturadas o afectadas por interferencias electromagnéticas [1].

Otra ventaja es la posibilidad de reutilizar infraestructura de iluminación existente. En espacios donde ya se requieren luminarias LED, la comunicación puede integrarse como una

función adicional, reduciendo la necesidad de instalar medios de transmisión completamente independientes.

VLC también presenta una comunicación naturalmente dirigida. La luz se propaga dentro de una zona determinada, lo que permite delimitar espacialmente la cobertura. Esta característica puede ser útil para aplicaciones localizadas, donde se desea enviar información a nodos ubicados dentro de un área específica.

Además, al tratarse de una tecnología óptica, puede aportar una capa adicional de seguridad física. La señal no atraviesa paredes como algunas señales de radiofrecuencia, lo que limita su propagación fuera del espacio iluminado.

V. Limitaciones y desafíos

A pesar de sus ventajas, VLC también presenta limitaciones importantes. Una de las principales es su dependencia de la trayectoria óptica entre transmisor y receptor. Si existe una obstrucción física, el enlace puede degradarse o interrumpirse [3].

La luz ambiente también puede afectar la recepción. Fuentes externas, reflejos o variaciones de iluminación pueden introducir ruido en el sistema, especialmente si el receptor no cuenta con filtrado adecuado.

Otro desafío corresponde a la alineación y cobertura. Para que el receptor detecte correctamente la señal, debe encontrarse dentro del campo útil de iluminación o dentro de una zona donde las reflexiones sean suficientes. Esto puede ser complejo en entornos dinámicos, donde personas, vehículos o equipos se mueven constantemente [3].

Por estas razones, VLC no debe entenderse como una solución universal ni como reemplazo directo de otras tecnologías. Su mayor valor aparece cuando se integra dentro de una arquitectura híbrida, complementando enlaces de radiofrecuencia, ópticos o de sensores.

VI. Aplicación en minería subterránea

En minería subterránea, VLC puede aprovechar la presencia de luminarias en túneles y galerías para habilitar comunicación localizada. Por ejemplo, podría utilizarse para transmitir comandos, señalización, información de evacuación, instrucciones hacia nodos de borde o datos hacia receptores ubicados dentro de una zona iluminada.

Su uso puede ser especialmente interesante en áreas donde se busca reducir interferencia de radiofrecuencia o donde la comunicación debe estar delimitada espacialmente. Además, en escenarios de emergencia, la iluminación puede actuar como soporte visual y como canal de información.

Sin embargo, el entorno minero introduce desafíos relevantes: polvo, humedad, vibraciones, tránsito de maquinaria y posibles obstrucciones. Estos factores pueden afectar la calidad del enlace óptico, por lo que el diseño debe considerar redundancia y mecanismos de respaldo [4].

Dentro de un sistema híbrido, VLC puede funcionar como un canal complementario. No necesita resolver por sí solo toda la conectividad de la mina, sino aportar una capacidad específica dentro de una arquitectura más robusta.

VII. Conclusión

VLC demuestra que la luz LED puede utilizarse no solo para iluminar, sino también para transmitir información. Mediante la modulación de intensidad luminosa y el uso de receptores ópticos, es posible construir enlaces de comunicación simples, dirigidos y libres de radiofrecuencia.

Sus ventajas la convierten en una tecnología atractiva para aplicaciones industriales y subterráneas, especialmente cuando se requiere comunicación localizada o se desea aprovechar infraestructura de iluminación existente.

No obstante, sus limitaciones frente a obstrucciones, luz ambiente y condiciones dinámicas hacen necesario integrarla dentro de sistemas híbridos. En minería subterránea, VLC puede aportar una capa adicional de comunicación, aumentando la diversidad tecnológica y contribuyendo a la continuidad operacional del sistema completo [5].

Proyección y pilotaje

El siguiente paso para la tecnología VLC es avanzar desde el montaje experimental hacia pruebas que permitan estudiar su comportamiento bajo condiciones representativas de iluminación, polvo, obstrucciones y operación minera. Los espacios de prototipado y validación pueden contribuir a evaluar su integración como canal complementario dentro de la arquitectura TerraQuantum.

Conoce más sobre las oportunidades de pilotaje y escalamiento tecnológico exploradas por TerraQuantum:

[Leer la nota completa en Reporte Minero](#)

References

- [1] T.-C. Yu, W.-T. Huang, W.-B. Lee, C.-W. Chow, S.-W. Chang, and H.-C. Kuo, "Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications," *Crystals*, vol. 11, no. 9, Art. no. 1098, 2021, doi: 10.3390/cryst11091098.
- [2] L. Teixeira, F. Loose, J. M. Alonso, C. H. Barriuello, V. A. Reguera, and M. A. Dalla Costa, "A Review of Visible Light Communication LED Drivers," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 1, pp. 919–933, 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3092284.
- [3] J. Solís, I. Sánchez, C. Azurdia-Meza, P. Palacios Játiva, D. Zabala-Blanco, and A. Dehghan Firoozabadi, "Line-of-Sight Probability Analysis of Underground Mining Visible Light Communication Diversity Schemes Under Random Receiver Orientation," *Sensors*, vol. 25, no. 9, Art. no. 2890, 2025, doi: 10.3390/s25092890.
- [4] P. Palacios Játiva, C. A. Azurdia-Meza, I. Sánchez, D. Zabala-Blanco, A. Dehghan Firoozabadi, I. Soto, and F. Seguel, "An Enhanced VLC Channel Model for Underground Mining Environments Considering a 3D Dust Particle Distribution Model," *Sensors*, vol. 22, no. 7, Art. no. 2483, 2022, doi: 10.3390/s22072483.
- [5] O. Stoicuta, S. Riurean, S. Burian, M. Leba, and A. Ionica, "Application of Optical Communication for an Enhanced Health and Safety System in Underground Mine," *Sensors*, vol. 23, no. 2, Art. no. 692, 2023, doi: 10.3390/s23020692.

Proyecto apoyado por

