



Ricerca di Sistema elettrico

## Metodi sperimentali per la valutazione della qualità della luce, sviluppo di sistemi a LED

L.Blaso, O.Li Rosi, S.Fumagalli, G.Leonardi, V.Tarantini,  
R.Pollidori, E. Rusconi, A.Frascone, A.Antonelli

## METODI SPERIMENTALI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLA LUCE, SVILUPPO DI SISTEMI A LED

L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli, G. Leonardi, V. Tarantini, R. Pollidori, E. Rusconi, A. Frascone, A. Antonelli (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione - c.1 Materiali e componenti utilizzati per l'emissione e la trasmissione della luce

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

Si ringraziano Alessandro Costantini di Intematix e Alessandro Cola di NERI per la competenza, gentilezza e disponibilità.  
Si ringrazia Stefano Anzola di ENEA per la progettazione del plinto per Stapelia.

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E DEI RISULTATI OTTENUTI.....	5
2.1 HUMBLEBEE.....	6
2.1.1 Il progetto HumbleBee.....	6
2.1.2 Descrizione del sistema di illuminazione <i>HumbleBee</i> .....	8
2.1.3 Il sistema di controllo.....	11
2.1.4 Gli apparecchi di illuminazione con tecnologia a fosfori remoti.....	12
2.1.5 Progetto illuminotecnico.....	15
2.2 LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLA LUCE. ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	16
2.2.1 Le patches.....	17
2.2.2 Il setup sperimentale.....	19
2.2.3 Le sorgenti.....	19
2.2.4 Procedura sperimentale.....	20
2.2.5 Sintesi dei risultati.....	22
2.3 INSTALLAZIONE DI STAPELIA.....	22
2.3.1 Evoluzione di Stapelia e caratteristiche del prototipo installato.....	24
2.3.2 Circuiti di carica.....	25
2.3.3 Illuminazione all'interno della foglia.....	26
2.3.4 Adeguamento del circuito crepuscolare.....	26
2.3.5 Adeguamento batteria.....	26
2.3.6 Illuminazione RGB della corolla.....	27
2.3.7 Uscita ausiliaria per i circuiti dei servizi ausiliari.....	27
3 CONCLUSIONI.....	29
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	29

## Sommario

L'attività si colloca nel tema "RISPARMIO DI ENERGIA ELETTRICA NEI SETTORI: CIVILE, INDUSTRIA E SERVIZI", con uno specifico obiettivo di questo tema è dedicato allo sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione., sia per quanto riguarda la progettazione che per quanto riguarda la valutazione della qualità della luce.

In questo rapporto si riporta in particolare:

- lo studio preliminare per la progettazione di un sistema di illuminazione, costituito da apparecchi con tecnologia a fosfori remoti e da un sistema di controllo Smart, pensato per l'applicazione in ambiente interno;
- una attività sperimentale comprendente test percettivi svolti per investigare l'impatto di aspetti legati al contesto sulla resa dell'apparenza cromatica al cambiare dell'illuminante;
- l'installazione di un prototipo sperimentale di apparecchio a LED – fotovoltaico stand-alone.

## 1 Introduzione

L'attività si colloca nel tema "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi"<sup>1</sup>, il cui obiettivo finale è lo sviluppo di strumenti e metodi, che mirano al miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di stimolare nel mercato la circolazione di prodotti più performanti.

Uno specifico obiettivo di questo tema è dedicato allo sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione. A sua volta l'obiettivo si è diversificato in due principali linee parallele di ricerca: una linea di attività ha trattato la progettazione di prodotti efficienti e al loro utilizzo in impianti efficienti (COEELLO, HUMBLEBEE, e inoltre Stapelia e PLUS ME); una seconda ha trattato la risposta del sistema visivo umano agli stimoli spaziali e spettrali legati all'illuminazione, alla ricerca di una misura per quantificare la qualità e l'affidabilità di una sorgente di luce in dipendenza dell'applicazione e per comprendere l'influenza delle nuove sorgenti luminose sulle prestazioni cognitive.

## 2 Descrizione delle attività svolte e dei risultati ottenuti

Un primo importante risultato delle attività di ricerca – per quanto riguarda lo sviluppo di prodotti efficienti – è stato la progettazione del sistema di illuminazione modulare a LED chiamato "COEELLO", COMfortable, Efficient Experiential Lighting for Office, da parte del Politecnico di Milano Dipartimento di Design<sup>2</sup>. La progettazione è stata preceduta da una ricerca sullo stato dell'arte dei sistemi a fosfori remoti e altri sistemi di generazione di luce bianca mediante tecnologia allo stato solido per individuarne pregi, difetti, indicazioni applicative e valutarne le performance in termini di resa cromatica, efficienza, comfort visivo e aspetti fisiologici circadiani dell'illuminazione artificiale negli interni (scuole e uffici in particolare): le parti teoriche di questo studio costituiscono anche la stessa base teorica delle attività ENEA sui fosfori remoti (HumbleBee).

Un secondo risultato – sempre per quanto riguarda lo sviluppo di prodotti efficienti – è stato ottenuto sempre grazie al Politecnico di Milano (che ha fornito supporto tecnico a ENEA) attraverso la prototipazione industriale di PLUS ME<sup>3</sup>, sistema modulare a LED per strade a traffico motorizzato all'interno dell'illuminazione urbana<sup>4</sup>. Il prototipo, da usare per sperimentazioni, è stato realizzato dalla ditta Neri, la quale ha anche collaborato in modo attivo al progetto.

Per quanto riguarda invece gli studi legati all'influenza delle nuove sorgenti sulle prestazioni cognitive, è stata svolta dall'Università di Roma Sapienza, Dipartimento DIIAEE, uno studio sperimentale<sup>5</sup> incentrato sulle sorgenti LED con spettro ricco di lunghezze d'onda corte. Gli effetti della luce con spettro ricco di luce blu non si limitano all'azione sui ritmi circadiani, ma hanno effetti anche sull'allerta e sulla vigilanza. Poiché le nuove sorgenti luminose potrebbero essere adottate soprattutto in tali contesti lavorativi, l'assenza di indagini scientifiche rispetto all'effetto di queste lampade sulle abilità spaziali e sulle funzioni esecutive umane può rappresentare una forte limitazione sulla conoscenza degli effetti a breve e a lungo termine. I

---

<sup>1</sup> Nell'accordo di programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2012, area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

<sup>2</sup> per dettagli, vedere "Fosfori remoti per l'illuminazione di Interni" M. Rossi, D. Casciani, F. Musante Dip. Design Politecnico di Milano, RdS/2013/113

<sup>3</sup> per dettagli, vedere "Ricerca e sviluppo progetto PLUS ME" M. Rossi, D. Casciani, F. Musante, Dip. Design Politecnico di Milano, RdS/2013/112

<sup>4</sup> progettato da Politecnico di Milano nella precedente annualità. Vedere "Advance LED lighting design nell'illuminazione pubblica... Ricerca progettuale PLUS ME", M. Rossi, D. Casciani, F. Musante (Politecnico di Milano), settembre 2012, RdS/2012/275

<sup>5</sup> per dettagli, vedere "Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani" C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini, F. Bisegna, Università La Sapienza, RdS/2013/109

primi risultati sembrano indicare che l'esposizione a un'illuminazione con uno spettro a elevata composizione spettrale nel blu, migliora le prestazioni riducendo gli errori e permettendo multiple rappresentazioni mentali.

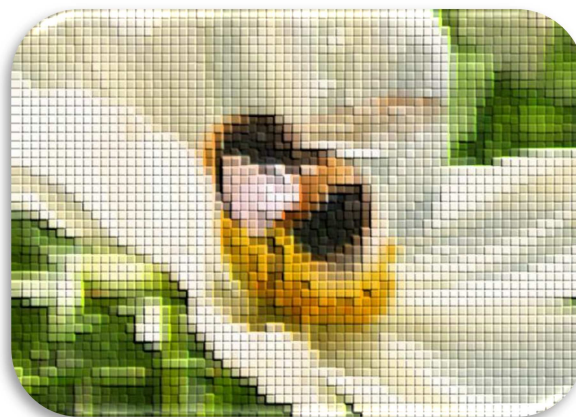
Nei seguenti capitoli sono descritte dettagliatamente le seguenti attività:

- HumbleBee;
- studio per la valutazione della qualità della luce;
- Stapelia.

## 2.1 HumbleBee<sup>6</sup>

E' stato svolto uno studio incentrato sulla progettazione di un innovativo sistema di illuminazione per ambienti interni in grado di coniugare due tecnologie quali l'uso di apparecchi di illuminazione a fosfori remoti ed un sistema di controllo Smart wireless per la gestione dell'impianto di illuminazione.

La ragione che ha portato alla progettazione di un sistema di questo genere è la volontà di realizzare in forma prototipale e successivamente testare un sistema di illuminazione innovativo che possa essere applicato negli ambienti interni e che sfrutti le tecnologie più avanzate disponibili nel panorama illuminotecnico in termini di efficienza energetica, di qualità dell'ambiente luminoso prodotto e di facilità di cablaggio ed utilizzo.



Il gruppo di ricerca che ha condotto l'attività ritiene di poter ottenere interessanti risultati, in termini di riduzione dei consumi energetici e di qualità dell'ambiente luminoso, quando il prototipo del sistema sarà installato e quindi testato in un ambiente reale (Hall tecnologica). Le valutazioni saranno rese possibili dall'attività di monitoraggio che sarà effettuata utilizzando la hall tecnologica in condizioni normali di esercizio. Durante questa fase di progettazione sono stati tenuti in considerazione tutti gli aspetti necessari per realizzare un sistema di illuminazione in grado di garantire i requisiti prestazionali richiesti, ciononostante, quando si procederà alla seconda fase (fase di installazione) il sistema sarà sottoposto ad una delicata fase di commissioning e taratura che sarà propedeutica alla fase effettiva di messa in servizio e monitoraggio dei parametri energetici ed ambientali.

### 2.1.1 Il progetto HumbleBee

Il sistema HumbleBee è stato progettato coniugando due innovative tecnologie quali degli apparecchi di illuminazione con fosfori remoti ed un sistema di controllo Smart.

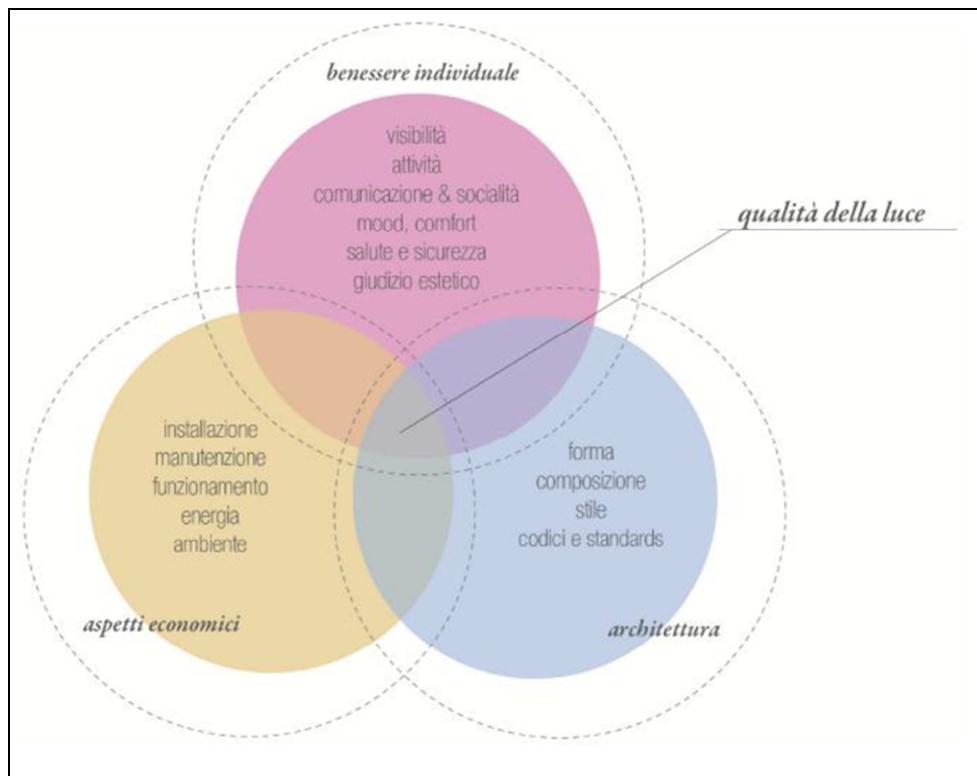
Il laboratorio, nel nostro caso i laboratori dell'ENEA di Ispra ICELAB per gli elettrodomestici del freddo e FIRELAB per i forni elettrici, sono veri e propri luoghi di lavoro, dove le persone trascorrono molte ore. E' quindi necessario passare dal luogo di lavoro "stereotipato" al luogo di lavoro "antropizzato" e quindi la

---

<sup>6</sup> HumbleBee è l'antico nome del bombo in inglese (ora si chiama Bumblebee). La sua forma ricorda quella dell'apparecchio di illuminazione high bay del progetto e il suo colore ricorda il "giallo" dei fosfori remoti classici. Inoltre l'operosità degli imenotteri ben si adatta al concetto di "laboratorio". "Harmonia UMBrae Lucisque EBur Ebumque Extollit", cioè "L'armonia di ombra e luce esalta l'ebano e l'avorio".



vera sfida progettuale è tesa ad ottenere un corretto bilanciamento tra diversi elementi chiave, come schematizzato in figura<sup>7</sup>.



**Figura 1: Schema delle relazioni tra elementi che contribuiscono a determinare la qualità della luce**

La scelta di utilizzare un apparecchio a fosfori remoti nasce dalla volontà di testare sul campo una delle tecnologie più avanzate per l'emissione di luce bianca. Per una trattazione molto completa sulla generazione di luce bianca e sulla tecnologia dei fosfori remoti in particolare, con confronti pregi-difetti di diverse tecnologie, vedere sempre [1].

La scelta di progettare un sistema di controllo Smart scaturisce dall'esigenza di realizzare un impianto di illuminazione regolato ed ottimizzato affinché durante il suo utilizzo permetta di contenere i consumi di energia elettrica e ridurre gli sprechi, migliorando le condizioni luminose e visive sulle aree di lavoro in base alle reali necessità degli operatori.

I sistemi di controllo Smart sono tecnologie conosciute già a partire dagli anni '80 e largamente utilizzate negli ultimi decenni grazie al loro rapido sviluppo, riconducibile all'evoluzione del settore elettronico e alla crescente affidabilità delle modalità di trasmissione dei dati (via cavo e wireless).

Partendo da questi presupposti si è optato per un sistema di controllo che sfruttasse al meglio le tecnologie di ultimissima generazione (in termini di sensoristica, applicazioni web, regolazioni manuali ed automatiche, impostazione di scenografie, etc..) e l'elevata flessibilità che la trasmissione wireless può offrire, garantendo comunque affidabilità e robustezza del funzionamento del sistema.

La scelta del protocollo wireless è certamente innovativa e al passo con i tempi: da alcuni anni le maggiori multinazionali produttrici di componenti e sistemi di controllo Smart hanno cominciato ad immettere sul

<sup>7</sup> testo e figura da [1]

mercato sistemi che utilizzano parzialmente o completamente protocolli di tipo wireless, inizialmente per il controllo degli impianti HVAC<sup>8</sup> e successivamente per gli impianti di illuminazione.

Questa tecnologia consente di ridurre al minimo il cablaggio fisico di tutti i dispositivi, che, alimentazione a parte, comunicano tra loro sulla rete wireless e dialogano con un controllore che accentra le informazioni e attua i controlli agendo sugli attuatori (via cavo o via wireless in base alla tipologia di architettura del sistema). Questa elevata flessibilità consente di facilitare l'installazione, l'indirizzamento dei dispositivi nella rete e la programmazione del sistema stesso, migliorando anche le fasi di manutenzione, in quanto i componenti guasti possono essere rimossi senza alcun problema e sostituiti con quelli nuovi che vengono indirizzati senza effettuare lavori di cablaggio.

In questo modo il sistema oltre a controllare e gestire l'impianto di illuminazione in termini di efficienza e riduzione dei consumi di energia elettrica risulta essere anche efficiente in termini di installazione, utilizzo e manutenzione.

### 2.1.2 Descrizione del sistema di illuminazione HumbleBee

Il sistema di illuminazione HumbleBee è stato progettato per essere installato ed utilizzato nella Hall tecnologica dell'ENEA di Ispra, dove sono operativi due laboratori, che condividono molte infrastrutture e strumentazioni: ICELAB (per elettrodomestici del freddo) e FIRELAB (per forni elettrici) (figura 2). La hall è un locale 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 (figure 3).

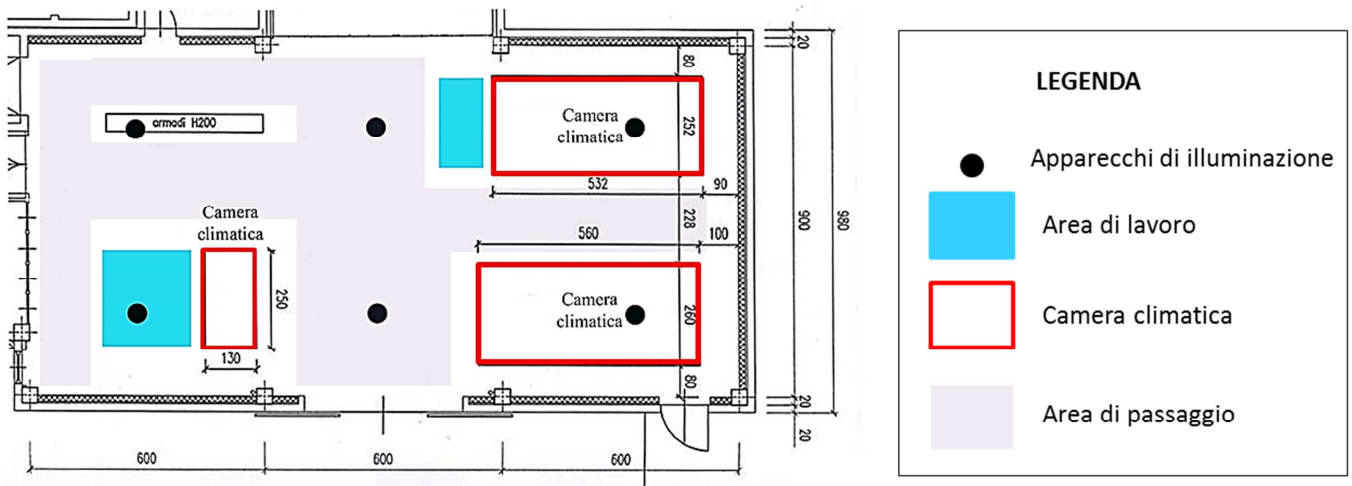


Figura 2: Planimetria della Hall tecnologica

<sup>8</sup> HVAC systems : Heating, Ventilation and Air Conditioning systems





**Figura 3: Viste interne della Hall tecnologica**

Nella figura 2 è indicata la posizione degli apparecchi di illuminazione esistenti (impianto tradizionale costituito da 6 apparecchi a vapori di mercurio ad alta pressione), collocati all'altezza di circa 7 metri (figure 4 e 5) che saranno sostituito dall'impianto nuovo con gli apparecchi a fosfori remoti (nella stessa posizione).



**Figura 4: Apparecchi di illuminazione esistenti a vapori di mercurio ad alta pressione**



**Figura 5: Vista dell'impianto di illuminazione esistente**

Il sistema di illuminazione HumbleBee è così caratterizzato:

- n° 6 apparecchi di illuminazione con tecnologia a fosfori remoti con installazione a plafone (all'altezza di circa 7 metri dal pavimento). L'impianto è progettato per garantire un livello di illuminamento medio mantenuto sul piano di lavoro (altezza di 1 metro) di 300 lx (Figura 2 – area di lavoro). I sei apparecchi di illuminazione sono progettati *ad hoc* in modo da equipaggiare i sensori presenza, i dispositivi elettronici per la comunicazione wireless e l'antenna;
- un sistema di controllo Smart dedicato per la gestione e la regolazione manuale ed automatica degli apparecchi di illuminazione. Il sistema utilizza il protocollo di comunicazione wireless ZigBee e comunica via radio con tutti i dispositivi presenti nella sua rete, quali i sensori di presenza, i fotosensori<sup>9</sup>, gli attuatori ed i dispositivi che consentono la regolazione manuale e l'interazione con il sistema di controllo (tablet, smart phone, touch screen). Il sistema, che non prevede l'utilizzo di interruttori tradizionali posti a parete, consente la verifica dei consumi energetici per mezzo dei degli appositi contatori di grandezze elettriche, da installare nel quadro elettrico dell'impianto di illuminazione. Inoltre, il sistema è predisposto anche per la memorizzazione di alcune variabili appositamente definite, quali i malfunzionamenti, i valori di illuminamento letti dai fotosensori, gli stati di presenza letti dai sensori di presenza, e le interazioni manuali con il sistema<sup>10</sup> per consentire una completa valutazione del funzionamento del sistema.

Le logiche di controllo del sistema HumbleBee sono:

- **logica di controllo manuale:**

- accensione/spengimento degli apparecchi di illuminazione;
- dimmerazione del flusso luminoso emesso dalle sorgenti luminose;
- regolazione della temperatura di colore delle sorgenti luminose<sup>11</sup>.

La logica di controllo manuale prevede che gli utenti possano interagire sul sistema regolando contemporaneamente o singolarmente gli apparecchi di illuminazione (accensione / spegnimento / dimmerazione). La regolazione della temperatura di colore delle sorgenti luminose è progettata per essere attuata singolarmente su ciascun apparecchio. Le matrici di LED selezionate per tale regolazione sono da 2500 K, 4000K e 6000 K. In condizioni di normale funzionamento (manuale e/o automatica) la programmazione prevede l'accensione con la matrice di 4000 K, mentre le regolazione con le altre due matrici (2500 K e 6000 K) sono attuabili solo manualmente in base alle necessità degli utenti. In qualunque condizioni di regolazione della temperatura di colore, il sistema garantisce lo stesso livello di illuminamento con la temperature di colore di 4000 K.

- **logica di controllo automatica:**

- accensione/spengimento degli apparecchi di illuminazione per mezzo di sensori di presenza;
- dimmerazione del flusso luminoso emesso dalle sorgenti luminose per mezzo di fotosensori.

L'accensione e lo spegnimento dell'impianto di illuminazione avvengono in relazione alla presenza/assenza degli utenti nel laboratorio. La logica di controllo prevede che all'accesso di un utente in ambiente i sensori di presenza, rilevando la nuova condizione, inviino l'input al sistema determinando l'accensione degli apparecchi di illuminazione (è sufficiente che un solo sensore percepisca la presenza degli utenti per determinare l'accensione degli apparecchi). In assenza di interazioni manuali e/o di altre

<sup>9</sup> La collocazione spaziale dei fotosensori sarà definita in fase di installazione in base alle loro specifiche caratteristiche tecniche.

<sup>10</sup> Queste informazioni saranno visualizzabili il giorno successivo.

<sup>11</sup> CCT è la "temperatura correlata di colore", anche se nell'uso corrente si parla di "temperatura di colore". La "Colour Temperature (tratto dal vocabolario della CIE) è la "temperature of a Planckian radiator whose radiation has the same chromaticity as that of a given stimulus". Per superare il problema dei radiatori non planckiani, cioè diversi dal corpo nero, si usa la "correlated colour temperature, temperature of the Planckian radiator having the chromaticity nearest the chromaticity associated with the given spectral distribution on a diagram where the (CIE 1931 standard observer based)  $u'$ ,  $2/3 v'$  coordinates of the Planckian locus and the test stimulus are depicted".

variabili (contributo di luce naturale) l'impianto garantisce le condizioni luminose di 300 lx per tutto il tempo in cui gli utenti sono nel laboratorio. Quando i sensori di presenza non rilevano più utenti in ambiente, trascorso un tempo di delay time impostato<sup>12</sup> (10 minuti di attesa), il sistema spegne completamente l'impianto di illuminazione artificiale.

La logica di controllo automatica consente sempre l'interazione manuale da parte degli utenti. Tale interazione può riguardare uno o più apparecchi di illuminazione (on/off/dimm e Temperatura di colore). La modifica dallo stato di controllo da automatico a manuale fa sì che l'impianto riprenda a funzionare in automatico trascorso il delay time di 10 minuti (in assenza di utenti).

Nel caso in cui gli utenti entrino nel laboratorio e le condizioni luminose (componente di luce naturale) fossero tali da soddisfare e/o superare i 300 lx di illuminamento di progetto (luminosità letta dai fotosensori installati) il sistema di controllo non accende gli apparecchi di illuminazione artificiale fino al perdurare di tali condizioni. Al ridursi del contributo di luce naturale, il sistema comincia ad incrementare il flusso luminoso per garantire il livello di illuminamento previsto da progetto.

I fotosensori presenti in ambiente regolano la luce artificiale in funzione di quella naturale, in relazione alle variazioni dinamiche delle condizioni luminose esterne, utilizzando un controllo "a loop chiuso" che incrementa/decrementa il flusso luminoso delle lampade per mantenere costante il flusso luminoso che garantisce, sul piano di lavoro, il livello di illuminamento medio di progetto misurato dai fotosensori in modalità automatica.

Il sistema di controllo Smart prevede la programmazione con scene luminose, quali:

- **scena giornaliera:** valida dalle 8.00 alle 20.00 con regolazione manuale ed automatica come prima descritto nelle logiche di controllo
- **scena notturna:** valida dalle ore 20.00 fino alle ore 8.00, prevista per l'accesso della vigilanza e del personale delle pulizie. In questa scena l'impianto di illuminazione si accende automaticamente, garantisce 100 lx (a prescindere dal sensore di luminosità) e si spenga trascorso il delay time di 10 minuti.

### 2.1.3 Il sistema di controllo

Il sistema di controllo progettato è pensato in modo da centralizzare in un luogo tutti gli aspetti decisionali e di raccolta dei dati (consumi energetici, presenza, luminosità, interazioni manuali, malfunzionamenti, etc.) consentendo sempre l'interazione manuale e puntuale sui punti luce per modificarne lo stato (on/off/dimm e temperatura di colore).

Tutte le operazioni sono permesse tramite browser di internet che richiama un IP fisso del server di sistema, il quale a sua volta richiama il software che è interfaccia all'utente. Il software "NSS Console" (figura 6) ed i software aggiuntivi per il suo corretto funzionamento sono attivati all'interno del server di ENEA ad ISPRA. Con questa configurazione il sistema (rete dei dati interna o regolamenti per la gestione) è controllabile in remoto da qualsiasi luogo anche, qualora permesso, esterno alla sede ENEA di Ispra.

---

<sup>12</sup> Dalla letteratura internazionale è noto che il delay time possa essere impostato in una range compreso tra 5 e 30 minuti. Generalmente per uffici, aule, etc. il delay time tipico è di 15 minuti (considerando il tempo previsto per gli intervalli), in un ambiente industriale, in cui la presenza degli utenti è costante, è sufficiente un delay time di 10 minuti per evitare che l'impianto rimanga acceso per troppo tempo in assenza degli utenti.

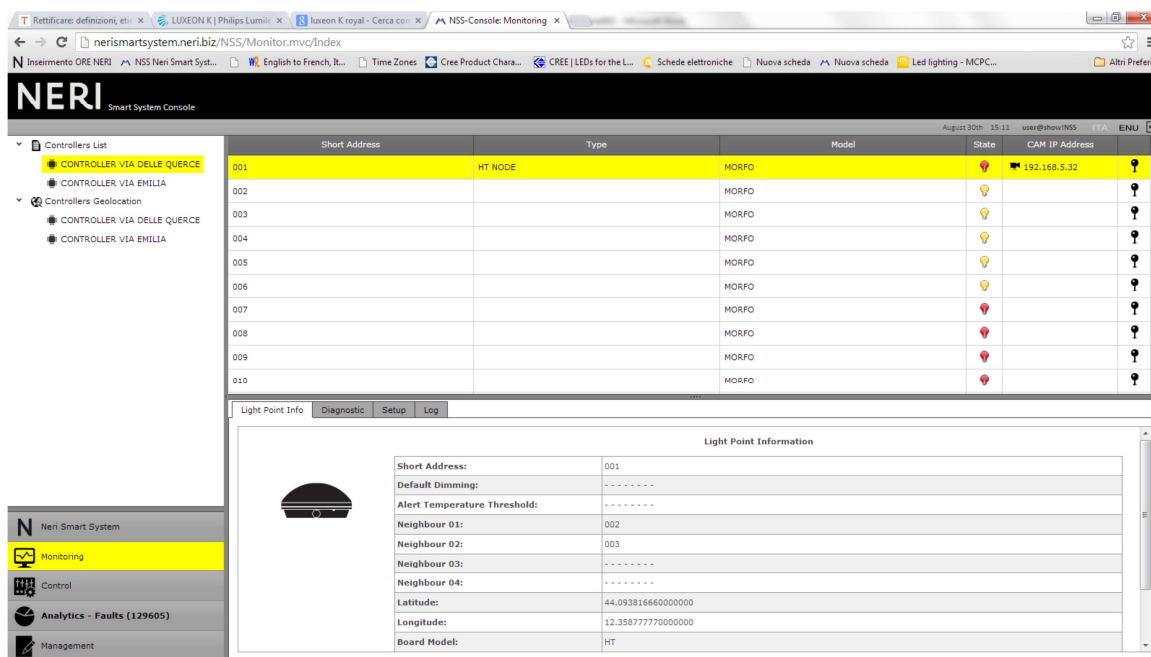


Figura 6: Interfaccia Console NSS (NERI SMART SYSTEM)

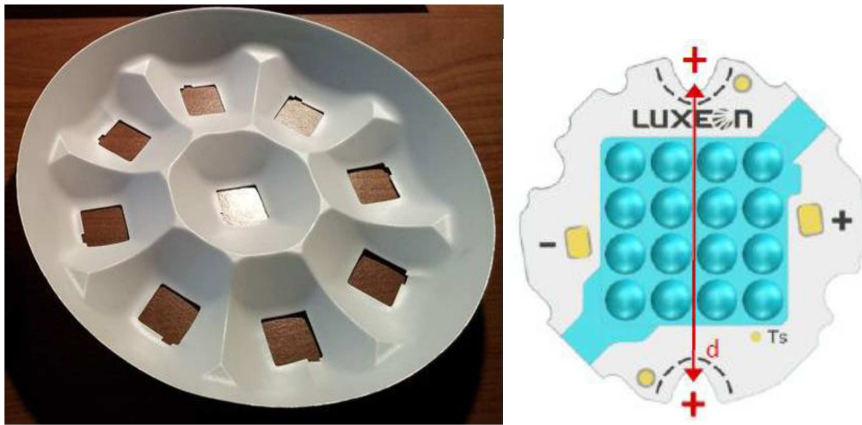
I dati sono raccolti attraverso una rete mesh da un collettore denominato “Controller” che è collegato alla rete interna tramite cavo LAN e trasferisce i dati al server di riferimento.

#### 2.1.4 Gli apparecchi di illuminazione con tecnologia a fosfori remoti

I punti luce seguono il concetto di High Bay. Il prodotto risulta circolare e con emissione rotosimmetrica del fascio luminoso. Tenuto conto che il sistema di controllo può avvalersi di rapide logiche decisionali e che il tema fondamentale alla base della progettazione di HumbleBee è il risparmio energetico, i LED sono il motore principale del prodotto anche se tecnicamente la sorgente luminosa è il vetro con fosfori depositati su un suo lato.

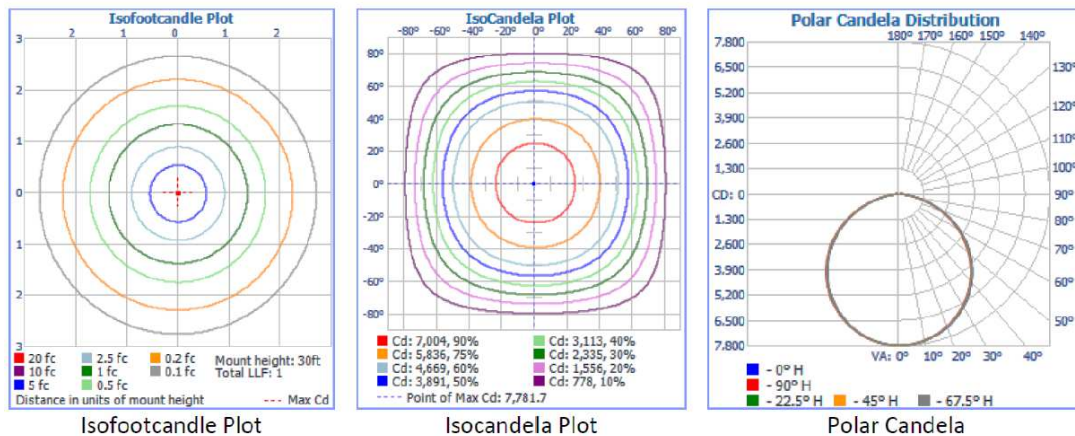
La tecnologia di fosfori remoti consiste nell'utilizzare sorgenti LED blu il cui fascio va ad eccitare il fosforo producendo luce bianca. A seconda del mix di fosfori presenti si genera la luce bianca delle caratteristiche volute. Per la Hall tecnologica si è scelto di utilizzare un vetro con fosfori per generare una luce con temperatura di colore pari a 4000 K.

Essendoci riflessioni interne da parte del vetro con fosfori, l'utilizzo di una camera di miscelazione è essenziale: materiale fortemente riflettente in maniera Lambertina permette il recupero del flusso di luce blu che in tal modo insisterà nuovamente sui fosfori aumentandone l'efficienza (figura 7).



**Figura 7: Camera di miscelazione per 9 moduli e modulo con LED Luxeon K Royal Blue**

Inoltre, essendo Lambertina anche l'emissione della sorgente (vetro) con apertura 115° del fascio luminoso, si è optato di non inserire un sistema ottico addizionale per direzionare la luce nell'ambiente (figura 8).

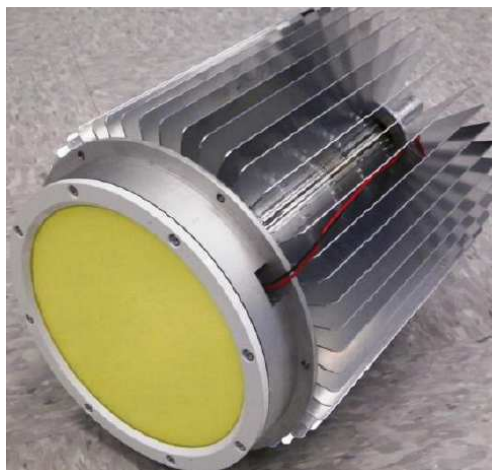


**Figura 8: Fotometria dell'apparecchio**

Il sistema dissipativo del prodotto che raffredda le sorgenti LED, garantendone la vita e le prestazioni, è costituito da un unico componente suddividibile in una parte alettata per aumentarne la superficie di scambio ed un cuore centrale formato da un piano di contatto con interfaccia sorgenti/camera di miscelazione ed una colonna "heat pipe" per massimizzare lo scambio termico con le alette laterali (figure 9 e 10).



**Figura 9: Dissipatore alettato con heat pipe**



**Figura 10: High Bay prototipale, parte centrale del prodotto finale**

L’elettronica è ospitata a lato della parte centrale (figura 10) per mezzo di carenatura.

I punti luce sono dotati ciascuno di un sensore presenza a radar che permette di non essere disturbato da fonti di calore quali quelle presenti per il riscaldamento dell’ambiente in inverno<sup>13</sup>. L’antenna inserita all’interno dell’apparecchio è rivolta verso il basso e permette il dialogo all’interno della rete mesh propria del sistema di controllo.

Di seguito si riportano le prestazioni del prodotto escludendo le perdite sull’alimentatore:

**Tabella 1: Caratteristiche apparecchio di illuminazione**

Photometric Results	High Bay Luminaire
	Goniophotometer
Total Luminous Flux (lumen)	<b>22,367.7</b>
Luminous Efficacy (lumen/Watt)	<b>110.3</b>

Per la gestione e controllo del fascio luminoso è presente un ingresso digitale con protocollo DALI, che permette la comunicazione bidirezionale tra il sistema di controllo e l’alimentatore.

Gli apparecchi di illuminazione e il sistema di gestione saranno realizzati dalla ditta NERI con componenti Intematix:

- Neri è dal 1962 impegnata nella progettazione e realizzazione di prodotti per l’illuminazione e per l’arredo urbano, con particolare attenzione alla creazione di soluzioni tecnologiche e di design in dialogo con l’ambiente naturale e architettonico che le ospita.
- Intematix, fondata nel 2000, è una ditta leader a livello mondiale per la produzione di fosfori per l’industria di LED for lighting e nello sviluppo dei metodi di applicazione. In particolare commercializza e svolge R&D su fosfori remoti.

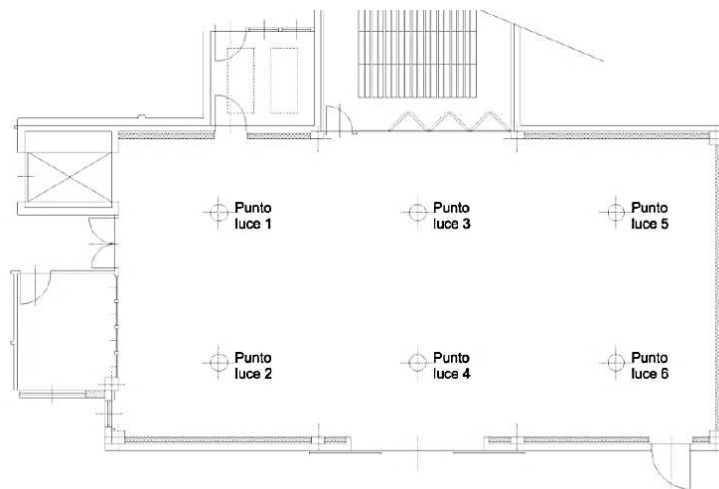
<sup>13</sup> I fotosensori saranno installati direttamente nell’ambiente nelle posizioni ritenute più idonee in relazione alle caratteristiche tecniche dei dispositivi.



### 2.1.5 Progetto illuminotecnico

Il progetto illuminotecnico è stato propedeutico al corretto dimensionamento dell'impianto di illuminazione e quindi alla progettazione degli apparecchi a fosfori remoti. La verifica dei calcoli illuminotecnici è stata fatta con un software di simulazione di tipo commerciale<sup>14</sup>. Dopo aver individuato le aree di lavoro, definito i coefficienti di riflessione luminosa delle pareti e delle superfici di lavoro ed aver realizzato il modello 3D della Hall tecnologica, sono state identificate le superfici di calcolo necessarie per il software per effettuare i calcoli illuminotecnici. I requisiti illuminotecnici di progetto, verificati con la simulazione, sono il valore dell'illuminamento medio mantenuto ( $E_m$ ) pari a 300 lx e l'uniformità degli illuminamenti ( $U_o$ <sup>15</sup>) pari a 0.60 (crf. normativa EN 12464-1:2012).

In figura 11 sono indicate le posizioni dei 6 punti luce.

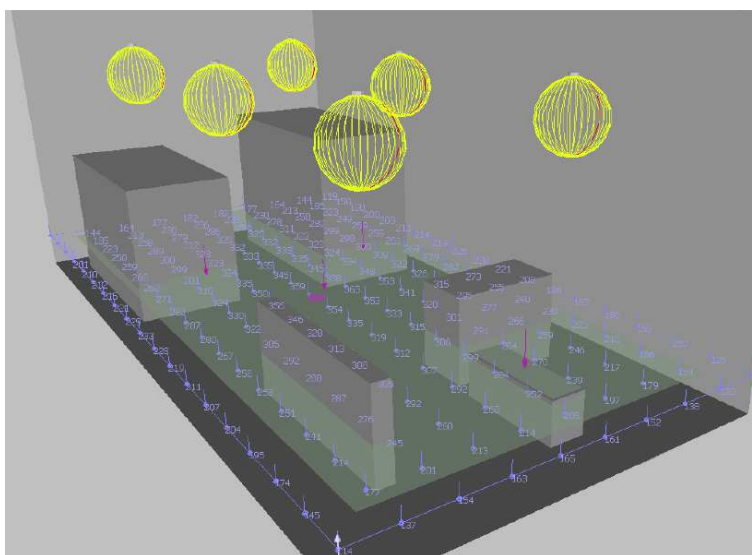


**Figura 11: Planimetria della Hall Tecnologica con indicate le posizioni dei 6 punti luce**

La figura 12 rappresenta un esempio di output 3D dei calcoli illuminotecnici eseguiti con il software di simulazione. Si può osservare la superficie di calcolo posizionata ad 1 metro dal pavimento (altezza delle aree di lavoro) ed i valori di Illuminamento puntuale calcolati sulla griglia dei punti che giacciono sulla superficie stessa.

<sup>14</sup> Software utilizzato: free, scaricabile dal sito: <http://www.dial.de/DIAL/it/dialux/download.html>

<sup>15</sup> Uniformità ( $U_o$ ) = Illuminamento minimo/Illuminamento medio ( $E_{min}/E_{med}$ )



**Figura 12: Output 3D del software di simulazione con calcoli eseguiti sulla superficie di calcolo. Solidi fotometri 3D degli apparecchi (giallo).**

## 2.2 La valutazione della qualità della luce. Attività sperimentale

Questa attività ha riguardato la resa dei colori legata al contesto, attraverso test di percezione visiva, in collaborazione con l'Università di Milano Dipartimento di Informatica<sup>16</sup>, motivati dal fatto che il calcolo del CRI si basa unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce e non tiene conto di come la luce si distribuisce nella scena e di come il nostro sistema visivo elabora la scena percepita.

L'Università ha investigato la base teorica dell'esperimento, ha definito la procedura sperimentale (ENEA ha apportato alcune variazioni operative) e predisposto parte del materiale per i test. L'attività sperimentale è stata svolta da ENEA presso il suo laboratorio a Ispra, comprendendo sia i test con gli individui sia la caratterizzazione fotometrica e spettrale delle sorgenti. L'analisi dei dati è stata svolta essenzialmente dall'Università, con contributi ENEA.

P.J. Bouma, 1948 afferma: *"It (daylight) displays a great variety of colours, makes it easy to distinguish slight shades of colour, and the colours of objects around us obviously look natural"*. La "bontà" di una sorgente luminosa è in genere collegata al fatto che essa renda fedelmente i colori nell'accezione detta sopra, cioè rispetto alla luce naturale. La definizione non è semplice, anche perché la luce naturale stessa non è uniforme e costante nel tempo (ad es. durante il trascorrere del giorno, oppure con cielo sereno o nuvoloso ecc. ecc.). La CIE ha definito l'indice di resa cromatica, come *"[the] effect of an illuminant on the color appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their color appearance under a reference illuminant."*

Tuttavia oggi è noto che questo indice non è più sufficiente a caratterizzare davvero la bontà di una sorgente, soprattutto in presenza di sorgenti luminose con diversi tipi di spettro.

Sono stati fatti diverse ricerche in proposito, arrivando a definire diversi indici<sup>17</sup>, ma uno dei problemi principali è che non sembra sufficiente in assoluto un unico indice (numerico o no) per valutare la qualità

<sup>16</sup> Report tecnico di riferimento: "Metodi sperimentali per la quantificazione dell'indice di resa cromatica di una sorgente luminosa e studio di approcci computazionali alternativi di tipo percettivo", A. Rizzi, C. Bonanomi (Università degli Studi di Milano), L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli (ENEA). RdS/2013/108

<sup>17</sup> anche la CIE stessa ha fatto proposte e studi

della luce. Per una descrizione sintetica sull'evoluzione e lo sviluppo di indici di resa cromatica vedere [2] e per una più dettagliata vedere [3].

Come già affermato, l'indice di resa cromatica cerca di misurare quanto viene preservata l'apparenza del colore degli oggetti osservati sotto una sorgente di luce test. Tuttavia il termine "apparenza del colore" si riferisce a come viene percepito il colore di un oggetto posto in un contesto specifico. Diverse configurazioni spaziali della scena possono modificarne infatti la percezione del colore: due stimoli identici osservati in condizione di illuminazione diversi o in contesti diversi possono apparire differenti.

Le immagini che noi consideriamo essere "illusioni ottiche" sono configurazioni visive che non si comportano come ci aspetteremmo da un modello puntuale (cioè fuori contesto) del colore. Esse al contrario ci parlano di come funziona il sistema visivo umano. Grazie allo studio di queste configurazioni sono state identificate importanti proprietà del sistema visivo umano.

Seguendo questa idea è stato ideato un esperimento che facesse uso di un'illusione ottica (tratta dalla copertina del libro di Albers, "Interaction of color", per studiare l'influenza di una particolare configurazione spaziale sulla percezione del colore sotto diverse sorgenti di luce.

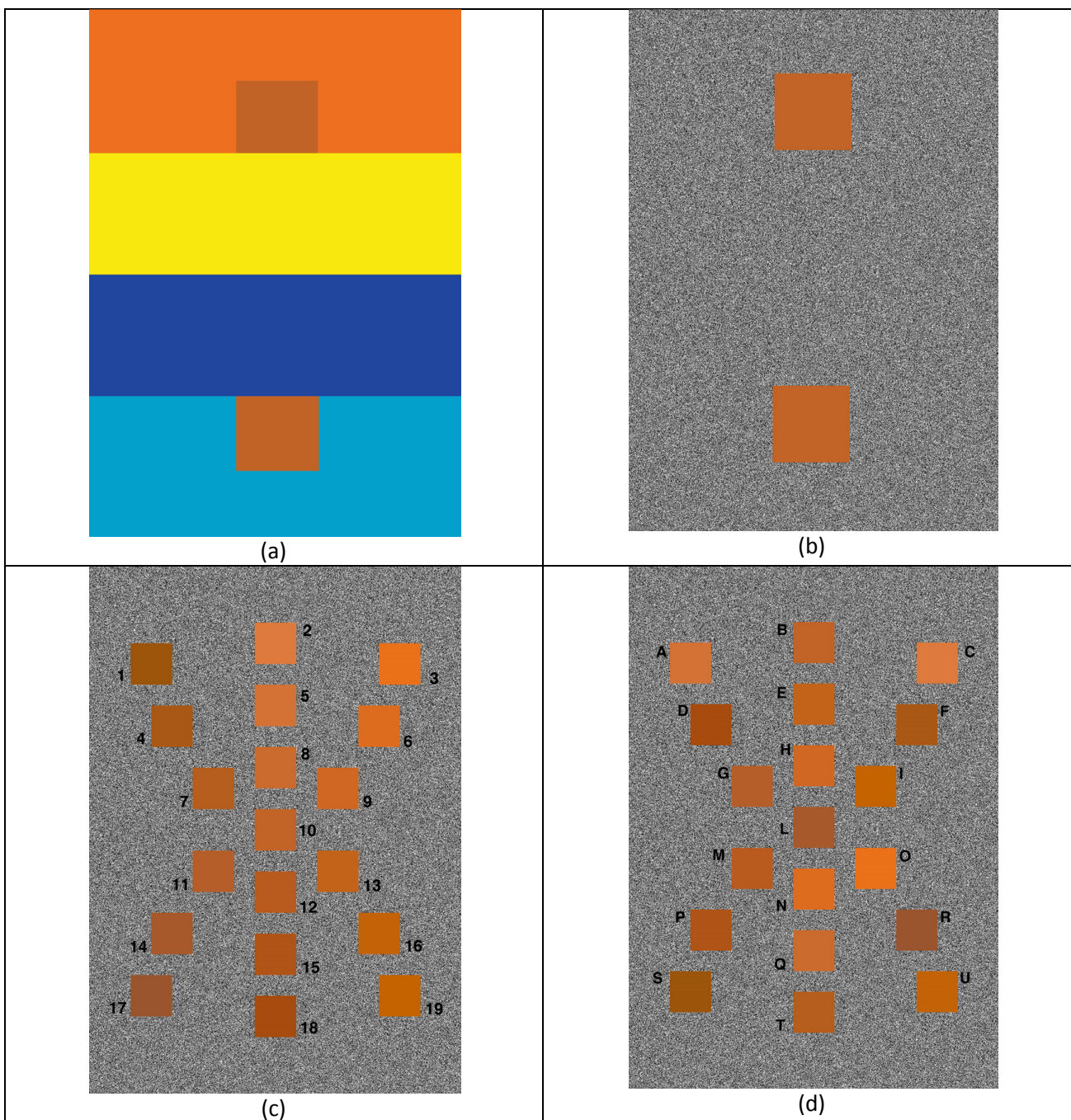
Scopo dell'esperimento è raccogliere dati che riguardano il cambiamento dell'apparenza cromatica in un dato contesto a seconda di quale sorgente luminosa è utilizzata. L'esperimento è avvenuto tra la primavera e l'estate, per un totale di 3 mesi e ha coinvolto 87 volontari: 47 donne e 40 uomini con un'età compresa tra i 10 e i 60 anni. I volontari sono stati reclutati durante l'Open Day del JRC (Joint Research Center) avvenuto il 4 Maggio 2013 e tra impiegati dell'Enea e del centro JRC.

### 2.2.1 Le patches

Per lo svolgimento dell'esperimento erano necessarie quattro diverse stampe, due di riferimento, da confrontare con altre due su cui erano stampate una serie di campioni. In particolare le quattro stampe erano così caratterizzate (figura 13):

- La prima stampa di test ricreava una famosa illusione di Albers (copertina del libro "Interaction of Color"). Il foglio è diviso in quattro rettangoli orizzontali di colore diverso: arancione, giallo, blu e azzurro. Sui rettangoli arancione e azzurro sono posizionati due quadrati di colore marrone, che toccano un lato del rettangolo. I due quadrati hanno colore identico, ma a causa della configurazione spaziale appaiono differenti (fig. 13a).
- La seconda stampa, di controllo è composta da due quadrati dello stesso colore della stampa di test, posizionata nello stesso punto, ma questa volta posti su uno sfondo a rumore bianco. In questo caso l'effetto del contesto è identico su entrambe le patch, non causando la forte differenza percettiva del primo caso (fig. 13b).
- Una stampa composta da 19 patch, in modo che quella centrale abbia colore corrispondente a quelle dei test. Allontanandosi dal centro sui sei raggi il colore cambia gradualmente, in particolare variano una o due coordinate Lab del colore della patch. Per poter segnalare la patch corrispondente a quella di test, i campioni sono etichettati con dei numeri acromatici (fig. 13c).
- Una seconda stampa composta delle stesse patch ma disposte in ordine casuale e etichettate con lettere acromatiche (fig. 13d).

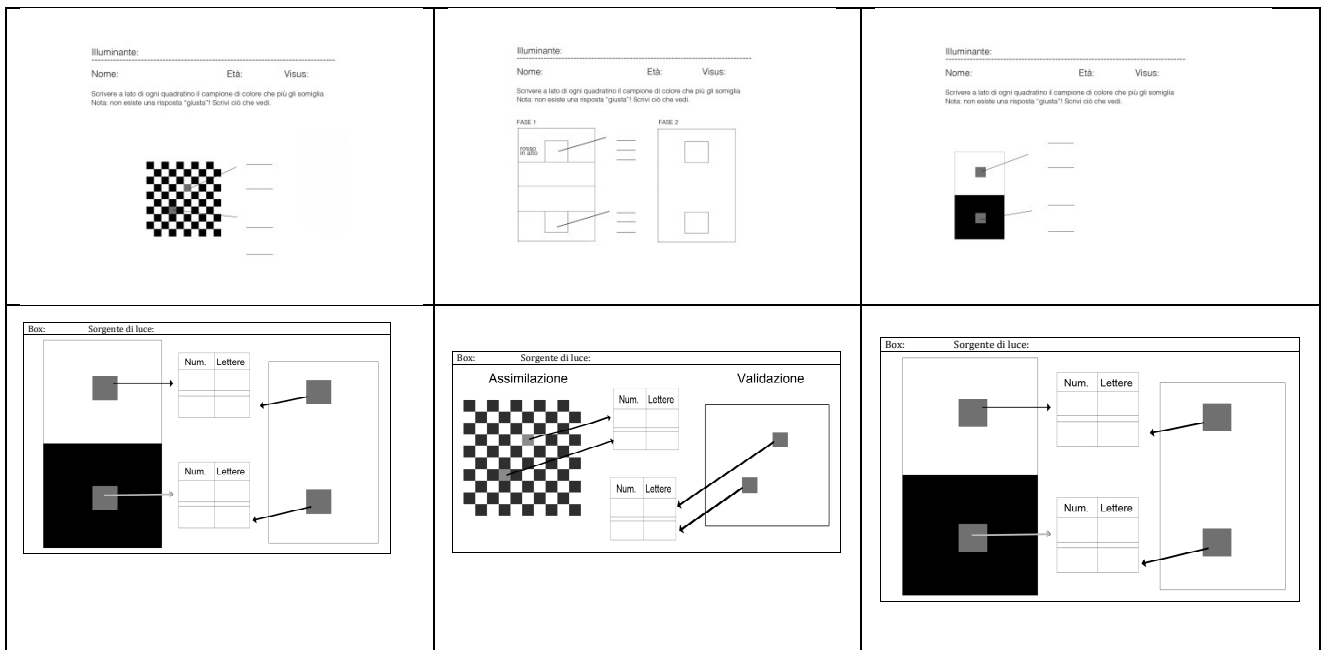
Le stampe hanno dimensione A4. Per poter svolgere l'esperimento contemporaneamente nei 4 box sono state stampate 4 copie di ogni foglio, dopo aver scaldato la stampante ed aver eliminato le prime copie, così da minimizzare la variabilità di ogni singola copia.



**Figura 13: immagini usate durante l'esperimento. Sulla prima riga i fogli di test (a) e di validazione (b). Sotto i campioni per il confronto, etichettati da numeri (c) e da lettere (d)**

La scelta definitiva delle patches e dei relativi format da usare è stata preceduta da un pre-test su campioni di patches diversi in numero e colore. La procedura sperimentale è stata provata nel laboratorio ENEA, ma è emersa subito una difficoltà operativa. Si è visto infatti che un test molto completo, come era quello in origine previsto, avrebbe comportato tempi inaccettabili, in quanto i partecipanti al test avrebbero subito un affaticamento visivo eccessivo, vanificando probabilmente la buona riuscita del test stesso. La procedura sperimentale con i relativi format sono quindi stati modificati e il numero di patches è stato ridotto per avere test completi ma su un minor numero di parametri.

In figura 14 si mostrano alcuni esempi dei format inizialmente presi in considerazione. .



**Figura 14: Alcuni dei format legati alle patches sperimentali iniziali**

### 2.2.2 Il setup sperimentale

Sono state costruite quattro cabine di luce di dimensione 1m x 1m x 0.8 m. All'interno sono ricoperte con carta bianca. Le quattro cabine denominate Box 1, Box 2, Box 3 e Box 4 sono disposte in modo che, effettuando il test in una, non fosse possibile vedere l'apertura della cabina a fianco (figura 16). I box sono stati collocati all'interno di una stanza quasi completamente buia, nella quale i livelli di illuminamento non erano tali da compromettere la buona riuscita dell'esperimento.

### 2.2.3 Le sorgenti

Sono state testate sette sorgenti luminose all'interno delle 4 cabine, con conseguente divisione dell'esperimento in due fasi. Nei Box 1, 2 e 4 sono state posizionate due lampade, accese una alla volta (la prima nella fase 1 e la seconda nella fase 2). Nel box 3 sono state alloggiare due lampade identiche (con basso flusso luminoso) per garantire le stesse condizioni luminose (uniformità di illuminamento ed illuminamento medio) presenti negli altri box, quando una sola delle altre sorgenti luminose è accesa. Gli utenti coinvolti nel test hanno testato 8 condizioni luminose, ripetendo due volte il box 3 (inconsapevoli che fosse la stessa sorgente). La tabella 2 riassume le sorgenti di luce usate.

**Tabella 2: Tipo di lampada usata e rispettivo box.**

Etichetta	Fase	Box	sorgente
B1S1	I	1	CFL
B2S1	I	2	CFL
B3S1	I	3	LED
B4S1	I	4	CFL
B1S2	II	1	LED
B2S2	II	2	ALOGENA
B3S2	II	3	LED
B4S2	II	4	LED



Nella seguente figura, la radianza normalizzata delle sorgenti usate, misurate nel laboratorio dell'ENEA di Ispra. Si nota la netta differenza tra gli spettri di lampade con diversa tecnologia<sup>18</sup>.

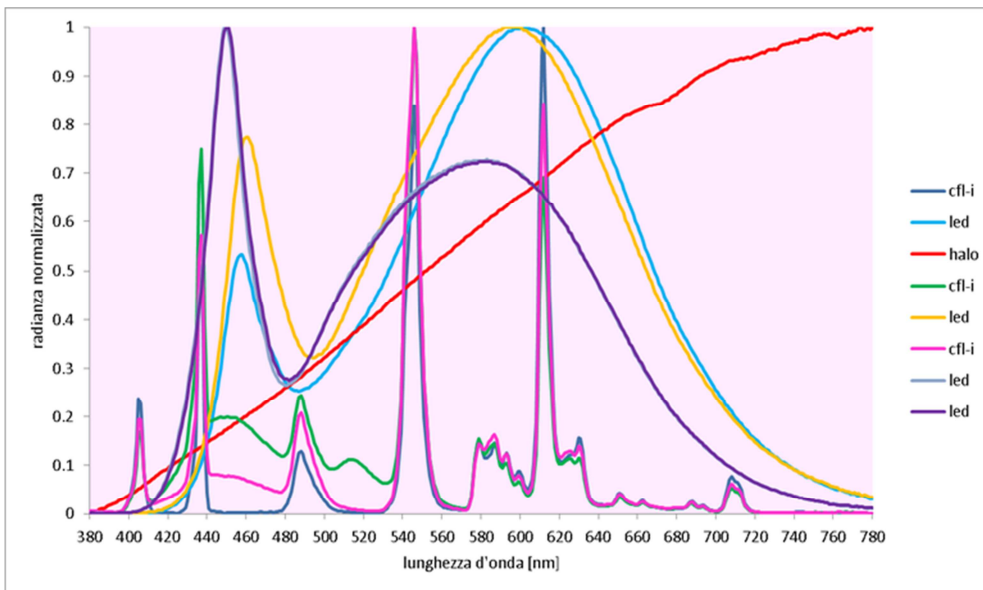


Figura 15: spettri normalizzati delle sorgenti usate nei test

#### 2.2.4 Procedura sperimentale

Prima di cominciare l’esperimento, agli utenti sono state fornite le istruzioni relative alla compilazione del questionario con i dati personali (iniziali di nome e cognome, sesso, età, colore degli occhi, eventuali problemi di vista ed uso di lenti a contatto o occhiali durante l’esperimento) e successivamente, è stato spiegato loro come svolgere l’esperimento.

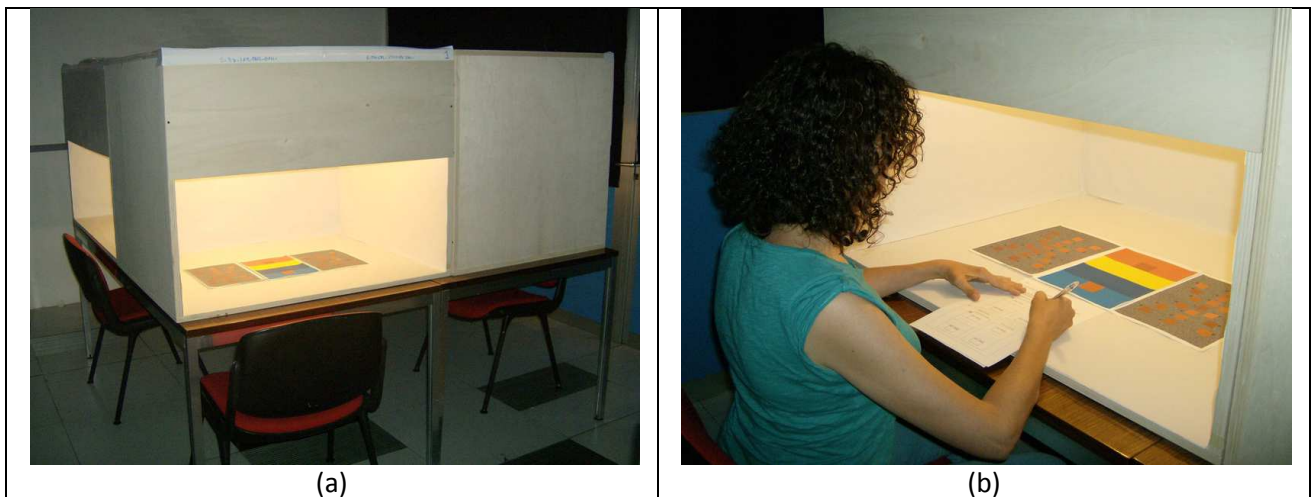
L’esperimento è diviso in due parti: la fase di test e la fase di validazione. In entrambi i casi sono presenti all’interno di ciascun box tre fogli disposti nel seguente ordine:

- A sinistra: foglio con i campioni etichettati dai numeri;
- Al centro: foglio con i campioni target oggetto del test;
- A destra: foglio con i campioni etichettati da lettere.

In figura 16 è possibile vedere il setup dell’esperimento (a) e una fase dello stesso (b).

<sup>18</sup> si notano due spettri praticamente sovrapposti: sono quelli delle due lampade dello stesso modello poste nel box 3





**Figura 16: (a): setup dell'esperimento. In figura è visibile la distribuzione dei 4 box. (b): fase dell'esperimento. Al centro è visibile il foglio con l'illusione di Albers. Ai lati i fogli con i campioni necessari per il confronto.**

Agli utenti è stato chiesto di osservare prima il riquadro arancione di riferimento, su fondo colorato che è posto nella parte alta del foglio centrale, poi di osservare i riquadri posti a sinistra (identificati con un numero) e di associare quello che si avvicinava di più come apparenza a quello di riferimento e quindi trascrivere la scelta sul questionario; quindi ripetere la stessa cosa con i riquadri di destra (identificati con lettere) e trascrivere la scelta sul questionario.

Completata la parte alta del questionario, è stato chiesto di ripetere la stessa cosa osservando il riquadro arancione di riferimento posto nella parte bassa del foglio ed associare il riquadro di sinistra e poi quello di destra che più si avvicina all'apparenza di quello di riferimento e quindi compilare il questionario.

Terminata la prima parte, è stato rimosso il foglio centrale con i riquadri di colore arancione su fondo colorato ed è stato chiesto di ripetere l'osservazione, con le stesse modalità di prima, e di confrontare il nuovo foglio con i due riquadri di colore arancione su fondo grigio con i fogli posti a sinistra ed a destra.

Prima di procedere con l'esperimento è stato chiesto agli utenti di dare risposte spontanee in modo che la componente logica mentale non fosse preponderante, ma che prevalesse la prima impressione visiva. Inoltre è stato spiegato loro che avrebbero effettuato il test con una prima serie di lampade (4 lampade diverse ciascuna collocata in un box) e che dopo una breve pausa tecnica (per consentire il cambio di accensione delle lampade e fare riposare gli occhi degli utenti) avrebbe ripetuto l'esperimento con una seconda serie di lampade (sempre 4 diverse ciascuna collocata in un box). Non è stato detto loro che nel box 3 le lampade sarebbe rimaste le stesse per la prima e la seconda parte del test.

Terminata la fase di istruzione, gli utenti sono entrati nella stanza e si sono seduti ognuno di fronte ad un box. Ogni utente ha osservato i fogli contenuti in ciascun box seguendo il senso di rotazione: box 1, box 2, box 3, e box 4. Terminato la prima serie di osservazioni, dopo una pausa di pochi minuti, hanno continuato il test con la seconda serie di lampade seguendo lo stesso senso di rotazione: box 1, box 2, box 3, e box 4. Prima di cominciare a compilare il questionario gli utenti sono stati invitati ad osservare semplicemente i fogli in modo che vi fosse adattamento cromatico alla lampada nel box.

Si precisa che le lampade della prima serie, essendo lampade CFL, venivano accese 20 minuti prima del test mentre le lampade della seconda serie, essendo LED o alogena, non richiedevano alcuna accensione anticipata.

Gli utenti erano seduti comodi a loro piacimento e liberi di muoversi così da compensare eventuali riflessi interni, in ogni caso molto contenuti, visto l'alto grado di diffusione dell'illuminazione all'interno di ogni box.

La durata media di un singolo test è stata di circa 20 minuti.

### 2.2.5 Sintesi dei risultati

La descrizione dettagliata dell'esperimento è contenuta in [2], in quanto è stata svolta prevalentemente dall'Università di Milano.

L'analisi dei dati mette in evidenza come il cambio dell'illuminante provochi uno spostamento dell'apparenza disomogeneo e non lineare. Una diversa luce cambia l'apparenza di patch identiche in modo diverso a seconda non solo dell'interazione tra riflettanza ed illuminante ma anche del contesto in cui la patch si trova. Anche la diversa distribuzione spaziale con cui sono state organizzate le due scale usate per la determinazione dell'apparenza delle patch campione ha portato a differenze nella valutazione finale dell'apparenza. I risultati hanno quindi evidenziato un'influenza del contesto come ipotizzato, ma la complessità dei dati analizzati ha evidenziato una dipendenza spaziale difficile da caratterizzare e quantificare con modelli semplici o lievi modifiche a modelli preesistenti. La lettura e la comprensione dei dati risultanti dagli esperimenti compiuti suggeriscono di approfondire ulteriormente l'effetto del contesto attraverso ulteriori esperimenti, prima di procedere con lo sviluppo di un nuovo indice di resa cromatica che tenga in considerazione i colori, non solo nelle loro caratteristiche globali di riflettanza, ma anche locali di contrasto spaziale, considerando la loro disposizione all'interno della scena.

Da questo esperimento è emersa chiaramente la necessità di proseguire nella ricerca e nella sperimentazione riguardante le misure di resa cromatica delle sorgenti luminose, tenendo in considerazione il contesto di visione e la distribuzione spaziale dei colori all'interno della scena.

### 2.3 Installazione di Stapelia

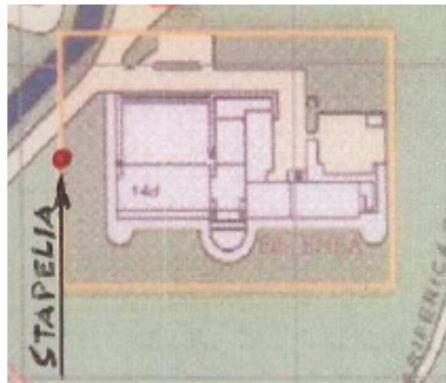
Stapelia è una struttura finalizzata per l'illuminazione per parchi, strade, aree pubbliche in modalità "stand alone", ossia senza l'ausilio di energia elettrica fornita dalla rete, in quanto dotata di pannelli fotovoltaici posti sulla sommità della struttura stessa.

Stapelia è stata già oggetto di sperimentazione e di modifiche funzionali nel corso delle passate annualità. In particolare è stata introdotta una "foglia" che ospita i corpi illuminanti principali, mentre per la "corolla" è stata pensata una semplice retroilluminazione. Sono state apportate anche migliorie ai circuiti di controllo. I test sulla funzionalità di Stapelia si sono sempre svolti con i vari elementi disassemblati. Per dettagli vedere [4] e [5].

Si è quindi pensato di costruire un prototipo completo di palo, da installare presso l'ENEA di Ispra, in vista di future sperimentazioni sul campo. La parte funzionale è stata ulteriormente migliorata, anche in base ai risultati delle prove già eseguite. E' quindi stata completata l'installazione del prototipo, operativo in modalità stand-alone.

L'obiettivo è quello di dimostrare nella realtà, la prestazione e la consistenza della tecnologia sviluppata, la sua forza innovatrice, finalizzata ad un contenimento dei consumi energetici ovvero la capacità di produrre risparmio energetico.

E' stata individuata un'area adatta per l'installazione di un prototipo di Stapelia presso il CR ENEA Ispra nella parte ovest dell'area esterna (vedi figura seguente). La zona è libera e non ostruita edifici, alberi o altri elementi di disturbo per la captazione della radiazione solare da parte dei pannelli fotovoltaici, durante tutto il corso dell'anno (è stata fatta una analisi di soleggiamento del sito).



**Figura 17: Pianta sede ENEA ISPRA**

Nell'area indicata per la sistemazione del lampione è stato predisposto un apposito plinto per la collocazione dell'apparecchio (vedi figura seguente), comprendente:

- 1) scavo di fondazione e posa acciaio per cemento armato;
- 2) anelli in cls prefabbricati adibiti a cassero;
- 3) calcestruzzo per formazione del blocco;
- 4) contropiastre in ferro saldate alla struttura metallica del plinto, con dima da adattare alla piastra del palo di Stapelia



**Figura 18: il plinto**

Per questo esemplare sono state ottimizzate alcune parti elettroniche, è stata sviluppata una struttura meccanica di adattamento rispetto al progetto iniziale (vedi figura 3) e sono stati aggiunti nuovi particolari che completano la struttura.

Rimane invariata la struttura che porta gli elementi illuminanti (foglia) che fissata al palo di sostegno trasforma di fatto l'intera struttura in lampione per illuminazione. Nella parte centrale del "fiore", che è la parte captatrice di energia, è stata inserita un contenitore, all'interno del quale viene sistemata la batteria di accumulo dell'energia prodotta dai pannelli FV. La struttura metallica di sostegno dei pannelli fotovoltaici sono stati riconsiderati in funzione delle dimensioni dei pannelli e sono stati montati quattro dei cinque previsti<sup>19</sup>.

Naturalmente tutte le modifiche di tipo "estetico" rispetto al progetto iniziale sono da considerarsi provvisorie e suscettibili di modifiche in funzione degli eventuali sviluppi futuri.

---

<sup>19</sup> non è stato possibile acquisire il quinto pannello in tempo utile per l'installazione, per problemi con il fornitore. Si è quindi optato per una installazione parziale, per evitare altri ritardi.



Figura 19. modello iniziale Stapelia e modifiche funzionali al contenitore per la batteria

### 2.3.1 Evoluzione di Stapelia e caratteristiche del prototipo installato

Il bilancio energetico del lampione fotovoltaico Stapelia evidenzia una disponibilità energetica che può essere utilizzata per implementare il sistema con dispositivi ausiliari il cui fine può non essere esclusivamente l'illuminazione.

Durante la fase sperimentale, periodo maggio-giugno 2011, è emerso che il bilancio energetico del lampione fotovoltaico Stapelia (pannelli PV-batteria-LED) è positivo; l'energia utilizzata dall'apparecchio durante la fase di accensione (notte) è inferiore all'energia accumulabile dai pannelli fotovoltaici.

E' dunque è stato possibile pensare di dotare Stapelia di dispositivi supplementari con diverse funzioni aggiuntive (smart). Ad esempio:

- Sensori di presenza e di movimento con cui comandare la regolazione della luce;
- Connessione alla rete con sistema Wi-Fi;
- Telecamera per videosorveglianza e monitoraggio traffico tipo:
- Centralina meteo;
- Sistema di monitoraggio ambientale;
- Chiamata d'emergenza tramite satellitare o telefonia mobile;
- Illuminazione supplementare d'accento tipo accensione ciclica di LED RGB.

Il prototipo costruito è stato cablato con un'uscita ausiliaria per l'alimentazione di tali funzioni ed è stata implementata la retroilluminazione della corolla, per ottenere un effetto simile a quello del progetto originale.

Le parti interessate della “nuova Stapelia” alla ingegnerizzazione sono:

- 1) Circuiti di carica;
- 2) Implementazione dell'illuminazione all'interno della foglia;
- 3) Adeguamento del circuito crepuscolare;
- 4) Adeguamento batteria.

Le parti in aggiunta sono (servizi aggiuntivi):

- 5) Illuminazione RGB della corolla;
- 6) Uscita ausiliaria per circuiti di servizio.

In figura un esempio di telecamera utilizzabile per funzioni aggiuntive di Stapelia.



Sensore 1/4" Progressive Scan CMOS - Varifocale 2.8 - 10 mm/F1.7, diaframma DC - Angolo orizz. 22° - 80°  
Illuminazione minima 0,9 - Compressione, H.264 Motion JPEG  
Max risoluz. video (pixel), 1280 x 800 (1 MP) - HDTV 720p  
Frame per secondo, 30 (1280x800) - 30 (HDTV 720p)  
Audio bidirezionale con microfono incorporato, PoE Classe 2  
1input/1output - Motion detection., Audio detection, Tampering alarm., digital PTZ, pixel counter.  
Vandal resistant

**Figura 20: possibile telecamera per Stapelia**

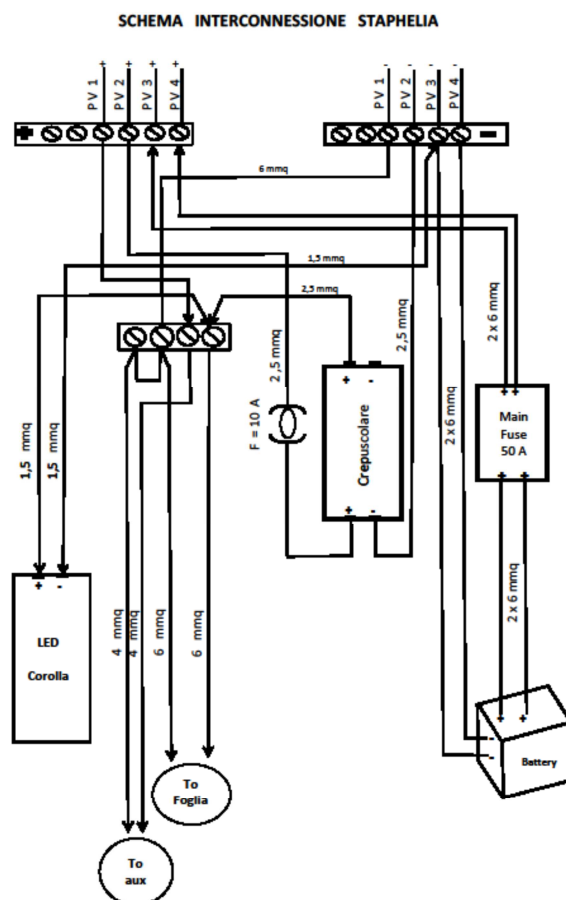
### 2.3.2 Circuiti di carica

Il circuito di carica della batteria, cuore del sistema dal punto di vista energetico, è stato ulteriormente ingegnerizzato al fine di aumentarne l'efficienza.

Ogni pannello fotovoltaico che compone una delle facce di Stapelia ha "on board" il proprio circuito di carica adeguato in modo tale da ridurre al minimo il cablaggio, la dispersione e la caduta di tensione tra pannello, circuito di carica e batteria.

Si è inoltre apportato un efficace cambiamento a livello circuitale impiegando dispositivi attivi di commutazione con bassissimi livelli di tensione di saturazione aumentando così notevolmente il trasferimento di energia dal pannello alla batteria, con un incremento di efficienza del sistema.

Il circuito è alloggiato in box metallico IP68 ed è solidale con il pannello.



**Figura 21: Schema alimentazione**

### 2.3.3 Illuminazione all'interno della foglia

La matrice a LED inizialmente esterna alla struttura “foglia”, di Stapelia è stata ulteriormente protetta con adeguati dispositivi per le scariche elettrostatiche al fine di renderla più robusta agli eventi atmosferici.

Inoltre la struttura della foglia è stata rilavorata per incassare la matrice a LED al suo interno con vetro di protezione, rendendo anch'essa IP68.

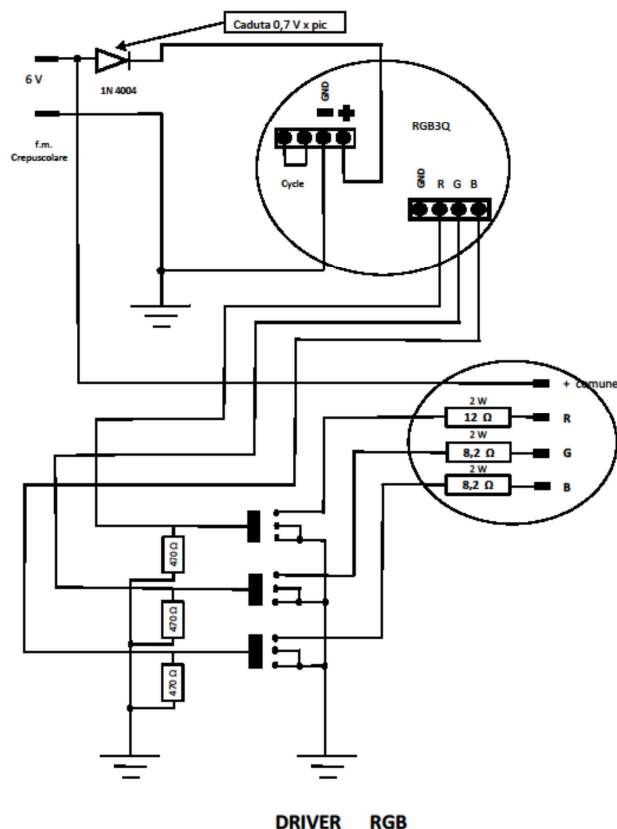


Figura 22: Alimentazione foglia

### 2.3.4 Adeguamento del circuito crepuscolare

Anche questa parte è stata ingegnerizzata al fine di ottenere una commutazione più stabile e decisa con opportuni accorgimenti di isteresi per evitare accidentali accensioni a parziali oscuramenti momentanei; è stato ulteriormente allargato il range di regolazione del crepuscolare e aggiunta la sezione di abilitazione dell'illuminazione della corolla durante l'oscurità.

### 2.3.5 Adeguamento batteria

La collocazione della batteria in un primo momento era prevista in modo diverso. Ora è alloggiata all'interno di Stapelia con apposito box situato sulla flangia di aggancio della corolla col palo di sostegno.

Il box è stato pensato per tenere ben salda la batteria nel punto più delicato del lampione, all'interno del fiore, ed sufficientemente aperto per permettere, nei momenti più caldi dell'estate, un minimo di aerazione naturale.



La batteria è al piombo-gel per trazione, adatta a frequenti cicli di carica/scarica con grandi capacità di scariche profonde senza danneggiamenti. Essa (6 V, 160 Ah) garantisce un'autonomia d'illuminazione di 40 ore consecutive che corrispondono a quattro notti con 10 ore di luce per notte.

Originariamente la scelta era caduta su batterie Ni-MH perché tali batterie sono in grado di immagazzinare notevoli quantità di energia in volumi e pesi ridotti, ma il rapporto prestazioni/prezzo per una 160 Ah è ancora troppo conveniente a favore delle batterie PbSO<sub>4</sub>, per cui si è optato per la soluzione più economica in vista di possibili applicazioni pratiche. E' stata testata praticamente la serie C500 della Sonnenschein da 12V ed i risultati sono stati positivi.

Stapelia normalmente è operativa su cinque petali, ma, come già detto, si è stati costretti ad operare con quattro pannelli funzionanti che si sono dimostrati sufficienti in questa fase di prima sperimentazione<sup>20</sup>.

### 2.3.6 Illuminazione RGB della corolla

E' stato introdotto un circuito PWM per la gestione di 5 LED di potenza RGB con lo scopo di illuminare la corolla stessa nella notte.

Questo circuito ha una sequenza di accensione ciclica dei LED RGB, scritta all'interno di un micro controllore completamente autonoma e si auto-attiva all'accensione di Stapelia stessa disattivandosi automaticamente al sopraggiungere del giorno. La commutazione dei vari colori avviene in dissolvenza lenta al fine di creare un suggestivo effetto sulla struttura stessa.

In figura, la disposizione dei LED RGB sul contenitore della batteria.



**Figura 23: i LED RGB per la retroilluminazione della corolla**

### 2.3.7 Uscita ausiliaria per i circuiti dei servizi ausiliari

Questa uscita deriva direttamente dalla tensione di batteria opportunamente protetta; è sempre presente al fine ai alimentare eventuali circuiti ausiliari che si dovessero applicare a Stapelia.

Nelle seguenti immagini, alcune foto del prototipo.

---

<sup>20</sup> è stato inserito un elemento decorativo al posto del pannello mancante. L'elemento è visibile nella sequenza fotografica

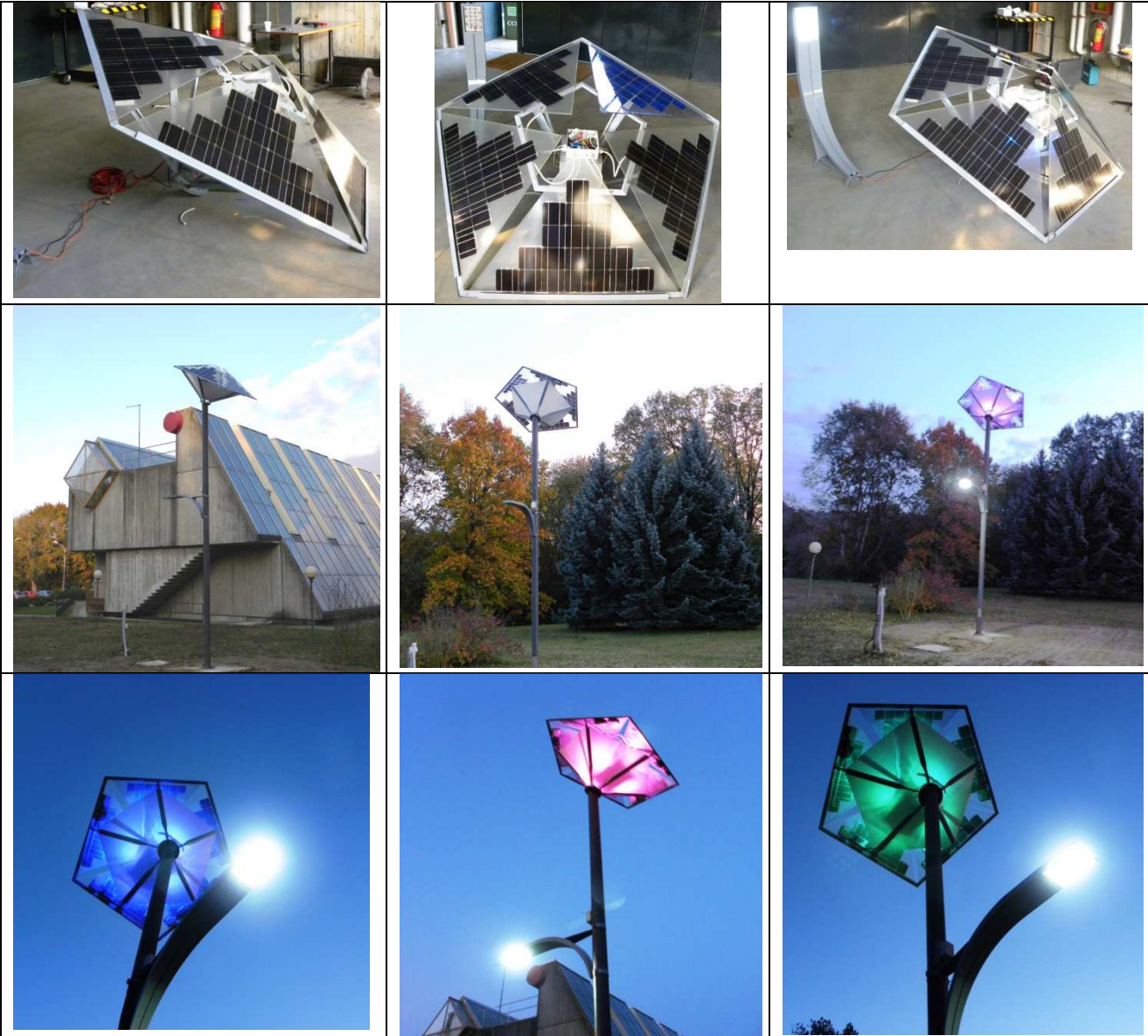


Figura 24: sequenza fotografica Stapelia a Ispra

### 3 Conclusioni

La progettazione del sistema di illuminazione HUMBLEBEE è stata un'attività di ricerca innovativa che ha permesso di analizzare ed utilizzare nuove tecnologie per definire un sistema altamente tecnologico.

Il passo successivo, che consentirà di verificare le prestazioni di tale sistema e quindi di monitorarne il funzionamento, è la realizzazione del prototipo e la sua installazione che avverranno entro la fine dell'anno 2013.

Nel prossimo anno di ricerca, appena il sistema sarà installato, si procederà alla programmazione, alla messa in servizio ed all'avvio dell'attività di monitoraggio che consentirà di verificare le prestazioni energetiche, ambientali ed il corretto funzionamento del sistema di illuminazione HUMBLEBEE.

L'esperimento che riguarda la diversa percezione della resa cromatica in configurazioni spaziali particolari, ha messo in evidenza la necessità di sviluppare una nuova generazione di indicatori di resa cromatica che considerino oltre allo spettro della luce di test, la sua distribuzione spaziale nella scena. Nessuno degli indici di resa cromatica sviluppati fino ad ora presenta caratteristiche di questo tipo.

I risultati hanno evidenziato un'influenza del contesto come ipotizzato, ma la complessità dei dati analizzati ha evidenziato una dipendenza spaziale difficile da caratterizzare e quantificare con modelli semplici o lievi modifiche a modelli preesistenti. La lettura e la comprensione dei dati risultanti dagli esperimenti compiuti, oggetto di questa relazione, suggeriscono di approfondire ulteriormente l'effetto del contesto attraverso ulteriori esperimenti, prima di procedere con lo sviluppo di un nuovo indice di resa cromatica.

Il prototipo di Stapelia, apparecchio fotovoltaico a LED, è disponibile per sperimentazioni ed evoluzioni future.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. "Fosfori remoti per l'illuminazione di Interni", M. Rossi, D. Casciani, F. Musante (Politecnico di Milano), settembre 2013, RdS/2013/113
2. "Metodi sperimentali per la quantificazione dell'indice di resa cromatica di una sorgente luminosa e studio di approcci computazionali alternativi di tipo percettivo" A. Rizzi, C. Bonanomi (Università Milano), L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli (ENEA), settembre 2013, RdS/2013/108
3. "Verso un indice di resa cromatica basato su modelli più efficaci del sistema visivo", A. Rizzi, C. Bonanomi (Università degli Studi di Milano), S. Fumagalli, G. Leonardi (ENEA), settembre 2012, RdS/2012/272
4. , "Progetto Stapelia", A. Balzarotti (Albatech), settembre 2010, RdS/2010/247
5. "Prove sperimentali su nuovo prototipo Stapelia", G. Leonardi, A. Scognamiglio (ENEA), Settembre 2011, RdS/2011/273