



Ricerca di Sistema elettrico

Illuminazione intelligente a servizio dell'uomo (HCL). Definizione contesto e prima progettazione. Attività sperimentali e quadro normativo 2016

S. Fumagalli, A. Antonelli, L. Blaso, G. Bottani, O. Gregori,
G. Leonardi, O. Li Rosi, F. Romanello, F. Pieroni, E. Vaccari,
A. Castaldo, D. Diaz Sanudo

ILLUMINAZIONE INTELLIGENTE A SERVIZIO DELL'UOMO (HCL). DEFINIZIONE CONTESTO E PRIMA PROGETTAZIONE. ATTIVITÀ SPERIMENTALI E QUADRO NORMATIVO 2016

S. Fumagalli, A. Antonelli, L. Blaso, G. Bottani, O. Gregori, G. Leonardi, O. Li Rosi, F. Romanello, F. Pieroni, E. Vaccari, A. Castaldo, (ENEA), D. Diaz Sanudo (Università dell'Insubria)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.5 "Innovazione tecnologica, funzionale e gestionale nella illuminazione pubblica ed in ambienti confinati"

Obiettivo: C "Human Centric Lighting"

Responsabile del Progetto: : Nicoletta Gozo, ENEA

Si ringraziano Fulvio Musante e Daria Casciani del Politecnico di Milano, Giampiero Bellomo di TSA, Luigi Schiavon di UNI e Danilo Giannetti di Agilux.

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 SPERIMENTAZIONE ASTERISM.....	6
2.1.1 <i>Il prodotto</i>	7
2.1.2 <i>L'installazione</i>	10
2.1.3 <i>I test effettuati</i>	12
2.1.4 <i>Procedura di prova e strumentazione usata</i>	12
2.1.4.1 Schermatura da luce naturale.....	13
2.1.4.2 Normalizzazione dati di misure spettroradiometriche.....	13
2.1.5 <i>Risultati</i>	14
2.1.5.1 Consumi dei diversi elementi.....	14
2.1.5.2 Curva di dimmerazione.....	15
2.1.5.3 Illuminamento in funzione della tonalità di luce.....	16
2.1.5.4 Mappatura dell'illuminamento sul piano di lavoro.....	17
2.1.5.5 Irradianza spettrale del piano di lavoro.....	20
2.1.5.6 Risposta spettrale al variare della potenza.....	21
2.1.5.7 Illuminamento verticale e irradianza spettrale a livello dell'occhio.....	23
2.1.6 <i>Questionario</i>	24
2.1.7 <i>Conclusione</i>	25
2.1.8 <i>Bibliografia</i>	26
2.2 SPERIMENTAZIONE HUMBLEBEE.....	26
2.2.1 <i>Il prodotto e l'installazione</i>	26
2.2.2 <i>I test effettuati</i>	28
2.2.3 <i>Strumentazione usata</i>	29
2.2.4 <i>Risultati</i>	29
2.2.4.1 Misure fotometriche.....	29
2.2.4.2 Misure elettriche.....	34
2.2.4.3 Misure Termiche.....	36
2.2.4.4 Misure spettroradiometriche.....	40
2.2.5 <i>Conclusione</i>	41
2.2.6 <i>Bibliografia</i>	42
2.3 SPERIMENTAZIONE LIGHT BOX PER BENESSERE CON LA LUCE.....	42
2.3.1 <i>Il prodotto</i>	42

2.3.2	<i>I test effettuati</i>	43
2.3.2.1	Procedura di prova e strumentazione usata	43
2.3.2.2	Misura per la misura dell'illuminamento	44
2.3.3	<i>Risultati</i>	45
2.3.3.1	Potenza elettrica assorbita	46
2.3.3.2	Illuminamento su un piano a diverse distanze	46
2.3.3.3	Spettro di emissione e temperatura correlata di colore	49
2.3.4	<i>Conclusione</i>	51
2.4	SPERIMENTAZIONE CIRCADIANO E SENSORE INNOVATIVO	51
2.4.1	<i>Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro</i>	51
2.4.1.1	Risultati	51
2.4.1.2	Conclusioni	59
2.4.2	<i>Sensore circadiano innovativo</i>	60
2.4.2.1	Filtri ottici	63
2.4.3	<i>Sviluppi industriali</i>	65
2.4.4	<i>Bibliografia</i>	65
2.5	ATTIVITÀ NORMATIVA E LEGISLATIVA	66
2.5.1	<i>Bibliografia</i>	68
3	CONCLUSIONI	68
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	68
5	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	69

Sommario

Oggi è importante pensare alla progettazione in termini innovativi, che mettano l'individuo e il suo benessere al centro dell'interesse, includendo quindi esplicitamente parametri legati alla qualità, direzionalità, colore, dinamicità della luce, oltre alla efficienza energetica; la tecnologia a stato solido si presta molto bene a questi sviluppi per la sua elevata controllabilità. Questo concetto viene espresso come "Human Centric Lighting" (HCL). Uno studio recente dichiara che HCL può diventare un business molto promettente, in quanto il suo campo di applicazione riguarda circa il 7% del mercato dell'illuminazione in Europa.

Il presente rapporto descrive diverse attività svolte da ENEA, mirate allo sviluppo di modelli e prototipi avanzati di sistemi intelligenti di illuminazione di ambienti confinati al fine di migliorarne sia l'efficienza energetica che le prestazioni in termini di comfort, di qualità e in generale di benessere dell'individuo. In particolare:

- la caratterizzazione sperimentale di dispositivi di illuminazione innovativi installati presso ENEA a Ispra e di un dispositivo del mercato, venduto per migliorare il benessere tramite la luce
 - il sistema di illuminazione Asterism per postazione di lavoro multipla in interni
 - il sistema HumbleBee per ambiente industriale
 - un "light box" per il benessere, per utilizzo anche domestico
- una analisi di ambiente (misure e simulazioni) per luoghi di lavoro per definire una sensoristica e metodologia di diagnosi e controllo dell'illuminazione che includa anche parametri legati al ritmo circadiano
- la definizione di "regole comuni", con la partecipazione a lavori normativi in ambito italiano (UNI) ed europeo (a livello di ecodesign ed etichettatura energetica).

La sperimentazione sul campo ha dato risultati interessanti sia per la caratterizzazione di sistemi già installati, sia come spunto per sviluppi futuri.

Lo sviluppo di norme tecniche aggiornate e applicabili per il settore illuminazione, così come una legislazione europea, elaborata in un processo condiviso con gli stakeholders, volta a spostare il mercato verso prodotti più efficienti, sono di chiara utilità per tutto il settore, e quindi per ricaduta sugli utilizzatori, beneficiari e protagonisti, come il termine stesso "Human Centric Lighting" fa giustamente pensare.

1 Introduzione

Il lavoro oggetto del presente rapporto si inquadra all'interno dell'Accordo di Programma ENEA-MISE "Ricerca Sistema Elettrico", PAR 2015, Progetto: D.5 "Innovazione tecnologica, funzionale e gestionale nella illuminazione pubblica ed in ambienti confinati", Obiettivo: C "Human Centric Lighting".

La motivazione del lavoro sta nel fatto che oggi è importante pensare alla progettazione in termini innovativi, che mettano l'individuo e il suo benessere al centro dell'interesse, includendo quindi esplicitamente parametri legati alla qualità, direzionalità, colore, dinamicità della luce, oltre alla efficienza energetica; la tecnologia a stato solido si presta molto bene a questi sviluppi per la sua elevata controllabilità. Questo concetto viene espresso come "Human Centric Lighting" (HCL). Uno studio recente dichiara che HCL può diventare un business molto promettente, in quanto il suo campo di applicazione riguarda circa il 7% del mercato dell'illuminazione in Europa.

L'obiettivo dunque, a lungo termine, ha come finalità lo sviluppo di modelli e prototipi avanzati di sistemi intelligenti di illuminazione di ambienti confinati al fine di migliorarne sia l'efficienza energetica che le prestazioni in termini di comfort, di qualità e in generale di benessere dell'individuo. Tra le varie attività:

- studio e sviluppo di metodologie basate sulla illuminazione "Human Centric" per valutare come tale approccio può aiutare la popolazione a vivere meglio, sia in ambito residenziale che in ambito dei luoghi di lavoro con sperimentazione in campo di sistemi innovativi e sistemi di controllo:
 - sperimentazione sistema di illuminazione per luoghi di lavoro Asterism
 - sperimentazione sistema per illuminazione industriale HumbleBee
 - sperimentazione light box per benessere con la luce
 - sperimentazione circadiano e sensore
- contributo allo sviluppo di norme tecniche aggiornate e applicabili per il settore illuminazione e al processo di preparazione di legislazione europea volta a spostare il mercato verso prodotti più efficienti.

La ricerca è strutturata secondo 5 macro attività parallele.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

La descrizione è costituita da 5 sezioni distinte.

- 2.1. sperimentazione sistema di illuminazione per luoghi di lavoro Asterism
- 2.2. sperimentazione sistema per illuminazione industriale HumbleBee
- 2.3. sperimentazione light box per benessere con la luce
- 2.4. sperimentazione circadiano e sensore
- 2.5. attività normativa e legislativa.

2.1 Sperimentazione Asterism

Questa attività è un test sul campo di un sistema di illuminazione a LED innovativo e smart per luoghi di lavoro.

Il sistema, chiamato Asterism, è un prototipo per una scrivania multifunzionale in ufficio, utilizzabile da una o più persone. L'installazione è a Ispra, nell'edificio ENEA, in una stanza dei laboratori DTE-SEN-SCC, adibita

a diversi utilizzi, tra cui quello di sala-riunioni (fisiche oppure virtuali tramite Internet), dove il sistema, da alcuni mesi, è utilizzato come sistema principale di illuminazione, permettendo quindi un monitoraggio di utilizzo reale.

Asterism è un prototipo progettato e realizzato nel 2015 dal Politecnico di Milano Dip. Design, nel corso dell'AdP ENEA-MISE "Ricerca sistema elettrico" PAR2014 [1]. Il tema alla base di questa attualissima progettazione e realizzazione è l'illuminazione di ufficio in relazione agli aspetti fisiologici e psicologici che la luce artificiale induce sugli esseri umani tenendo in considerazione i nuovi strumenti di lavoro e le nuove necessità sociali in contesti di lavoro moderni. Da una serie di scenari futuribili e atmosfere di luce volte al benessere e al comfort nell'ambito lavorativo, sono stati sviluppati e realizzati prototipi di sistemi di illuminazione con sistema di controllo smart integrato, il cui scopo è quello di giungere alla definizione di un sistema di illuminazione per applicazioni di ufficio che non risponda solo a criteri di risparmio energetico, ridotta manutenzione e miglioramento del comfort visivo per i lavoratori, ma cerchi anche di indagare aspetti riguardanti il benessere psico-percettivo dell'individuo mediante una luce dinamica, personalizzabile e bio-ispirata.

2.1.1 Il prodotto¹

Asterism è stato concepito in modo da includere diverse possibilità di controllo e di variazione luminosa in un unico sistema di illuminazione da ufficio. Il concetto di modularità rende possibile ottenere configurazioni diverse adattabili a diverse possibili configurazioni delle postazioni e dei luoghi di lavoro. Asterism è stato quindi progettato pensando ad un sistema destrutturato e capace di evolversi in diverse forme e configurazioni, ed è perciò costituito non da un sistema monoblocco ma da diversi moduli funzionali che garantiscano la massima flessibilità di installazione, composizione e utilizzo.

E' articolato con una struttura portante a cui sono connessi i sistemi di illuminazione diretta e indiretta come una costellazione di elementi luminosi le cui caratteristiche sono gestibili separatamente e dunque in grado di soddisfare diversi scenari di illuminazione. Principali elementi costitutivi:

- tre moduli per illuminazione diretta (down-light);
- quattro moduli per illuminazione indiretta (up-light);
- connessioni meccaniche di raccordo e giunzione dei diversi moduli tra loro;
- blocco degli ausiliari elettrici montato a soffitto, connesso tramite cavi di acciaio al resto del sistema
- interfaccia di controllo

¹ tutto questo capitolo, incluse le figure, è tratto da [1]

In

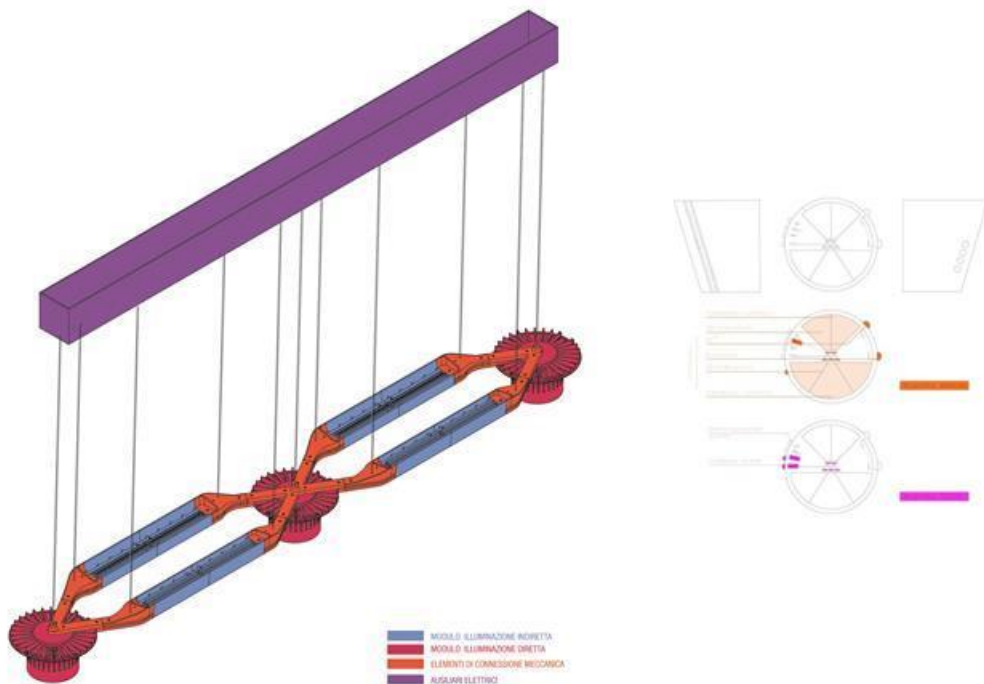


Figura 1 gli elementi costitutivi del sistema.

Figura 1 - Asterism: Elementi funzionali costitutivi

Le diverse forme e configurazioni possono essere ottenute facilmente con montaggi diversi, oppure variando esclusivamente il sistema di connessione. In Figura 2, alcune tipiche configurazioni, con postazione di lavoro singola o multipla: il tipo di montaggio fisicamente realizzato e installato a Ispra è quello in basso nella figura.

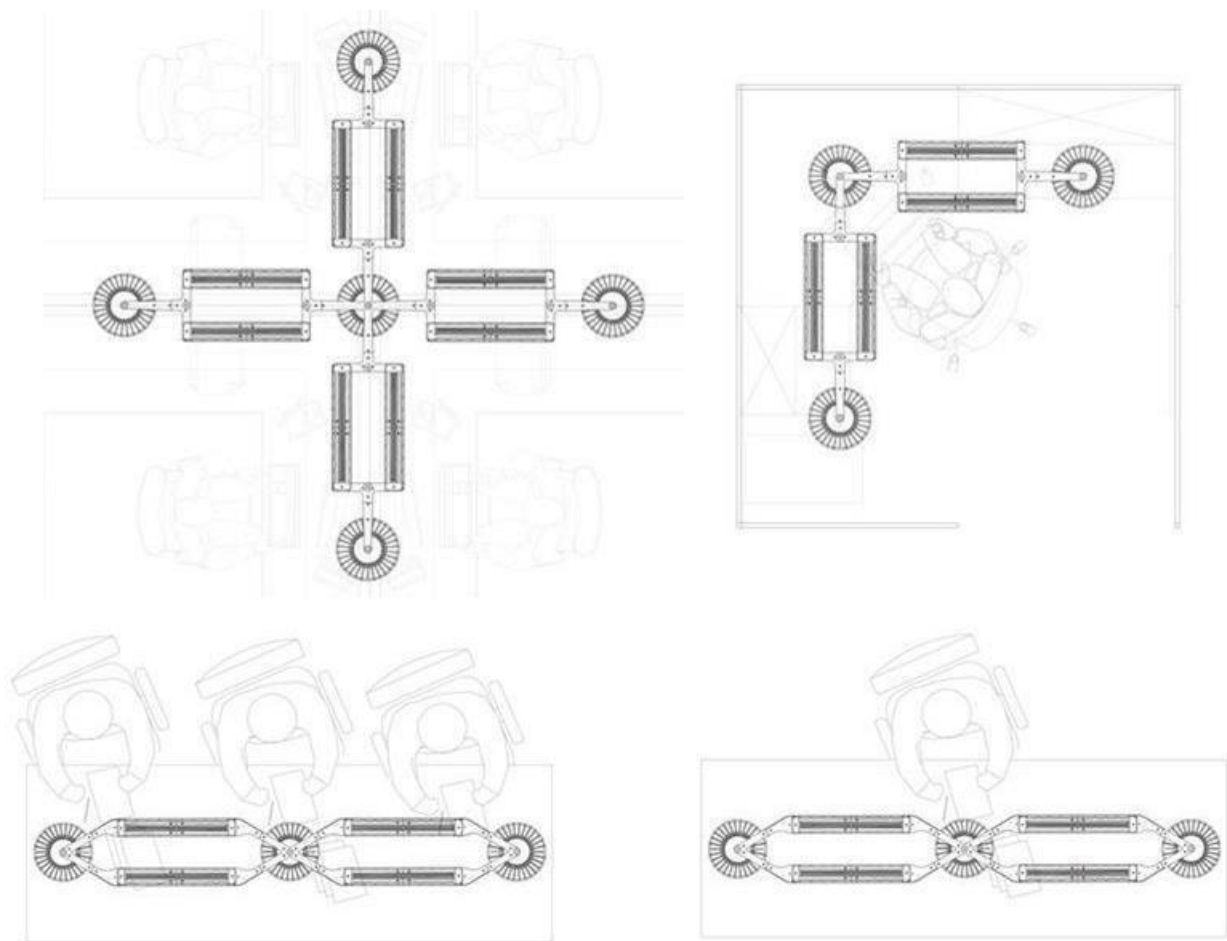


Figura 2 - Configurazione ufficio multifunzionale con postazione di lavoro singola o multipla

Il modulo per illuminazione indiretta comprende LED dynamic white (2 die cool-white, 2 die warm-white) con lente e schermatura per evitare visione diretta della lente, angolo di apertura del fascio $2 \times 22^\circ$. Ogni modulo ha un flusso luminoso massimo di 473 lm, incluse lente e schermatura. Il modulo di illuminazione indiretta comprende LED alternati a luce calda e fredda e lenti asimmetriche. Ogni modulo ha un flusso luminoso massimo di 1200 lm, lenti incluse.

Sono utilizzati diversi alimentatori e un sistema di controllo, basato su ARDUINO (comunicazione wireless tra interfaccia di controllo e apparecchio di illuminazione), che permette di pilotare ogni singolo modulo per illuminazione diretta e 2 moduli alla volta per illuminazione indiretta (longitudinalmente, lato sx e dx).

Il sistema è in grado di mantenere lo stesso flusso luminoso al variare della CCT, compensando quindi la differenza di emissione originale dei LED usati tra gli elementi a luce calda e fredda.

In Figura 3 prospetti e dimensioni del sistema realizzato.

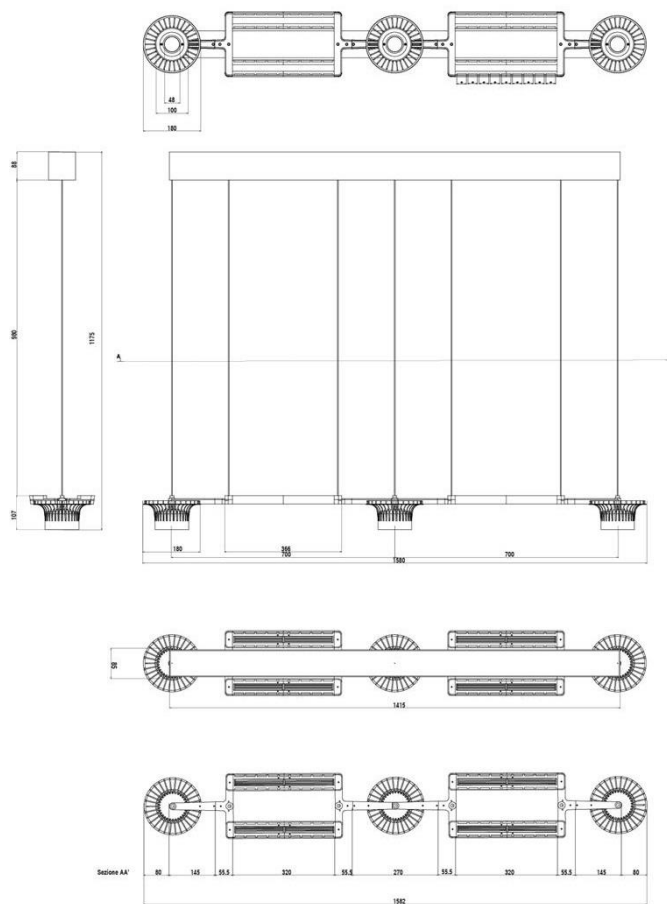


Figura 3 - Viste e prospetti sistema di illuminazione Asterism. Misure in mm. Disegni fuori scala

Le diverse possibilità di illuminazione dinamica riguardano:

- variazione dell'intensità luminosa (dimmerazione) da 0 (OFF) a 100 (ON);
- variazione della temperatura correlata di colore tra 3000K e 6500K;
- variazione della distribuzione luminosa diretta e indiretta in modalità autonoma e personale;
- variazione della distribuzione luminosa diretta e indiretta secondo diversi scenari. Nello studio originale² sono stati individuati e proposti alcuni scenari:
 - Scenario 1 – Workshop: illuminazione estesa diretta e indiretta per il lavoro in team;
 - Scenario 2 - Focus: illuminazione focalizzata diretta e indiretta per il lavoro individuale;
 - Scenario 3 - Haven: illuminazione diretta per la concentrazione e privacy;
 - Scenario 4 - Relax: illuminazione indiretta per il relax (con eventuale modulo ART).

2.1.2 L'installazione

L'installazione a Ispra è nell'edificio dell'ENEA, in un locale dei laboratori DTE-SEN-SCC. La stanza, di medie dimensioni (4.75m x 5.25m altezza 2.70m), riceve luce naturale da una grande vetrata che si affaccia sul laboratorio ICELAB, dalla porta di ingresso a vetri e da una finestra che si affaccia sull'esterno (circa 2m x 0.6 m) situata nella parte alta di un'altra parete. Il locale è sul lato Nord dell'edificio e non è mai investito di luce solare diretta.

² gli scenari sono dettagliatamente descritti in [1]

L'arredo è costituito essenzialmente da un grande tavolo (1m x 2m) con sedie, alcuni armadi (piccola biblioteca di laboratorio), un frigo-congelatore e una postazione fissa di PC.

La stanza ha diversi utilizzi: sala controllo per il laboratorio ICELAB, nel quale si svolgono varie attività³, e sala riunioni (fisiche oppure virtuali tramite Internet), quando sono coinvolti piccoli gruppi di persone.

Qui Asterism, da alcuni mesi, funge da sistema principale di illuminazione, permettendo quindi un monitoraggio di utilizzo reale. Le persone che lavorano nella stanza possono liberamente regolare il sistema secondo le loro necessità e preferenze. In Figura 4 due foto del locale⁴.

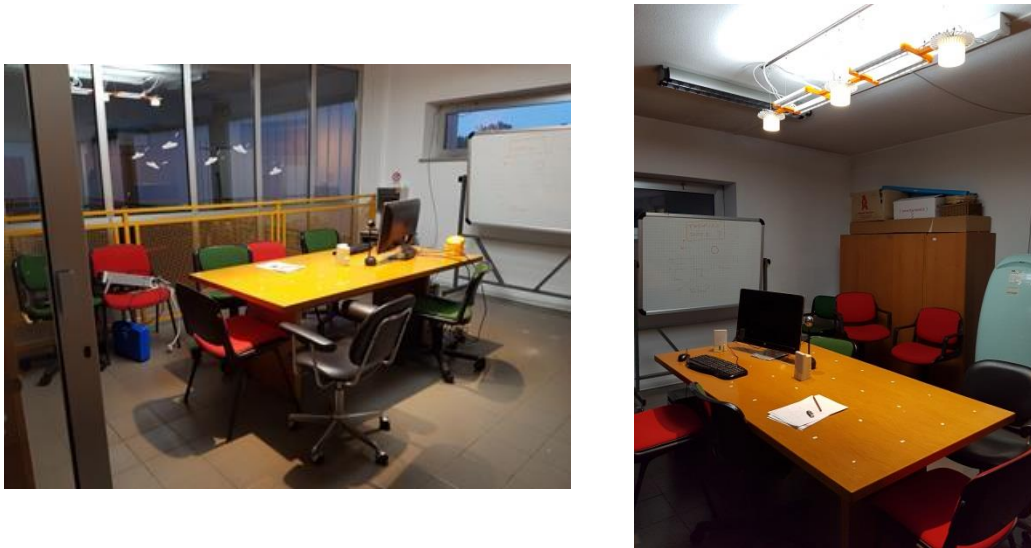


Figura 4 - il locale test per Asterism

Tra gli scenari ipotizzati dal Politecnico, i due che si avvicinano di più alle reali condizioni di utilizzo sono lo scenario "Workshop" e "Focus":

- Workshop : illuminazione estesa diretta e indiretta per il lavoro in team⁵. Pensato per supportare il lavoro collettivo, sia in team che individuale, in una postazione di lavoro multifunzionale in cui possano essere seduti diversi soggetti contemporaneamente. Si tratta di una zona di meeting e networking in cui si possano realizzare attività di scambio di informazioni, comunicazione e creatività in gruppo. Ciascun modulo di illuminazione diretta corrisponde ad una zona del piano di lavoro, ed eventualmente al soggetto, e può essere individualmente controllato. L'illuminazione indiretta garantisce una qualità e chiarezza visiva all'ambiente ufficio, aumentando lo spazio percepito e creando un'atmosfera più accogliente in una dimensione pubblica.
- Focus: illuminazione focalizzata diretta e indiretta per il lavoro individuale. Pensato per creare un ambiente luminoso adatto al lavoro individuale, sia di creatività che di processo delle informazioni, e lavoro al video terminale. La maggiore focalizzazione sul compito visivo implica un maggiore livello di illuminamento nella zona in cui si sta compiendo il lavoro mentre l'ambiente circostante è uniformemente illuminato in modalità indiretta garantendo comunque un equilibrio delle

³ tra le varie attività c'è la sperimentazione di HumbleBee, altro sistema di illuminazione innovativo e smart per luoghi di lavoro di tipo industriale

⁴ il sistema di illuminazione preesistente (apparecchi a soffitto con tubi fluorescenti lineari) è stato lasciato in posizione, per eventuali casi particolari. Asterism è stato collegato all'alimentazione elettrica tramite prese e spine.

⁵ la descrizione è da [1]

luminanze con lo sfondo. Uno dei tre moduli di luce diretta risulta acceso mentre gli altri possono essere accesi, spenti o regolati in modo individuale al fine di fornire un equilibrio di luminanze sul piano del tavolo in base alle preferenze dell'individuo. L'illuminazione indiretta sarà quindi regolata in modo tale da garantire una corretta chiarezza visiva sul piano di lavoro ma anche una visuale frontale ampia, limitando il senso di oppressione e definendo i contorni dello spazio ufficio. In questo scenario si può prevedere la possibilità di controllare le due emissioni, indirette frontali o retrostante l'individuo, in modo da garantire comunque uno spazio visivo confortevole e salvaguardando l'efficienza energetica dell'installazione.

In realtà nello scenario "Workshop" il numero di persone è molto variabile, per cui non sempre si verifica l'ipotesi di una postazione di lavoro coincidente con una persona come ipotizzato nel progetto.

E' interessante notare che la configurazione "Focus", che comprende illuminazione diretta e indiretta, è quella che descrive meglio il lavoro individuale: mentre per il lavoro in gruppo è abbastanza naturale pensare a una illuminazione sia diretta che indiretta, l'esperienza di questi mesi ha mostrato che le persone, anche se lavorano individualmente, preferiscono in ogni caso una visuale ampia, rispetto a una illuminazione focalizzata solo sulla postazione di lavoro e quindi l'illuminazione anche indiretta è importante.

2.1.3 I test effettuati

Sono state fatte delle misure fotometriche, radiometriche ed elettriche sul sistema installato, non tanto per validare le ipotesi fatte dai progettisti, quanto per quantificare le prestazioni del sistema reale.

In particolare:

- consumi dei diversi elementi (moduli di illuminazione, standby, interfaccia di controllo) a piena potenza e in diverse condizioni di dimmerazione (flusso e tonalità di luce)
- curva di dimmerazione del sistema (flusso luminoso in funzione della potenza)
- illuminamento sul piano di lavoro in funzione della tonalità di luce
- mappatura di illuminamento sul piano di lavoro a diverse posizioni di dimmerazione e diverse tonalità di luce, per i singoli moduli e per il sistema completo
- irradianza spettrale a diverse tonalità di luce, sul piano di lavoro
- risposta spettrale al variare della potenza / flusso, per diverse tonalità di luce
- illuminamento verticale e irradianza spettrale a livello dell'occhio, per diverse tonalità di luce

Dalle misure sono stati calcolati anche i parametri legati all'efficienza energetica del sistema.

E' stata fatta anche un simulazione con Dialux del sistema installato, in cui, oltre ai parametri tipici quali l'illuminamento sul piano di lavoro, sono stati simulati anche punti di calcolo per illuminamento verticale a livello dell'occhio.

In settembre 2016 è stato proposto un semplice questionario per valutare in modo qualitativo le prestazioni del sistema in funzione della soddisfazione degli utilizzatori.

2.1.4 Procedura di prova e strumentazione usata

Le prove si sono svolte in ambiente reale, quindi con:

- alimentazione da rete (non stabilizzata)
- temperatura ambiente variabile (compresa tra 20°C e 25°C nel periodo di prova)
- umidità relativa ambiente (indicativamente 40 – 60%)
- arredi nella stanza

In Tabella 1 la strumentazione usata per tutte le prove.

Tabella 1 – Strumentazione per misure su Asterism

<i>Test</i>	<i>Strumentazione</i>
Potenza elettrica	Yokogawa WT210 digital power meter
Illuminamento	Luxmetro Czibula-Grundmann classe A
Parametri radiometrici e temperatura correlata di colore	JETI Specbos 1211-UV

2.1.4.1 Schermatura da luce naturale

Durante le prove, le fonti di luce naturale non erano schermate: le misure di illuminamento sono quindi state eseguite 2 volte per ogni punto di misura, a brevissimo intervallo di tempo: una volta con Asterism acceso e una volta con Asterism spento, per tener conto correttamente del fondo di luce naturale. Questa procedura è stata scelta dopo una verifica del tempo di stabilizzazione di Asterism e ha permesso tempi di realizzazione delle prove abbastanza contenuti.

Le prove infatti devono normalmente essere eseguite in condizioni di stabilità e questo, in laboratorio, prevede una accensione di 30 minuti [2] e un successivo monitoraggio dei parametri elettrici e del parametro luminoso scelto, che devono mantenersi entro determinati limiti in 15 minuti. Dovendo mappare 36 punti sul tavolo, in diverse condizioni, non si è ritenuta applicabile la procedura standard.

E' stato quindi schermata quanto più possibile da luce naturale una piccolo volume nelle vicinanze di un modulo, si è acceso il sistema e misurata la potenza e l'illuminamento in un punto per un certo periodo di tempo. Si è sottratto il fondo naturale, misurato all'inizio (prima di accendere) e alla fine (a sistema spento), fondo che si è mantenuto molto basso (meno di 10 lx), per la presenza della schermatura. Le condizioni di luce naturale erano stabili, in quanto era una mattina con cielo molto coperto. Si è visto che in 15 minuti la variazione dell'illuminamento è stata minore di 0.5%. Per gli scopi del test, cioè fare misure su un sistema reale, installato e in funzione, si ritiene questo un errore accettabile. La potenza elettrica nello stesso periodo è molto stabile.

Notiamo che, se il sistema non avesse mostrato questo comportamento, non sarebbe stato possibile nemmeno utilizzare la procedura standard, in quanto il fondo di luce naturale può variare moltissimo nei 45 minuti di attesa a sistema sempre acceso, impedendo di fatto di valutarne la stabilità⁶ fotometrica.

La stessa procedure, cioè la doppia misura con apparecchio acceso e spento, per sottrarre il fondo ambiente, è stata utilizzata per le misure spettrometriche.

2.1.4.2 Normalizzazione dati di misure spettrometriche

Le misure che sono state fatte nella stanza non sono state pensate tanto per determinare la radianza spettrale del solo apparecchio o dei suoi elementi costitutivi, quanto per analizzare il sistema installato⁷, in ambiente). Il parametro di rilievo è quindi l'irradianza spettrale. I dati rappresentano perciò non solo il contributo dell'apparecchio, ma anche le riflessioni dell'ambiente.

Di questi test non è importante tanto la quantità assoluta di luce che arriva sul punto di misura o da cui ne viene emessa, quanto la distribuzione: i risultati vengono quindi presentati in genere come normalizzati.

⁶ in questo caso una possibile soluzione è schermare finestra, porta e vetrata, il che però è difficoltoso dal punto di vista pratico.

⁷ E' possibile una misura diretta della radianza spettrale degli apparecchi installati puntando lo spettrometro sulla superficie emettente dell'apparecchio, ma non era questo lo scopo dei test.

2.1.5 Risultati

2.1.5.1 Consumi dei diversi elementi

E' stata misurata la potenza assorbita dai diversi elementi di Asterism (moduli di illuminazione, standby, interfaccia di controllo) a piena potenza e con dimmerazione a metà potenza: in Tabella 2 i valori misurati.

Sono stati utilizzate solo le combinazioni reali dell'apparecchio: quindi 1 o 3 moduli per illuminazione diretta, e 2 o 4 moduli per illuminazione indiretta (non è possibile accendere 1 solo modulo per illuminazione indiretta).

Tabella 2 - Potenze assorbite Asterism

Elementi accesi	Dimmerazione: 100%		Dimmerazione: 50% potenza	
	Lettura potenza ⁸ [W]		Lettura potenza [W]	
	Tonalità: Caldo	Tonalità: Freddo	Tonalità: Caldo	Tonalità: Freddo
tutto	101.0	102.0	50.5	49.7
2 moduli indiretti	39.5	42.5	24.5	23.3
4 moduli indiretti	70.1	76.8	39.5	36.4
1 modulo diretto	21.0	18.0	13	13.8
3 moduli diretti	40.2	34.4	20.6	22.7
standby	9.65	9.50	9.65	9.6
Interfaccia di controllo	3	3	3	3

La potenza totale risulta poco dipendente dalla tonalità di luce, anche se ci sono differenze per i moduli a luce calda o fredda. Lo standby rimane costante, così come la potenza dell'interfaccia di controllo.

Sottraendo lo standby, si possono ricavare le potenze dei soli moduli LED e confrontare con i datasheet dei prodotti utilizzati. Il modulo per illuminazione diretta ha una potenza calcolata di circa 9.5W, contro 8.7W da datasheet alla stessa corrente di alimentazione; il modulo per illuminazione indiretta ha 15.8W, contro 14.7W da datasheet: c'è quindi un buon accordo con quanto ci si potrebbe aspettare, tenendo conto che i test non sono effettuati in condizione di laboratorio(ad esempio non è stata misurata la temperatura di giunzione).

Dalle stime / misure del Politecnico il flusso luminoso totale a piena potenza è di 6219lm. Con una potenza di 100W l'efficienza è di 62.19 lm/W, comprendendo tutti gli ausiliari e dispositivi di controllo nell'apparecchio.

I consumi si possono ricavare ipotizzando tempi di utilizzo opportuni.

In Figura 5 e Figura 6 sono rappresentati i consumi di una giornata invernale e una estiva rispettivamente: l'illuminazione artificiale viene accesa nella giornata e dimmerata tenendo conto dell'illuminazione naturale (quindi a livelli bassi nelle ore centrali). Nelle ore di non utilizzo, compreso l'intervallo di mezzogiorno, il sistema è in standby. Questo modo di utilizzo presuppone un utilizzatore consapevole e attivo, cosa realistica nel nostro caso. Ricordiamo infatti che il sistema viene controllato in maniera manuale o

⁸ durante il test la tensione di rete era tra 226 e 277V.

programmata ma non ha, nella versione attuale, un meccanismo automatico di dimmerazione. Nella simulazione di consumi non viene preso in considerazione l'eventuale cambio della CCT, poiché abbiamo visto che i consumi non dipendono sostanzialmente da essa.

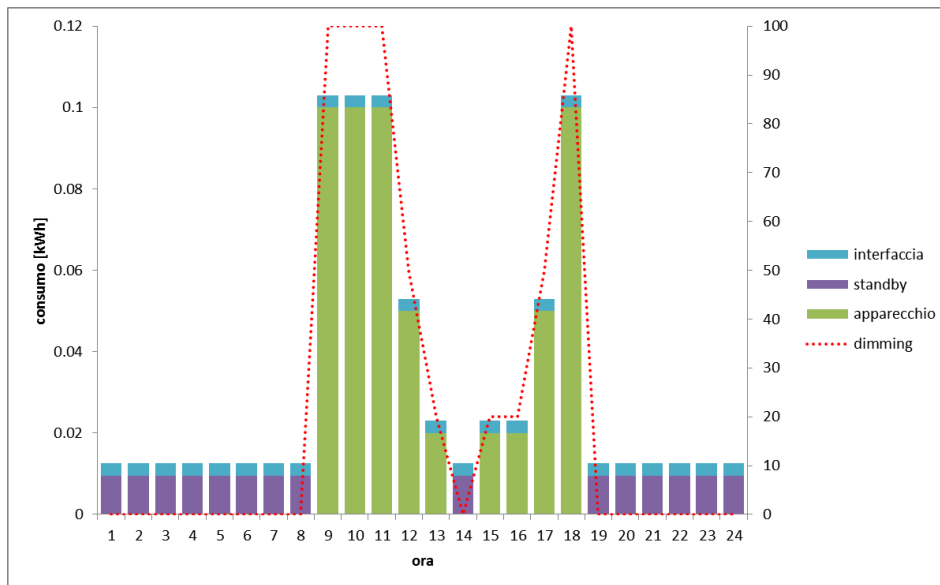


Figura 5 - Consumi teorici giornata invernale

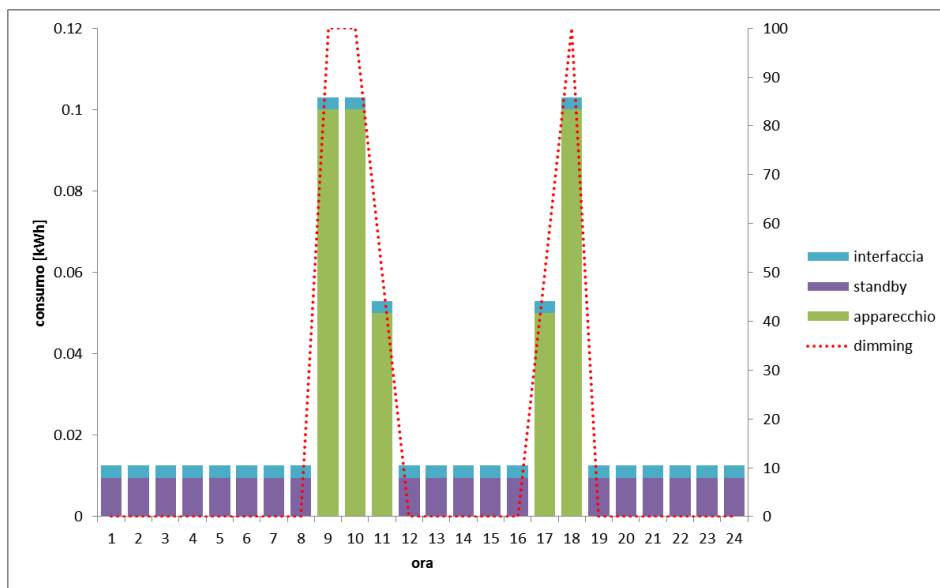


Figura 6 - Consumi teorici giornata estiva

Lo standby (e, in misura minore, l'interfaccia) ha una incidenza alta sui consumi: in inverno il 76% dei consumi è dato dall'apparecchio acceso + interfaccia, il 24% da standby + interfaccia, mentre in estate le analoghe quantità sono del 64% e 36%.

E' quindi importante scollegare dall'alimentazione il sistema quando non è utilizzato. Lo svantaggio di questa soluzione è che, a ogni accensione del sistema, è necessario del tempo (30 secondi) perché si riattivi la comunicazione tra l'apparecchio e il controllo, che si traduce in un ritardo di accensione.

2.1.5.2 Curva di dimmerazione

La dimmerazione in potenza / flusso luminoso è ottenuta dall'interfaccia di controllo tramite uno slider che viene mosso manualmente fino a raggiungere l'impostazione desiderata.

Per le prove sono stati utilizzati 9 step di 10.5W circa, discendenti, dalla posizione MAX di dimmerazione flusso alla posizione MIN (l'apparecchio non emette luce).

Le misure sono state fatte con tonalità di luce calda. E' stata misurato, oltre alla potenza, anche l'illuminamento in un punto fisso sul piano di lavoro. Questo ha permesso di ricavare una curva di dimmerazione dell'apparecchio: illuminamento in funzione della potenza. Si può assumere che il flusso luminoso abbia lo stesso andamento. In Figura 7 la curva di dimmerazione normalizzata.

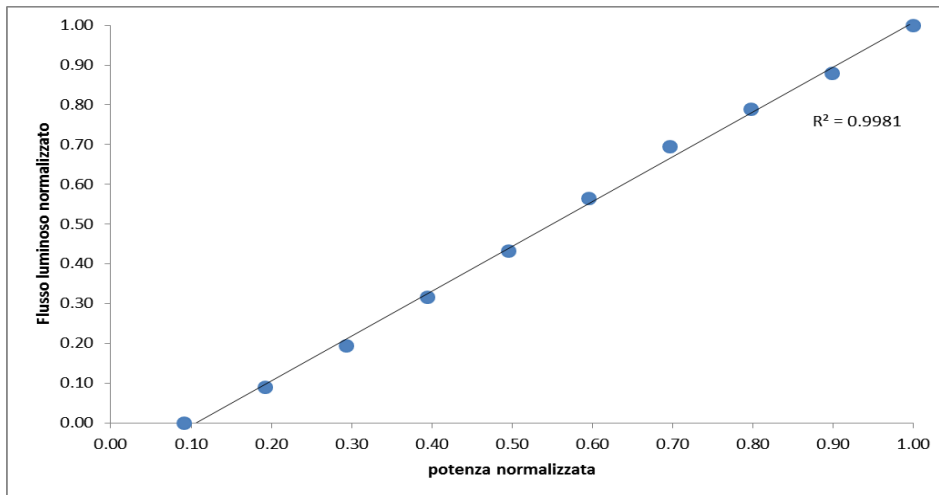


Figura 7 - Curva di dimmerazione Asterism

L'andamento è sostanzialmente lineare, con flusso nullo alla potenza di standby.

2.1.5.3 Illuminamento in funzione della tonalità di luce

E' stato posizionato il luxmetro sul piano di lavoro, approssimativamente sotto il centro dell'apparecchio (quindi sotto il modulo centrale per illuminazione diretta). Sono stati accesi i 3 moduli per illuminazione diretta.

La dimmerazione in tonalità di luce è ottenuta dall'interfaccia di controllo tramite uno slider che viene mosso manualmente fino a raggiungere l'impostazione desiderata Per i test è stata variata in 7 step la tonalità di luce, e misurati l'illuminamento e la potenza assorbita. In Tabella 3 le letture.

Tabella 3- Illuminamento in funzione della tonalità di luce

Tonalità di luce	Potenza [W]	Illuminamento [lx]
<div style="text-align: center;"> </div>	40	549.6
	39	554.6
	38	556.3
	37	552.7
	36	544.6
	35	545.7
	34.4	555.3
Calda		

Si nota che l'illuminamento rimane costante (variazione ± 1% sul valore medio) e questo è un grande beneficio per l'utilizzatore.

2.1.5.4 Mappatura dell'illuminamento sul piano di lavoro

E' stato mappato l'illuminamento sul piano di lavoro, in diverse condizioni. La mappatura è stata su 4 x 8 punti di misura, su un reticolo di 25 cm di lato, come in Figura 8.

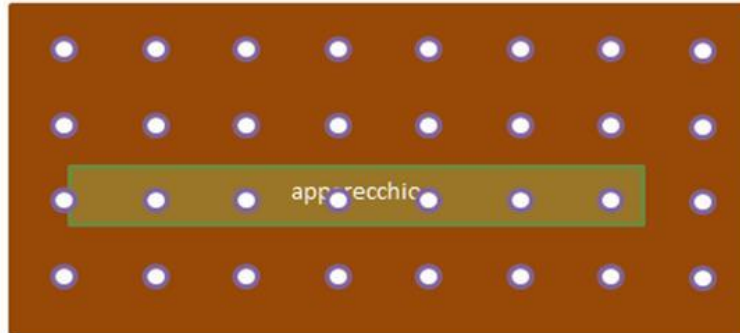






Figura 8- il piano di lavoro con il reticolo per la mappatura illuminamento

L'apparecchio non è in centro al tavolo, per ragioni logistiche e anche per avere maggior comfort visivo nelle posizioni di utilizzo prevalente della stanza, considerando la posizione del PC o di altri elementi usati in riunione.

La mappatura è stata fatta con moduli singoli oppure l'intero apparecchio accesi, a dimmerazione (in potenza / flusso) al 100%, con tonalità di luce calda e fredda ed è stata ripetuta ad apparecchio tutto acceso con dimmerazione (in potenza / flusso) di poco inferiore al 50%, tonalità di luce calda e fredda.

In Figura 9, Figura 10, Figura 11 i risultati. L'illuminamento risponde ai requisiti per la postazione di lavoro. La distribuzione dell'illuminamento sul piano di lavoro non cambia al variare della tonalità di luce.

<i>Schema accensione</i>	<i>Moduli accesi illum. diretta</i>	<i>Moduli accesi illum. indiretta</i>	<i>illuminamento medio [lx]</i>	<i>Isolux e legenda</i>
	1	0	149	
	1	0	152	

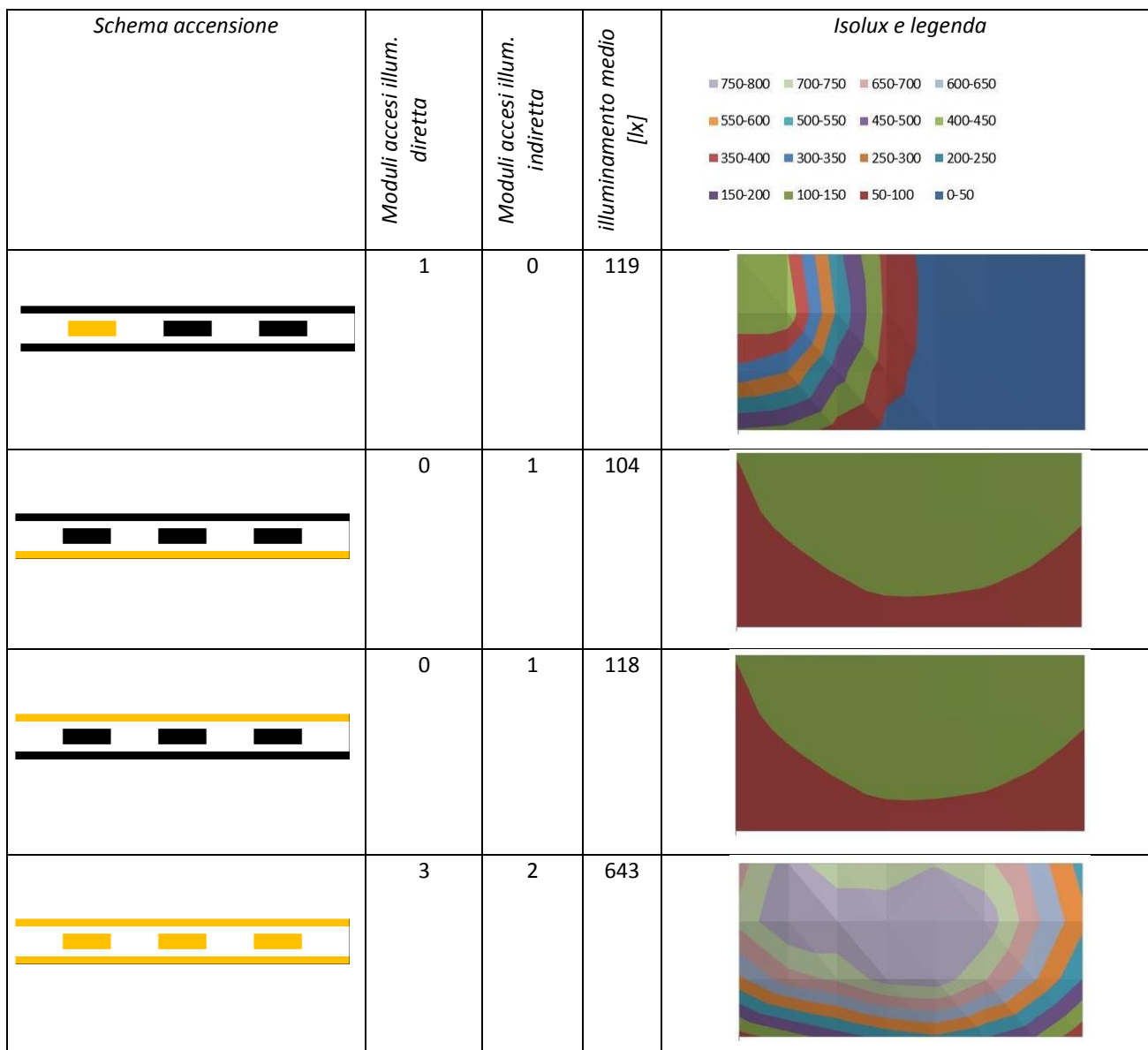


Figura 9 - Mappatura tonalità di luce calda, dimmerazione potenza / flusso 100%








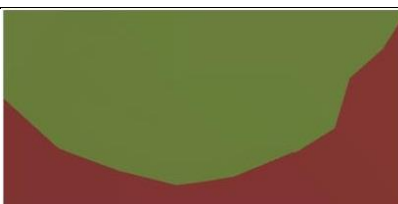



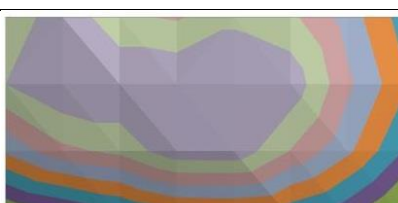

Schema accensione	Moduli accesi per illum. diretta	Moduli accesi per illum. indiretta	illuminamento medio [lx]	Isolux e legenda
	1	0	152	
	1	0	125	
	0	1	104	
	0	1	117	
	3	2	646	

Figura 10 – Mappatura tonalità di luce fredda, dimmerazione potenza / flusso 100%

Schema accensione	Moduli accesi per illum. diretta	Moduli accesi per illum. indiretta	Dimmerazione potenza / flusso	tonalità luce	illuminamento medio [lx]	Isolux e legenda
						


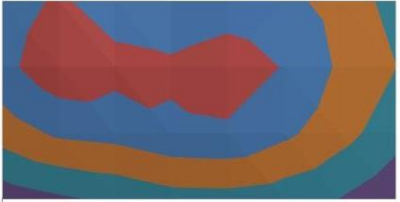

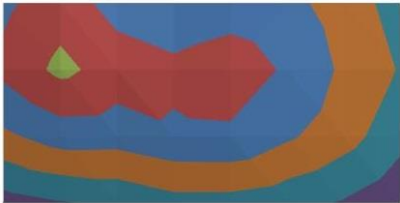
Schema accensione	Moduli accesi per illum. diretta	Moduli accesi per illum. indiretta	Dimmerazione potenza / flusso	tonalità luce	illuminamento medio [lx]	Isolux e legenda
	3	2	50	Calda	287	
	3	2	50	Fredda	291	

Figura 11 – Mappatura dimmerazione potenza / flusso 50%, tonalità di luce calda e fredda

2.1.5.5 Irradianza spettrale del piano di lavoro

E' stata misurata l'irradianza spettrale del sistema installato, a livello del piano di lavoro, in una posizione corrispondente al centro dell'apparecchio (quindi sotto al modulo centrale per illuminazione diretta). I valori sono quindi stati normalizzati, sulla base del valore max misurato per le due tonalità. In Figura 12 e Figura 13 i risultati, con apparecchio settato tutto in tonalità di luce fredda e calda rispettivamente, dimmerazione in potenza / flusso 100%.

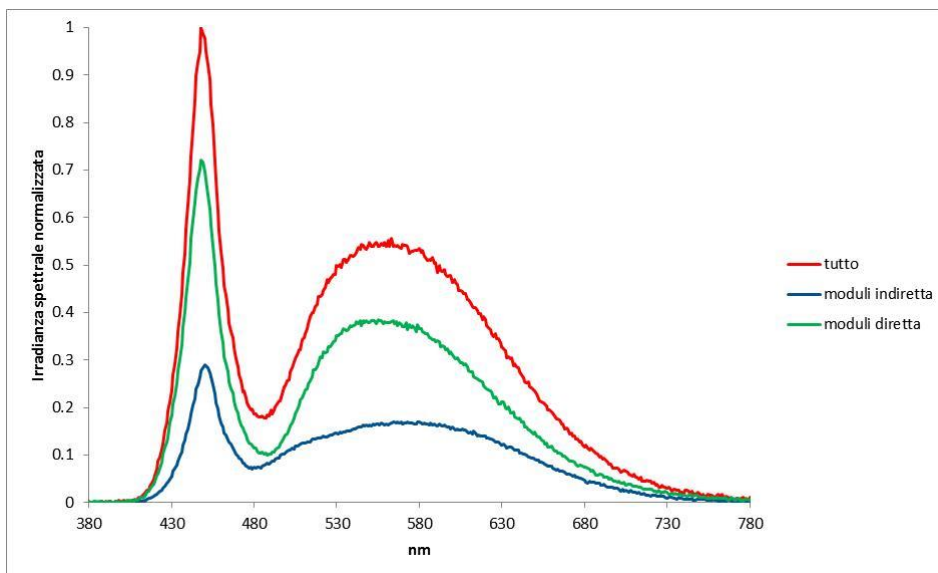


Figura 12 - Irradianza spettrale normalizzata sul tavolo, con tonalità di luce fredda

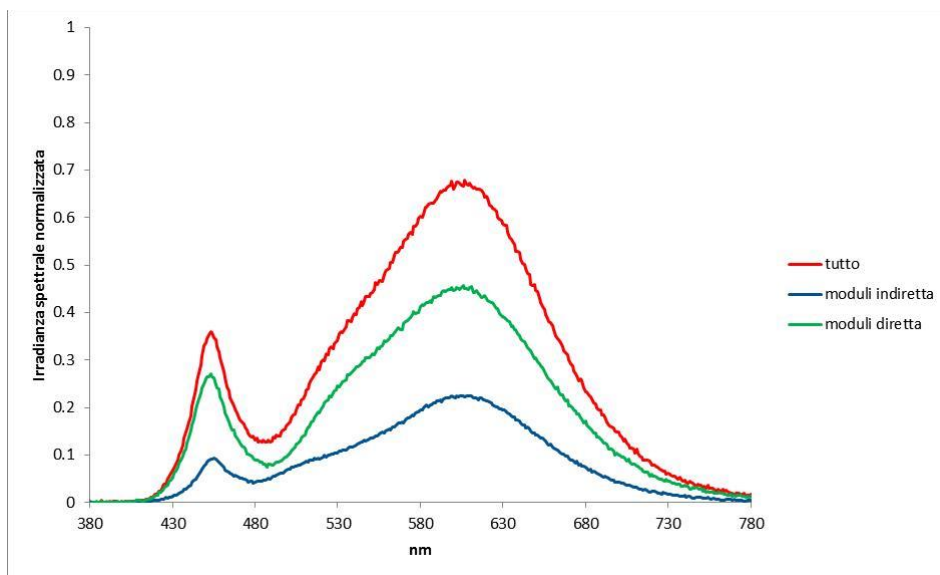


Figura 13 - Irradianza spettrale normalizzata sul tavolo, con tonalità di luce calda

In Tabella 4 CCT e CRI calcolati e l'illuminamento, calcolato a partire dall'irradianza (sempre al netto del contributo di luce naturale).

Tabella 4 – CCT, CRI e illuminamento

Tonalità di luce	Acceso: tutto			Acceso: moduli illuminazione indiretta			Acceso: moduli illuminazione diretta		
	CCT [K]	CRI	illuminamento [lx]	CCT [K]	CRI	illuminamento [lx]	CCT [K]	CRI	illuminamento [lx]
fredda	5706	79	869	5240	85	278	5949	75	595
calda	2964	82	871	2856	83	280	3024	81	595

Si noti che anche le CCT e CRI sono da considerare sempre nell'ambiente, cioè in presenza di arredi colorati, che possono influire sul risultato: questo è importante soprattutto per quanto riguarda la resa cromatica.

I valori di illuminamento per le due tonalità di luce sono molto simili, confermando⁹ che l'apparecchio ha la stessa emissione (in quantità) nelle diverse tonalità di luce, sia a livello complessivo sia come contributi separati dell'illuminazione indiretta e diretta.

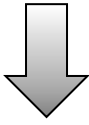
2.1.5.6 Risposta spettrale al variare della potenza

Si voleva verificare se, al variare della potenza, cambiasse lo spettro emesso dall'apparecchio, pur con il limite dei contributi dell'ambiente già visti in precedenza. Il punto di misura è sotto il centro dell'apparecchio.

Le misure sono state fatte in 5 posizioni di dimmerazione (in potenza / flusso), selezionate manualmente, con tonalità di luce calda e fredda, con tutti i moduli accesi: in Tabella 5 la effettiva dimmerazione in potenza / flusso, ricavata dagli illuminamenti / irradianze misurate: la normalizzazione è sulla base dell'illuminamento massimo per le due tonalità di luce.

⁹ vedere la mappatura dell'illuminamento sul piano di lavoro

Tabella 5 - Posizioni dimmerazione in potenza / flusso

<i>Dimmerazione</i>	<i>Tonalità calda</i>	<i>Tonalità fredda</i>
max	0.99	1.00
	0.82	0.82
	0.62	0.62
	0.42	0.43
	0.24	0.24
min		

In Figura 14 e Figura 15 la irradianza spettrale normalizzata: anche questa non dipende dalla posizione della dimmerazione.

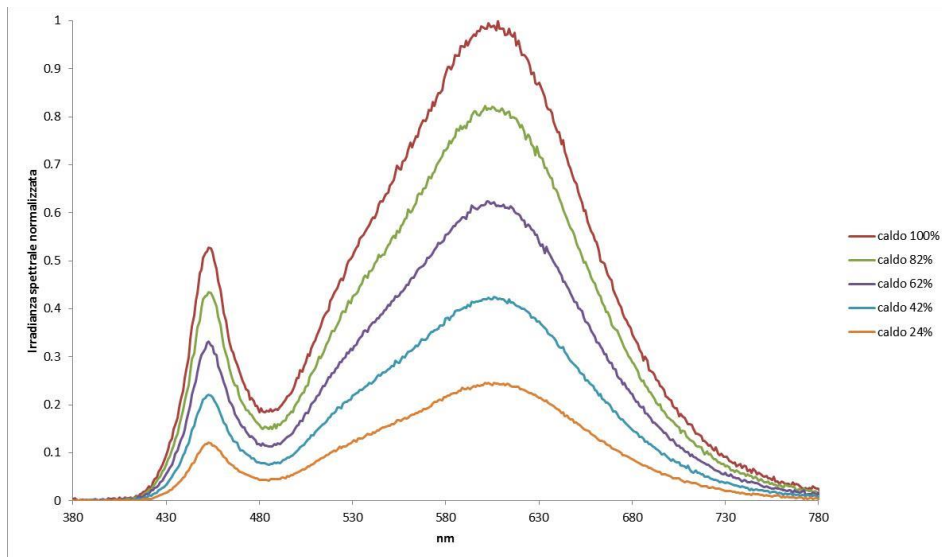


Figura 14- Irradianza spettrale normalizzata sul tavolo, in dimmerazione, tonalità calda

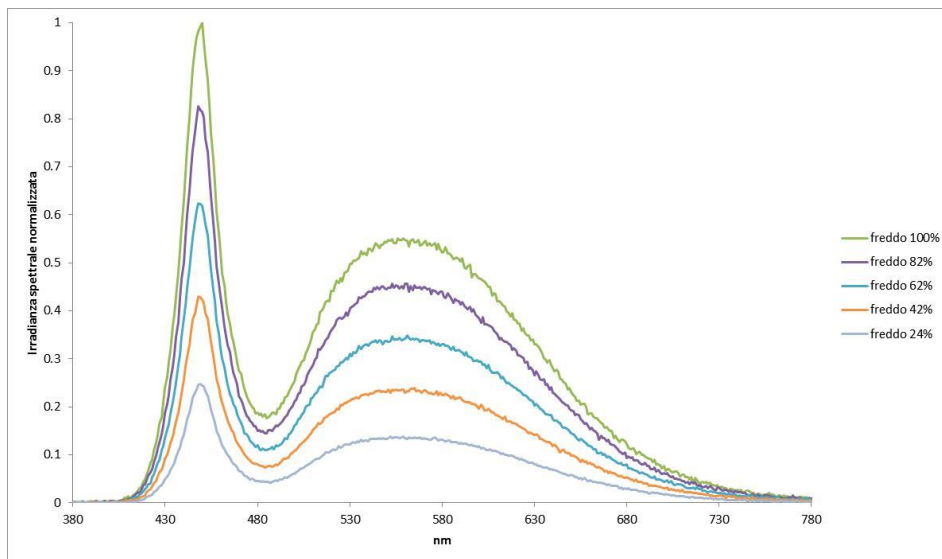


Figura 15 - Irradianza spettrale normalizzata sul tavolo, in dimmerazione, tonalità fredda

2.1.5.7 Illuminamento verticale e irradianza spettrale a livello dell'occhio

E' stata fatta una misura dell'illuminamento verticale e della irradianza spettrale in una posizione corrispondente all'occhio di un osservatore seduto al tavolo (piano di lavoro). La posizione è stata identificata in un punto a 117 cm da terra, a bordo tavolo, in una posizione corrispondente al centro dell'apparecchio, con la normale uscente verso il tavolo. In Figura 16 si vede il posizionamento del sensore (sia fotometrico che spettroradiometrico). L'apparecchio era in funzione al 100% della dimmerazione e le misure sono stata fatte con tonalità di luce calda e fredda.

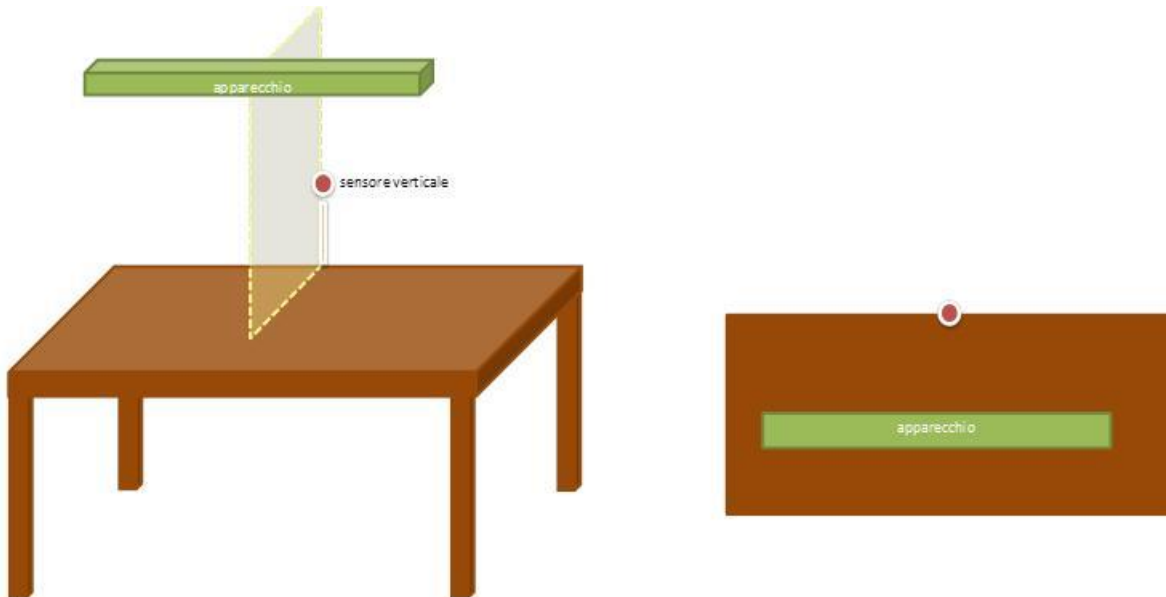


Figura 16 - Posizione sensore per misure a livello dell'occhio

In Figura 17 l'irradianza spettrale normalizzata verticale, a livello dell'occhio, nelle tonalità di luce calda e fredda.

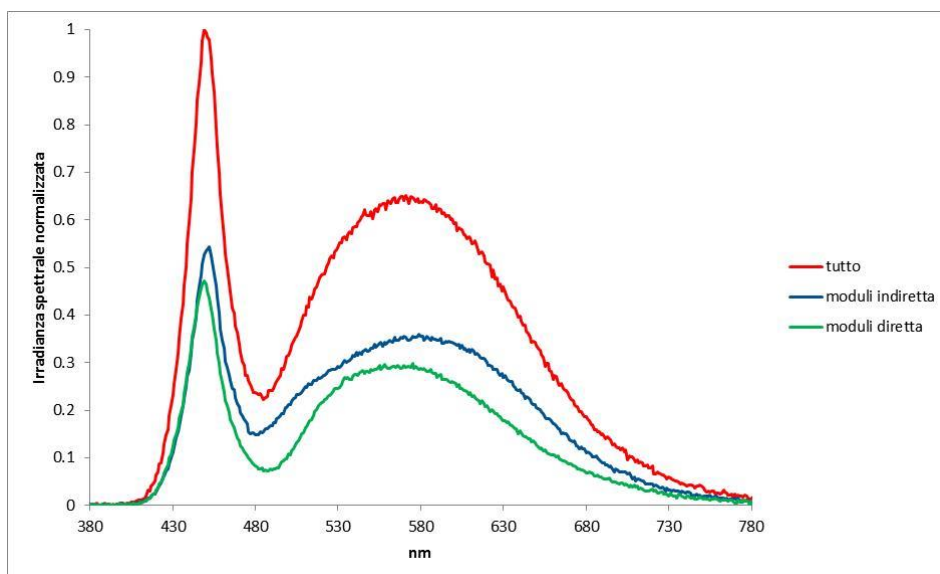


Figura 17 - Irradianza spettrale normalizzata verticale a livello dell'occhio, con tonalità di luce fredda

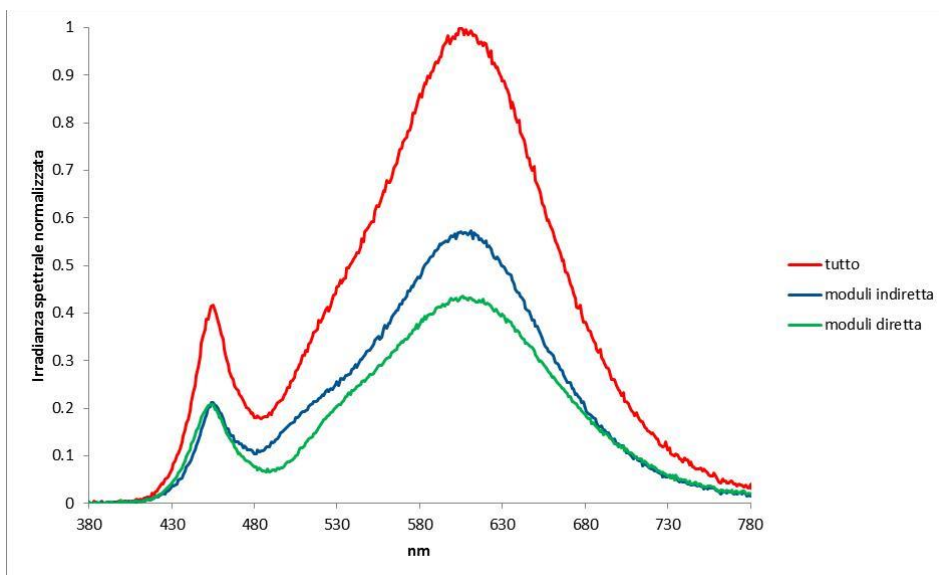


Figura 18 – Irradianza spettrale normalizzata verticale a livello dell'occhio, con tonalità di luce calda

L'illuminamento verticale, a livello dell'occhio, è in Tabella 6. Nella stessa tabella è riportato, per confronto, l'illuminamento medio sul tavolo (considerato come "task area") nelle stesse condizioni.

Tabella 6 - Illuminamento verticale e orizzontale

Condizione: acceso	Tonalità di luce	Illuminamento verticale a livello dell'occhio [lx]	Illuminamento medio sul tavolo [lx]
tutto	fredda	245	646
moduli indiretta	fredda	133	221
moduli diretta	fredda	112	426
tutto	calda	249	643
moduli indiretta	calda	135	222
moduli diretta	calda	115	420

Si nota che ci sono differenze sia in quantità di luce incidente sia in spettro, e questo è dovuto all'influenza dei vari elementi dell'ambiente. L'illuminamento verticale è sempre minore di quello orizzontale sul piano di lavoro: la maggior differenza si ha con l'illuminazione solo diretta, dove il luxmetro sul tavolo "vede" anche i moduli che emettono luce. A livello verticale l'illuminazione indiretta prevale sulla diretta, al contrario di quanto accade sul piano di lavoro.

2.1.6 Questionario

E' importante sapere come viene vissuto e interpretato dagli utilizzatori, specialmente se l'installazione è concepita con criteri "Human Centric". Per questo motivo, in settembre 2016 è stato proposto un semplicissimo questionario a 15 persone, che avevano avuto modo di operare nella stanza test di Asterism.

Le domande erano:

- che tipo di attività svolgi in questo locale?
- pensi che la luce naturale sia sempre sufficiente per le attività che svolgi qui?
- come illuminazione artificiale, preferisci il vecchio sistema o Asterism?
- con Asterism:

- pensi che l'illuminazione sia sufficiente per l'attività che svolgi?
- preferisci illuminazione diretta, indiretta o entrambe?
- preferisci tonalità di luce calda o fredda:
 - per illuminazione diretta?
 - per illuminazione indiretta?
- trovi utile poter regolare l'illuminazione:
 - in intensità?
 - in tonalità di luce?
- è facile regolare Asterism?

L'attività prevalente delle persone (tutte) è stata il lavoro in comune (riunioni fisiche o virtuali), e qualcuno usa la stanza anche per lavorare da solo. L'illuminazione naturale, come si poteva facilmente intuire, è stata considerata non sempre sufficiente (specialmente nelle ore non centrali della giornata) a svolgere le proprie attività, per cui viene acceso l'impianto di illuminazione artificiale. All'unanimità, Asterism è preferito al sistema preesistente (a tubi fluorescenti lineari). Utilizzando opportunamente la dimmerazione, con Asterism l'illuminazione è sufficiente.

14 persone su 15 hanno dichiarato di preferire la presenza contemporanea di luce sia diretta sia indiretta (una persona ha detto invece che le piace variare). E quasi tutti preferiscono tonalità di luce calda, sia per la luce diretta che indiretta (a una persona piace variare). Tutti trovano molto utile poter regolare l'intensità di luce e variarne la tonalità, ma solo 2 persone hanno trovato facile l'interfaccia di controllo, mentre 6 l'hanno giudicata difficile da usare e altri non hanno mai provato personalmente.

La conclusione a oggi è estremamente positiva. Il disagio con l'interfaccia di controllo è perfettamente comprensibile e anche prevedibile, in quanto si tratta di un prodotto prototipale, per cui è necessario un minimo addestramento. Per il futuro, questo è certamente un elemento suscettibile di miglioramento.

2.1.7 Conclusione

La campagna sperimentale di alcuni mesi sull'utilizzo reale ha dato risultati molto interessanti e ha anche fornito spunti per sviluppi futuri.

Le caratteristiche tecniche di Asterism sono rispondenti a quanto progettato: la regolazione della tonalità di luce è ben bilanciata rispetto al flusso luminoso, lo spettro è ricco e la distribuzione delle intensità dà un risultato gradevole in ambiente, oltre a soddisfare i requisiti illuminotecnici.

L'efficienza del sistema è alta. Sono inevitabilmente non trascurabili i consumi in fase di standby, per la necessità di mantenere attive le comunicazioni di rete.

Le persone hanno mostrato di gradire il nuovo sistema di illuminazione, amano una illuminazione sia diretta che indiretta, la luce calda e la possibilità di "personalizzare". L'indagine sulla soddisfazione prosegue nel tempo con nuove persone e, al momento, si confermano gli stessi risultati, a parte sporadiche preferenze per luce fredda. Sarebbe interessante capire il perché della preferenza alla luce calda, ma questo va al di là degli scopi del presente lavoro. L'elemento importante è essenzialmente la possibilità di poter scegliere.

Riteniamo utile proseguire nella sperimentazione, andando a investigare anche altri aspetti legati all'installazione e all'utilizzo reale: i risultati potrebbero essere utili anche a livello di prenormativa, specialmente quella sull'illuminazione dei luoghi di lavoro in interni.

Per gli sviluppi futuri di Asterism, e rimanendo nel puro campo dell'illuminazione, si può pensare di inserire il sistema in un vero contesto di smart building, dove ad esempio l'attivazione della rete sia programmata tramite lo studio dei profili di utilizzo, per diminuire i consumi quando la stanza non è occupata, oppure dove il sistema sia controllabile anche attraverso trigger esterni quali l'andamento della luce naturale nel

giorno o nelle stagioni, o a curve dinamiche nel tempo per ottenere particolari effetti – ad esempio l'attivazione circadiana – o a scelta totalmente personalizzata da parte delle persone.

2.1.8 Bibliografia

1. M. Rossi, D. Casciani, F. Musante (Politecnico di Milano, Dip. Design), "Lighting design for wellbeing". Report Rds/Par2014/030. Settembre 2015
2. UNI EN 13032-4 "Luce e illuminazione - Misurazione e presentazione dei dati fotometrici delle lampade e apparecchi di illuminazione - Parte 4: Lampade a LED, moduli e apparecchi di illuminazione"

2.2 Sperimentazione HumbleBee

2.2.1 Il prodotto e l'installazione

HumbleBee è un sistema di illuminazione innovativo e intelligente per uso industriale, con controlli Smart, basato su LED e fosfori remoti, sviluppato in precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico [1], [2], [3]. E' stato progettato per essere installato ed utilizzato nell'edificio ENEA di Ispra, nella Hall tecnologica ICELAB (Figura 19), un laboratorio di 18,00 x 9,40 metri, alto 7 metri, assimilabile ad un ambiente industriale. L'area di lavoro dei tecnici e dei ricercatori, che svolgono attività sperimentale, è focalizzata all'interno delle 3 camere climatiche e nelle due aree di lavoro (banchi da lavoro) utilizzate per la preparazione del materiale da testare.

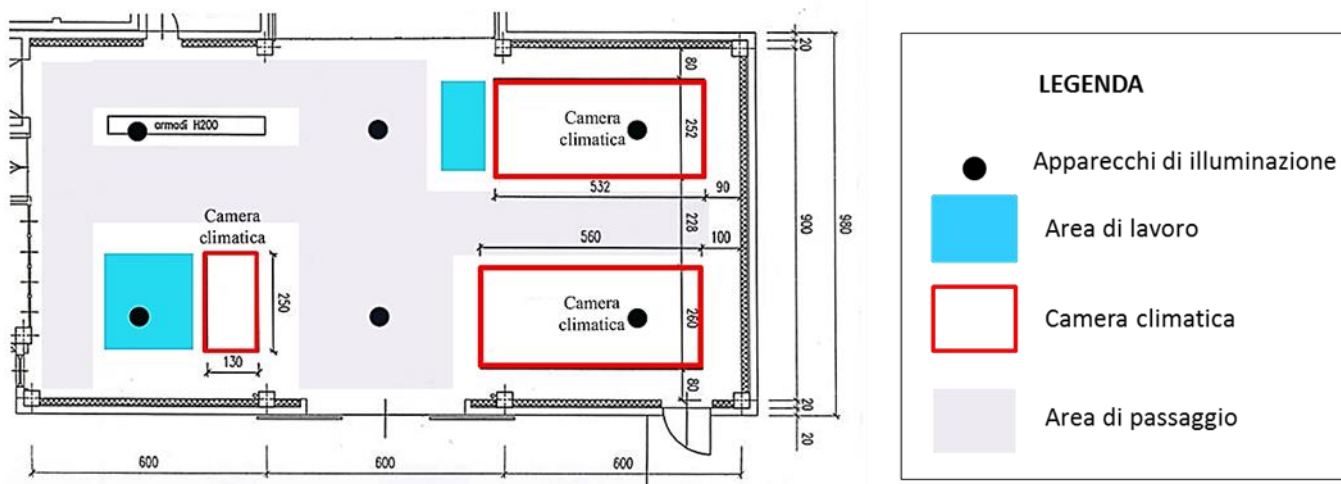


Figura 19 - Planimetria della Hall tecnologica

Gli apparecchi sono prototipi, di tipo High Bay, progettati e realizzati ad hoc, con sensori di sensori presenza, dispositivi elettronici per la comunicazione wireless e l'antenna, collegati in rete per la gestione manuale e automatica. Il sistema di controllo Smart (EyeNut Harvard) consente anche la verifica dei consumi energetici per mezzo di appositi contatori di grandezze elettriche incorporati nei dispositivo EyeNut adapter installati in ciascun apparecchio.

L'impianto è progettato per garantire un livello di illuminamento medio mantenuto sul piano di lavoro (altezza di 1 metro) di 300 lux.

In Figura 20 si vede la Hall tecnologica, e gli apparecchi HumbleBee installati a sospensione tramite carrucole: questa soluzione è stata adottata per poter facilmente intervenire sul sistema per testare nuovi componenti, sia dell'apparecchio sia dei dispositivi di controllo, oppure per upgrade di qualsiasi tipo.

L'impianto precedente era costituito da 6 apparecchi high bay a vapori di mercurio, installati a circa 7 m di altezza e disposti nel locale come si vede in Figura 20.

Il nuovo impianto, con HumbleBee, comprende invece 5 esemplari, in quanto la zona delle camere climatiche (dove in precedenza c'erano 2 apparecchi) deve essere illuminato nella zona di passaggio tra le camere climatiche e non "sopra" le camere climatiche stesse.



Figura 20 - La Hall tecnologica con HumbleBee montati su carrucola

Gli apparecchi sono composti da LED royal blu (emissione a banda molto stretta), con opportuna alimentazione elettrica e dissipazione termica. I LED sono alloggiati in un vano con una camera di miscelazione, la quale orienta la luce verso la vera superficie emettente dell'apparecchio, cioè il vetro con i fosfori remoti, i quali assorbono la luce blu e la riemettono nel bianco (CCT = 4000 K circa). L'emissione è rotosimmetrica e, in assenza di altri componenti, è lambertiana.

Nel tempo sono state fatte diverse modifiche funzionali al sistema.

L'ultima, oggetto della sperimentazione descritta in questo rapporto, è l'applicazione di riflettori con un nuovo tipo di materiale riflettente (prodotto da Almecco, appartenente alla famiglia VEGA, tipo V98127, costituito da un substrato di alluminio preanodizzato e un rivestimento in argento, a riflettanza diffusa), con caratteristiche ottiche molto elevate (ad es. riflettanza totale $\geq 97\%$, riflettanza diffusa 95%): questo sempre in linea con la sperimentazione rivolta agli elementi più innovativi del mercato.

In Figura 21 la fotometria di progetto del proiettore e un rendering (da Almecco).

Si fa notare che il riflettore, quando in opera nell'installazione reale, dovrebbe essere protetto da un apposito guscio esterno, soprattutto dal punto di vista meccanico. Si è in questa fase optato per posticipare la realizzazione del guscio, preferendo effettuare una prima campagna di test in laboratorio. Si prevede in seguito di realizzare anche i gusci e quindi di installare gli apparecchi nel luogo prescelto per l'utilizzo.

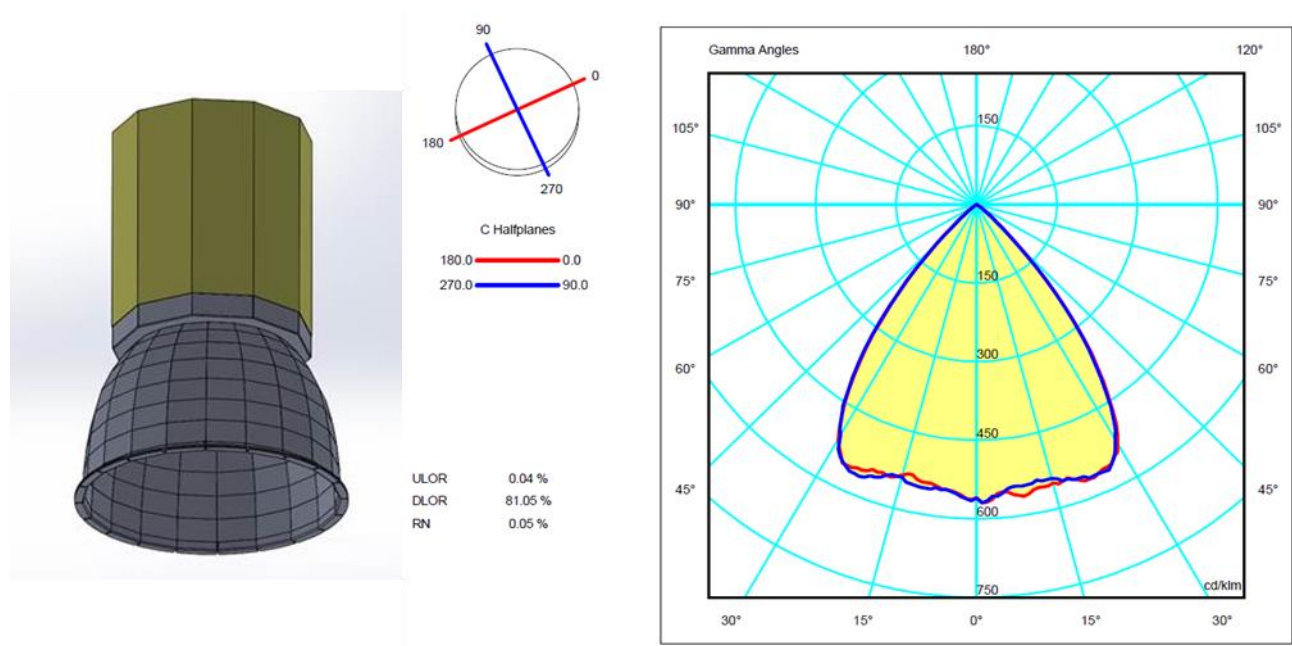


Figura 21 - Rendering nuovo proiettore Almeco e fotometria di progetto

2.2.2 I test effettuati

Scopo dei test è stato caratterizzare l'apparecchio con il nuovo riflettore, soprattutto per quanto riguarda il miglioramento delle prestazioni fotometriche. Sono stati fatti anche test sulle caratteristiche elettriche e di legate alla dissipazione termica, per rilevare eventuali variazioni dopo l'applicazione del riflettore, anche in funzione delle ultime modifiche (soprattutto meccaniche) alla struttura dell'apparecchio.

Per i test è stato utilizzato un esemplare di apparecchio con proiettore.

Sono stati misurati parametri:

- fotometrici: mappatura di illuminamento su piano di lavoro e ricostruzione solido fotometrico
- elettrici ed energetici: curva di dimmerazione (emissione luminosa in funzione della potenza)
- termici: temperature di alcuni componenti a diverse temperature ambiente e a diverse condizioni di dimmerazione
- spettroradiometrici: radianza spettrale a diversi angoli di emissione

In Figura 22 l'apparecchio in prova, all'interno della camera climatica (per le prove termiche).



Figura 22 - L'apparecchio HumbleBee con riflettore Almecco, in prova nella camera climatica

2.2.3 Strumentazione usata

In Tabella 7 la strumentazione usata per tutte le prove.

Tabella 7 – Strumentazione per misure su HumbleBee

<i>Test</i>	<i>Strumentazione</i>
Potenza elettrica	Yokogawa WT210 digital power meter
Illuminamento	Luxmetro LMT B360E Czibula Grundmann Luxmeter Class A
Parametri radiometrici e temperatura correlata di colore	JETI Specbos 1211-UV
Temperatura superficiale	Termoresistenze PT-100
Analisi termografiche	Termocamera FLIR SC660

2.2.4 Risultati

2.2.4.1 Misure fotometriche

E' stato mappato l'illuminamento su un piano orizzontale: scopo della misura non era tanto quello di misurare un reale piano di lavoro, quanto di esaminare la distribuzione dell'illuminamento, per confrontare con la situazione senza riflettore. E' stata utilizzata la cella di prova del laboratorio "Corvo" (Figura 23), parallelepipedica, con pareti, pavimento e soffitto neri. Su un piano orizzontale vicino al pavimento è installata una guida su due assi, su cui si muove un luxmetro. L'area utile per le misure è di 4 x 4 m. L'altezza utile di installazione arriva a 3 m.

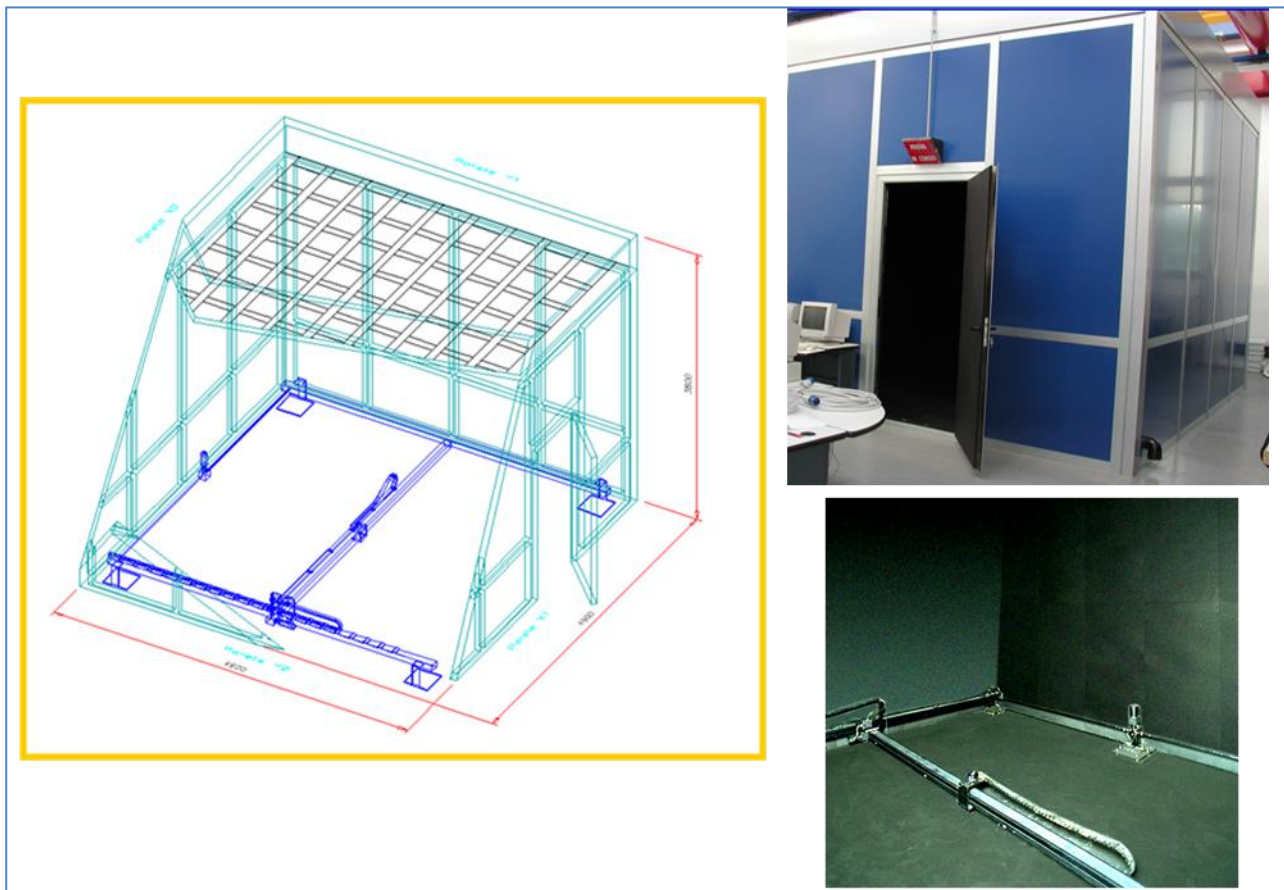


Figura 23 – Cella di prova del laboratorio “Corvo” con il luxmetro sul sistema di movimentazione x-y

Il sistema permette la mappatura di illuminamento su un piano orizzontale, sulla base di reticoli regolari scelti dall'utilizzatore.

I parametri principali per questo test:

- altezza di installazione 2.6 m (distanza superficie emettente – piano di misura)
- apparecchio sospeso in centro al soffitto della cella
- temperatura ambiente $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- griglia di misura sul piano orizzontale: 50 x 50 punti su 4 x 4 m
- misure in condizioni di stabilità (l'apparecchio è stabile entro 15 minuti dall'accensione)

In Figura 28 il risultato. Si deve anche notare che l'altezza di installazione (2.60 m), imposta dai vincoli fisici della cella di prova, non è rappresentativa dell'utilizzo reale (dove l'altezza è di circa 6 m).

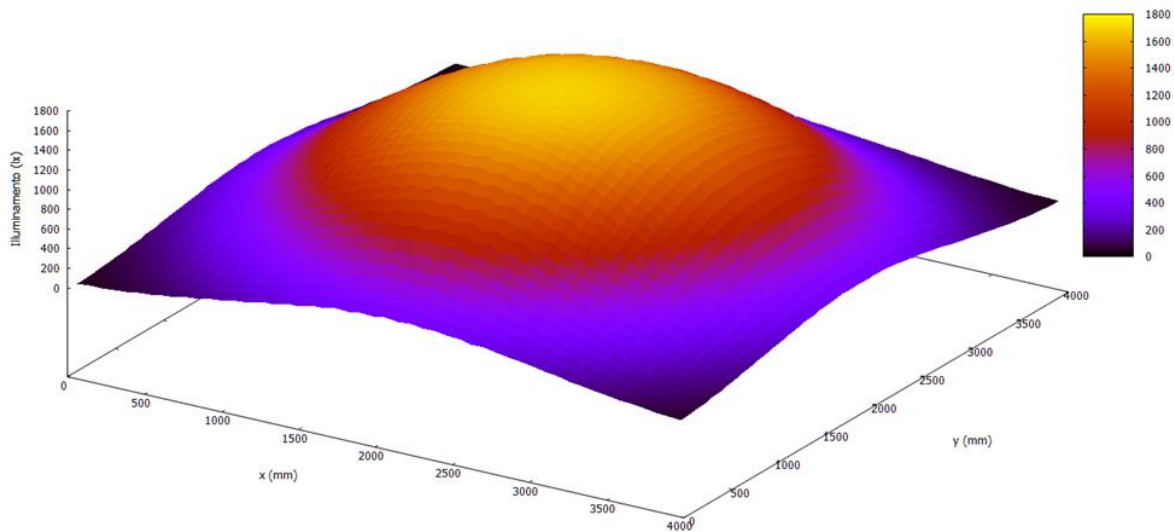


Figura 24 - mappatura illuminamento HumbleBee senza riflettore

Di un apparecchio di illuminazione è importante conoscere il solido fotometrico, rappresentazione grafica della sua emissione di luce nello spazio. La misura delle intensità nello spazio si effettua con un goniometro, di dimensioni adeguate per poter considerare "puntiforme" la sorgente.

Nel caso di HumbleBee, in particolar modo con il riflettore, non era possibile l'utilizzo del goniometro del laboratorio, che può misurare sorgenti con dimensioni lineari dell'ordine dei 10 cm, mentre le dimensioni di HumbleBee sono di 60 cm. Invece di rivolgersi a un laboratorio esterno, si è deciso di sviluppare un metodo diverso per arrivare al risultato voluto, specialmente perché si erano pianificati parecchi test parametrici.

Dalla mappatura di illuminamento sul piano orizzontale, con calcoli trigonometrici, è possibile calcolare le intensità dalle misure di illuminamento, sulla griglia. È quindi possibile, sempre con calcoli trigonometrici, interpolare le intensità ai piani C e angoli γ di interesse (su una griglia regolare di angoli), che insistono sullo stesso piano¹⁰.

Per ottenere il solido fotometrico, è necessario misurare punti anche sulle pareti verticali: è stato seguito questa procedura, limitando le misure solo ad alcune zone delle pareti, sulla base di considerazioni fisiche: si è visto che l'emissione dei HumbleBee è sostanzialmente rosimmetrica, per cui sono state scelte 4 "linee" verticali in centro alle pareti, su cui posizionare (manualmente) il luxmetro a varie quote, identificate dagli angoli γ desiderati. L'altezza massima di misura è stata definita anch'essa sulla base di caratteristiche fisiche di HumbleBee: in pratica, data la presenza del riflettore, oltre a una certa altezza l'emissione luminosa è nulla.

I parametri principali per questo test:

- angolo (γ) massimo di rilievo sul piano orizzontale: 36°
- angoli (γ) misurati sulle pareti: da 36° a 78°, su quattro piani C (0°, 90°, 180°, 270°)¹¹

Per le misure sulle pareti, è stato utilizzato il luxmetro portatile, dopo averlo calibrato con quello fisso.

¹⁰ Piani C e angoli γ rappresentano coordinate polari nel sistema convenzionalmente usato per la distribuzione delle intensità nello spazio.

¹¹ per le misure verticali, è stato utilizzato il luxmetro portatile Czibula Grundmann, dopo aver verificato la calibrazione rispetto al luxmetro fisso LMT



Figura 25 - L'interno della cella di prova, con il luxmetro per le misure sulla griglia orizzontale e le guide per i punti di misura su 2 pareti verticali

Dalla ricostruzione delle intensità nei vari angoli e piani desiderati si è costruito il file di interscambio fotometrico (formato Eulumdat), che è quindi disponibile per simulazioni illuminotecniche.

In Figura 26 il risultato della costruzione del solido. Era stata fatta l'ipotesi di apparecchio rotosimmetrico: dal solido si nota un apparente scostamento dalla simmetria prevista, che tuttavia è da attribuire soprattutto al non perfetto allineamento tra gli elementi in cella di prova (che, ricordiamo, non è un goniofotometro): si ritiene trascurabile questo aspetto, per gli scopi del presente lavoro.

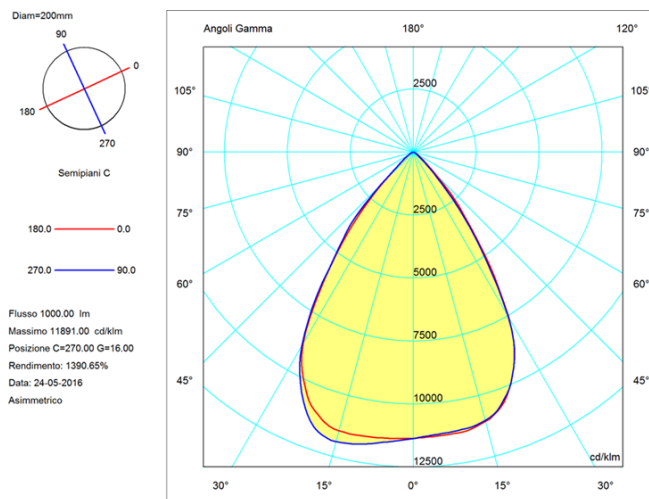


Figura 26 - Solido fotometrico HumbleBee con riflettore, costruito da mappatura illuminamento

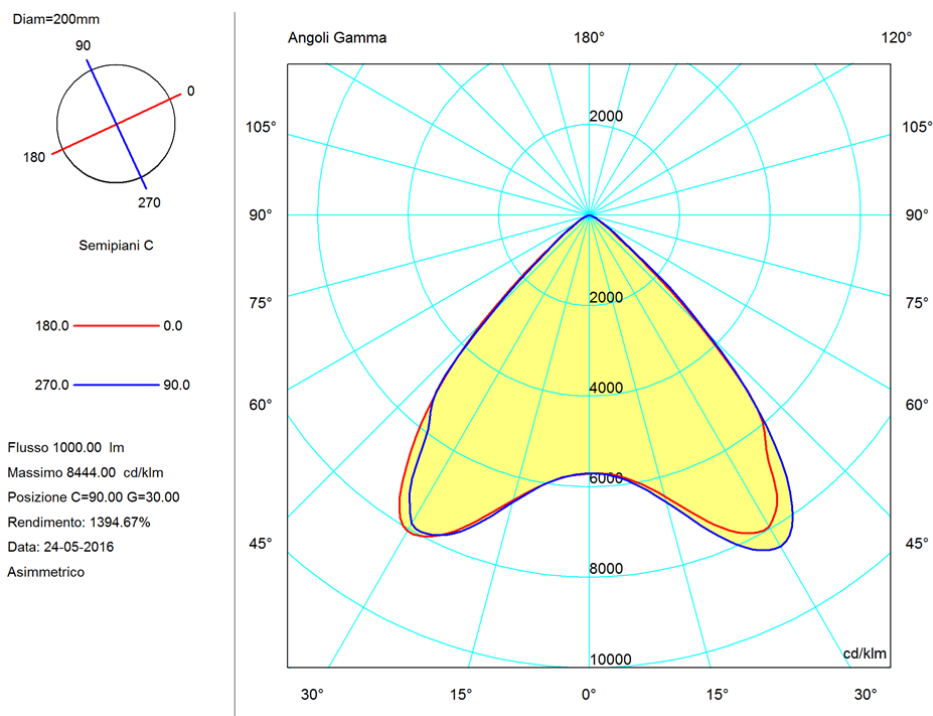


Figura 29 - Solido HumbleBee con riflettore installato in posizione erronea

2.2.4.2 Misure elettriche

E' stata misurata la curva di dimmerazione dell'apparecchio, che indica il flusso emesso in funzione della potenza elettrica.

Nel caso di HumbleBee, non è stato misurato il flusso, per i motivi già detti sopra, ma sono state fatte misure di illuminamento, sempre nella cella di prova del laboratorio "Corvo", sui 9 punti centrali della griglia utilizzata in precedenza per la mappatura di illuminamento (il punto centrale rispetto all'asse polare dell'apparecchio e 8 punti attorno): da questi valori si può calcolare il flusso, nell'ipotesi che la distribuzione dell'illuminamento non dipenda dalla potenza.

Sono state misurate, a valle del sistema di alimentazione, tensione, corrente e potenza.

La potenza è stata dimmerata dal 100% al 30%, a step di 10%, tramite il sistema EyeNut.

In Figura 30 l'illuminamento nei singoli punti di misura per le diverse posizioni di dimmerazione, dove si vede che la distribuzione dell'illuminamento, come ci si aspettava, non dipende dalla dimmerazione ed è perciò ragionevole calcolare il flusso in dimmerazione a partire dalle misure di illuminamento.

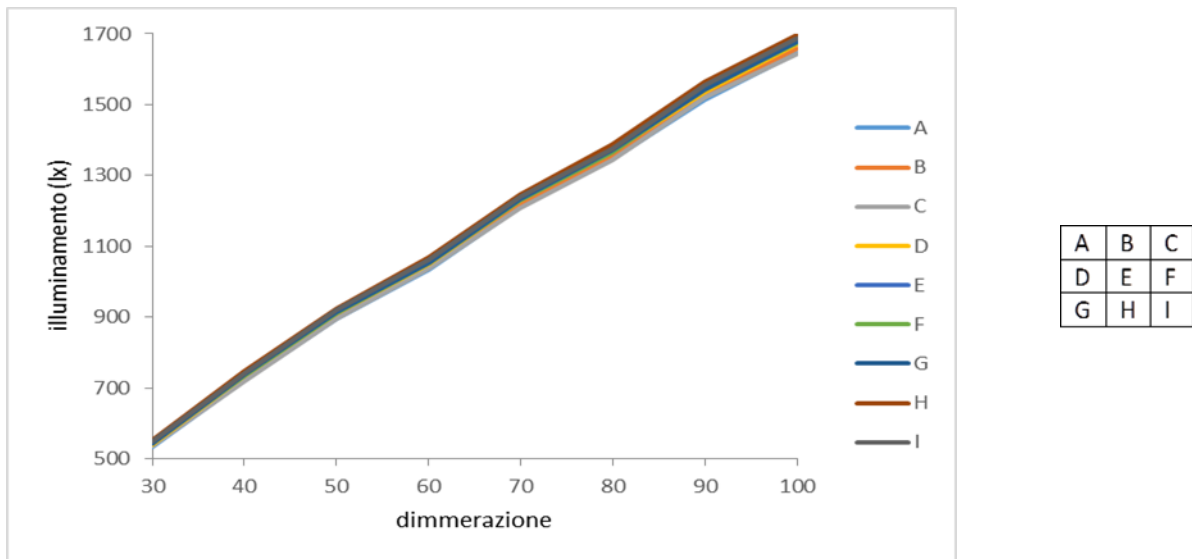


Figura 30 – Illuminamento nei 9 punti di misura, a diverse posizioni di dimmerazione

In Tabella 8 i risultati delle misure.

Tabella 8 – Misure elettriche su HumbleBee

Dimmerazione	100	90	80	70	60	50	40	30
Illuminamento medio [lx]	1672	1540	1367	1229	1052	911	734	543
Potenza [W]	139.4	125.5	110.3	97.2	81.8	69.9	55.5	40.4
Tensione [V]	396.9	398	394.7	396	392.4	392.5	389.7	387.4
Corrente [mA]	353	317	281	247	210	180	144	106

In Figura 31 i valori normalizzati rispetto alla posizione di dimmerazione 100 (cioè a piena potenza) dei parametri elettrici misurati e del flusso luminoso calcolato: la dimmerazione è essenzialmente in corrente.

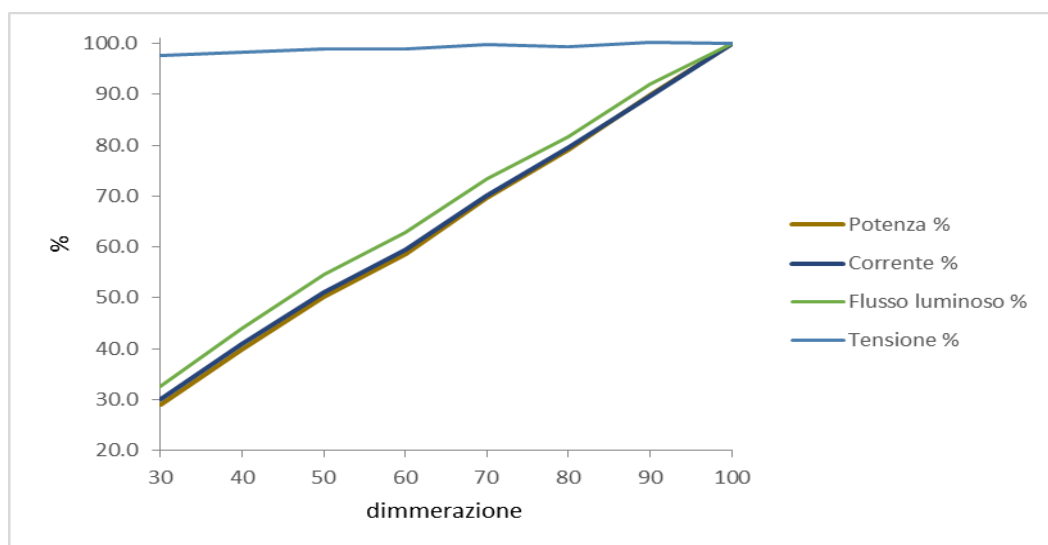


Figura 31- Risultati normalizzati misure elettriche HumbleBee

In Figura 32 la curva di dimmerazione di HumbleBee, che si conferma lineare.

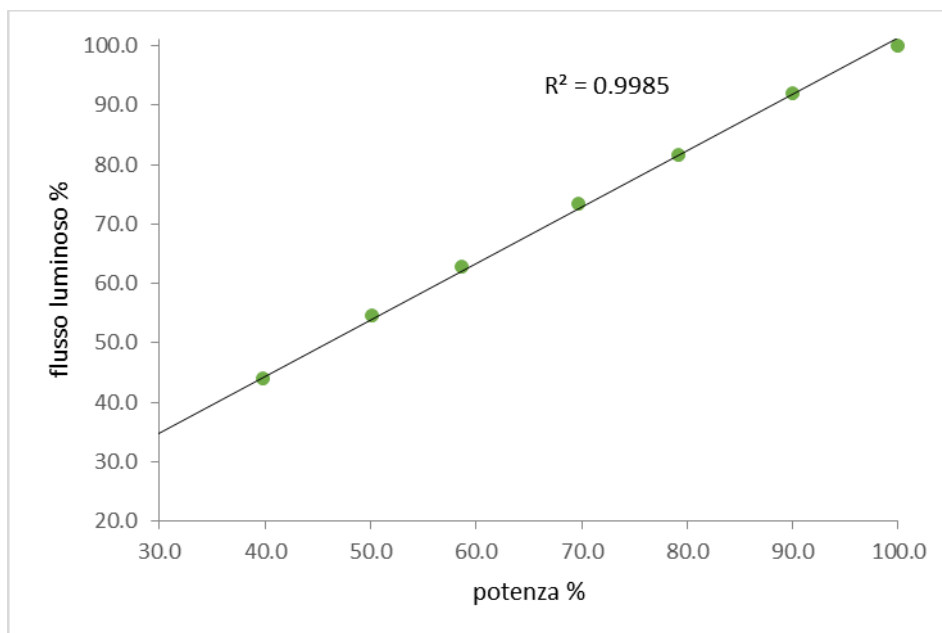


Figura 32 - Curva di dimmerazione HumbleBee

2.2.4.3 Misure Termiche

Sono state fatte misure termiche sull'apparecchio, per avere indicazione sulle condizioni operative in alcune situazioni "statiche" tipiche: temperatura ambiente 25°C (di riferimento, situazione comune) e 50°C (ad esempio il soffitto di un ambiente industriale d'estate).

Sono state valutate le temperature in alcuni punti particolari: l'interno della camera di miscelazione (ambiente in cui operano i LED), l'esterno del vetro / fosfori remoti, la parete interna del riflettore, l'esterno della corona metallica a contatto del vetro/fosfori remoti, l'esterno del dissipatore, la superficie del sistema di controllo e alimentazione DALI.

Le prove si sono svolte in camera climatica, con l'apparecchio installato a sospensione, quindi nella normale posizione di funzionamento.

Le temperature sono state misurate con termoresistenze a contatto ed è stata utilizzata una termocamera per le superfici visibili.

Per ogni condizione, prima dell'inizio del test l'apparecchio spento è stato lasciato stabilizzare termicamente.

In Tabella 1 Tabella 9 le prove.

Tabella 9 - Prove termiche

Prova	Temperatura [°C]	Dimmerazione [%]
Accensione fino a stabilità	25	100
Accensione fino a stabilità	50	100
Accensione fino a stabilità	25	20
Accensione fino a stabilità	50	20
Spegnimento fino a stabilità	50	100

In Figura 33 l'andamento delle temperature e della potenza nella prova a 25°C ambiente, dimmerazione 100%, dal momento dell'accensione per 90 minuti.

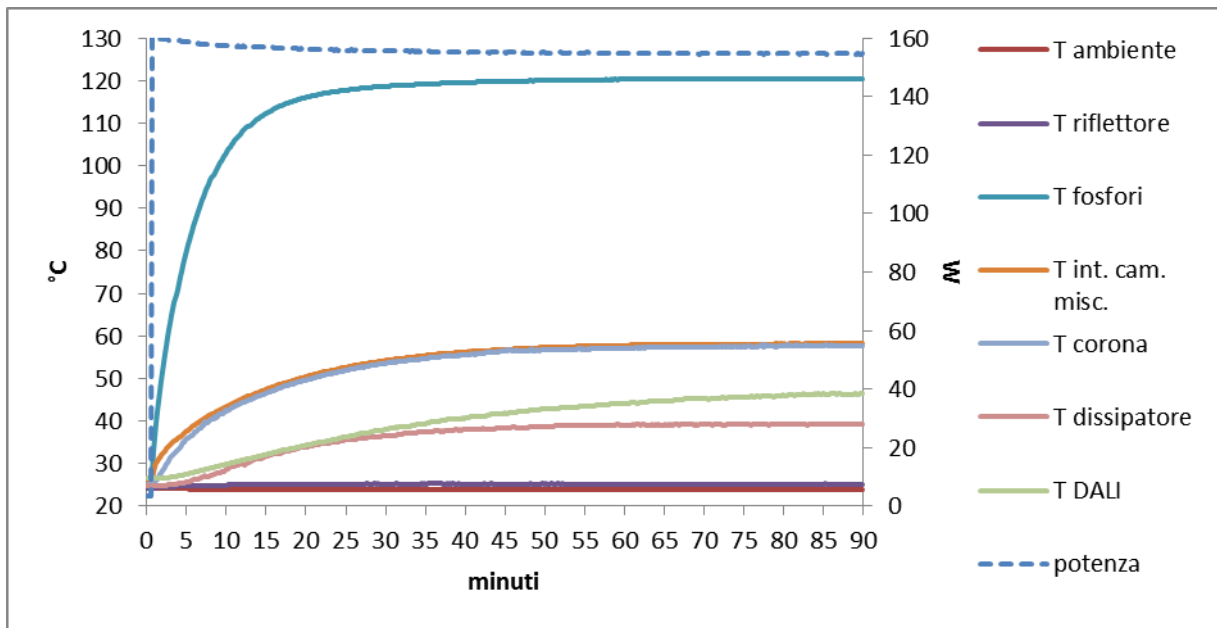


Figura 33 - Misure termiche HumbleBee a 25°C ambiente, dimmerazione 100%

In Figura 34, l'immagine termografica della zona della corona, con evidenziato il target (box1) per la misura della temperatura: il target, costituito di carta adesiva, è stato utilizzato per poter valutare correttamente la temperatura di una superficie metallica, caratterizzata da alta riflettanza nell'infrarosso.



Figura 34 - Immagine termografica corona

In Figura 35, Figura 36, Figura 37 le misure di accensione e attesa stabilità nelle altre condizioni.

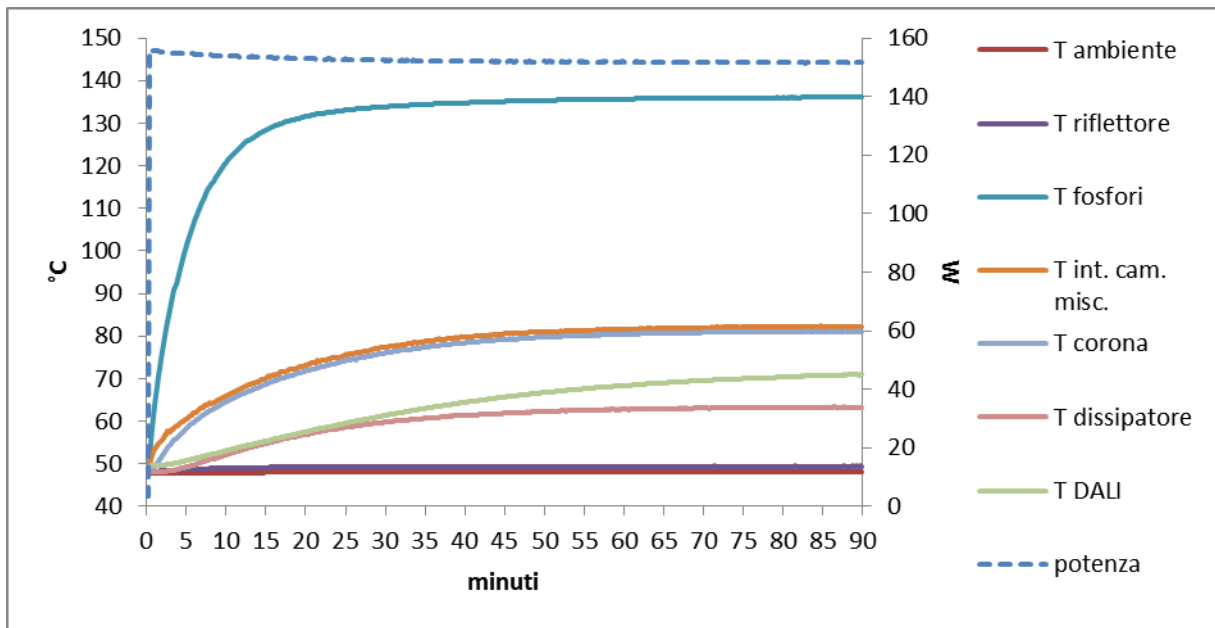


Figura 35 - Misure a 50°C ambiente, dimmerazione 100%

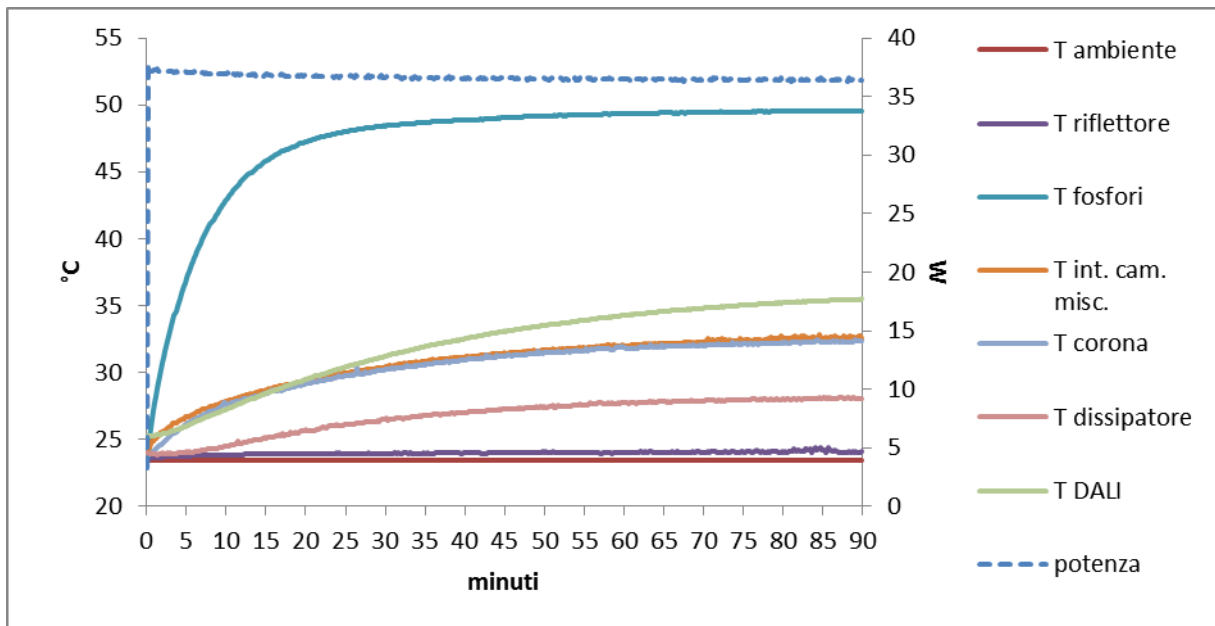


Figura 36 – Misure a 25°C ambiente, dimmerazione 20%

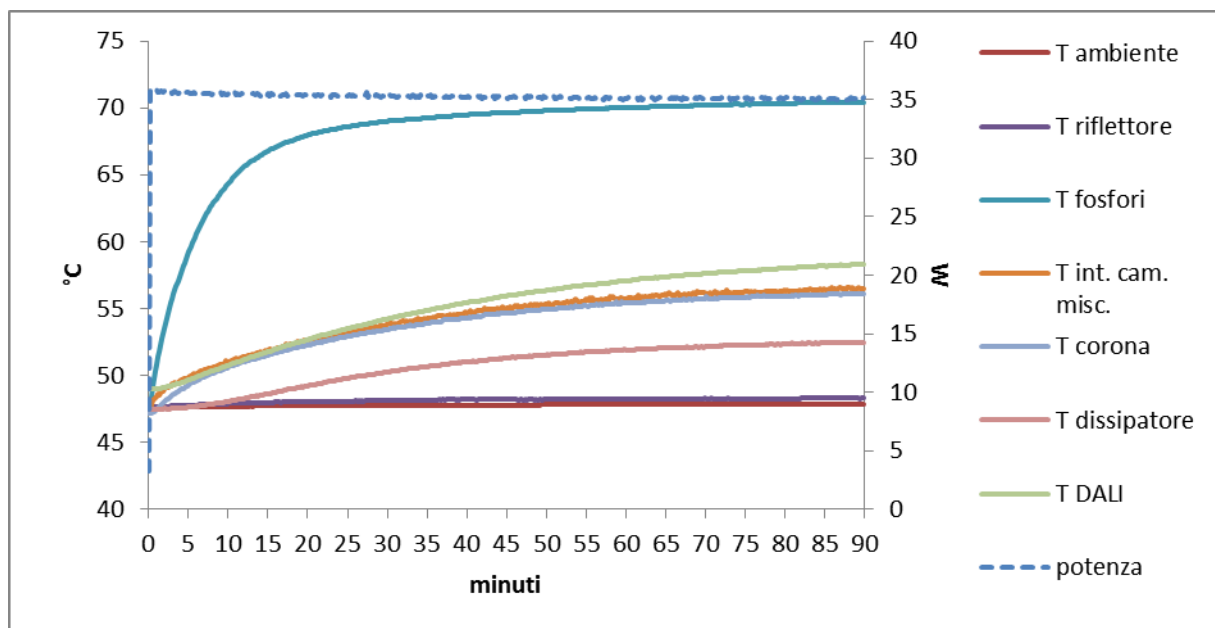


Figura 37 - Misure a 50°C ambiente, dimmerazione 20%

In Tabella 10 i valori massimi raggiunti dai diversi parametri.

La temperatura della superficie dei fosfori remoti raggiunge valori elevati (superiori a 120°C già a 25°C) e anche la temperatura del vano dove sono posizionati i LED, rappresentato dalla T interna camera miscelazione e T corona (non è stata misurata la temperatura di giunzione), rimane sotto i 60°C a 25°C ambiente, ma supera 80°C a 50°C ambiente.

Tabella 10 - Valori massimi delle grandezze misurate

<i>T ambiente [°C]</i>	25	50	25	50
<i>Dimmerazione [%]</i>	100	100	20	20
T riflettore [°C]	25.3	49.5	24.4	48.3
T fosfori [°C]	120.5	136.4	49.6	70.4
T int. cam. misc. [°C]	58.2	82.4	32.8	56.6
T corona [°C]	58.0	81.3	32.5	56.1
T dissipatore [°C]	39.4	63.5	28.2	52.5
T DALI [°C]	46.5	72.2	35.5	58.3
potenza [W]	160.3	156.2	37.7	35.8

In Figura 38 l'andamento delle temperature nella prova di raffreddamento, effettuata alle condizioni più gravose per l'apparecchio: 50°C ambiente e 100% dimmerazione.

L'apparecchio, acceso e in condizioni di stabilità termica, è stato spento e si è osservato il tempo di raffreddamento dei diversi punti di controllo.

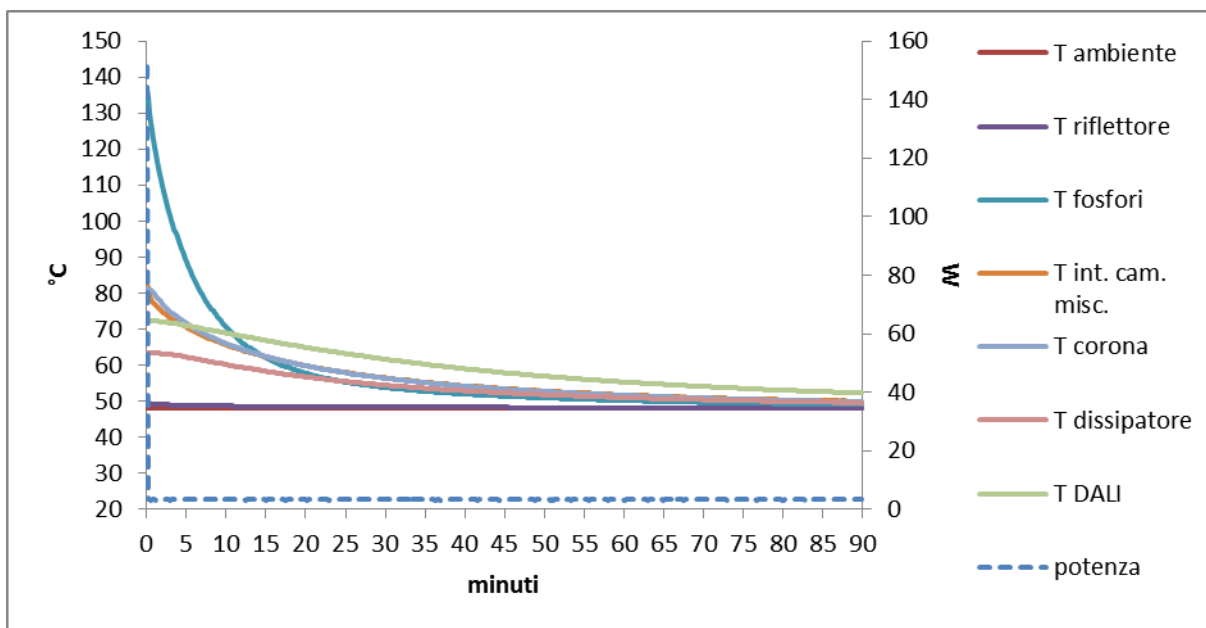


Figura 38 - Misura di raffreddamento a 50°C dimmerazione 100%

Si nota in tutti i casi, sia in fase di accensione / riscaldamento che in fase di spegnimento / raffreddamento, un tempo di stabilizzazione molto lungo. E' difficile quindi ipotizzare quali saranno le condizioni termiche durante il funzionamento normale, con l'apparecchio in dimmerazione continua secondo l'apporto di luce naturale e la presenza di persone.

2.2.4.4 Misure spettrometriche

Sono state misurate le caratteristiche di emissione spettrale dell'apparecchio. La misura è stata fatta misurando la radianza di una superficie nella cella di prova del laboratorio "Corvo". L'ambiente è costituito da superfici nere a bassissima riflettanza, per cui possiamo attribuire lo spettro misurato alla sola emissione dell'apparecchio, senza influenze dell'ambiente.

Le misure sono state fatte misurando radianza / irradianza spettrale su un piccolo target, posto a 1 m di distanza dall'apparecchio, con diversi angoli di incidenza (da 0° a 50° step 10°, su un piano C), per valutare eventuali variazioni di spettro al variare dell'angolo.

In questo test non era importante il valore assoluto, per cui i risultati sono stati normalizzati. In Figura 39 l'andamento dell'emissione spettrale per tutti gli angoli misurati. Si nota che la quantità di luce che incide sul / viene emessa dal target diminuisce all'aumentare dell'angolo e della relativa distanza dalla superficie emettente, mentre lo spettro rimane invariato.

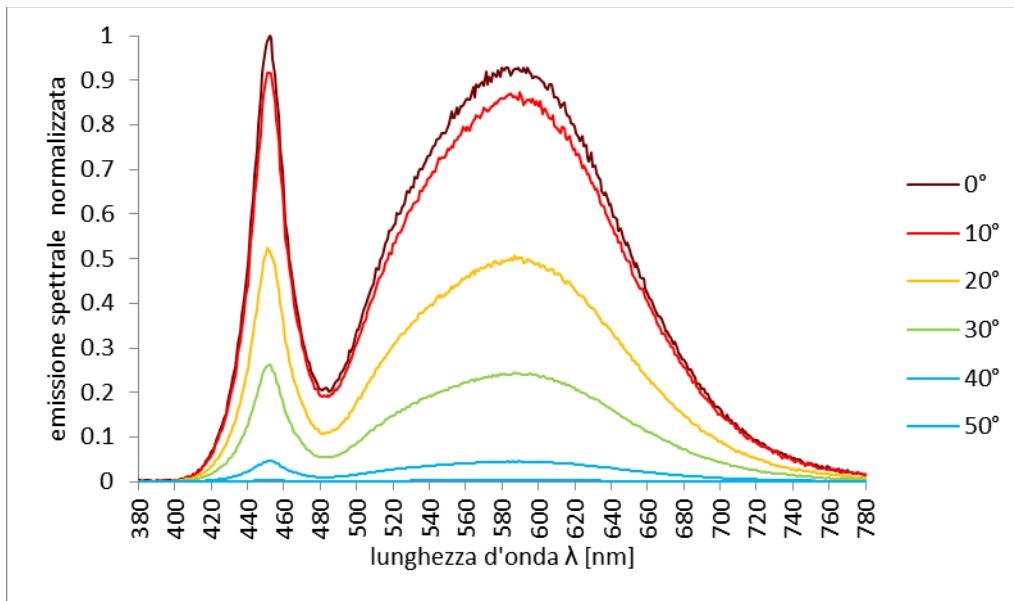


Figura 39 - Emissione spettrale normalizzata HumbleBee

In Figura 40 una rappresentazione delle coordinate cromatiche dell'apparecchio con riflettore e le CCT corrispondenti.

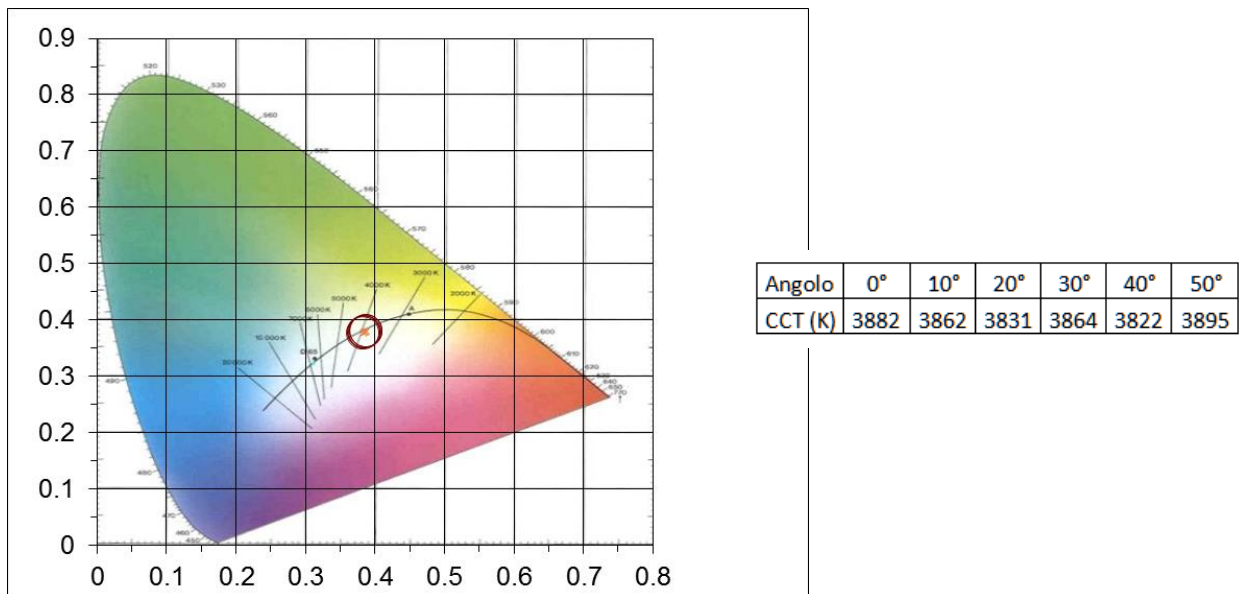


Figura 40 - Coordinate cromatiche HumbleBee con riflettore

L'apparecchio era stato misurato in passato senza riflettore e la CCT risultava di 4100K. Una misura diretta della radianza sui fosfori e sul riflettore ha portato a CCT di 4032K e 3884K rispettivamente. Quindi la presenza del riflettore, con le sue caratteristiche specifiche di riflettanza spettrale, modifica leggermente la CCT dell'apparecchio.

2.2.5 Conclusione

Il riflettore Almecco applicato all'apparecchio HumbleBee migliora notevolmente la distribuzione delle intensità, ottimizzando l'illuminamento sul piano di lavoro.

Le caratteristiche elettriche sono invariate rispetto alla situazione precedente, e si conferma la curva lineare di dimmerazione. Le modifiche strutturali apportate all'apparecchio hanno migliorato anche la dissipazione termica, tuttavia ci sono ancora margini per ulteriore miglioramento in questo senso.

2.2.6 Bibliografia

1. A. Antonelli, L. Blaso, S. Fumagalli, G. Leonardi, O. Li Rosi, P. Pistochini, E. Rusconi, M. G. Villani, P. Zangheri, "Attività sperimentale per sviluppo dei sistemi di illuminazione efficienti e studi relativi alla resa cromatica delle sorgenti luminose, eventi formativi, GIS per illuminazione pubblica", Report RdS/PAR2013/071, Settembre 2014
2. L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli, G. Leonardi, V. Tarantini, R. Pollidori, E. Rusconi, A. Frascone, A. Antonelli (ENEA), "Metodi sperimentali per la valutazione della qualità della luce, sviluppo di sistemi a LED", Report RdS/2013/114, Settembre 2013
3. L. Blaso, S. Fumagalli, O. Li Rosi, P. Pistochini, M. G. Villani, A. Antonelli, G. Leonardi (ENEA), A. Pasqua (Università Insubria), "Progettazione e sperimentazione con sistemi a LED innovativi", Report RdS/PAR2014/029, Settembre 2015

2.3 Sperimentazione light box per benessere con la luce

Sul mercato stanno diffondendosi prodotti (dispositivi a LED) che hanno lo scopo dichiarato di migliorare il benessere delle persone con la luce: sono da utilizzare con piccole sedute dedicate (quindi non come illuminazione generale) per sentirsi più in forma, regolare i ritmi circadiani, alleviare i sintomi della tristezza invernale...¹²

Esiste anche un utilizzo terapeutico vero e proprio della luce, quindi sotto controllo medico. Tra le diverse applicazioni, la "bright light therapy" è "The use of bright lights (>1000 lux) for certain periods of time at a certain time of day to reset one's biological clock."¹³

Da una piccola indagine in rete, abbiamo notato che i prodotti proposti vengono associati a caratteristiche generiche legate allo spettro (con espressioni del tipo "luce bianca naturale arricchita di blu") oppure all'illuminamento (il tipico parametro è "max 10000 lux"). Poiché l'illuminamento è dipendente dalla distanza dal dispositivo, sono disponibili dati di illuminamento a diverse distanze (si parla di decine di cm). Vengono infine suggeriti tempi di esposizione, orientamento, posizionamento...

Abbiamo svolto una serie di test su un esemplare del mercato, per determinarne le caratteristiche fotometriche / elettriche¹⁴.

Si fa notare che i risultati sono da considerare utili come indicazioni generali, ma non devono essere presi come rappresentativi del modello, dato che si è misurato un solo esemplare.

Ci è sembrato utile svolgere questa attività per dare indicazioni quantitative, anche se solo a livello orientativo, per gli utilizzatori, sia diretti (le persone che usano questi dispositivi) che indiretti (le persone che propongono applicazioni).

2.3.1 Il prodotto

¹² Si veda ad esempio il sito <http://www.wellango.it/>

¹³ Dal sito del Centre for Chronobiology, Psychiatric Hospital of the University of Basel (CH) <http://www.chronobiology.ch/>

¹⁴ Si tratta di prodotti per uso speciale, in termini di Direttiva Ecodesign, quindi la documentazione di prodotto disponibile sui siti dei produttori è molto limitata per gli aspetti legati a questa direttiva.

Il prodotto verrà identificato come LIGHTBOX in questo rapporto, senza specifiche di marca e modello.

L'aspetto è un parallelepipedo, di circa 30 x 40 x 4 cm, di circa 2 kg di peso. La faccia emettente (una delle due facce maggiori) è opalina. E' possibile regolare la quantità di luce a step (5 posizioni di dimmerazione), appoggiare il prodotto (ad es. sul tavolo) e inclinarlo. Il dispositivo è alimentato a 24V CC tramite apposito alimentatore / adattatore. L'area luminosa è di circa 25.5 cm x 26.5 cm.

Nelle specifiche tecniche sono date, tra le altre informazioni:

- Potenza in uscita caratteristica dell'adattatore 24 W
- Classificazione dispositivo medico IIa
- Temperatura del colore 4000-5000 K
- Indice di resa cromatica >70
- Potenza nominale a 17.5 (50) cm (intensità 100%) 29 (8) W/m² ; 10000 (2750) lux
-

Sono date le istruzioni di utilizzo (tempi, orientamento, distanza...), avvertenze e una serie di FAQ utili.

2.3.2 I test effettuati

Su un esemplare del LIGHTBOX sono state svolte diverse attività di test. In particolare, per le diverse posizioni di dimmerazione:

- Potenza elettrica assorbita.
- Illuminamento su un piano a diverse distanze.
- Spettro di emissione, sulle lunghezze d'onda del visibile (380-780 nm), una misura 250-1000 nm (quindi VIS, UV e IR). Temperatura correlata di colore (CCT).

I test sono stati effettuati nel laboratorio ENEA a Ispra, utilizzando una procedura di misura dedicata, ispirata agli standard di misura per apparecchi / lampade a LED¹⁵.

2.3.2.1 Procedura di prova e strumentazione usata

In Tabella 1 le condizioni di prova e la strumentazione usata per tutte le prove.

Tabella 11 - Strumentazione

<i>Test</i>	<i>Ambiente di prova</i>	<i>Temperatura ambiente</i>	<i>Posizionamento LIGHTBOX</i>	<i>Note</i>	<i>Strumentazione</i>
Potenza elettrica assorbita	Laboratori o CORVO	25 C ± 1.2°C	Verticale	Su banco	Yokogawa WT210 digital power meter
Illuminamento su un piano a diverse distanze	cella di prova CORVO	24° C ± 1.6°C	Orizzontale, con emissione verso il basso	Locale 4 x 4 x 3 m, colore interno nero, dotato di asse di movimentazione	Illuminance Meter LMT B 360 DAP3000A Microstar

¹⁵ Essenzialmente EN 13032-4, June 2015. Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED lamps, modules and luminaires

				x-y per il sensore di illuminamento	(grandezze elettriche)
Spettro di emissione e temperatura correlata di colore	di sfera integratrice (1.8 m di diametro)	25°C ± 1°C	Orizzontale, emissione verso l'alto	Ambiente con riflettanza elevata, uniforme e non dipendente dalla lunghezza d'onda	Minolta CS-2000

In alcuni casi la posizione scelta per i test probabilmente non coincide con quella effettiva di utilizzo del dispositivo: la scelta è per semplificare le procedure di test.

Tutte le prove si sono svolte con questa sequenza:

- 1) Posizionamento LIGHTBOX
- 2) Accensione LIGHTBOX e attesa stabilizzazione termica (1 ora almeno)
- 3) Verifica parametri elettrici e altre condizioni al contorno (temperatura ambiente...)
- 4) Per ogni livello di dimmerazione: settaggio livello dimmerazione, attesa (qualche minuto), misura¹⁶.
- 5) Spegnimento LIGHTBOX

2.3.2.2 Misura per la misura dell'illuminamento

E' stato definito un rettangolo di misura corrispondente a un uso realistico del prodotto, in base ai suggerimenti per l'utilizzo forniti dal produttore.

E' stato ipotizzato un apparecchio messo in verticale su un tavolo, con l'utilizzatore seduto al tavolo. L'occhio dell'utilizzatore viene a trovarsi in corrispondenza della parte alta dell'apparecchio. Sono quindi stati fissati angoli e distanze limite:

- orizzontalmente una distanza angolare di 60° dal bordo dell'apparecchio, per tenere conto del campo visivo dell'utilizzatore e anche della correttezza delle misure con il luxmetro
- verticalmente una distanza angolare di circa 30° dal bordo dell'apparecchio, per tenere conto dei vincoli dati dalla posizione suggerita per l'utilizzo.

In Figura 41 una rappresentazione grafica di quanto sopra.

¹⁶ Fa eccezione la prova di illuminamento su un piano: non è stato possibile svolgere tutto il programma in una sola giornata senza spegnere il LIGHTBOX, a causa della durata dei test singoli. Quindi l'apparecchio è stato spento e riaccessso secondo necessità.

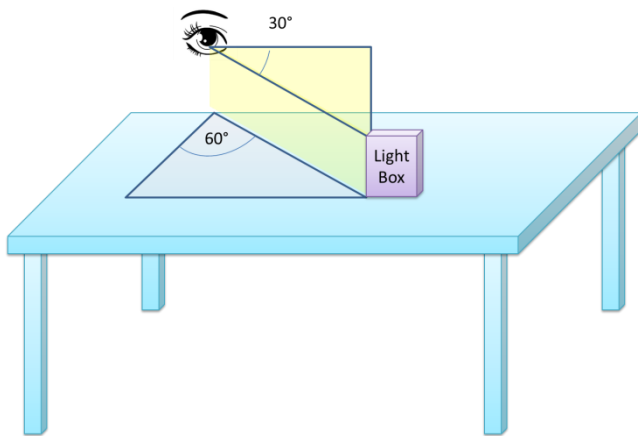


Figura 41 - L'utilizzatore al tavolo, il light box e gli angoli estremi di riferimento

A 50 cm di distanza, questo equivale a un rettangolo di circa 203 x 100 cm, con il Light Box proiettato al centro, come si vede in Figura 42.

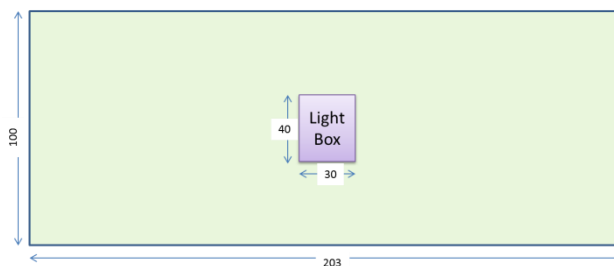


Figura 42 - Rettangolo di misura illuminamenti a 50 cm (misure in cm)

Sono state quindi definite diverse distanze di riferimento e relativi rettangoli di misura, come in Tabella 12

Tabella 12 - distanze e aree di misura

<i>Distanza</i>	<i>Dimensioni rettangolo misura</i>	<i>Posizioni dimmerazione</i>	<i>Spiegazione</i>
50 cm	2125 mm x 1025 mm	Tutte (1-5)	E' distanza di utilizzo suggerita. E' disponibile l'illuminamento nominale massimo
17.5 cm	500 mm x 500 mm	Tutte (1-5)	E' distanza a cui è dichiarato illuminamento nominale massimo di 10000 lux
27.5 cm	750 mm x 750 mm	4, 5	Distanza intermedia per verificare aspetti non lineari

Le misure sono state prese su un reticolo di passo 25 mm.

A distanza inferiore a 50 cm, sono stati scelti rettangoli di misura molto più piccoli, essenzialmente per ragioni di tempo (ogni singolo test dura alcune ore).

Per tutte le distanze, è possibile confrontare rettangoli di misura di 500 mm x 500 mm.

Poiché, a parità di tutte le altre condizioni, l'illuminamento a un dato angolo di incidenza dipende solo dall'inverso del quadrato della distanza, per cui, se necessario, si può ricostruire in modo geometrico l'illuminamento su una superficie più estesa.

2.3.3 Risultati

2.3.3.1 Potenza elettrica assorbita

In Figura 43, la potenza assorbita nelle varie posizioni di dimmerazione e in fase di standby (l'apparecchio non emette luce ed è collegato alla rete elettrica). Sono rappresentate 3 serie di misure¹⁷.

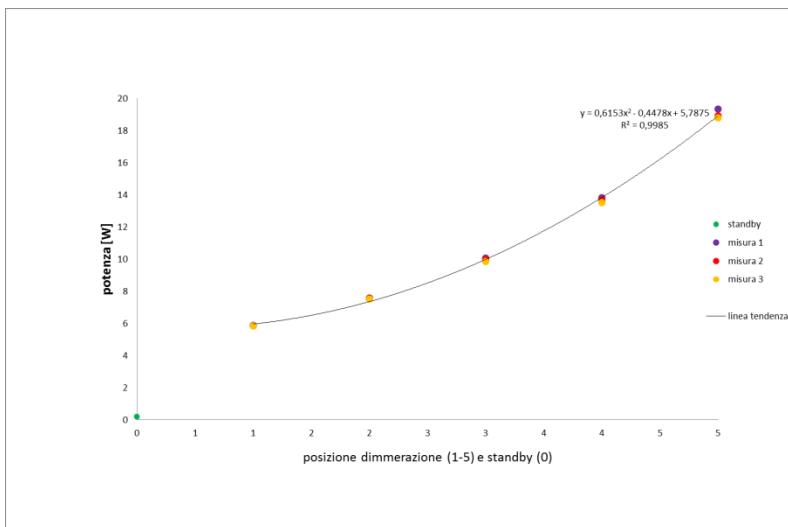


Figura 43 - Potenza in funzione della dimmerazione

L'andamento è di tipo parabolico (equazione in figura).

Si nota anche la potenza nella fase di standby (circa 0.2W). Ipotizzando 30 minuti di utilizzo a massima potenza i consumi sono di circa 9.7 Wh. Se, nel resto della giornata, l'apparecchio rimane in standby, il suo consumo è di circa 4.3 Wh. E' quindi importante staccare l'apparecchio (e il suo alimentatore) dalla rete elettrica quando non utilizzato.

2.3.3.2 Illuminamento su un piano a diverse distanze

In Figura 44, l'illuminamento massimo misurato a diverse distanze dall'apparecchio (50cm, 27.5 cm, 17.5 cm) in diverse posizioni di dimmerazione. Il punto di massimo illuminamento risulta al centro della proiezione dell'area luminosa sul piano di misura.

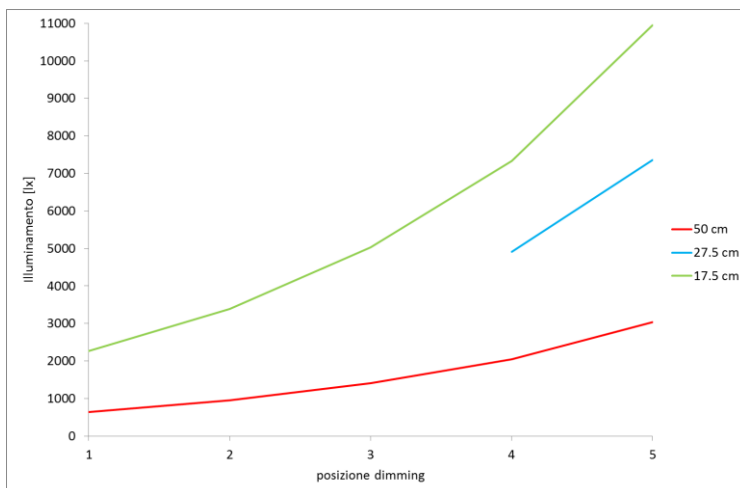


Figura 44 - Illuminamento massimo a diverse distanze e posizioni di dimmerazione

¹⁷ Due su banco, una dai rilievi di illuminamento

L'illuminamento medio su un rettangolo dell'area di misura corrispondente alle dimensioni dell'area luminosa stessa è rappresentato in Figura 45, sempre per diverse distanze dall'apparecchio e diverse posizioni di dimmerazione.

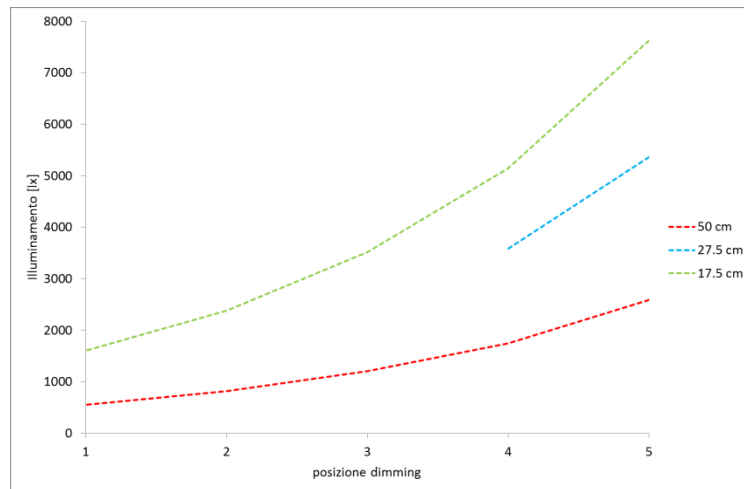


Figura 45 - Illuminamento medio su proiezione area luminosa

L'illuminamento a una certa distanza (fissati gli altri parametri geometrici) è funzione lineare della potenza (equazioni in figura), ma poiché l'andamento della potenza in base alle posizioni (discrete) di dimmerazione non è lineare, l'illuminamento risulta non lineare in base alla posizione di dimmerazione (vedi in Figura 46 un esempio, riferito all'illuminamento massimo): di questo si deve eventualmente tener conto nell'applicazione reale.

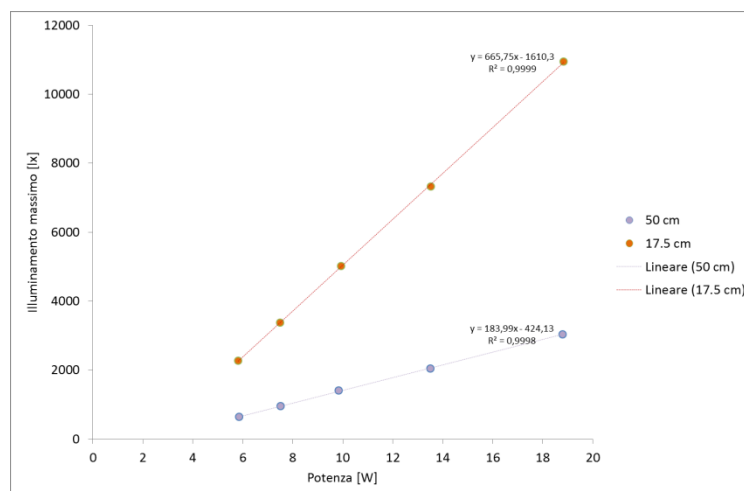


Figura 46 - illuminamento massimo in funzione della potenza

Si conferma l'andamento dell'illuminamento come funzione dell'inverso del quadrato della distanza. In Figura 47 l'illuminamento massimo in due posizioni di dimmerazione (linea di tendenza in figura).

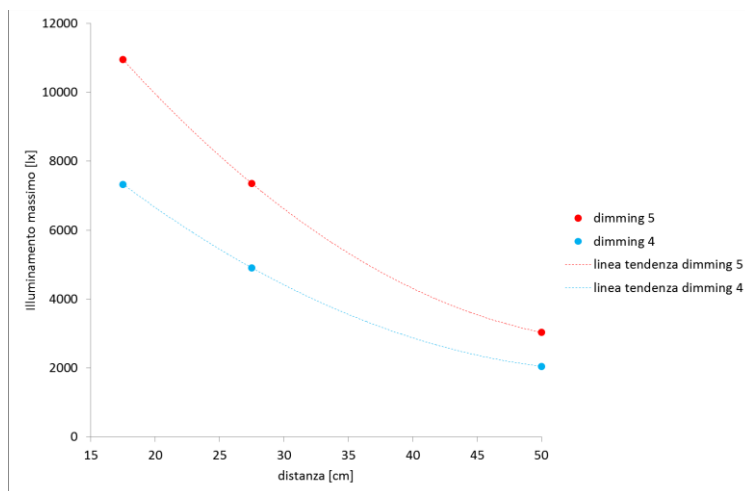


Figura 47 - Illuminamento in funzione della distanza

Si riportano infine alcuni esempi della distribuzione di illuminamento sul piano misurato: le misure sono tutte a 50 cm di distanza¹⁸ (Figura 48 con dimmerazione a livello minimo, Figura 49 con dimmerazione a livello medio, Figura 50 con dimmerazione a livello massimo).L’andamento è lo stesso a tutte le posizioni di dimmerazione, cambiano i valori di illuminamento.

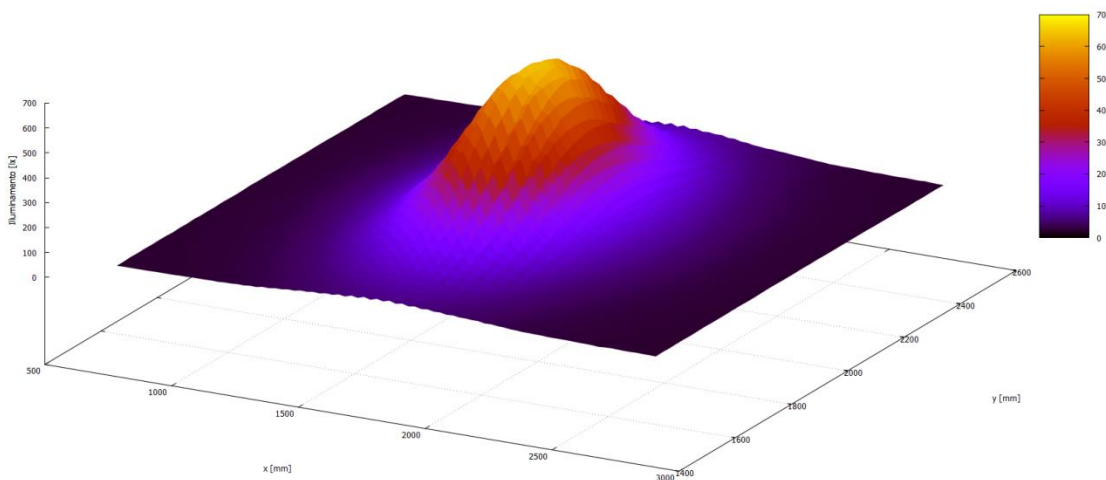


Figura 48 - Illuminamento a 50 cm, dimmerazione 1 (minimo)

¹⁸ L’andamento è lo stesso anche alle altre distanze, di cui non sono riportati i grafici. Per il confronto alle diverse distanze, sono stati usati i rettangoli di misura 5000 mm x 500 mm.

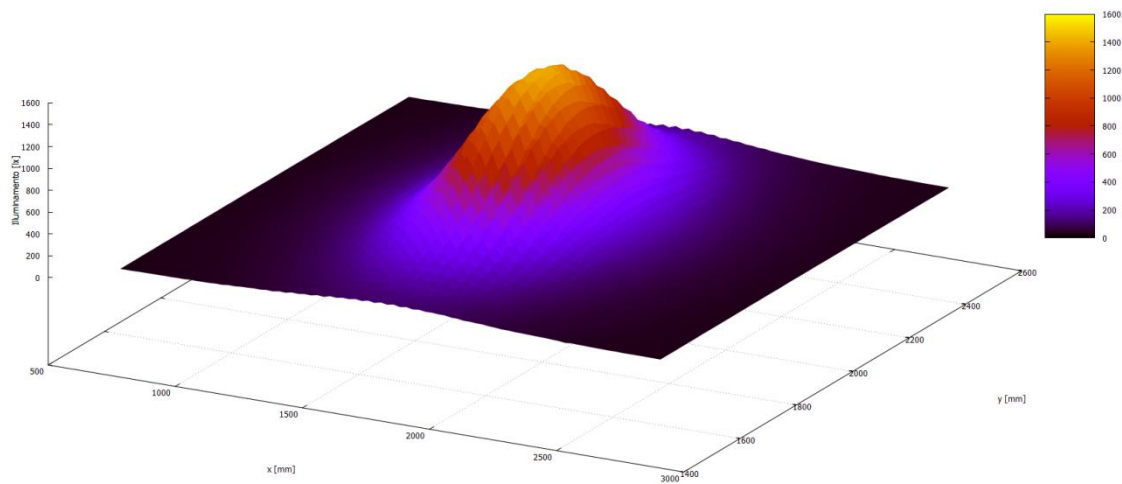


Figura 49 - Illuminamento a 50 cm, dimmerazione 3 (medio)

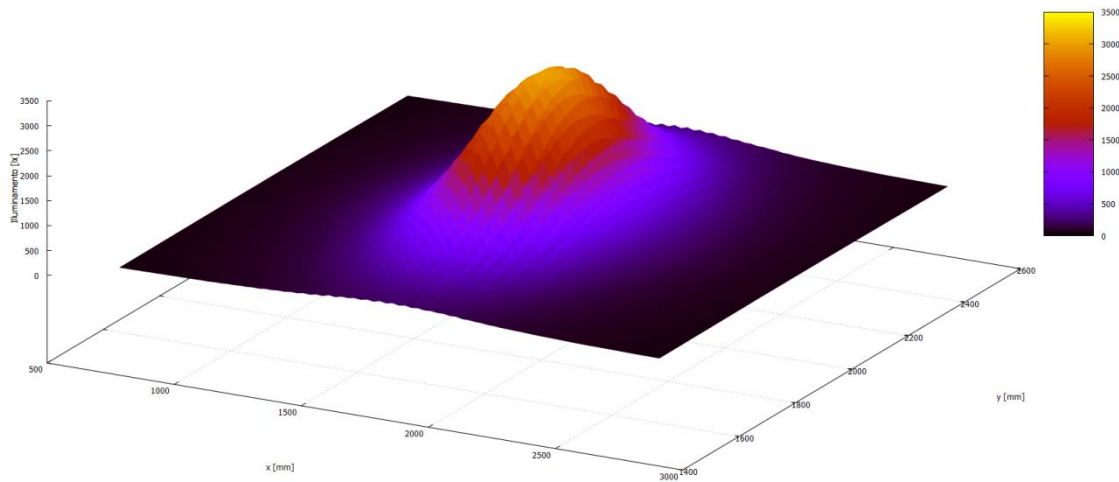


Figura 50 - Illuminamento a 50 cm, dimmerazione 5 (massimo)

2.3.3.3 Spettro di emissione e temperatura correlata di colore

E' stata misurata la radianza spettrale del LIGHTBOX, a tutte le posizioni di dimmerazione. In Figura 51 la radianza spettrale per tutte le posizioni di dimmerazione.

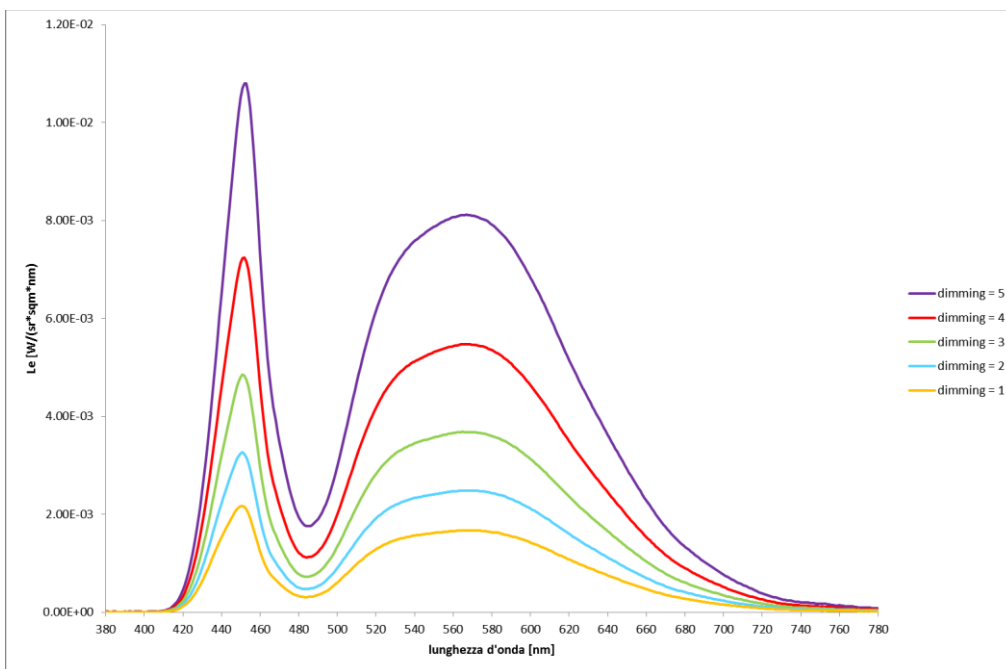


Figura 51 - Radianza spettrale

L’andamento spettrale è lo stesso in tutte le posizioni di dimmerazione, mentre cambia la quantità di luce emessa. Si conferma l’andamento non lineare dell’emissione luminosa in funzione della dimmerazione, già evidenziato nelle misure di illuminamento.

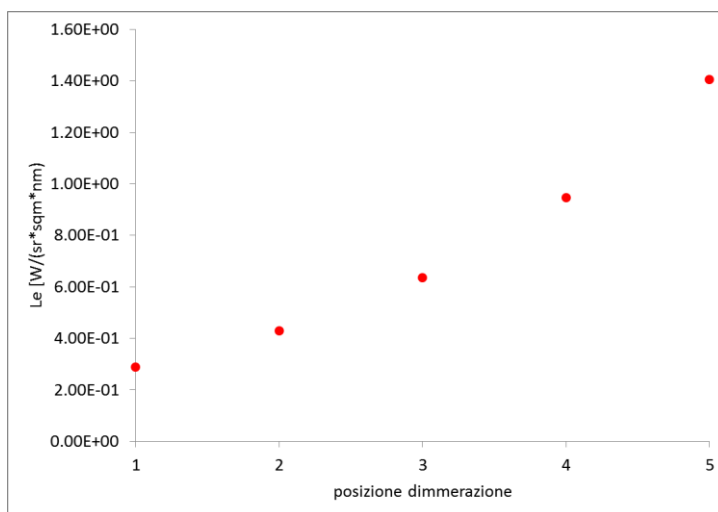


Figura 52 - Radianza in funzione della dimmerazione

Le misure sono state ripetute nel tempo, partendo dal momento dell’accensione (a dimmerazione 5 = massimo). In 45 minuti circa si nota la stabilizzazione del prodotto, la cui emissione luminosa varia (diminuisce) di circa il 2%.

In Tabella 13 le altre informazioni colorimetriche di rilievo ricavate dalle misure spettrali, mediate sulle 5 posizioni di dimmerazione:

Tabella 13 – Dati colorimetrici

CCT [K]	5039
Ra	71
x	0.346
y	0.368

2.3.4 Conclusione

Le misure confermano sostanzialmente le dichiarazioni del produttore, anche se non è possibile una vera valutazione in quanto è stato preso in esame un solo esemplare e le procedure di prova sono state adattate al particolare prodotto. Tuttavia i risultati valgono come indicazioni di massima.

2.4 *Sperimentazione circadiano e sensore innovativo*

2.4.1 Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro

L'attività svolta è propedeutica alla realizzazione e messa a punto di un sistema di acquisizione dati, equipaggiato da un sensore innovativo per il monitoraggio e la valutazione della qualità dell'illuminazione negli ambienti lavorativi, sia per quanto riguarda gli effetti visivi che quelli non visivi. Il vantaggio dell'applicazione di un dispositivo di questo tipo risiede nel fatto che si rende possibile l'acquisizione di tutte le informazioni utili alla caratterizzazione dell'illuminazione (sia naturale che artificiale) senza ricorrere all'uso di uno strumenti costosi e onerose rielaborazioni di dati. Inoltre, un dispositivo di tale tipo potrebbe essere ulteriormente sviluppato a sistema di controllo "smart" che, operando su un impianto di illuminazione realizzato mediante corpi illuminanti con tecnologia LED, riesca a realizzare non solo condizioni di illuminazione adeguate per il comfort visivo, ma anche per il conseguimento di condizioni che favoriscano i ritmi circadiani e la salute degli occupanti.

In tale ambito, la conoscenza delle condizioni di illuminamento naturale negli ambienti lavorativi risulta essenziale, poiché il modo più efficace per garantire una corretta regolazione dei ritmi circadiani in ufficio è la massima esposizione alla luce naturale durante le ore del mattino; quando questa non risulti sufficiente, occorre prevedere una corretta integrazione con luce artificiale, di opportuna intensità e distribuzione spettrale.

Il monitoraggio della luce naturale a cui sono soggetti gli ambienti lavorativi reali della sede ENEA di Ispra, iniziato nella scorsa annualità e proseguito in questa, ha permesso di ottenere una panoramica ampia delle condizioni d'illuminazione, evidenziando in particolare la radiazione luminosa che effettivamente arriva agli occhi degli utenti e che contribuisce alla regolazione dei ritmi circadiani.

Tale esaustivo studio ha inoltre portato all'importante risultato di permettere l'elaborazione di un protocollo sperimentale per il monitoraggio dell'apporto di luce naturale negli ambienti lavorativi, che può rivelarsi strumento utile nella progettazione illuminotecnica per la valutazione delle condizioni di illuminamento da un punto di vista sia di prestazioni visive che di regolazione del sistema circadiano.

Per ottenere una panoramica più ampia delle condizioni d'illuminazione negli uffici ENEA, si è quindi proseguita la caratterizzazione della luce naturale coinvolgendo stagionalità diverse.

La metodologia adottata ha ricalcato quella della scorsa annualità (si veda RdS/PAR2014/029), e le misurazioni sono state effettuate negli stessi due uffici con esposizioni a Sud e a Nord, situati al piano terra della sede Enea di Ispra, e contemporaneamente all'esterno dell'edificio tramite un apposito sistema di acquisizione dati. L'acquisizione si è svolta in 7 giornate caratterizzate da differenti condizioni meteorologiche, nelle stagioni invernale e primaverile.

Per permettere un confronto più ampio, nell'elaborazione dei dati e nelle figure in alcuni casi sono stati aggiunti i valori misurati nella scorsa annualità nella stagione estiva.

2.4.1.1 Risultati

Sono riportati i risultati relativi alle misurazioni effettuate nell'arco di 7 giornate lavorative, quattro per l'ufficio con esposizione a SUD e tre per quello a NORD, tra la stagione invernale e quella primaverile (Tabella 14). Per valutare la quantità totale di luce a cui sono soggetti gli ambienti test, per tutte le giornate di misura non è stato utilizzato alcun sistema schermante.

Tabella 14 - Giornate di misurazioni e relative condizioni meteorologiche

NORD Inverno 1	NORD Inverno 2	SUD Inverno 1	SUD Inverno 2	NORD Primavera	SUD Primavera 1	SUD Primavera 2
coperto	sereno, poco nuvoloso	coperto, variabile	sereno, poco nuvoloso	coperto	coperto	sereno, poco nuvoloso

a) Illuminamenti

I livelli di illuminamento orizzontale esterno misurati sono variabili, e vanno da un massimo di circa 72.000 lx misurato a mezzogiorno in maggio ad un minimo di circa 2700 lx misurato alle 16.00 in inverno (Figura 53).

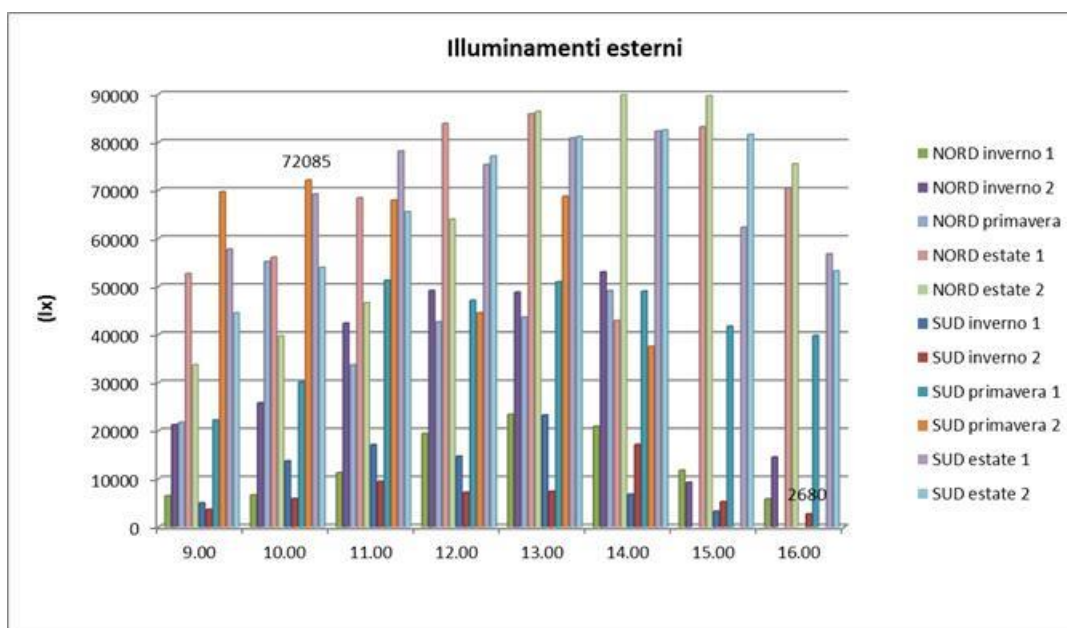


Figura 53 - Illuminamenti orizzontali esterni misurati per le tre stagionalità

Per quanto riguarda gli illuminamenti interni, le variazioni stagionali riscontrate nei due uffici sono differenti poiché dipendono dall'orientamento delle finestre e in alcuni casi non seguono l'andamento degli illuminamenti su piano orizzontale misurati all'esterno (Figura 54).

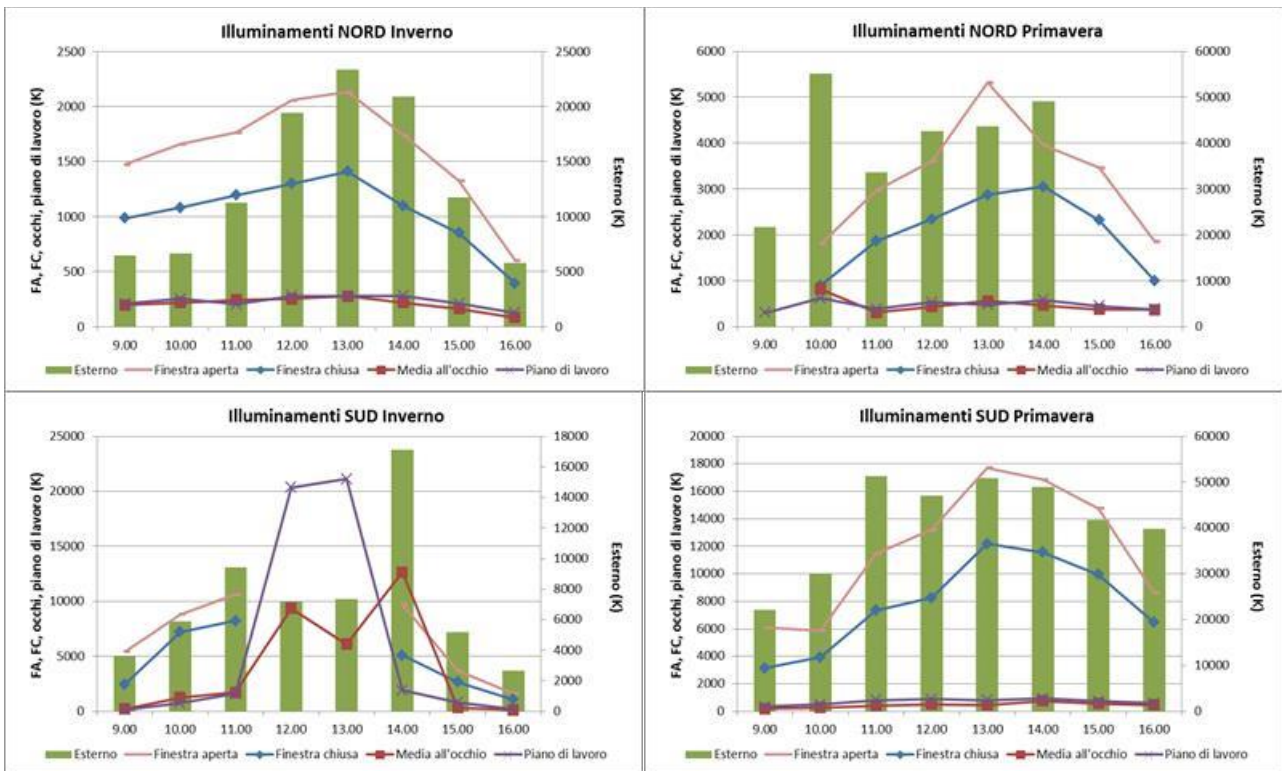
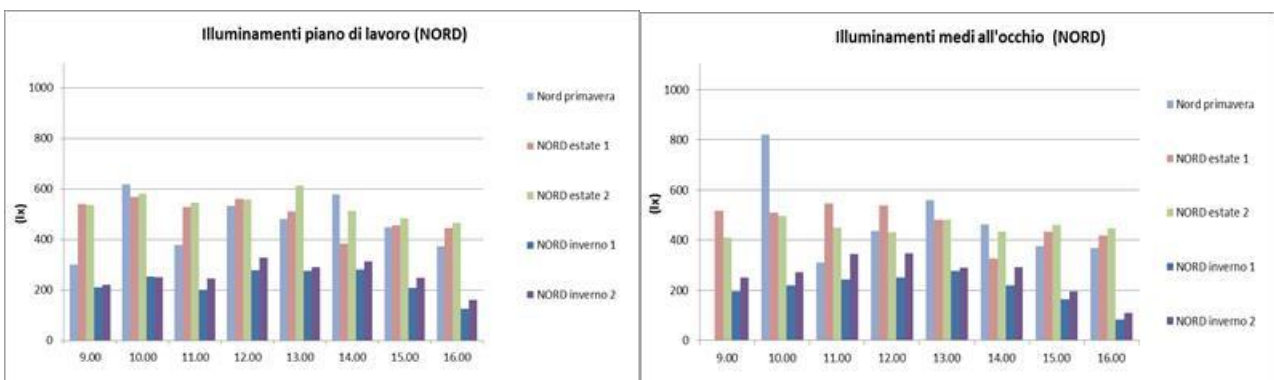


Figura 54 - Illuminamenti esterni, alla finestra aperta (FA), finestra chiusa (FC), piano di lavoro e medi a livello di occhi per i due uffici nelle stagioni inverno e primavera

Infatti, sebbene gli illuminamenti esterni siano ovviamente massimi nella stagione estiva, nelle ore centrali della giornata i massimi valori di illuminamento orizzontale sul piano di lavoro si registrano invece in inverno nella stanza con orientamento a Sud, così come i valori di illuminamento verticale agli occhi nella mattinata; questo perché in inverno l'altitudine solare è minore e quindi la luce riesce a penetrare maggiormente all'interno dell'ufficio. A causa della radiazione diretta del sole nelle ore centrali della giornata, non è stato possibile misurare alcuni valori di illuminamento alla finestra per le giornate di misura in inverno nell'ufficio a SUD, per sovraesposizione dello spettroradiometro.

Per entrambe le esposizioni, i valori di illuminamento orizzontale misurati al centro del piano di lavoro sono mediamente sempre superiori a quelli medi a livello di occhi dell'utente; come già riscontrato nel precedente monitoraggio estivo, una differenza maggiore tra scrivania e livello di occhi si ha nell'ufficio con esposizione a Sud, con un delta di circa 11000 lx rilevato in inverno per effetto della radiazione diretta del sole sulla scrivania, mentre nell'ufficio a Nord il delta è più ristretto, con un massimo 115 lx di differenza in primavera. In Figura 55 si riportano a confronto i valori di illuminamento misurati al livello di occhi e di piano di lavoro per le esposizioni a NORD e a SUD. Gli illuminamenti agli occhi ricalcano gli andamenti di quelli alla scrivania.



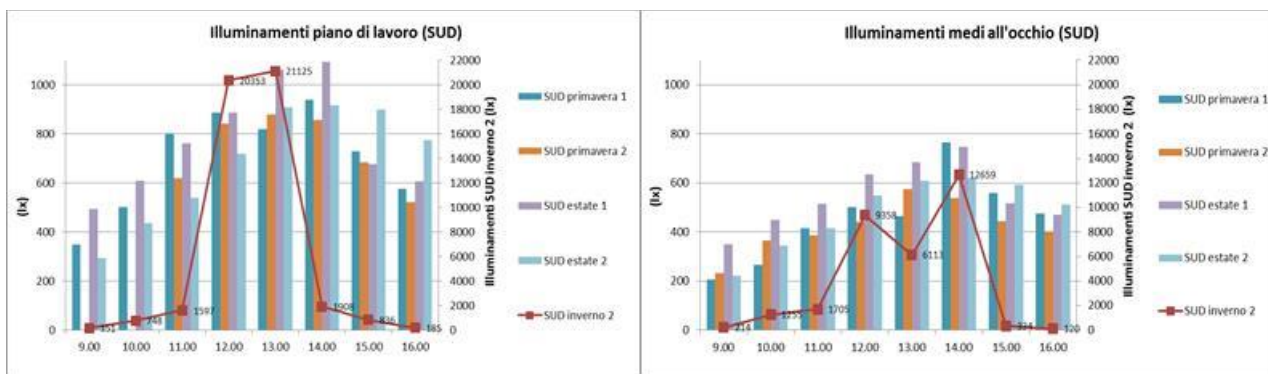


Figura 55 - Valori di illuminamento interno all'occhio e sul piano di lavoro a confronto per le due esposizioni NORD e SUD

Come già evidenziato per la stagione estiva nella scorsa annualità, anche per le altre stagionalità si riscontra una differenza di valori di illuminamento al piano di lavoro tra i due uffici, anche se più contenuta rispetto all'estate (non considerando le misure invernali a Sud con radiazione solare diretta), con un delta tra le misure massime riscontrate di 320 lx; anche in questo caso le differenze tra le due stanze si riducono ulteriormente per quanto riguarda gli illuminamenti medi agli occhi, con soli 50 lx di delta tra i valori massimi, come apprezzabile nei grafici riportati in Figura 56.

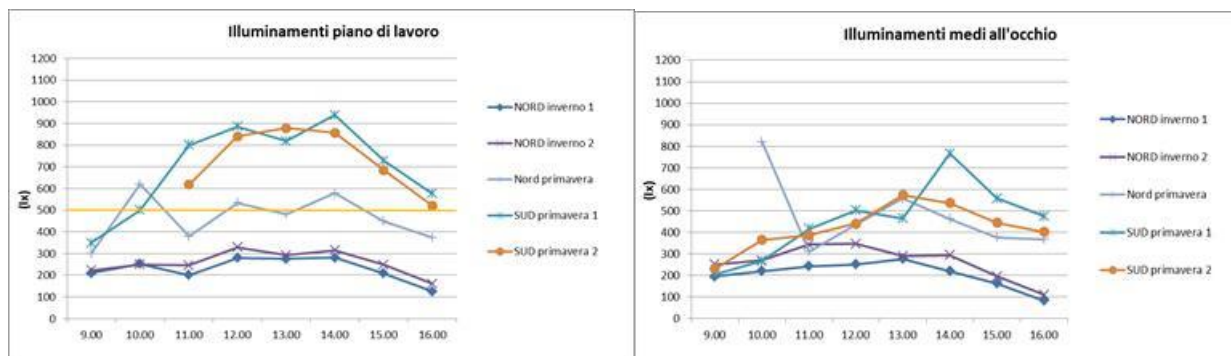


Figura 56 - Confronto tra Illuminamenti al piano di lavoro e medi a livello di occhio per i due uffici per 5 giornate di misura

Notiamo come gli illuminamenti al piano di lavoro siano inferiori ai 500 lx raccomandati dalla norma UNI EN 12464-1 per questo compito visivo (evidenziati in figura con una linea retta gialla) per quasi tutti i rilievi effettuati nella stanza a NORD, sia in inverno sia in primavera, mentre per l'ufficio a SUD, per il compito visivo, non si riscontrerebbe la necessità di integrazione della luce naturale con quella artificiale nelle giornate di misura.

I valori di CCT misurati nella porzione di cielo visibile dagli uffici nei 7 giorni di misura rientrano in un range che va dai 4700 ai 7600 K in inverno e dai 4600 ai 9000 K in primavera (Figura 57).

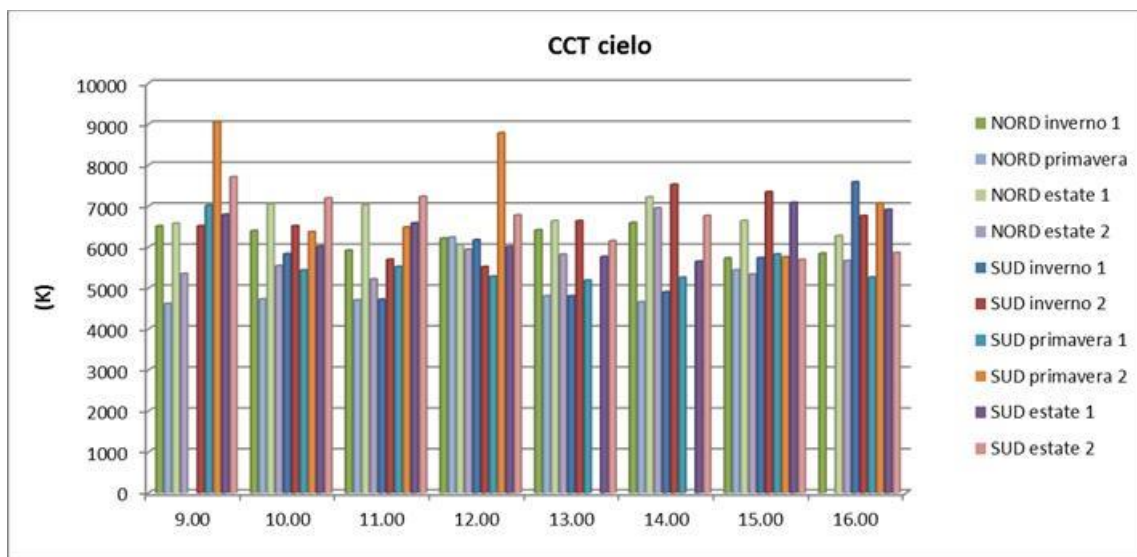


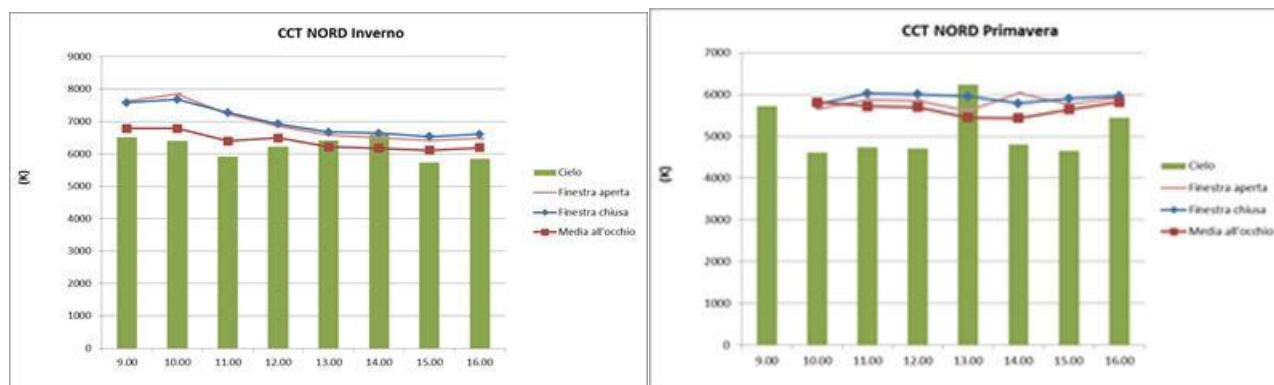
Figura 57 - Temperature di colore del cielo per le tre stagionalità inverno, primavera ed estate

Si riscontrano mediamente differenze poco significative tra i valori di CCT misurati a finestra chiusa rispetto a quelli a finestra aperta.

I valori di CCT misurati alla finestra chiusa presentano un range più ampio in inverno (dai 4780 ai 9450 K) e più ristretto in primavera (dai 5770 agli 8640 K).

Si rilevano differenze tra i due uffici, con un valore medio in inverno di circa 7140 K per quello a NORD, contro i 5930 K medi per l'ufficio a SUD; in primavera calcoliamo un valore medio di 5910 K per l'ufficio a NORD, e 6430 K per quello a SUD.

In Figura 58 si riportano i valori di CCT misurati per il cielo, la finestra aperta, la finestra chiusa e la media all'occhio, per quattro giornate di misura.



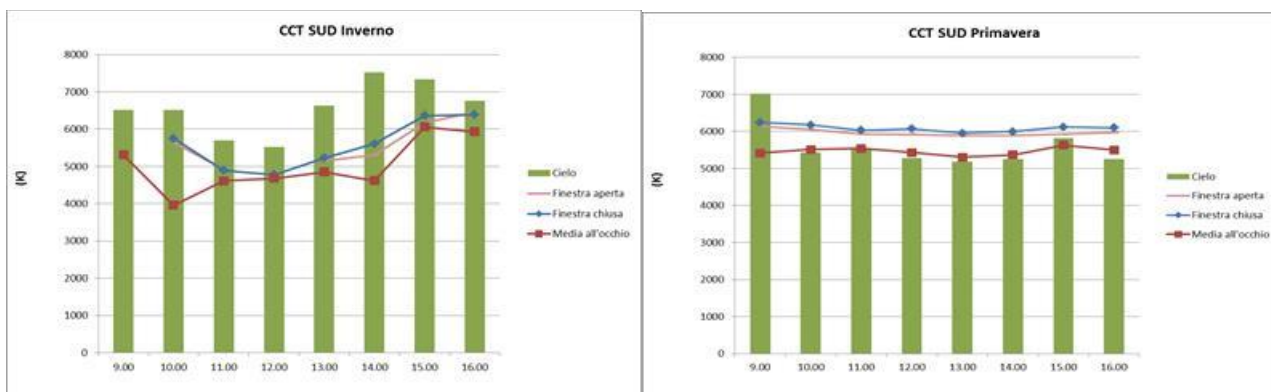


Figura 58 - Temperature di colore del cielo, alla finestra, e a livello di occhio a confronto, per i due uffici nelle stagioni inverno e primavera

Anche per quanto riguarda i valori di CCT misurati a livello di occhi, abbiamo un range più ampio di valori in inverno (dai 3960 ai 7210 K) rispetto alla primavera (dai 5300 ai 6280 K) in primavera.

Come già evidenziato per la stagione estiva la scorsa annualità, anche per gli altri periodi monitorati le differenze nei due uffici sono contenute (5650 K di media a NORD contro 5600 K di media a SUD), mentre in inverno la differenza di valori è più evidente (6390 K medi a NORD contro 4940 K medi a SUD); in questo caso, a differenza dell'estate, i valori registrati al NORD risultano essere mediamente sempre maggiori rispetto al SUD (Figura 59).

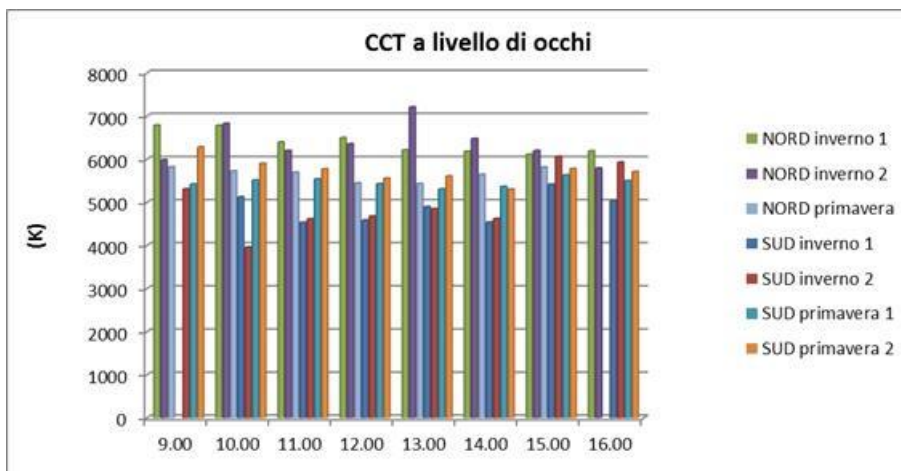


Figura 59 - Temperature di colore medie misurate a livello di occhi a confronto

Le radianze spettrali del cielo misurate alle finestre presentano valori diversi in funzione dell'esposizione, più elevati per l'ufficio con esposizione a Sud, come facilmente riscontrabile osservando le radianze spettrali misurate alle ore 12 (ora solare) per le tre stagioni monitorate (Figura 60).

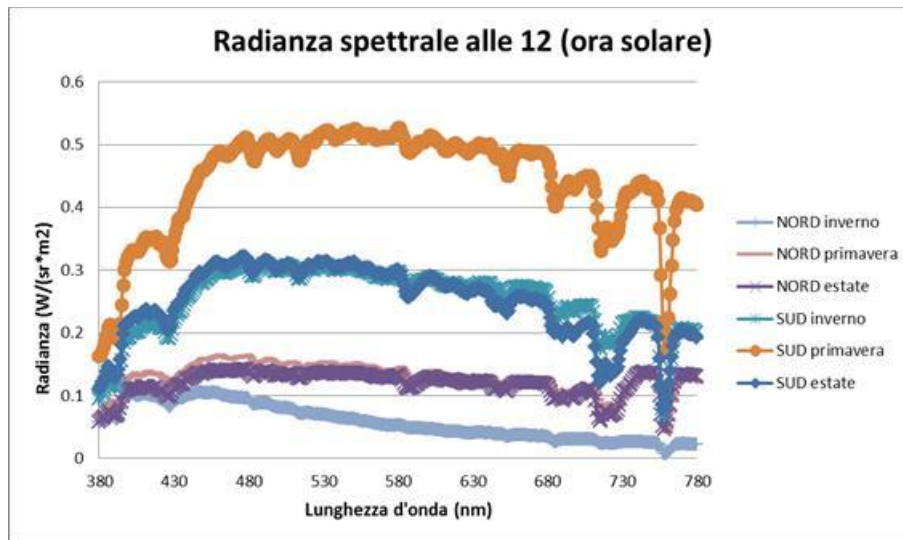


Figura 60 - Radianza spettrale del cielo per i due uffici misurate alle ore 12 (ora solare) per le tre stagioni di monitoraggio

Anche i valori di irradianza spettrale a livello di occhi, ottenute mediando le irradianze riscontrate per i 5 angoli di misurazione, rivelano differenze tra gli uffici a Sud e a Nord, ma queste differenze risultano molto più contenute rispetto ai valori di radianza spettrale misurati nella porzione di cielo vista dalla finestra, come già riscontrato per la stagione estiva. In Figura 61 si riporta il confronto dei valori di irradianza spettrale misurate alle ore 12 (ora solare), dove si nota una parziale sovrapposizione dei valori riscontrati nei due uffici, a meno di quelli misurati in inverno nella stanza a SUD, dove alle ore 12 si ha la radiazione diretta del sole.

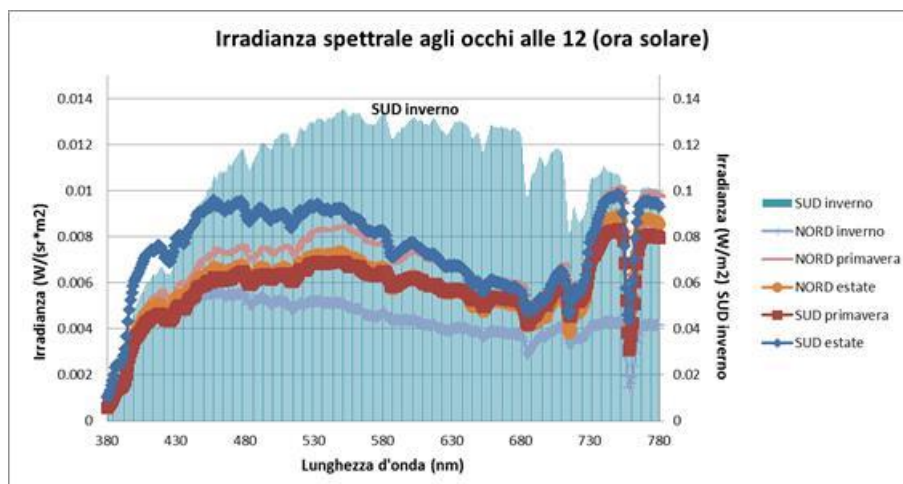


Figura 61 - Valori di irradianza spettrale a livello di occhi per i due uffici misurate alle ore 12 (ora solare) per le tre stagioni di monitoraggio

Grazie alla misura delle irradianze spettrali a livello di occhi, è possibile valutare l’impatto della luce sul sistema circadiano, applicando il modello di fototrasduzione circadiana di Rea [1,2,3] (si veda RdS/PAR2014/029); per ogni giornata di misura, sono stati calcolati i valori di illuminamento circadiano (CL_A) e di soppressione melatoninica (CS – Circadian Stimulus). In Tabella 15 si riporta il confronto dei valori di soppressione di melatonina % calcolati per giornate di misura confrontabili per condizioni meteorologiche, per le due stanze con le due diverse esposizioni, nell’arco delle tre stagioni.

Tabella 15 - Valori di illuminamento circadiano (CLA) e di soppressione di melatonina calcolati per 6 giorni di misura

	SUD - INVERNO sereno, poco nuvoloso		NORD - INVERNO sereno, poco nuvoloso		SUD - PRIMAVERA coperto		NORD - PRIMAVERA coperto		SUD - ESTATE poco nuvoloso, variabile		NORD - ESTATE poco nuvoloso, variabile	
	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)	CL _A (W/m ² pesati)	CS (%)
9.00	2,92E+02	42,36	4,01E+02	47,31	2,63E+02	40,68	Pioggia leggera		5,4E+02	51,62	1,0E+03	59,40
10.00	1,36E+03	62,32	5,30E+02	51,38	3,70E+02	46,10	1,35E+03	62,21	8,3E+02	57,18	1,0E+03	59,37
11.00	2,30E+03	66,40	6,02E+02	53,12	6,40E+02	53,92	4,57E+02	49,26	9,9E+02	59,18	1,1E+03	60,31
12.00	1,54E+04	73,16	6,40E+02	53,92	7,57E+02	56,05	6,68E+02	54,47	1,3E+03	61,98	1,1E+03	60,25
13.00	9,62E+03	72,28	5,97E+02	52,99	6,75E+02	54,61	8,16E+02	56,95	1,5E+03	62,95	1,0E+03	59,31
14.00	2,05E+04	73,56	5,41E+02	51,66	1,18E+03	60,93	6,61E+02	54,34	1,5E+03	63,27	7,9E+02	56,56
15.00	5,53E+02	51,96	3,16E+02	43,61	9,08E+02	58,18	5,58E+02	52,08	1,4E+03	62,61	9,1E+02	58,25
16.00	1,40E+02	30,62	1,29E+02	29,29	7,21E+02	55,46	5,57E+02	52,07	1,2E+03	61,02	9,0E+02	58,09

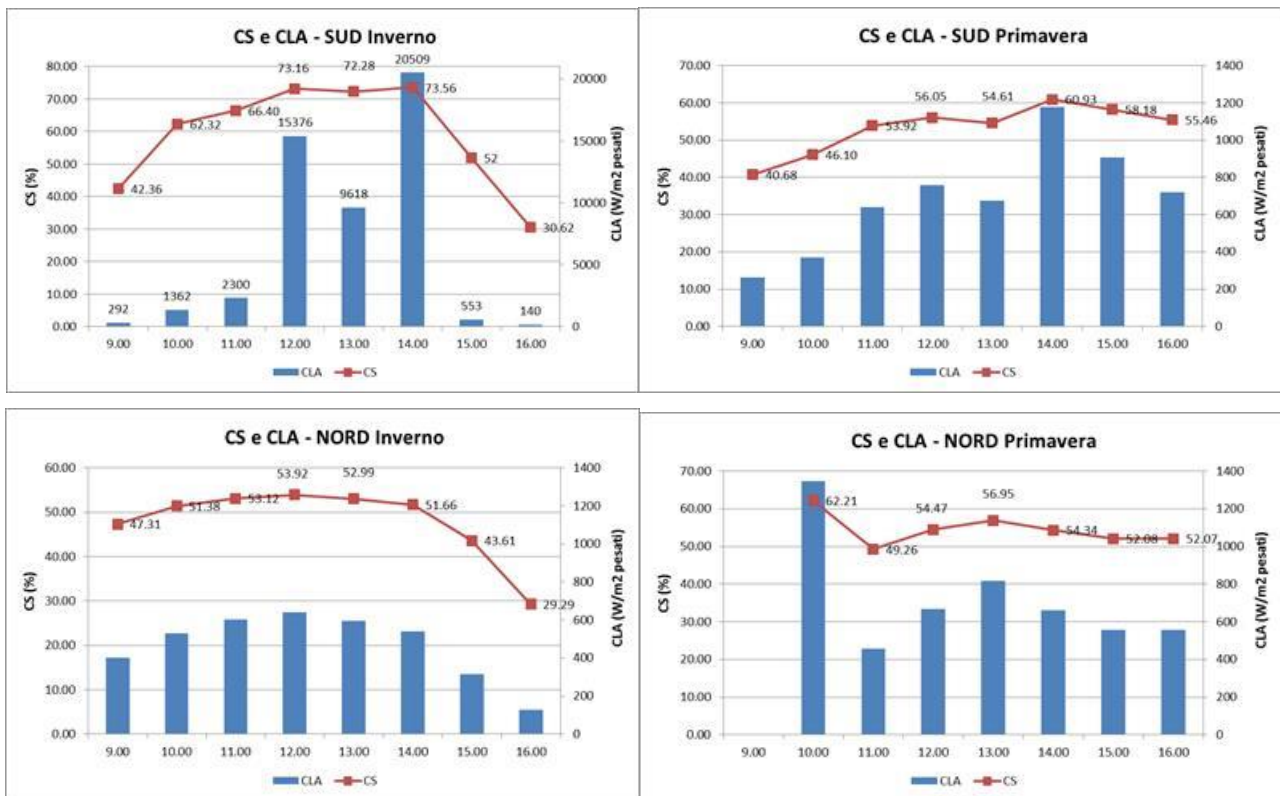
Poiché CS non è funzione lineare della luce circadiana e tende ad un valore massimo di 75%, nella pratica un valore del 50% corrisponde ad un'elevata risposta in termini di soppressione di melatonina.

Alcuni autori hanno inoltre ipotizzato che un'esposizione a valori di CS pari a 35% per almeno 1 ora al mattino possa essere sufficiente per il regolamento dei ritmi circadiani [4].

Come si può notare dalla Figura 62, i valori di Stimolo Circadiano calcolati nei quattro giorni di misura sono sempre maggiori di 35%, corrispondendo quindi a valori adeguati per quanto riguarda la sincronizzazione circadiana. Da un punto di vista puramente circadiano, gli utenti di questi ambienti, in tali condizioni, non necessitano quindi di integrazioni di illuminazione artificiale al mattino per sincronizzare i ritmi circadiani.

Gli andamenti dei valori di CLA e CS ricalcano quelli degli illuminamenti all'occhio, e i valori maggiori di CS nelle ore centrali della giornata si riscontrano in inverno nella stanza a SUD.

In Figura 62 sono rappresentati i valori di CS e CL_A per le stagioni inverno e primavera.



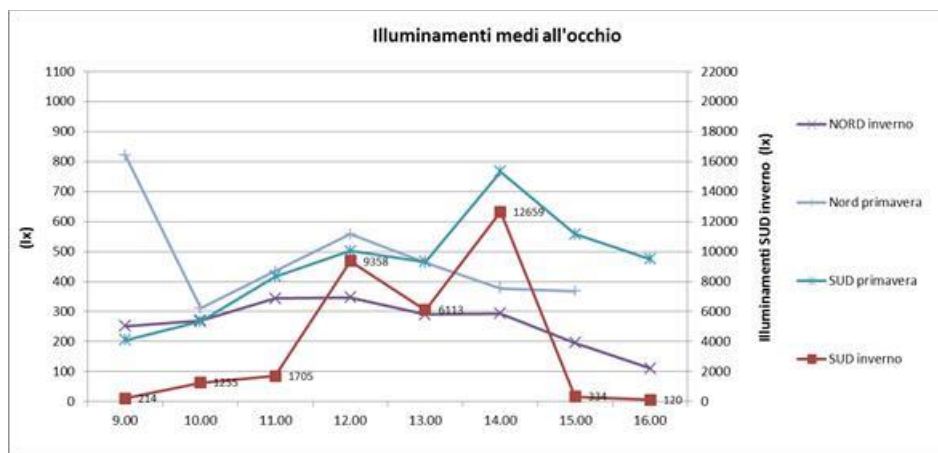


Figura 62 - CLA, CS ed illuminamenti all'occhio per le stagioni inverno e primavera

E' utile anche il confronto dei dati di CS e CL_A con quelli di illuminamento medio agli occhi, per verificare che, come già accorso nella stagione estiva, anche per gli altri periodi gli andamenti delle curve di CS ricalchino quelli dei corrispondenti illuminamenti agli occhi (Figura 62).

L'attenuazione degli illuminamenti che arrivano agli occhi degli utenti rispetto a quelli esterni e alla finestra, dovuti alle ostruzioni esterne, ai vetri e alle riflessioni interne della radiazione luminosa operata dalle superfici e dagli arredi, porta quindi a riscontrare un andamento lineare tra i valori di illuminamento medio agli occhi e di CLA, come riscontrabile in Figura 63.

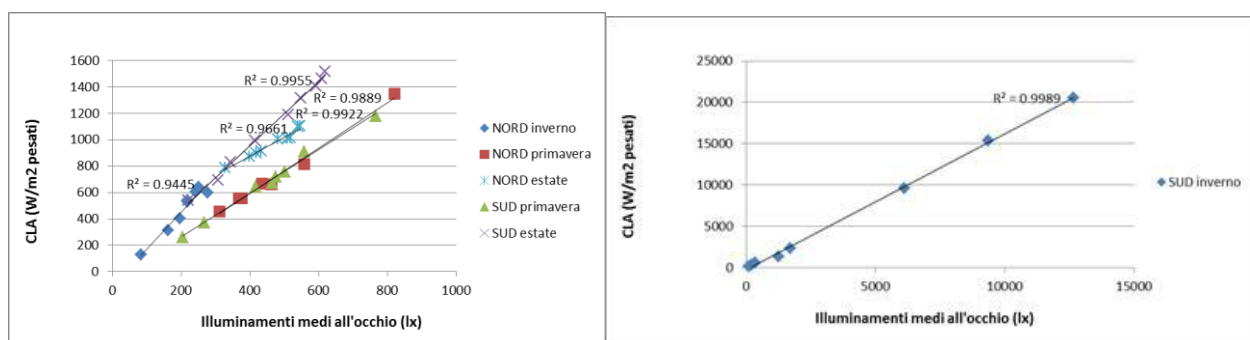


Figura 63 - CLA in funzione degli illuminamenti medi all'occhio per le 3 stagioni di misura

2.4.1.2 Conclusioni

L'estensione del periodo di monitoraggio della luce naturale a cui sono esposti i due uffici ENEA ha permesso una valutazione più globale delle condizioni di illuminamento e di distribuzione spettrale della luce che arriva agli utenti.

Sono confermate le forti differenze di illuminamento alla finestra tra i due uffici, con un valore medio sui due giorni di misura di circa 8700 lux per la stanza SUD in inverno (a cui mancano valori elevati di illuminamento delle ore centrali non rilevabili per sovraesposizione dello strumento) contro i 1800 lx medi per l'intera giornata per la stanza a NORD; in primavera, riportiamo un valore medio di illuminamento per il SUD di 11800 lx, contro i 3200 lx del NORD.

Per entrambe le esposizioni, i valori di illuminamento orizzontale misurati al centro del piano di lavoro sono mediamente sempre superiori a quelli verticali medi a livello di occhio dell'utente; una differenza notevolmente maggiore tra scrivania e livello di occhio si ha nell'ufficio con esposizione a Sud, poiché questo è raggiunto sia dalla radiazione solare globale diretta che indiretta.

In riferimento ai livelli di illuminamento raccomandati dalla norma UNI EN 12464-1 (500 lx per i luoghi di lavoro interni con destinazione ad uso ufficio), vi è necessità di integrazione con la luce artificiale in quasi tutto il periodo monitorato nella stanza a NORD, sia in inverno sia in primavera, mentre per l'ufficio a SUD non si riscontrerebbe tale necessità nelle giornate di misura considerando solo le necessità per il compito visivo.

Per quanto riguarda i valori di illuminamento medio a livello di occhi, viene ribadito quanto già riscontrato per la stagione estiva, e le differenze di illuminamento riscontrate tra le due stanze risultano molto attutite.

I due uffici presentano differenze per quanto riguarda i CCT misurati alla finestra, anche se meno marcate rispetto a quelle evidenziate per la stagione estiva, con un valore medio per quello a NORD d'inverno di circa 7140 K, contro i 5930 K medi per l'ufficio a SUD; in primavera calcoliamo un valore medio di 5910 K per l'ufficio a NORD, e 6430 K per quello a SUD.

Come per l'estate, anche per la primavera le differenze nei due uffici di CCT medi misurati a livello di occhi sono poco significative (5650 K di media a NORD contro 5600 K di media a SUD), mentre in inverno la differenza di valori è più evidente (6390 K medi a NORD contro 4940 K medi a SUD); in questo caso, a differenza di quanto visto per l'estate, i valori registrati al NORD risultano essere mediamente sempre maggiori rispetto al SUD. Sottraendo dal calcolo della media le ore centrali in cui nella stanza a SUD sia ha radiazione diretta del sole nella postazione di lavoro, le differenze di CCT agli occhi dell'utente per le due esposizioni si attenuano ulteriormente, con una media di 6400 K al NORD e 5500 K a SUD.

Il range delimitato di valori sia di CCT che di illuminamento riscontrati a livello di occhi per entrambe le esposizioni, può rappresentare in definitiva una semplificazione nella realizzazione del sistema di sensori e per la stima della "luce circadiana".

Come atteso, i valori di radianza spettrale misurati nella porzione di cielo vista dalla finestra dell'ufficio a Sud presentano valori molto più elevati rispetto all'ufficio a Nord; anche i valori di irradianza spettrale a livello di occhio, rivelano differenze tra gli uffici a Sud e a Nord, ma queste differenze risultano molto più contenute rispetto ai valori di radianza spettrale misurati, come già riscontrato per la stagione estiva.

I valori di CS calcolati mediante modello di Rea presentano una differenza di rilievo tra le due esposizioni per la stagione invernale, con una media della giornata di circa 60% per la stanza a SUD e di 48% per quella a NORD, mentre in primavera i valori medi riscontrati coincidono (55%).

In tutti i casi, i valori di Stimolo Circadiano calcolati per le mattine sono sempre maggiori di 35%, corrispondendo quindi a valori adeguati per quanto riguarda la sincronizzazione circadiana. Da un punto di vista puramente circadiano, gli utenti di questi ambienti, in tali condizioni, non necessitano quindi di integrazioni di illuminazione artificiale al mattino per sincronizzare i ritmi circadiani.

Anche i valori decrescenti al pomeriggio seguono l'andamento naturale dello stimolo circadiano per la soppressione della melatonina, andamento che può però essere alterato dalla presenza della luce artificiale.

La valutazione di come la linearità riscontrata per i valori di CL_{Av} in funzione degli illuminamenti a livello di occhi, possa variare rispetto alla diversa tipologia di ingombri esterni e superfici e arredi interni è interessante, perché può permettere di effettuare, in determinati casi, il monitoraggio effettuando un numero minore di misure nell'arco della giornata.

A fronte della sua utilità per stabilire l'impatto della luce sulle condizioni circadiane, la complessità (in termini di tempo e strumentazione) nell'effettuare un monitoraggio della luce a cui è sottoposto l'utente è evidente. Le condizioni estremamente variabili di meteo che si riscontrano ad Ispra nei periodi invernali e primaverili causano ulteriore laboriosità alla caratterizzazione.

2.4.2 Sensore circadiano innovativo

La complessità nella realizzazione di un monitoraggio reale esaustivo della luce negli ambienti lavorativi, evidenziata già dal lavoro di caratterizzazione svolto nella scorsa annualità, è stata il primo motore all'ideazione di un sistema semplice e di facile utilizzo, che sia in grado di monitorare la qualità e la quantità dell'illuminazione in ambiente e che abbia la sensibilità dell'occhio umano, una sorta di spettroradiometro a basso costo che non comporti misure manuali ed onerose elaborazioni di dati.

Poiché recenti studi [3,5] attestano come il sistema circadiano non dipenda solo dalle cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili, ma anche dagli altri fotorecettori presenti sulla retina attraverso un fenomeno di opponenza spettrale, si è optato per lo sviluppo di un dispositivo da collocare in ambiente, equipaggiato di cinque sensori con appositi filtri passa banda, in grado di rilevare in contemporanea gli stimoli corrispondenti ai cinque fotorecettori, ossia relativi ai tre coni S, L, M (420nm, 535nm, 565nm), ai bastoncelli (507 nm) ed alle cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili (480nm).

In questa prima annualità si sono studiate la fattibilità e le principali caratteristiche sia del sensore che dei filtri ottici, in collaborazione con l'università Federico II di Napoli, con il laboratorio DTE-SEN-SCC di Enea Casaccia e con il laboratorio DTE-STT-SCIS di Enea Portici.

Una possibile architettura del sistema prevede:

1. Un'unità centrale a microcontrollore per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati,
2. Cinque fototransistor che lavorano nella banda del visibile per il rilevamento dell'illuminamento,
3. Cinque filtri passa banda (uno per ogni fototransistor) per la selezione delle frequenze relative ai cinque fotorecettori della retina,
4. Amplificatore del segnale con controllo automatico del guadagno (CAG) per normalizzare i segnali, che può essere realizzato sia via SW che HW.

Stabilita l'architettura, sono state poi evidenziate le variabili da calcolare con l'elaborazione dei cinque segnali di ingresso all'unità centrale, come si evince nello schema in Figura 64.

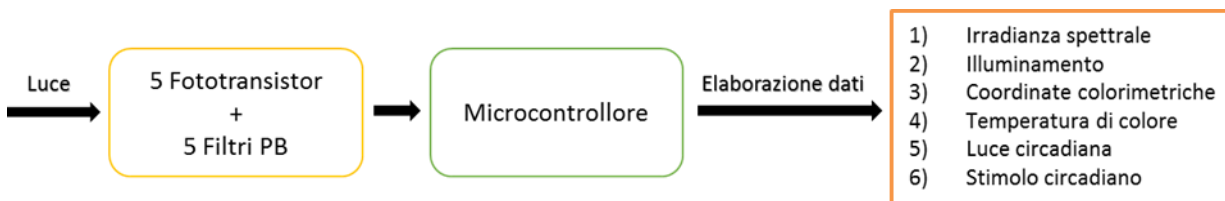


Figura 64 - Architettura sistema e variabili da stimare

Per la futura realizzazione in forma prototipale del sensore circadiano innovativo, la piattaforma scelta è ARDUINO UNO che utilizza come microcontrollore il processore AT MEGA 328 (ma la scelta non è vincolante), sulla quale girerà il software che provvederà a ricevere ed elaborare i segnali dai sensori. La piattaforma ARDUINO UNO inoltre, consente la gestione di memorie di massa di vario genere, anche di memorie SD su cui possono essere archiviati dati derivanti dalle misure o dalle elaborazioni.

Il microcontrollore, nota l'irradianza spettrale e l'illuminamento, integrando i segnali di uscita può valutare se la quantità/qualità di luce è giusta per la regolazione del ritmo circadiano, oltre ad avere un'integrazione nel tempo e delle statistiche per la valutazione del ciclo.

Una volta acquisiti gli stimoli dei 5 fotorecettori, si renderà possibile ricavare, oltre allo stimolo circadiano, anche il tipo di visione (fotopica, mesopica, scotopica), il valore di illuminamento corrispondente, e la temperatura di colore della radiazione agli occhi. Per quest'ultima potremmo sfruttare anche l'uso di un ulteriore sensore per il riconoscimento del colore, come ad esempio il TCS230.

I sensori scelti come fotorecettori in questa prima fase di sperimentazione, per la valutazione dell'illuminamento sono dei sensori di luce ambientale che utilizzano il fototransistor TEMT6000 riportato

in Figura 65. Questi sono componenti molto economici che in questa fase servono a guidare nella definizione dell'architettura del sistema e a dimostrare la fattibilità del progetto di un sistema di misura integrato in grado di effettuare le misurazioni contemporanee delle cinque bande spettrali componenti.

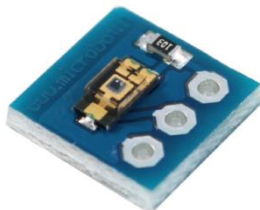


Figura 65 - Fototransistor

Il sensore è connesso con una resistenza di pull-down per formare un partitore di tensione che fornisce una tensione compresa tra 0V e +5V proporzionale alla luce percepita nello spettro della luce visibile. Tensione di uscita più bassa indica una minore luce rilevata.

La risposta spettrale del sensore è incentrata sulle lunghezze d'onda del visibile come mostra la Figura 66.

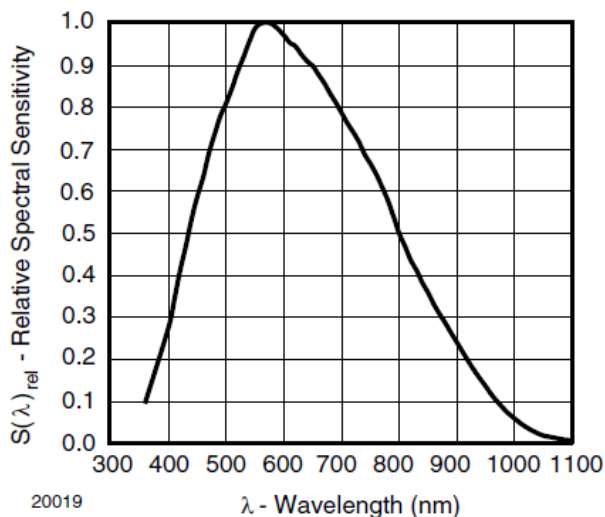


Figura 66 - Risposta spettrale fototransistor

A partire da questo spettro, si dovranno poi dotare i fototransistor di filtri passa banda dunque selettivi, in modo che ogni fotorecettore abbia una curva caratteristica incentrata su una determinata lunghezza d'onda (si avranno cinque curve nel campo del visibile con caratteristiche differenti), come riportato in Figura 67 e Tabella 16:

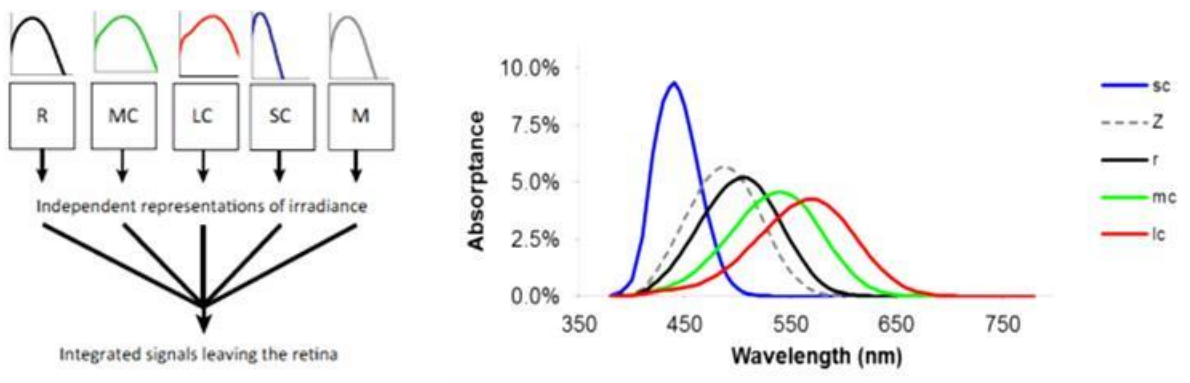


Figura 67 - Curve caratteristiche dei cinque fotorecettori

Tabella 16- Lunghezze d'onda di picco dei cinque fotorecettori

Fotorecettore	λ_{max}	α
Cono S	419.0	SC
Cellule gangliari	480.0	Z - M
Bastoncelli	496.3	R
Cono M	530.8	MC
Cono L	558.4	LC

2.4.2.1 Filtri ottici

Esistono filtri passa banda commerciali, che rispondono al criterio di permettere il passaggio di lunghezze d'onda all'interno di un dato intervallo (definito banda passante) ed attenuare le lunghezze d'onda al di fuori di esso. Osservando i valori corrispondenti alle risposte di coni, bastoncelli e cellule gangliari intrinsecamente fotosensibili si nota che essi sono localizzati in un range molto ristretto dello spettro elettromagnetico (circa 150nm) e che l'utilizzo di filtri commerciali potrebbe non essere la scelta ottimale, sia in termini di efficacia che di risoluzione e costi.

La scelta di usare filtri ottici progettati *ad hoc* offre chiaramente un notevole valore aggiunto, in quanto permette di avere il massimo di trasmittanza coincidente con i valori del sistema biomimetico progettato e/o con quelli che ne rappresentassero evoluzioni successive. Inoltre, disporre di filtri ottici a film sottile conferisce versatilità all'architettura del dispositivo, in quanto è possibile depositare il filtro su differenti substrati o direttamente sui sensori. I filtri ottici sottili progettati e realizzati nei laboratori di DTE-STT-SCIS di Enea Portici sono rivestimenti spettralmente selettivi, che si ottengono attraverso la tecnica della deposizione *sputtering* su differenti substrati trasparenti. Essi constano di più *layer*, ciascuno preposto ad uno scopo, per la funzione complessiva di modulabilità della trasmittanza e riflettanza nella porzione visibile dello spettro elettromagnetico (selezione spettrale). Partendo dall'approvvigionamento-disponibilità di *target* per *sputtering*, vengono selezionati materiali che soddisfino le richieste funzionali dei singoli strati (*barriera*, *template*, *riflettore*, etc.) ed individuate le modalità sperimentali della deposizione complessiva del filtro desiderato. Una volta definiti, fabbricati e caratterizzati i singoli materiali, si procede alla simulazione delle proprietà dell'intero rivestimento, attraverso un opportuno software che consente di impostare le proprietà spettrali desiderate (bande passanti piccate in corrispondenza delle lunghezze d'onda dei cinque fotorecettori). La simulazione restituisce i valori degli spessori dei singoli strati, che quindi vengono fabbricati e caratterizzati nuovamente, al fine di inserire nel programma i valori sperimentali delle proprietà ottiche risultanti per quel definito spessore ed iterare il procedimento.

Per la realizzazione dei filtri ottici nella regione di interesse l'approccio teorico è quello di sfruttare strutture periodiche metallo-dielettrico [6], che esibiscano l'effetto di un *tunneling* risonante, oppure delle cavità di Fabry-Perot [7, 8], che forniscano proprietà spettrali ancor più convenienti, con la possibilità di un'unica regione di trasparenza nel *range* del visibile e vicino infrarosso. I materiali scelti risultano l'argento come metallo (dato il suo basso indice di rifrazione in tutto il *range* visibile) ed il nitruro di alluminio come dielettrico trasparente ed inerte nei confronti del metallo, che funge sia da *template* che da barriera. Alternando opportunamente questi materiali in spessori differenti, a seconda del massimo di trasmittanza visibile desiderato, è possibile simulare tutti e 5 i filtri. In Figura 68 sono riportate le curve di trasmittanza simulate per i 5 filtri a base di Ag-AIN.

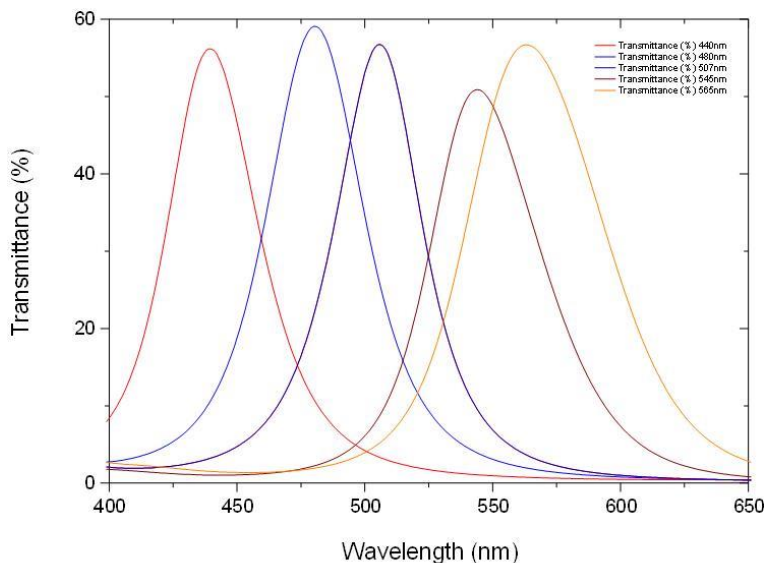


Figura 68- Trasmittanza simulata per i 5 filtri realizzati con Ag-AIN.

Argento e nitruro di alluminio vengono depositati in successione, attraverso un unico processo di *sputtering*. In particolare, per depositare argento si usa la modalità DC di alimentazione del target metallico, mentre per l'AIN la modalità di *sputtering* reattivo a partire da un *target* di alluminio. A titolo esplicativo del metodo adoperato, prendiamo in considerazione il filtro a 480 nm, realizzato in forma prototipale su vetro, attraverso la deposizione via *sputtering* del multistrato progettato, il cui schema è riportato in Figura 69.

AIN	154.0nm
Ag	33.3nm
AIN	187.0nm
Ag	33.3nm
AIN	44.0nm
EAGLE XG	

Figura 69 - Schema del multistrato progettato per il filtro a 480 nm.

Il processo di fabbricazione di *layer* di argento sottili (<35nm) riserva una serie di criticità, legate al fatto che i metalli nobili tendono a sferizzare e crescere ad isole al di sotto di determinati spessori, perdendo le caratteristiche proprietà dei loro *bulk*. L'utilizzo come *template* del nitruro di alluminio per promuovere una crescita compatta del film di argento garantisce al film metallico di preservare, anche nei bassi spessori, le proprietà di riflettanza richieste. A sua volta lo *sputtering* reattivo del nitruro di alluminio presuppone lo studio della curva di isteresi del processo di *sputtering* reattivo, per definire il punto di lavoro e la corretta concentrazione del gas di processo (azoto) da utilizzare al fine di garantire la stechiometria del nitruro e prevenire problemi legati al *surplus* di gas reattivo nella successiva deposizione del *layer* di argento. In

Figura 70 sono riportate la riflettanza e la trasmittanza sperimentale del filtro fabbricato nella porzione visibile dello spettro elettromagnetico.

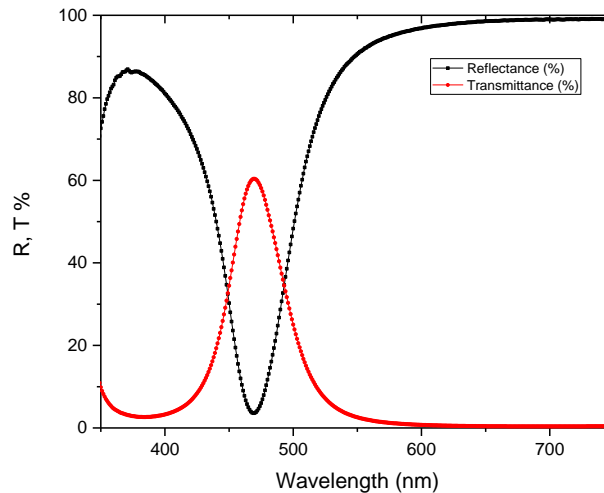


Figura 70 - Riflettanza e trasmittanza sperimentale del filtro a 480 nm.

Come si evince dal grafico è possibile realizzare il filtro attraverso un processo unico di *sputtering* sequenziale, ottimizzato in accordo ai dettami sugli spessori imposti dalla simulazione. Chiaramente ciascun filtro prevede determinati spessori degli strati e dunque ciascun processo sperimentale va messo a punto ed ottimizzato individualmente. Va sottolineato, come valore aggiunto, che i materiali selezionati sono gli stessi per tutti i filtri e dunque le criticità da affrontare sono prevedibili.

2.4.3 Sviluppi industriali

Al fine di valutare il possibile interesse della realtà produttiva italiana all'applicazione industriale del sistema di sensori ad apparecchi di illuminazione, per una realizzazione successiva di un sistema di controllo che grazie ai dati forniti dai sensori possa variare i parametri illuminotecnici dei corpi illuminanti, si è iniziata una collaborazione con la iGuzzini Illuminazione SpA, leader di prodotti di illuminazione. La società si è mostrata molto interessata ad una applicazione di questo tipo e, tramite sopralluogo, si è anche valutata l'opportunità di estendere lo studio di caratterizzazione della luce disponibile negli ambienti lavorativi anche in una test-room presso un loro edificio, applicando la metodologia da noi adottata.

2.4.4 Bibliografia

1. M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman. "A model of phototransduction by the human circadian system". *Brain Research Rev*, 50 (2005), 213-218.
2. M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough. "Circadian light". *Journal of Circadian Rhythms*, 8 (2) (2010).
3. M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner. "Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system". *Lighting Research & Technology*, 44 (2012), 386-396.
4. I. Acosta, R. P. Leslie, M. G. Figueiro. "Analysis of circadian stimulus allowed by daylighting in hospital rooms". *Lighting Research and Technology*, DOI. 10.1177/1477153515592948 (2015).
5. M. G. Figueiro, J. D. Bullough, R.H. Parsons, M. S. Rea. "Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans". *Neuroreport* 2004 Feb 9;15(2):313-6.

6. M. Scalora, M.J. Bloemer, A.S. Pethel, J. P. Dowling, C.M. Bowden, A.S. Manka JAP 83, 2377-2383 (1998).
7. H.A. Macleod, Thin Film Optical Filters (III) Institute of Physics 2001.
8. Y. T. Yoon , S. S. Lee, Opt.Express 18, 5344-5349 (2010).

2.5 Attività normativa e legislativa

ENEA partecipa ai lavori in ambito normativo nazionale e internazionale (UNI, CEN) su prodotti e sistemi di illuminazione, e sugli argomenti generali legati all'illuminazione: questa attività ha il preciso scopo di sviluppare norme tecniche aggiornate e applicabili per il settore illuminazione.

Ricordiamo che le norme tecniche, in generale, sono soluzioni - codificate e super partes - a problemi ricorrenti, che definiscono le caratteristiche e talvolta le prestazioni di prodotti, processi produttivi, servizi e professioni, in ordine a diversi aspetti (quantitativi, dimensionali, tecnologici, di organizzazione, di sicurezza e - soprattutto - qualitativi e ambientali), in sintesi sono regole per "fare bene le cose" [1]. L'importanza è dunque la possibilità di sfruttare un linguaggio comune a tutti gli interessati, a livello di ricerca, di professionisti, di produttori, di imprese o di altri stakeholders, consumatori inclusi, e questo porta a comprendersi meglio. La norma tecnica rappresenta lo stato dell'arte, la sua applicazione inevitabilmente aggiorna lo stato dell'arte per cui, conseguentemente, il parco normativo si evolve. La norma rappresenta quindi un collegamento tra l'evoluzione, quindi la ricerca, e la realtà quotidiana, lo stato dell'arte: di qui l'importanza di partecipare in modo attivo alla preparazione delle regole stesse.

In UNI si sono svolte attività su diversi Gruppi di Lavoro, a cui ENEA ha partecipato:

- Illuminazione degli ambienti di lavoro e dei locali scolastici (GL02)
- Illuminazione stradale GL05)
- Illuminazione gallerie (GL06)
- Fotometria e colorimetria (GL07)
- Inquinamento luminoso (GL08)
- Risparmio energetico negli edifici (di cui ENEA è coordinatore) (GL10)
- Progetto illuminotecnico (GL12)
- Prestazioni fotometriche (GL13, gruppo misto UNI-CEI).

Le norme pubblicate nel periodo 1 ottobre 2015 – 30 settembre 2016:

- UNI 11630:2016 . Luce e illuminazione - Criteri per la stesura del progetto illuminotecnico
- UNI EN 13201-2:2016. Illuminazione stradale - Parte 2: Requisiti prestazionali
- UNI EN 13201-3:2016. Illuminazione stradale - Parte 3: Calcolo delle prestazioni
- UNI EN 13201-4:2016. Illuminazione stradale - Parte 4: Metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche
- UNI EN 13201-5:2016. Illuminazione stradale - Parte 5: Indicatori delle prestazioni energetiche
- EC 1-2016 UNI EN 13032-4:2015. Luce e illuminazione - Misurazione e presentazione dei dati fotometrici delle lampade e apparecchi di illuminazione - Parte 4: Lampade a LED, moduli e apparecchi di illuminazione e la versione in italiano della 13032-4:2015

Inoltre:

- è stato sviluppato da ENEA un software (versione 1) per il calcolo dell'indicatore LENI riferito allo standard EN 15193-1 per la valutazione delle prestazioni energetiche degli impianti di illuminazione artificiale [2]
- è iniziato un interlaboratorio su prodotti a LED (lampade a tensione di rete, con attacco EDISON) , a cui ENEA partecipa sia come laboratorio sia per la fase di analisi dati
- è iniziato lo sviluppo di un modello per la quantificazione della luce dispersa verso l'alto, per il problema del cosiddetto "inquinamento luminoso" legato anche alle leggi regionali [3].

A livello europeo, è proseguita l'attività di supporto tecnico all'Italia per le attività che si svolgono, a livello di Commissione Europea, sullo sviluppo di legislazione di Ecodesign ed Etichettatura Energetica, in particolare su prodotti e sistemi di illuminazione e sugli "smart appliances", in cui sono compresi anche i dispositivi di illuminazione.

Questa attività è volta a spostare il mercato verso prodotti più efficienti: la direttiva Ecodesign trascina il mercato, poiché fissa requisiti minimi (legati all'impatto durante il ciclo di vita) per l'immissione sul mercato europeo dei prodotti, la direttiva Etichettatura Energetica spinge il mercato, informando il consumatore sulle caratteristiche prestazionali / energetiche e quindi mettendolo in grado di effettuare scelte consapevoli al momento dell'acquisto. Per i prodotti di illuminazione, i parametri importanti per Ecodesign sono legati alla fase di utilizzo e quindi riguardano efficienza energetica, caratteristiche funzionali (come la temperatura correlata di colore o la resa cromatica), informazioni di prodotto... Per l'etichetta energetica il parametro principale è il consumo di energia.

E' in corso la revisione dei regolamenti di Ecodesign sui prodotti di illuminazione e in questa annualità si è discussa una prima proposta della Commissione, dopo il completamento dello studio preparatorio nel dicembre 2015. Lo studio è pubblico e i documenti sono scaricabili gratuitamente da rete (<http://ecodesign-lightsources.eu>). Contemporaneamente anche l'etichetta energetica dovrebbe essere rivista. Ci sono ancora moltissimi contenuti tecnici da approfondire e discutere: oltre a stakeholders meetings e consultation forum, sono in corso vari scambi di opinioni con gli stakeholders, industria in primis.

E' in corso anche uno studio preparatorio per Ecodesign sui sistemi di illuminazione [4]: si è visto infatti che nelle direttive esistenti ci sono requisiti per singoli prodotti / componenti, ma che il "sistema" nel suo insieme non è stato finora adeguatamente considerato. Questo studio è di particolare importanza per gli aspetti pratici che riveste, in quanto va a considerare l'efficienza energetica a diversi livelli tra loro interconnessi, come rappresentato in Figura 71. Lo studio è pubblico e i documenti sono scaricabili gratuitamente da rete (<http://ecodesign-lightingsystems.eu>). Un importante stakeholder meeting ha avuto luogo in marzo 2016.

Come si vede in figura, l'efficienza energetica del sistema per una certa applicazione è si compone di diversi elementi, che possono essere raggruppati per tipologia (distinta per colori in figura):



I vari elementi hanno parametri significativi, i quali a loro volta sono quantificabili e misurabili (esistono riferimenti normativi, già disponibili o in fase di preparazione): questo è essenziale per definire requisiti, poterli dichiarare e poterli poi verificare.

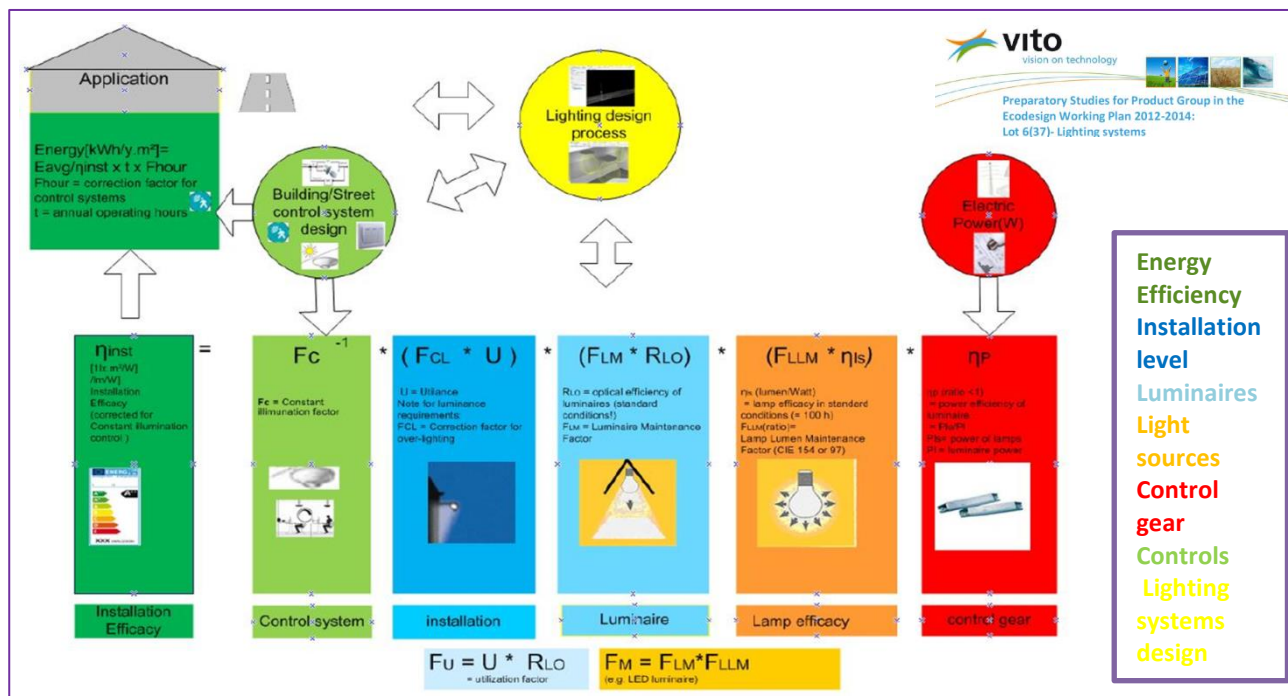


Figura 71: Componenti ed efficienza energetica sistemi di illuminazione

L'avanzamento dello studio sugli smart appliances è stato discusso in 2 stakeholders meetings. Uno degli obiettivi principali è quello di valutare se e come è possibile effettuare lo shift dei carichi, per ottimizzare l'utilizzo della rete elettrica. Per quanto riguarda l'illuminazione, la conclusione è che questo non è evidentemente possibile, per cui i vantaggi "smart" sono tipicamente diversi: ad esempio controllo intelligente, possibilità di servizi aggiuntivi sulla stessa infrastruttura, LI-FI, illuminazione human centric. Lo studio è quasi giunto alla conclusione (la pianificazione originale indicava settembre 2016 per come data finale, ma il documento definitivo non è ancora disponibile). Anche questo studio è pubblico e i documenti sono scaricabili da rete (<http://www.eco-smartappliances.eu>).

2.5.1 Bibliografia

1. UNI, "Le regole del gioco", UNI, Gennaio 2013.
2. L. Blaso, S. Fumagalli, O. Li rosi, F. Marino, " Versione 1 - Software per il calcolo dell'indicatore LENI riferito allo standard EN 15193-1 per la valutazione delle prestazioni energetiche degli impianti di illuminazione artificiale". RdS/PAR2015/007, ENEA, settembre
3. G. Leonardi, S. Pizzuti, S. Fumagalli, A. Antonelli, L. Blaso, F. Marino, F. Pieroni, S. Romano "Sviluppo della architettura e tecnologie di smart lighting e funzionalità del palo intelligente", RdS/PAR2015/008, settembre 2016
4. P. Van Tichelen, W. Chung Lam, P. Waide, R. Kemna, L. Vanhooydonck, L. Wierda, "Preparatory study on lighting systems 'Lot 6'". Specific contract N° ENER/C3/2012-418 Lot 1/06/SI2.668525. Implementing framework contract ENER/C3/2012-418 Lot 1. 2016

3 Conclusioni

Le conclusioni sono state scritte nei singoli capitoli delle attività.

4 Riferimenti bibliografici

I riferimenti sono riportati, ove applicabile, nei singoli capitoli delle attività.

5 Abbreviazioni ed acronimi

HCL – Human Centric Lighting