UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di
Scienze Matematiche
Fisiche e Naturali

Corso di Laurea in
Ottica e Optometria

Valutazione della percezione cromatica con lampade LED e tecnologia Visible Light Communication

Evaluation of color perception under LED lamps with Visible Light Communication Technology

Relatore
Chiar.ma Prof.ssa Elisabetta Baldanzi

Correlatore
Chiar.mo Dott. Stefano Caputo

Candidato
Vittoria D'Antoni

Anno Accademico 2017/2018

Valutazione della percezione cromatica con lampade LED e tecnologia Visible Light Communication

Evaluation of color perception under LED lamps with Visible Light Communication Technology

Vittoria D'Antoni

L'obiettivo della tesi è stato di osservare, attraverso test colorimetrici certificati e prove in ambiente reale, se la percezione dei colori cambia utilizzando una sorgente luminosa predisposta con tecnologia Visible Light Communication VLC in modalità accesa e spenta.
Il tipo di illuminante utilizzato è una lampada a LED su cui è stato montato un sistema VLC on-off (Visible Light Communication), un tipo di tecnologia tramite la quale una sorgente di illuminazione può essere sfruttata non solo per 'trasportare luce', ma anche per la trasmissione di informazioni.

Le motivazioni del lavoro di ricerca sono numerose, la tecnologia VLC è molto promettente ed è ormai una realtà presente nel mercato dell'illuminazione per le grandi potenzialità e per la facilità di utilizzo, promette di ottenere specifici vantaggi, viene utilizzata in ambienti sensibili per il colore come Musei, ma anche supermercati: il punto vendita Carrefour di Lille in Francia ha sostituito la sua illuminazione fluorescente con 2,5 chilometri di LED Philips ad alta efficienza energetica.
Questi utilizzano la luce per trasmettere agli smartphone dei clienti un segnale di localizzazione, consentono ad un'applicazione di fornire servizi basati sulla posizione attuale, sulle offerte dei vari prodotti e sulla localizzazione di un determinato prodotto all'interno del centro commerciale.
Non esistono in letteratura dati relativi agli effetti sulla percezione del colore per cui occorre certificare che i vantaggi ottenuti non determinino effetti sulla percezione cromatica.

Lo scopo principale della tesi è quindi quello di valutare e stabilire attraverso specifici test che le sorgenti, che montano questo tipo di tecnologia in grado di fornire un evidente vantaggio dal punto di vista tecnologico, non vadano ad alterare la percezione cromatica e, quindi, la performance del sistema visivo umano.

A causa delle molteplici competenze necessarie per questo tipo di studio la stesura di questa tesi e la raccolta dei dati è stata possibile grazie alla collaborazione di più Enti quali: l'Istituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Firenze (CNR-INO), il Museo del Tessuto di Prato coinvolto nella sperimentazione 5G, il Polo Universitario "Città di Prato", il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università degli Studi di Firenze e l'Istituto di Ricerca e di Studi in Ottica e Optometria (IRSOO) di Vinci.

Per la realizzazione dei test è stata predisposta una lampada LED che monta un sistema VLC, per illuminare determinati test colorimetrici prescelti (il test di Ishihara, il Farnsworth-Munsell test e il City University Colour Vision test) per la raccolta di dati certificati, e opere d'arte concesse dal Museo del Tessuto di Prato per un test di tipo in ambiente reale (come campioni abbiamo scelto un costume del film "Marie Antoinette" di Sophia Coppola ed un campionario tessile del 1700 dalla collezione di J. Claude Frères).

In entrambi i protocolli sperimentali, i test sono stati presentati a soggetti normodotati di età compresa tra i 20 e i 65 anni di età, con le relative correzioni oftalmiche.
Per il primo test tra i 20 soggetti esaminati vi erano 11 donne e 9 uomini, provenienti da luoghi di lavoro diversi. Il secondo test, svolto al Museo del Tessuto di Prato, ha visto la collaborazione di 20 soggetti: 12 donne e 8 uomini di età compresa tra i 20 e i 65 anni di età.
Per i test realizzati è stata importante la fase di preparazione dell'ambiente di lavoro (completamente oscurato per evitare che qualsiasi altra fonte luminosa incidesse sui dati), di posizionamento della fonte luminosa e dei test colorimetrici.

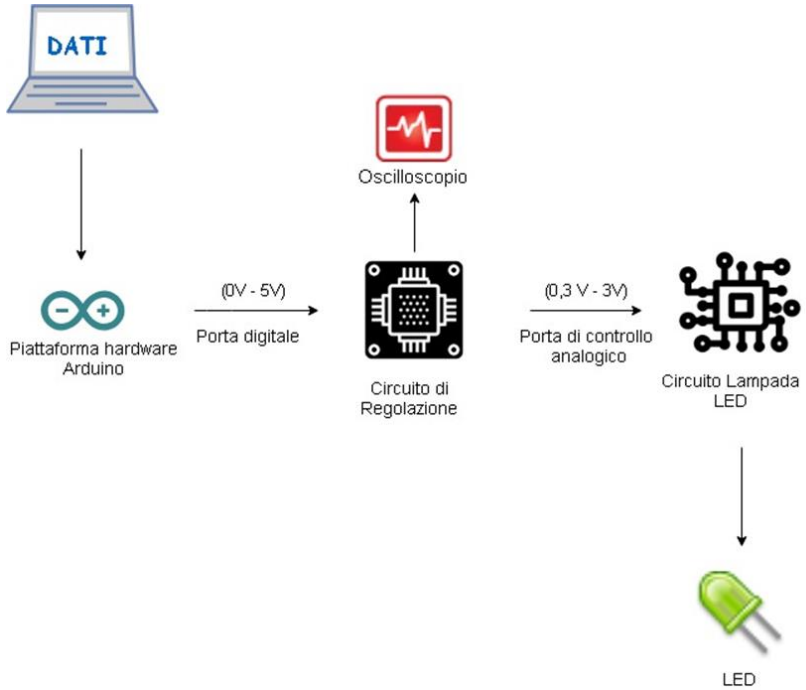
Lo studio svolto ha permesso di verificare l'ipotesi accreditata ma mai effettivamente dimostrata, che la tecnologia VLC non altera i compiti visivi richiesti ed in particolar modo la percezione cromatica degli oggetti. Questo lavoro di tesi rappresenta un importante integrazione al materiale disponibile in letteratura in quanto ha permesso di avviare uno studio mirato sulle performance visive specifiche del colore e verificare che queste non vengano compromesse.

I risultati ottenuti sono di rilievo perché confermano la possibilità di utilizzare la tecnologia Visible Light Communication VLC anche in ambienti con compiti visivi di alto profilo come ad esempio i musei, gli ospedali, le strade e gli ambienti di lavoro. I vantaggi di trasmettere dati attraverso la luce visibile sono molteplici (ad esempio la velocità di trasmissione per quanto concerne il numero di dati trasmessi al secondo, la sicurezza, in quanto la luce trasmette solo in zone ben precise: se non si vuole che il rilevatore avverta i dati, sarà sufficiente spostare la fonte di luce, al contrario delle onde radio che possono invece essere intercettate, ed infine una maggiore efficienza: essa non richiede l'inserimento di nuove strumentazioni).

Dunque, la dimostrazione che la percezione cromatica non venga alterata rappresenta uno step imprescindibile per una maggiore capillare diffusione ed un uso consapevole di questa tecnologia.

Materiali e Metodi Utlizzati

- Lampada LED con sistema VLC integrato. Il dato di partenza inviato tramite computer viene modulato tramite Arduino. Tramite il Circuito di Regolazione è stato possibile regolare il segnale in arrivo dalla porta digitale (0V – 5V), in un segnale accettato dal circuito della lampada (nel nostro caso 0,3V – 3V) attraverso due Resistenze che modificano la tensione media e la profondità di modulazione del segnale. Per inserire la modulazione richiesta, il circuito è inoltre fornito di una porta di controllo analogico. A questo punto il segnale viene inviato al LED il quale trasmette ad una certa frequenza. Il segnale viene trasmesso infine ad un fotodiodo, a sua volta collegato ad una seconda scheda Arduino, che in questo caso demodula il segnale.Al circuito di regolazione è stato infine associato un Oscilloscopio , uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare, su un grafico bidimensionale , l'andamento nel dominio del tempo dei segnali elettrici ed effettuare misure a lettura diretta di tensione e periodo. Esso è stato inserito anche come rapida verifica dello stato di on/off della trasmissione durante la ripetizione dei test per ogni soggetto.



Schema lampada LED con sistema VLC integrato

- Luxmetro e Spettroradiometro. Il primo utilizzato per la verifica dei livelli di illuminamento degli ambienti e sui luoghi di lavoro, ed il secondo per per la misura della distribuzione spettrale di energia proveniente da una sorgente luminosa, di cui ne determina le proprietà radiometriche, fotometriche e colorimetriche.

- Un costume del film “Marie Antoinette” di Sophia Coppola e un campionario tessile del 1700, dalla collezione di J. Claude Frères, Paris (Mode Internationale Sélection Service).
- Test colorimetrici. Ishihara Test, Farnsworth-Munsell 100 hue Colour Vision test, e City University Colour Vision test.

Campagna di misure eseguita al Museo del Tessuto di Prato, tramite un approccio di tipo qualitativo

Seconda campagna di misure eseguite al Polo Universitario “Città di Prato”, approccio quantitativo

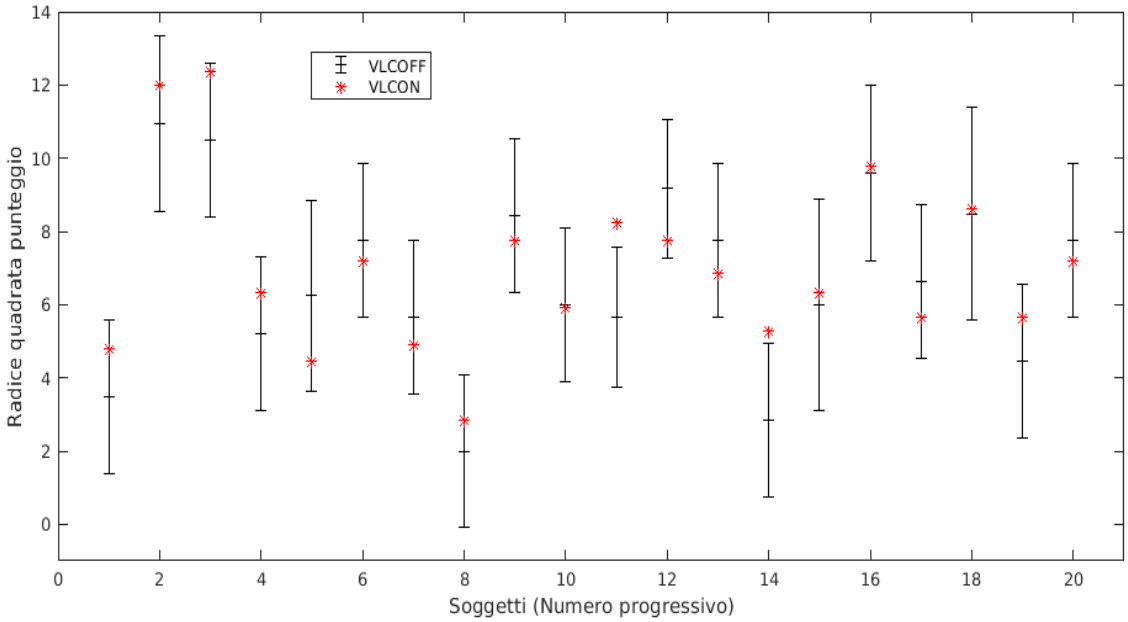
In entrambi i protocolli sperimentali, i test sono stati presentati a soggetti normodotati di età compresa tra i 20 e i 65 anni di età, con le relative correzioni oftalmiche.
Per il primo test tra i 20 soggetti esaminati vi erano 11 donne e 9 uomini, provenienti da luoghi di lavoro diversi.
Ciò che risulta importante definire, non è la performance del test in sé, ma osservare se ci sono differenze rilevanti tra i due casi di trasmissione dati on e off.
Proprio per questo motivo il lavoro di tesi si suddivide in due parti: per poter affermare che anche in situazioni quotidiane il soggetto non rilevi particolari differenze cromatiche di una scena illuminata con il sistema VLC, e che quindi questa tecnologia, possa essere introdotta nel mercato senza alterare la cromaticità degli oggetti che ci circondano.

Il secondo test, svolto al Museo del Tessuto di Prato, ha visto la collaborazione di 20 soggetti: 12 donne e 8 uomini di età compresa tra i 20 e i 65 anni di età. Per i test realizzati è stata importante la fase di preparazione dell'ambiente di lavoro (completamente oscurato per evitare che qualsiasi altra fonte luminosa incidesse sui dati), di posizionamento della fonte luminosa e dei test colorimetrici.
Questo secondo test rispetto al primo, scaturisce come conferma del fatto che, anche in situazioni quotidiane, e non solo tramite test optometrici, il soggetto non rileva particolari differenze cromatiche di una scena illuminata con il sistema VLC, perciò questa tecnologia può essere introdotta nel mercato senza alterare la cromaticità degli oggetti che ci circondano.

Presentazione dei Risultati

L'elaborazione dati svolta per ottenere i risultati sperimentali del primo test eseguito su un campione di 20 soggetti, ovvero il Farnsworth-Munsell 100 hue Color Vision Test (in seguito 100 hue), ha visto come procedimento inziale la raccolta dati e l'esecuzione dei relativi calcoli tramite il programma Microsoft Excel. Una volta calcolato il punteggio per ogni singolo utente nella duplice modalità on/off, ed aver preso nota dei tempi, è stato ricavato il relativo grafico a dispersione: il quale mostrava i vari errori commessi da ogni singolo soggetto in entrambe le modalità. Se ad esempio un soggetto durante il corso della prova eseguiva uno o più inversioni, e quindi non disponeva secondo il corretto ordine di tonalità le pastiglie colorate, sul grafico questo veniva rappresentato come un picco più o meno alto a seconda della gravità di inversione effettuata.
Una volta aver calcolato la radice quadrata di ogni punteggio in duplice modalità on/off sono stati creati tramite il programma Matlab i relativi grafici.

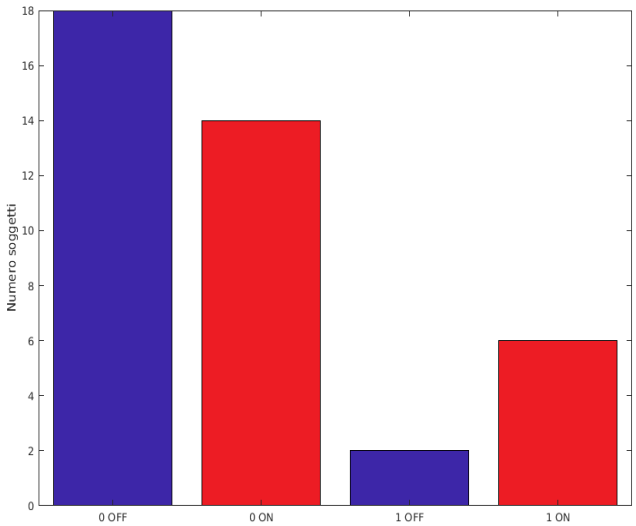
Lo scopo delle misure sperimentali era quello di osservare se la differente modalità ON/OFF provocasse una variazione nella visione dei colori. Per questa ragione è stato eseguito un confronto del Farnsworth-Munsell 100 hue Color Vision Test in duplice modalità vlc off/on:



Confronto vlc on/off

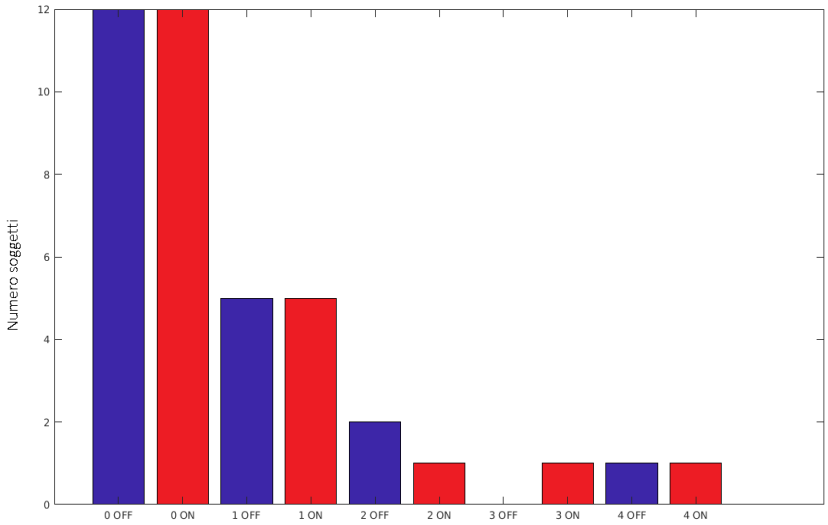
Nel grafico la croce nera rappresenta i valori vlc off, mentre l'asterisco rosso sono i valori vlc on. La barra di errore è ricavata dalla standard deviation nota in letteratura.
Quasi tutti i soggetti rientrano nella barra di errore, fatta eccezione per i due soggetti 11 e 14 che hanno eseguito la prova vlc off in modo migliore. Questo risultato può essere spiegato tenendo conto che entrambi questi soggetti hanno eseguito il test prima in modalità on e poi in modalità off: dunque il risultato poteva essere dovuto all'effetto learning.

E' stato poi possibile creare degli istogrammi per il City University Colour Vision Test (CUT) e l'Ishiara Test.
Come possiamo osservare dall'istogramma in figura, relativa al test di Ishiara, in cui sull'asse delle y troviamo il numero dei soggetti e sull'asse delle x il numero di errori per le diverse modalità di trasmissione, la variazione di trasmissione on/off non ha provocato un aumento significativo del numero di errori commessi.



Istogramma relativo all'Ishiara Test

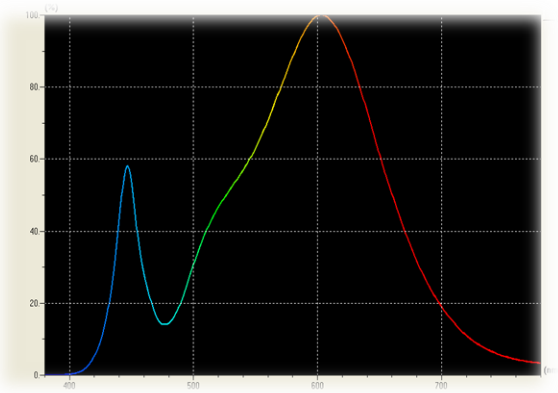
Lo stesso vale per l'istogramma del City University Colour Vision Test (CUT) in figura, dove anche in questo secondo caso sull'asse delle y è stato riportato il numero di soggetti esaminati e sull'asse delle x il numero di errori per le diverse modalità di trasmissione. In questo caso si ha una corrispondenza quasi totale tra le due diverse situazioni.



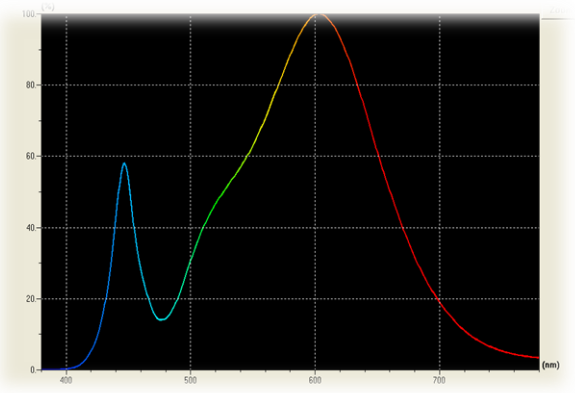
Istogramma relativo al City University Colour Vision Test (CUT)

Incidentalmente possiamo notare che gli errori commessi dagli utenti sono stati di più rispetto al test di Ishiara, segno di una maggiore difficoltà per il CUT anche in soggetti normali. Entrambi questi test confermano dunque la corrispondenza delle due situazioni di trasmissione per quello che riguarda la visione del colore.

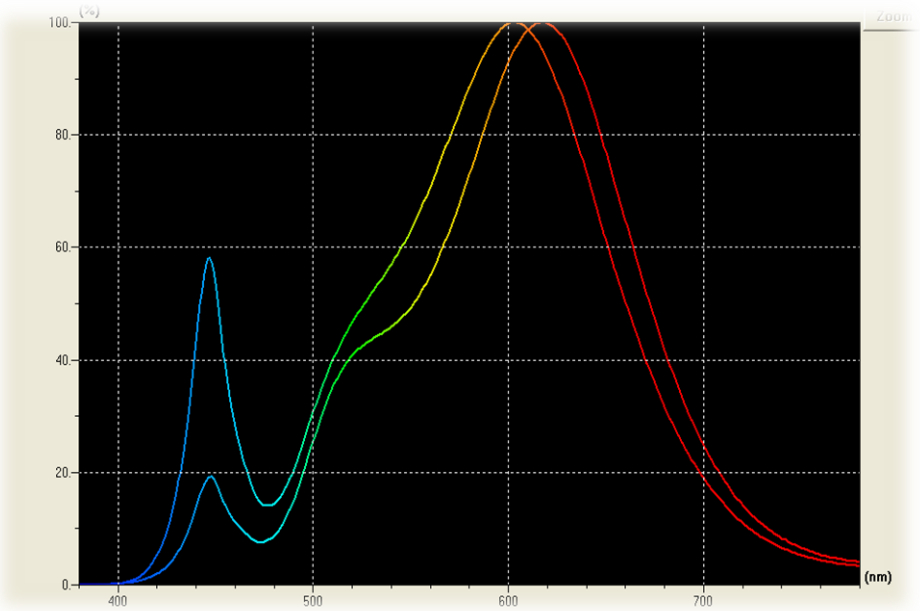
Dopo aver analizzato i risultati ottenuti con i test colorimetrici è stato possibile concentrarsi sull'analisi della sorgente di luce LED della lampada, tramite lo Spettroradiomentro CS 1000 Konica Minolta. Questa analisi di dati è stata eseguita come ulteriore verifica e conferma dei valori tratti dai test al Museo del Tessuto.La misura con lo Spettroradiometro è stata effettuata per quattro volte consecutive: 1) con il sistema VLC in stato off; 2) con il sistema VLC-on a 96 Hz (frequenza imposta come soglia dopo varie prove effettuate su 5 soggetti presi in esame); 3) con il sistema VLC-on ad alte frequenze (frequenza di 20KHz); 4) con sistema VLC in modalità on con frequenza pari a 96Hz e in aggiunta un filtro correttivo dicroico della Targetti Sankey S.p.A. di diametro 106mm.
I grafici e i diagrammi riportati in figure in questo paragrafo provengono da istantanee dello schermo del software dello Spettroradiomentro CS 1000 Konica Minolta.



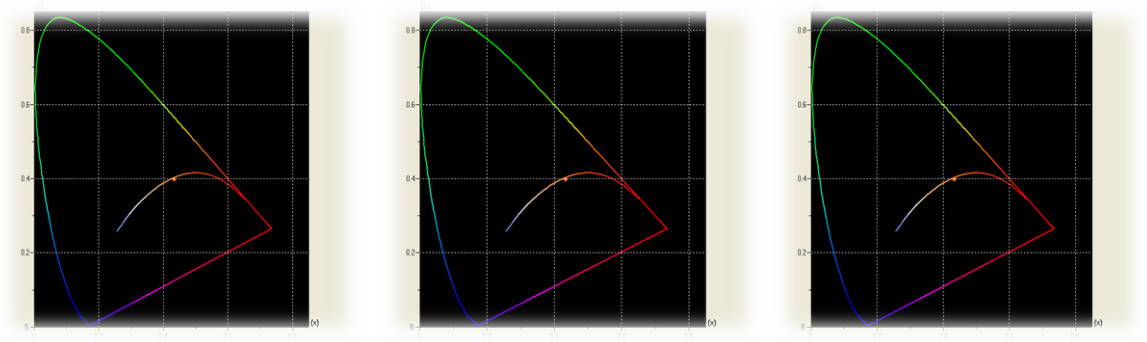
Confronto distribuzione spettrale VLC OFF/ON (frequenza 96 Hz)



Confronto distribuzione spettrale OFF/ ON (frequenza 20 KHz)



Confronto distribuzione spettrale VLC OFF+ VLC ON con filtro correttivo dicroico (frequenza 96Hz)



In ordine, Diagrammi di Cromaticità [xy] VLC OFF, VLC ON (frequenza 96Hz), VLC ON (frequenza 20KHz)

Come era prevedibile, anche in questo caso, eseguendo un confronto tra i grafici e i diagrammi rapportati alle due modalità di trasmissione on/off, è evidente come le caratteristiche della sorgente di illuminazione non subiscono alterazioni o presentano differenze tali da comunicare una diversità di caratteristiche dovute alla trasmissione di un'informazione.

Conclusioni

Al termine di questo lavoro di ricerca e dopo un'accurata analisi dei dati emersi dall'esecuzione dei tre test colorimetrici, il Farnsworth-Munsell 100 hue Color Vision Test, l'Ishiara Test ed il City University Colour Vision Test (CUT) è possibile affermare che la trasmissione dati della lampada con tecnologia Visible Light Communication non altera il risultato della percezione cromatica dei soggetti esaminati sia nel caso in cui la trasmissione dati fosse in stato on sia in stato off.
Inoltre è possibile osservare dai confronti tra le distribuzioni spettrali relative allo spettro in VLC OFF ed ON (con frequenza a 96 Hz), VLC OFF ed ON (con frequenza a 20KHz) ed infine VLC OFF e ON con filtro correttivo dicroico (e frequenza 96Hz), che non si ha una sostanziale differenza tra di essi. Oltre a ciò è possibile osservare che con e senza il filtro correttivo lo spettro si modifica: non a caso i soggetti percepivano tale differenza di colore. Questo dimostra che i soggetti sono normovedenti per la percezione del colore e la rivelano al variare dello spettro.
Tale verifica dunque va a supporto dei dati ritrovati nel compimento dei test colorimetrici, attestando dunque che la Visible Light Communication applicata alla luce LED non modifica i valori spettrali della sorgente.
Questo lavoro di tesi mostra l'importanza della sinergia di molteplici studi affrontati in ambito universitario. I test colorimetrici vengono presentati come strumento di indagine di sorgenti luminose e di nuove tecnologie ad esse applicate. Il fatto di avere eseguito i test a una frequenza di clock di 96 hertz ha permesso di ottenere i risultati per un valore critico di soglia destinato a migliorare ulteriormente per frequenze superiori.
I risultati evidenziano e certificano l'uguaglianza dell'analisi della sorgente luminosa con tecnologia VLC nel caso in cui essa trasporti un contenuto informativo o non trasmetta alcun

tipo di dato, e si può dunque garantire l'ipotesi secondo cui la trasmissione dati mediante VLC non compromette il visus del soggetto impegnato a svolgere determinate attività in un ambiente illuminato con questo tipo di tecnologia.
Questa ulteriore verifica, che prende in considerazione la percezione cromatica di un soggetto, può essere combinata a recenti studi che hanno visto l'utilizzo della Visible Light Communication applicata ai test di lettura. I risultati ottenuti in entrambi gli studi dimostrano e certificano dunque l'effettiva possibilità di utilizzo della tecnologia VLC in molteplici ambiti di progettazione in cui la percezione cromatica assume un ruolo fondamentale.
I risultati ottenuti sono di rilievo perché confermano la possibilità di utilizzare la tecnologia Visible Light Communication anche in ambienti con compiti visivi di alto profilo come ad esempio i musei, gli ospedali, le strade e gli ambienti di lavoro.
La dimostrazione che la percezione cromatica non venga alterata rappresenta uno step imprescindibile per una maggiore diffusione ed un uso consapevole di questa tecnologia: è di fondamentale importanza fare un attento studio mirato sulla percezione visiva
Questa ulteriore verifica può essere combinata a recenti studi che hanno visto l'utilizzo della Visible Light Communication applicata ai test di lettura.

Bibliografia

-[Arnon,S. 2015] Arnon, S. (Ed.). (2015). Visible light communication. Cambridge University Press.
-[Birch 1989] Birch, J. (1989). Use of the Farnsworth—Munsell 100- Hue test in the examination of congenital colour vision defects. Ophthalmic and Physiological Optics, 9(2), 156-162.
-[Bisegna, F. 2010] Bisegna, F., Gugliermetti, F., Barbalace, M., & Monti, L. (2010). Stato dell'arte dei led (light emitting diodes). Dipartimento di Fisica tecnica, Università di Roma 'La Sapienza. -[Breton, M. E. 1988] Breton, M. E., Fletcher, D. E., & Krupin, T. (1988). Influence of serial practice on Farnsworth-Munsell 100-hue scores: the learning effect. Applied optics, 27(6).
-[CIE 1989] CIE, C. (1989). International Lighting Vocabulary. Central Bureau of the Commission Internationale de l'Eclairage, Kegelgasse, 27. -[Dain 2004] Dain, S. J. (2004). Clinical colour vision tests. Clinical and Experimental Optometry, 87(4- 5), 276-293 -[Fletcher 1980] Fletcher, R. (1980). The City University colour vision test. London: Keeler. -[Haas 2016] Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2016). What is lifi?. Journal of Lightwave Technology, 34(6), 1533-1544.
-[Kaiser 1996] Kaiser, P. K., & Boynton, R. M. (1996). Human color vision.
-[Komine, T. 2004] Komine, T., & Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. IEEE transactions on Consumer Electronics, 50(1), 100-107. -[Mahler, E 2009] Mahler, E., Ezrati, J. J., & Viénot, F. (2009). Testing LED lighting for colour discrimination and colour rendering. Color Research & Application, 34(1), 8-17.
-[Nguyen 2015]Nguyen, Trang, et al. "High-speed asynchronous Optical Camera Communication using LED and rolling shutter camera." Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2015 Seventh International Conference on. IEEE, 2015. -[Palladino,P 2005] Palladino, P. (2005). Manuale di illuminazione. Tecniche Nuove. -[Rizzi, A 2011] Rizzi, A., Bonanomi, C., & Rasheed, S. (2011). Studio di misure alternative per la misura dell'indice di

resa cromatica e del contrasto percepito. -[Saini, H. (2012)] Saini, H. (2012). Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless
79
communication. -[Sharma, N 2017] Sharma, N., & Pavani, M. (2017). Li-Fi Technology in Wireless Communication. IUP Journal of Telecommunications, 9(3). -[Shinobu 1969]Ishihara, S. (1969). Ishihara's tests for colour deficiency: 24 plates. Kanehara Shuppan. -[Taylor 1996] TAYLOR, Steven J.; BOGDAN, Robert; DEVAULT, Marjorie. Introduction to qualitative research methods: A guidebook and resource. John Wiley & Sons, 1996.
- [Verriest, 1982] Verriest, G., Van Laethem, J., & Uvijls, A. (1982). A new assessment of the normal ranges of the Farnsworth-Munsell 100-hue test scores. American Journal of Ophthalmology, 93(5), 635-642.

Grazie per l’attenzione.

Relatore: Prof.ssa Elisabetta Baldanzi (elisabetta.baldanzi@ino.it)
Correlatore: Dott. Stefano Caputo (stefano.caputo@unifi.it)
Candidato: Vittoria D’Antoni (vittoria.dantoni@stud.unifi.it)