

Luigi Salamandra

Angelo Pizzoleo

DGTCSI - ISCTI – Università
degli Studi di Roma “Tor
Vergata”

Enrico Manca

DGTCSI - ISCTI

Visible Light Communication e rete Internet globale

Visible Light Communication and global Internet network

Sommario: *Il costante sviluppo tecnologico della rete 5G ha trainato contestualmente molte altre tecnologie per telecomunicazioni, che potranno essere utilizzate a supporto della rete stessa, ed in maniera complementare, ma anche come alternativa alle attuali, laddove impossibilitate da limiti di sicurezza o di applicabilità. Tra queste, la tecnologia basata su luce visibile come mezzo trasmissivo, Visible Light Communication - VLC, è sicuramente tra le più promettenti, in termini soprattutto di ri-utilizzo delle risorse per duplici scopi (illumin/comunicazione!), e peculiari caratteristiche di implementazione. Nondimeno, questa tecnologia è al momento in una fase embrionale, con diversi approcci realizzativi, anche ibridi (con altre pre-esistenti tecnologie) e aspetti di interfacciamento alla rete internet globale ancora in fase decisionale. Questo lavoro darà una breve panoramica dello stato dell'arte attuale della tecnologia VLC.*

Abstract: *The constant technological development of the 5G network has driven many other telecommunication technologies, which can be used to support the network itself, also in a complementary way, but more as an alternative where the present-day ones are unrealistic due to safety or feasibility limits. Among them, the technology based on visible light as transmission medium, so called Visible Light Communication - VLC, is certainly among the most promising, especially in terms of both re-use of resources for dual purposes (illumination!), and peculiar features of implementation. Nevertheless, this technology is currently in an embryonic stage, with different employment approaches, even hybrids (with other pre-existing technologies) and facets of interfacing with the global internet network still under decision. This work will give a brief overview of the current state-of-the-art of VLC technology*

1. Introduzione

Il progresso tecnologico alla base dello sviluppo del 5G rivoluzionerà in toto la vita di tutti i giorni, grazie al notevole aumento di banda (*ultra-larga*) a disposizione, non solo dell'utente finale *umano* (uso massivo dei social network, scambio foto/video alta risoluzione, servizi di streaming on-demand), ma anche di vari dispositivi 'intelligenti' IoT (Internet-of-Things), che sfrutteranno la rete per uno scambio continuo di informazioni, arrivando alla visione urbanistica (e non) della città autonomamente ed efficientemente gestita (Smart-City). Questo utilizzo ubiquo della connessione, permette lo sviluppo di altre tecnologie di telecomunicazione, oltre l'odierno binomio fibra/radio-frequenza;

queste tecnologie non necessariamente devono competere in termini di bit-rate, ma possono essere implementate in scenari alternativi e/o complementari a quelle attuali, eventualmente superando limiti intrinseci alle stesse.

Tra queste nuove tecnologie, una che si sta imponendo prepotentemente è il Li-Fi (Light-Fidelity), nome coniato per assonanza con la Wi-Fi (Wireless-Fidelity), tecnologia wireless basata sull'uso della luce visibile come veicolo di trasmissione dell'informazione. Questo concetto, più generalmente noto come Visible Light Communication (VLC), in realtà è tra i più 'vecchi' (basti pensare a segnali di fumo, fari nautici, SOS tramite luce intermittente), ma rimaneva confinato in uno stato di *non-applicabilità* per via dell'eccessiva latenza delle sorgenti ottiche (lampadine ad incandescenza, a fluorescenza, neon). Invece, grazie allo sviluppo e distribuzione di sorgenti per illuminazione artificiale d'ambiente basate su LED (Light Emitting Diode), che emettono direttamente una luce nello spettro visibile, e che sono di per sé inseribili all'interno di circuiti elettrici dedicati alla loro stessa modulazione in corrente, unito alle recenti e moderne idee di uso delle risorse senza sprechi (insito nell'idea stessa di Smart-City), ha permesso l'evoluzione, da concetto a prodotto finito, appunto della tecnologia VLC. In fin dei conti, l'illuminazione artificiale è presente ovunque, non solo in luoghi chiusi, dove il suo utilizzo è essenziale, ma anche in ambienti aperti (illuminazione stradale, insegne luminose, fari dei veicoli, semafori), e soprattutto, anche su dispositivi mobili (smartphone, tablet). Sfruttare la radiazione visibile emessa dai LED in maniera bivalente, come illuminazione e come connessione dati, 'sprecando' una *singola* risorsa è sicuramente un approccio efficiente; inoltre, la radiazione elettro-magnetica nel visibile è sicuramente più sicura, in termini sia di *safety* della persona esposta alla radiazione, sia di *salvaguardia delle informazioni* da possibili malintenzionati.

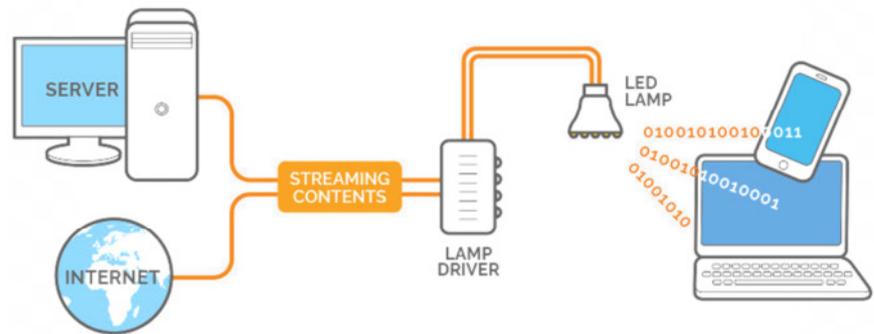
Questa tecnologia, che è già pronta alla commercializzazione in varie forme (la suddetta Li-Fi è già in fase di standardizzazione [1]), presenta, non di meno, ancora molte criticità applicative, in particolare per quanto riguarda il suo utilizzo formale come mezzo trasmissivo in uno scenario più ampio di condivisione collettiva delle informazioni (rete internet)

1. VLC: concetto base

Di fatto, è facile pensare e realizzare un link VLC uni-direzionale, che porti lo streaming dati in *down-link* dalla sorgente (server o internet) tramite il trasmettitore (LED) fino al ricevitore del dispositivo *client*. Quello che serve, sostanzialmente, è un dispositivo che riceva i dati dalla rete e traduca questo in un segnale di modulazione per il LED (*LED driver*); la luce così modulata investirà il dispositivo ricevente VLC finale (fig. 1). Anche le reti in connessioni cablate (Ethernet, Fibra Ottica e Power-Line) o wireless (Wi-Fi, Bluetooth) odierne utilizzano lo stesso paradigma, basti pensare alle reti casalinghe wireless (ma era lo stesso con quelle cablate Ethernet), in cui il segnale dall'esterno arriva su un modem connesso tramite fibra ottica (più moderna), o rete telefonica

(ad oggi ancora la più diffusa), e viene poi trasformato in un'onda elettro-magnetica (nel caso tecnologia Wi-Fi (antenna)).

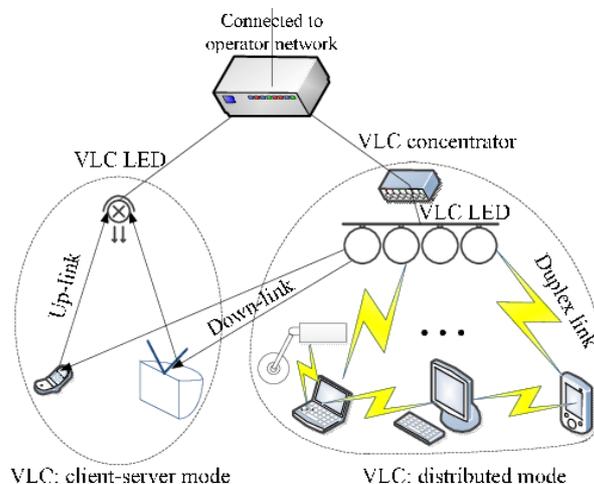
Figura 1. Schema generico di un apparato VLC (down-link). Lo streaming dati, dalla rete (o server), viene mandato al driver della sorgente LED, e diventa esso stesso il segnale modulante; la luce, quindi, verrà emessa 'modulata' con l'informazione dello streaming dati stesso, e ricevuta da vari dispositivi client



Quello che differisce, però, è il mezzo fisico con cui il dispositivo finale client riceve il segnale dati. Infatti, le connessioni di rete basate interamente su dispositivi elettrici (come le porte LAN), o quelle wireless che utilizzano un'antenna sia per trasmettere, sia per ricevere (unico mezzo fisico), sono facilmente implementabili e scalabili. Al contrario, le tecnologie ottiche, in cui serve sia un trasduttore da elettrico ad ottico (Laser o LED), sia l'inverso (foto-rilevatore), come per le reti in fibra, oppure per le Optical Wireless Communications, del quale insieme fa parte, appunto, la VLC, sono più onerose in termini anche solo di spazio condiviso per l'implementazione (Tx e Rx devono essere presenti entrambi sul dispositivo). Ancor più importante, questo limita notevolmente la capacità dei client VLC di poter utilizzare un percorso inverso di comunicazione (up-link).

In questo lavoro, quindi, verranno presentati vari approcci possibili per l'implementazione di una rete con *link duplex* basata su tecnologia VLC, sia totale, sia ibrida con altre tecnologie pre-esistenti e/o adattate, nonché l'approccio alla comunicazione della rete VLC (ibrida o meno) con l'esterno (fig. 2).

Figura 2: Schemi di tipologie di reti VLC: client-server o distribuito (duplex link). In questi schemi è previsto che il dispositivo finale client sia in grado anche di trasmettere informazione tramite tecnologia VLC



2. Link duplex VLC

Come accennato, la tecnologia VLC, in generale, prevede una bi-direzionalità del collegamento (duplex), che però risulta di difficile attuazione, soprattutto considerando la natura dei dispositivi finali, al momento non predisposti degli adeguati sistemi fisici (Tx e/o Rx). Di seguito si vedrà una breve panoramica delle possibili soluzioni.

2.1. VLC-ready duplex

Ci sono tutta una serie di dispositivi 'VLC-ready', cioè già predisposti, nativamente, di apparati interni utili alla realizzazione di un link VLC duplex. Esempi lampanti sono smartphone e tablet (fig. 3): essi ormai sono dotati di LED e foto-camera per poter fotografare e fare riprese (risulta uno dei maggiori utilizzi degli smartphone, tanto che alcune linee produttive puntano proprio sulla qualità di questa feature). Il LED del flash, quindi, è chiaramente utilizzabile come trasmettitore, e recentemente cominciano ad essere installati anche più di un LED, per cui si può azzardare l'ipotesi di trasmissione e/o comunicazione 'multi-canale'. La foto-camera, d'altronde, non è altro che un sofisticato foto-rilevatore, per cui può essere usato come ricevitore, ed anche in questo caso esistono già prodotti con due o più foto-camere. Oltre tutto, lo stesso schermo dei dispositivi smartphone e tablet (ma anche di Monitor TV!) non è altro che un trasmettitore, se opportunamente utilizzato [2].

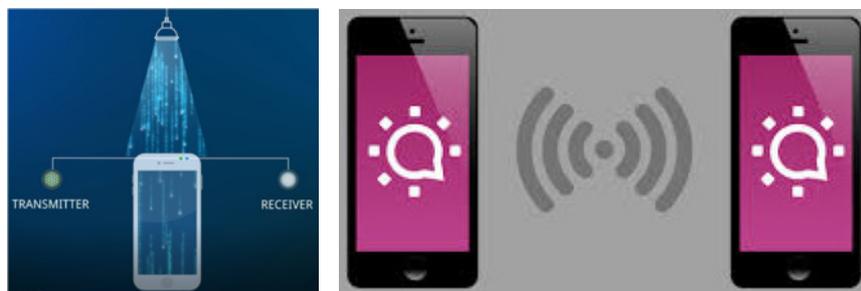


Figura 3. Flash e foto-camera integrati in uno smartphone, utilizzabili come Tx e Rx, rispettivamente, per comunicazioni VLC. Due smartphone possono comunicare tra loro con un link VLC duplex

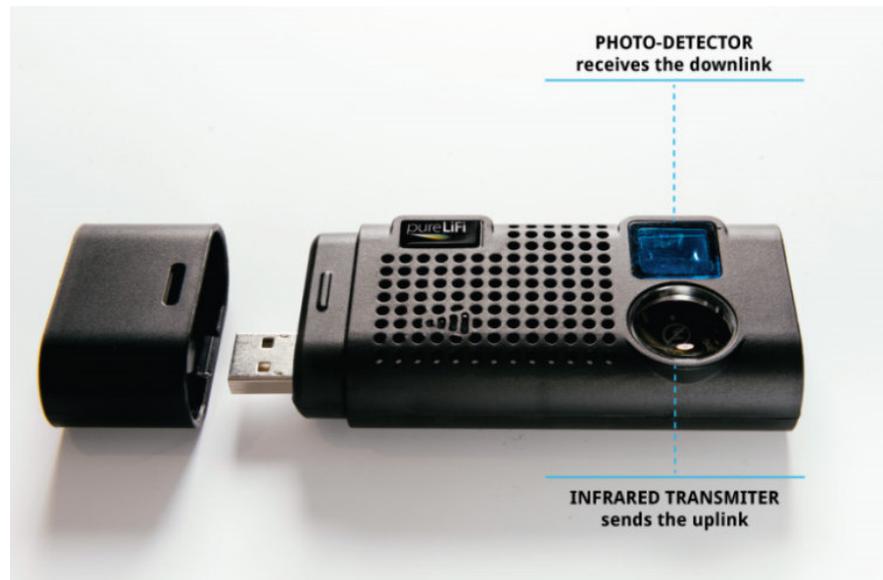
Unico inconveniente di questo approccio è la difficile definizione di uno standard adeguatamente ampio da prendere in considerazione tutte le possibili casistiche, data la natura aleatoria dei dispositivi coinvolti nel link VLC (in particolare, la latenza trasmissiva dovuta sia alle varie dimensioni delle sorgenti, flash o schermi, sia alle potenze di emissione dei LED).

2.2. Dongle-assisted duplex

L'approccio (al momento più usato) per intervenire in tal senso è quello di inserire un dongle (fig. 4), che integri al dispositivo gli elementi mancanti (LED e/o foto-rilevatore) [3], e che dia al contempo uno standard minimo comune agli apparati di trasmissione. Questo approccio è utile soprattutto per dispositivi da ufficio e macchinari (stampanti, PC desktop, condizionatori), ma può essere esteso anche ai

dispositivi VLC-ready, sempre con lo scopo di omogeneizzare le capacità di comunicazione (che risulterebbero dongle-dipendenti!).

Figura 4: Dongle USB per integrare "capacità" di comunicazione VLC a dispositivi nativamente privi di essa



2.3. Lampadari VLC

Discorso affine si può fare per quanto riguarda gli apparati 'sorgenti' della rete VLC. Come detto, infatti, una rete VLC sfrutta le capacità del LED di poter essere modulato per creare un segnale ottico nel visibile con contenuto informativo. Una qualunque lampadina LED, quindi, può diventare una sorgente VLC in down-link. Nella realtà dei fatti, dato che le attuali lampadine LED sul mercato presentano un circuito raddrizzatore a ponte di diodi, per via dell'adattamento alle pre-esistenti reti elettriche, è dubbia la fattibilità di una modulazione diretta in corrente; ma anche sorvolando su questo aspetto (la produzione di nuovi LED non comporterebbe costi aggiuntivi, e basterebbe sostituire il circuito raddrizzatore con un driver), rimane il problema della ricezione di un segnale VLC (up-link).

Figura 5. LED Panel (sinistra) e Lamp (destra) con sistemi VLC integrati



2.4. Bluetooth Low Energy (BLE)

Altro approccio possibile per risolvere il problema dell'up-link in una rete VLC è quella di sfruttare un'altra tecnologia wireless pre-esistente, o

comunque più facilmente integrabile. Viene da sé che sfruttare il Wi-Fi renderebbe inutile tutto il discorso. Serve una tecnologia che, almeno in parte, verta verso le nuove idee di risparmio energetico, riutilizzo delle risorse, basso costo, integrazione (in ambito IoT soprattutto), rispettando le idee alla base degli *smart-systems*, e del 5G stesso. Al momento la soluzione adottata è quella di sfruttare un canale sempre ottico-elettrico, sfruttando delle porte ad infrarossi (IR), economiche per definizione, visto il loro impiego in tantissimi prodotti di uso comune (telecomandi in primis); tuttavia questo approccio presenta molte criticità affini al VLC, in particolare il problema della direzionalità del canale.

Serve un metodo che sia efficiente, al contempo, in energia impiegata e raggiungibilità. In tal senso, una tecnologia molto interessante è quella del Bluetooth Low Energy (BLE) [5], anche nota come Bluetooth Smart [6]. Questa tecnologia è simile alla 'madre' Bluetooth, ma con consumi energetici e costi nettamente inferiori, pur mantenendo simili standard di comunicazione (fig. 6). In particolare, pensando ad una tecnologia ibrida BLE/VLC, in un ambiente chiuso non troppo ampio come una abitazione, oppure un ufficio, si potrebbero sfruttare la velocità di connessione in down-link tramite VLC (ordine del Gb/s), mentre l'up-link sarebbe delegato alla tecnologia BLE, capace di arrivare a velocità utili oltre 1Mb/s [5]. La BLE, inoltre, risulterebbe efficace dal punto di vista del riconoscimento del dispositivo all'interno dello spazio di azione della VLC stessa.

Bluetooth™
4.0

Low Energy
50 meter range
1 Mbt/s transfer

consumes 50-99%
less power than
Bluetooth Classic
(depending on the use case)

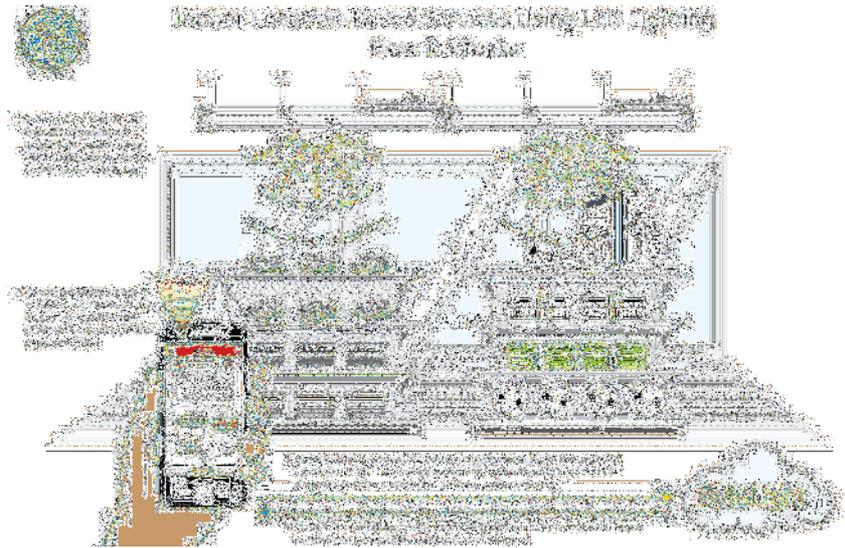


Figura 6. Caratteristiche generali della tecnologia Bluetooth Low Energy

I dispositivi più moderni già prevedono apparati interni per sfruttare la comunicazione BLE, quindi anche l'espansione di una rete ibrida BLE/VLC sarebbe meno frenata. Inoltre, dal punto di vista delle sorgenti di luce artificiale per la parte Tx della VLC, il precedente paradigma di dispositivi Tx/Rx entrambi presenti sul lampadario (per esempio), risulterebbe meno costrittiva, dato che il Rx in tecnologia BLE potrebbe essere collocato anche distante fisicamente dalla sorgente stessa, integrato nel circuito di pilotaggio del LED. Un approccio in tal senso è

stato già testato dalla GE Lightning [7] con il loro progetto ByteLight (fig. 7).

Figura 7. Progetto ByteLight della GE Lightning, in cui si sfrutta una tecnologia basata su BLE e VLC insieme per geolocalizzare un cliente e mandare sul suo smartphone indicazioni della merce esposta



3. VLC vs Internet

Come detto, la VLC rappresenta una tecnologia innovativa, già pronta per l'ampio ed eterogeneo mondo che sarà la rete 5G, grazie anche alle altissime prestazioni di velocità di trasferimento dati [8-10]. Tuttavia, come qualunque rete wireless, anche un link ottico VLC comporta l'utilizzo di un'altra tecnologia 'cablata' a supporto per garantirne l'accesso ad internet. Naturalmente, si può adattare il prodotto VLC, in particolare quello da installare in posizione fissa e che funga da server, ma essendo la tecnologia molto 'adattabile' a varie situazioni, si sono sviluppate anche altre realtà

3.1. PLC e PoE

Al momento la stragrande maggioranza delle realtà commerciali attive nel campo delle VLC applicate (Li-Fi), punta su una interfaccia VLC/internet basata su tecnologia PLC (Power-Line Communication), le quali sfruttano la rete elettrica (di alimentazione) per far viaggiare l'informazione. Possono essere sia esse stesse un ponte con un altro tipo di rete (telefonica o fibra ad un modem Ethernet/PLC), ma idealmente potrebbe essere direttamente connesso all'esterno (fig. 8), in analogia con l'approccio FTTC (Fiber-To-The-Cabinet) rispetto a quello FTTH (Fiber-To-The-Home).

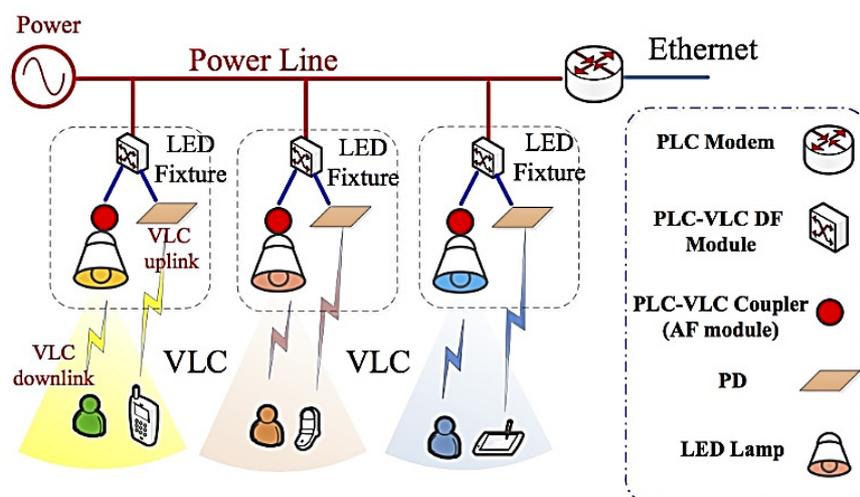


Figura 8. Schema completo di una rete PLC/VLC

La sinergia tra VLC e PLC è ampia, anche grazie agli standard della tecnologia PLC definiti HomePlug (famiglia di varie specifiche di comunicazione sulla linea di alimentazione), che comprendono tantissime tipologie applicative (Internet Protocol Television, Home Gaming, Streaming), ma soprattutto le specifiche della tecnologia [11] sono pubbliche, e fortemente focalizzate sulla comunicazione con dispositivi IoTs. Un adattamento di un apparato HomePlug, per supportare nativamente anche VLC, risulterebbe relativamente semplice, economico ed immediato.

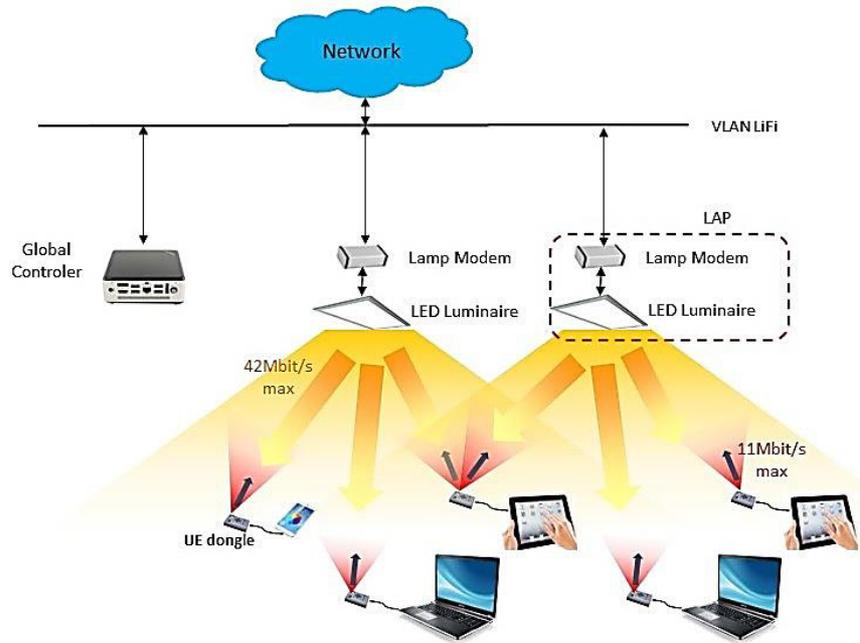
La tecnologia VLC, inoltre, può diventare essa stessa un vantaggio per la diffusione della PLC. Infatti, negli ultimi anni le reti PLC sono migliorate notevolmente in termini di affidabilità e velocità di trasmissione, per altro su un'ampia area di distribuzione (sfrutta la rete elettrica pre-esistente in loco). Tuttavia, una rete PLC prevede cablaggi ai singoli dispositivi, e nel caso dei dispositivi mobile (a batteria) risulta impossibile, lasciando un vantaggio considerevole alla tecnologia Wi-Fi. Se però si pensa ad una combinazione di PLC e VLC (P/V-LC), possiamo trarre vantaggio dall'infrastruttura di rete PLC per il backhaul, distribuita praticamente ovunque in un ambiente chiuso come una casa (ogni presa elettrica diventa potenzialmente un punto di accesso), ed utilizzare apparati HomePlug con tecnologia VLC per la connessione wireless ai dispositivi finali, mobili e non.

Oltretutto, gli apparati PLC possono essere inseriti nei circuiti di alimentazione di rete, ma anche applicati ai circuiti di illuminazione di rete, implementando una soluzione a singolo chip (basso costo di integrazione). Entrambe le tecnologie forniscono il potenziale per le comunicazioni Gigabit a un costo inferiore, e con una maggiore sicurezza, rispetto al Wi-Fi.

Alternativamente alle PLC, ad integrazione e supporto della tecnologia VLC vi è anche il Power-over-Ethernet (PoE), ovvero la possibilità, laddove sia o energeticamente vantaggioso, o difficile reperire corrente, di alimentare le apparecchiature utilizzando lo stesso cavo di rete dati ethernet (ultimo standard IEEE 802.3at) [12]. Più in generale, comunque, si può pensare di sfruttare il segnale uscente da

una porta Ethernet standard (fig. 9) in modo da poter pilotare (modulare) la sorgente a LED del link VLC (down-link), e viceversa, mandare sulla porta Ethernet un segnale elettrico amplificato dal fotorelevatore (up-link). Unico inconveniente, in quest'ultimo caso, è la rigidità dei sistemi Ethernet, non disponibili ad un adattamento degli standard, dato il loro lungo e consolidato 'retaggio'.

Figura 9. Rete VLC interfacciata tramite Ethernet (VLAN) alla rete internet



In questo senso, risulta chiaro perché società come **pureLiFi** abbiano già implementato e commercializzato prodotti VLC che supportano nativamente PLC e/o PoE [3].

I campi di applicazione delle reti basate sulla tecnologia ibrida P/V-LC trovano l'esempio di punta nelle future reti ospedaliere. Infatti, gli ospedali più moderni cominciano ad adottare l'*E-Health*, termine con cui si indica il supporto al più generale *Healthcare* sfruttando processi e comunicazioni elettroniche a complemento dei tradizionali servizi di assistenza sanitaria (fig. 10), soprattutto in visione del concetto Smart-City. Un sistema E-Health deve quindi prevedere una rete a supporto che sia la meno invasiva e nociva per il paziente curato. Laddove una rete cablata sarebbe di difficile implementazione in strutture pre-esistenti, una PLC si integra per definizione, sfruttando la rete elettrica, per forza presente; e considerando che le radiazioni delle onde elettromagnetiche a radio-frequenza prodotte dalle attuali reti wireless possono andare ad interferire con i sistemi di monitoraggio e/o i macchinari di misura del paziente (per non parlare di problemi a dispositivi salva-vita, quali un pacemaker), un sistema VLC non comporta radiazioni nocive e/o aggiuntive al paziente (e l'ambiente chiuso prevede comunque l'uso di luci artificiali!).

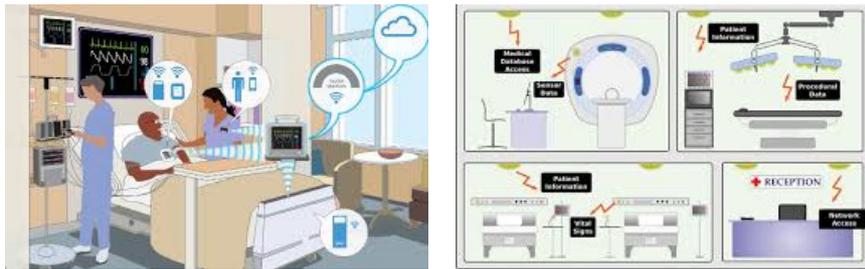


Figura 10. Scenario applicativo per E-Health con sistema di comunicazione ibrida PLC/VLC in ambiente ospedaliero. I dispositivi comunicano via VLC tra loro e con l'infrastruttura base, le aree ospedaliere (stanze) tramite PLC

3.2. VLC con Laser nel visibile

Altro possibile ed interessante spunto di realizzazione di una rete VLC è quello di sfruttare, anche solo per l'accesso della rete in casa, un canale ottico nel visibile, realizzato sfruttando i nuovi laser a basso costo e bassa potenza presenti ad oggi sul mercato, tipicamente usati per realizzare laser-pointer (fig. 11). Questi puntatori, infatti, sfruttano sorgenti laser nel rosso (630-750nm) e vicino infrarosso (N-IR, tipicamente tra 800 e 1100nm), ormai tecnologia consolidata e perciò economica, sia tramite solo lenti di espansione e collimazione (nel caso del rosso), sia aggiungendo a queste dei cristalli di Nd:YVO₄ e KTP (cristalli con effetti non lineari, che trasformano l'emissione N-IR in verde). La testa laser è collegata ad una circuiteria di pilotaggio, anch'essa semplificata all'estremo.

Si può quindi immaginare uno scenario di utilizzo, in cui la sorgente laser viene utilizzata in spazio libero per entrare all'interno dell'abitazione, e da lì eventualmente riconvertita, ma mantenendo tutti gli apparati congrui alla tecnologia VLC. Altresì, si può pensare ad una integrazione su fibre ottiche plastiche (POF) della sorgente laser visibile, per far arrivare più facilmente ed economicamente il segnale fino all'abitazione (o ufficio), riconvertendo al Cabinet il segnale portato su fibra ottica 'normale' in 3° finestra (~1500nm) in quello visibile, più facilmente allineabile (core millimetrico) e attenuazione del segnale visibile molto basso (fig. 12).

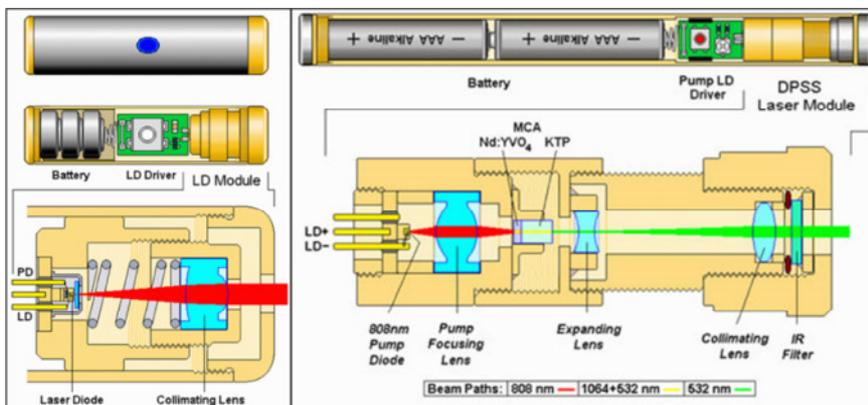
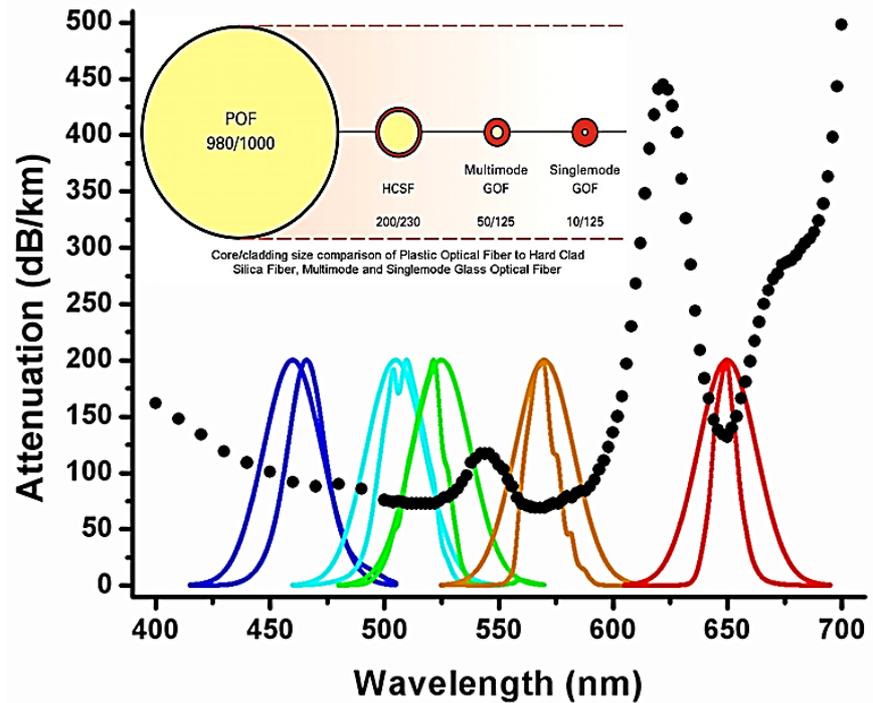


Figura 11. Schema di due laser-pointer a basso costo, con emissione nel (sinistra) rosso e (destra) verde

Figura 12. Spettro di attenuazione di una fibra ottica plastica (POF) e comparazione del core rispetto alle fibre ottiche classiche



Bibliografia

- [1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.7, "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light", IEEE Std 802.15.7-2011, pp.1-309, 6 Sept. 2011. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195
- [2] R. Boubezari, H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, A. Bouridane, "Novel detection technique for smartphone to smartphone visible light communications", 2016 10th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP 2016. (2016) 8–12. doi:10.1109/CSNDSP.2016.7573915.
- [3] LiFi-XC di pureLiFi (<http://purelifi.com/lifi-products/>).
- [4] LED Panel e Lamp della VLNComm (http://vlncomm.com/#_products)
- [5] C. Gomez, J. Oller, J. Paradells, "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology", Sensors., vol. 12 (2012), pp. 11734–11753. doi:10.3390/s120911734.
- [6] Bluetooth SIG (<https://www.bluetooth.com/news/pressreleases/2009/12/17/>)
- [7] GE Lightning (<https://www.gelighting.com/>)

- [8] V. Sharma, S. Rajput, P.K. Sharma, "Light fidelity (Li-Fi): An effective solution for data transmission", in: AIP Conf. Proc., 2016: p. 020061. doi:10.1063/1.4942743.
- [9] A. M. Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury, and E. Ciaramella, "1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation", IEEE Photonics J., vol. 4, no. 5, pp. 1465–1473, Oct. 2012.
- [10] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O'Brien, and H. Haas, "LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications", J. Light. Technol., vol. 34, no. 13, pp. 3047–3052, Jul. 2016.
- [11] HomePlug Alliance
(<http://www.homeplug.org/tech-resources/download-specs/>).
- [12] IEEE Standard Association
(<https://standards.ieee.org/findstds/standard/1901-2010.html>).