Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale
Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

Human-centric lighting

Luce per la salute, il benessere e la produttività delle persone.
Dalla teoria alla sua applicazione

Relatore

Prof.ssa Anna Pellegrino

Candidato

Matteo Cresto

Luglio 2023

Abstract

Le persone oggi trascorrono la maggior parte del loro tempo al chiuso in ambienti costruiti, l'architettura quindi, e le caratteristiche degli ambienti interni, tra cui le condizioni di illuminazione, svolgono un ruolo fondamentale per la salute degli occupanti. La tesi tratta i benefici che la radiazione ottica ha sull'organismo in termini visivi ma soprattutto in termini biologici con effetti sul sistema circadiano. Ne consegue che, all'interno degli edifici, in assenza di illuminazione naturale o in condizioni di scarsa disponibilità della stessa, l'illuminazione elettrica dovrebbe garantire la stessa capacità della luce presente in natura di mantenere sincronizzato il ritmo circadiano, senza però compromettere la sostenibilità energetica degli edifici. Regolando alcune caratteristiche della radiazione luminosa è possibile migliorare lo stato biologico e psicologico delle persone; in ambienti lavorativi al chiuso questo aspetto è di particolare importanza. I sistemi di illuminazione non sono però gli unici responsabili delle condizioni di benessere e comfort degli occupanti, vi partecipano anche le caratteristiche dello spazio fisico, dell'allestimento e delle finiture. Il tema del rapporto tra illuminazione ed effetti sul sistema circadiano (effetti non visivi) è un tema ad oggi non ancora del tutto esplorato e definito. Nella prima parte della tesi sono state pertanto analizzate la letteratura scientifica e le raccomandazioni attualmente disponibili su questo tema. Nella seconda parte è stato fatto un approfondimento sulle tecnologie di illuminazione e di controllo della luce elettrica attualmente disponibili e funzionali a realizzare un sistema di illuminazione dinamico, in grado di rispondere ai requisiti della Human-centric lighting. Vengono inoltre analizzati alcuni casi studio di riferimento, che propongono soluzioni in linea con i principi della Human-centric o integrative lighting. Infine, i principi e le soluzioni esplorate nella prima e nella seconda parte della tesi sono stati applicati in un'ipotesi di riprogettazione dei sistemi di illuminazione delle aule studio della sede del Lingotto del Politecnico di Torino

INDICE:

LUCE 11

Introduzione 11
Evoluzione del concetto 14
Uomo + Luce 17

HUMAN CENTRIC LIGHTING 21

Il sistema di ricezione della luce 22
Risposta umana alla radiazione ottica 27
Sistema circadiano 29
Risposte del sistema circadiano 34
Caratteristiche della radiazione che influenzano le risposte umane 38
Caratteristiche architettoniche che influenzano le risposte umane 44
Human-Centic Lighting 48
Quantificazione della potenza biologica 51
Riferimenti in ambito internazionale: CIE e Protocollo Well 55

71 SISTEMI DI ILLUMINAZIONE E GESTIONE

72 Illuminazione Dinamica
74 Sistemi di controllo dell'illuminazione
Sistemi di controllo dell'illuminazione
95 Human-Centric
97 Double Dynamic Lighting
99 Sostenibilità energetica

105 ESEMPI PROGETTI Human-centric Lighting

121 CASO STUDIO

123 Fasi di Progetto Human-centric Lighting
Progetto per le aule studio del Lingotto
134 Politecnico di Torino

LUCE

Introduzione

Siamo una generazione indoor. L'uomo sta abbandonando lo stile di vita sano all'aria aperta, è ormai coinvolto sempre di più all'interno della società, governato da routine, abitudini, impegnato al lavoro in ufficio e coinvolto nelle comodità e confort che le nuove tecnologie ci offrono. Ma siamo sicuri che tutto questo non ci stia conducendo verso uno stile di vita malsano? Quanto tempo dedichiamo alla nostra salute prendendoci dei momenti per stare all'aperto? Moltissime persone oggi preferiscono passare il proprio tempo in casa. Questo è quello che emerge da numerose indagini condotte in tutta Europa e negli Stati Uniti, perché mai quanto oggi trascorriamo così tanto tempo in spazi chiusi. Viviamo il 90% delle nostre giornate in ambienti interni e senza nemmeno rendercene conto, come dimostrato da un sondaggio condotto nel 2018 da YouGov intervistando ben 16.000 persone, trascorriamo meno di 3 ore al giorno all'aperto. Mediamente ogni individuo trascorre in casa, o in ufficio, a scuola o in altri ambienti confinati ben 22 ore del proprio tempo quotidiano. Questi dati sono stati ulteriormente confermati dal recente episodio pandemico che ci ha costretti nelle case anche il 100% delle nostre giornate rendendo le abitazioni anche luogo di lavoro, scuola, palestra o spazio dedicato a molte diverse attività. Per questo motivo non possiamo più permetterci di vivere il nostro tempo indoor in ambienti spesso malsani.

È importante quindi interrogarsi su quali siano gli aspetti dell'architettura in grado di suscitare le sensazioni e il benessere che si ritrova in natura, quali siano le caratteristiche di un edificio su cui poter intervenire per migliorare il benessere delle persone e il confort degli ambienti interni. Ebbene se consideriamo un edificio come un grande organismo, sono tante le sue parti che possiamo migliorare e una di queste, quella forse più evocativa nell'architettura, è la luce. Se consideriamo la citazione che recita "il carattere per cui essa si distingue dalle altre attività artistiche, sta nel suo agire con un vocabolario tridimensionale che include l'uomo" di Bruno Zevi in de "Saper vedere l'architettura", la Human-Centric Lighting, ovvero un'illuminazione incentrata sui fabbisogni dell'uomo, è un'estensione del concetto all'interno dell'organismo architettonico e per questo svolge un ruolo critico per la salute fisica e psicologica di ogni individuo nello spazio costruito.

La luce, è parte di un'energia illimitata emessa dalla nostra stella e grazie anche ad essa la vita prospera sul nostro pianeta, permette la fotosintesi clorofilliana e regola il ciclo di vita di tutta la fauna della Terra. Quasi ogni essere vivente trascorre il proprio tempo in spazi aperti durante le ore diurne, alla luce del Sole, traendone enormi benefici; la luce naturale è una fonte inesauribile di benessere. Tuttavia, gli effetti benefici della luce non vengono apprezzati quanto si dovrebbe, ad esempio dalle popolazioni che vivono nelle zone climatiche temperate o equatoriali, come sottolinea il detto popolare "Non apprezzi mai le cose che hai finché non le perdi". Lo sanno bene le persone residenti nelle zone polari della Terra dove nel corso dell'anno l'alternanza luce-buio non ha un ciclo regolare quotidiano nell'arco dell'intero anno. Poche ore di luce naturale in inverso e poche ore di buio in estate sono causa di fenomeni di depressione e suicidi.

Proprio perché siamo tutt'ora e saremo in futuro sempre più portati ad una vita al chiuso, sebbene la luce fornita dal Sole rimanga la migliore per il nostro benessere, è necessario che le tecnologie per l'illuminazione si evolvano permettendo di godere in ambienti indoor degli edifici di un benessere il più possibile riconducibile a quello che si sperimenta in ambiente esterno. Non è più possibile accontentarsi solo di un'illuminazione che rispetti dei requisiti in termini quantitativi ma diventa indispensabile migliorare l'illuminazione anche in termini qualitativi per supportare i nostri cicli biologici. Da diversi anni questo argomento è materia di studio e in questi ultimi decenni la sensibilità nei confronti dell'importanza della luce è cresciuta notevolmente, sia in ambito scientifico che nella società civile.

Le recenti scoperte hanno portato alla consapevolezza di effetti legati alla luce che possono essere riconducibili alla visione di ciò che ci circonda o che osserviamo, ma anche di tipo non visivo: la luce non solo ci permette di vedere oggetti e suscitare in noi sensazioni positive o negative, ma è anche lo stimolo che regola i ritmi biologici dell'uomo così come di ogni altro essere vivente. La Human-centric lighting o Integrative lighting ha come obiettivo il benessere indoor delle persone tramite la progettazione dell'illuminazione sia naturale che artificiale per sostenere i bisogni fisiologici delle persone e permetterci di vivere al chiuso con gli stessi benefici di un ambiente all'aperto. Nel corso della tesi vedremo che i principali elementi in un sistema di illuminazione human-centric sono due e insieme permettono di raggiungere questo obiettivo: la sorgente luminosa e il sistema di controllo. L'interazione di questi due elementi fornisce benefici per la salute e il benessere dell'uomo e per l'ambiente sotto forma di risparmio energetico, tema altrettanto importante per dare un contributo al processo globale di riduzione dei consumi. Con interventi di efficientamento in ambito illuminotecnico non si risolve la crisi climatica mondiale ma di certo si contribuisce al miglioramento della prestazione energetica degli edifici.

Evoluzione del concetto

Il termine “luce” in rapporto agli effetti sull’uomo e sugli organismi viventi in generale può risultare impreciso. Per capire il motivo è utile ripercorrere brevemente il percorso degli studi condotti nel tempo sul tema. Nel mondo occidentale, il popolo che più si approcciava alla scienza erano i greci e non potevano essere che loro a iniziare questo percorso di conoscenza. A quel tempo esistevano due correnti di pensiero, a cui vennero attribuiti diversi nomi che identificavano il medesimo concetto. Alcuni credevano che l’occhio umano emanasse dei raggi che a contatto con gli oggetti li rendesse visibili e colorati, altri pensavano l’esatto opposto ovvero che fossero gli oggetti a emanare raggi che interagendo con l’occhio permettevano la loro visione. A sostegno di questa teoria ci furono Pitagora e Aristotele che conoscevano questo fenomeno come la “freccia animata”. Intorno all’anno mille ci furono nuovi sviluppi grazie agli studi del persiano Avicenna che introdusse i termini lumen e lux, le unità di misura della luce tutt’ora in uso. Questi non avevano basi scientifiche ma erano fenomeni che si potevano osservare anche nel il fuoco e dalla luce emessa dagli oggetti. Il concetto dell’emissione di un elemento fisico, ovvero la luce, è stato sostenuto anche da un altro scienziato in questo caso di origine islamica, Alhazen, che come i suoi predecessori credeva nell’esistenza di un agente che veniva proiettato da ogni punto di un oggetto verso l’occhio. Fu però il periodo successivo quello più determinante, il metodo scientifico galileiano diede inizio ad una serie di ricerche che vedeva una divisione di pensiero tra chi sosteneva che la luce fosse generata da onde (Teoria ondulatoria), che vide come maggior sostenitore Christiaan Huyghens e chi invece sosteneva fosse un flusso di particelle (Teoria corpuscolare). Alla fine del XVII secolo, Isaac Newton fu un convinto seguace di quest’ultima teoria. Il suo esperimento più celebre fu la scomposizione dello spettro luminoso tramite l’uso di un prisma, dimostrò che la luce bianca del sole era in realtà composta da molti colori differenti ma non era ancora chiaro come questo fenomeno fosse possibile. Restava l’interrogativo riguardo la propagazione di queste particelle che per Newton avveniva linearmente o come viene definito oggi con moto rettilineo uniforme. Il precedente concetto ondulatorio però ebbe numerosi sostenitori e nel 1800 Thomas Young fece un passo in avanti dimostrando che la luce è caratterizzata da interferenze appoggiando la teoria delle onde.

Figura 1

Isaac Newton – esperimento sulla scomposizione della luce

https://www.andreaminini.org/fisica/luce/la-scomposizione-della-luce-bianca-nel-prisma#l’esperimento_del_prisma_di_newton

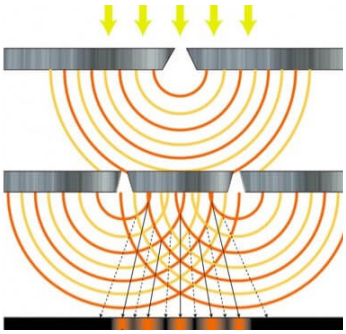


Figura 2

Thomas Young – esperimento “doppia fenditura” dimostra il moto oscillatorio della luce

https://www.chimica-online.it/fisica/esperimento-di-young.htm

Nel XIX secolo ci fu l'ultimo passo prima di arrivare alla nostra attuale conoscenza della luce. Lo sviluppo dell'elettricità e del magnetismo è stato di ispirazione per il lavoro di James Clerk Maxwell. Egli dimostrò i movimenti ondulatori dei campi elettrici e magnetici (Teoria elettromagnetica), lo stesso fenomeno che anni prima erano stati teorizzati da altri scienziati per la luce. Ma nel 1905 Albert Einstein ribalta nuovamente tutti i concetti. Introduce l'effetto fotoelettrico che consiste in elettroni emessi da un metallo illuminato da una luce a frequenza elevate. Mostra come la luce è composta da pacchetti di energia, i fotoni (Teoria quantistica). Solo negli anni 2000 gli scienziati arrivano ad una conclusione: la luce è composta da particelle elementari di energia chiamate fotoni, che si muovono nello spazio con un moto oscillatorio. È avvenuta quindi una fusione delle due principali teorie sulla natura della luce (Teoria di sintesi delle concezioni corpuscolare e ondulatoria). Questo flusso di particellare si muove tramite onde elettromagnetiche generate dall'alternarsi in modo ciclico di campi elettrici e campi magnetici. Ogni onda presenta caratteristiche differenti e fanno sì che venga percepita diversamente e agisca in modo altrettanto diverso sugli oggetti. Esistono quindi grandezze fisiche che ci permettono di leggere e valutare un flusso luminoso: la lunghezza d'onda (λ) espressa in nm o μm, cioè la distanza percorsa dall'onda in un'oscillazione completa, la distanza che intercorre tra due creste dell'onda elettromagnetica; la frequenza (f) misurata in Hz è il numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo. Queste grandezze permettono di misurare un'onda elettromagnetica e quindi di identificare e classificare le stesse all'interno dello spettro elettromagnetico.

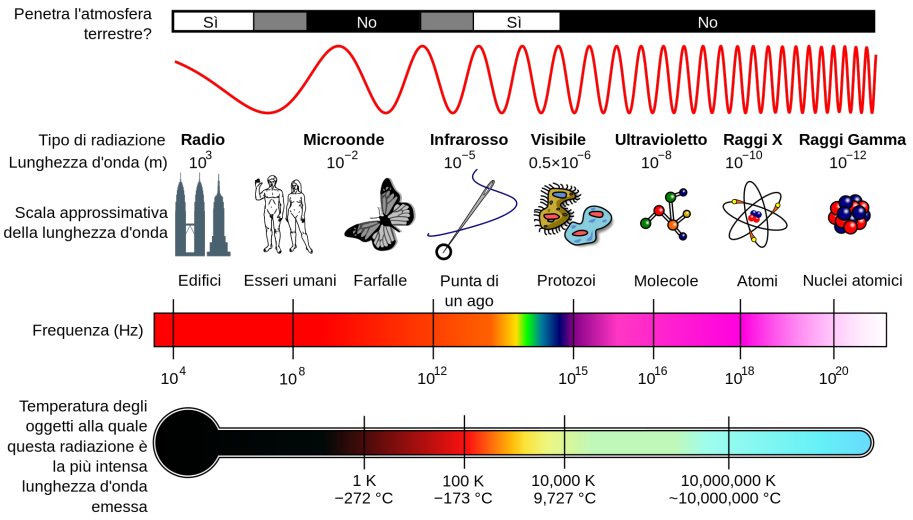


Figura 3

Rappresentazione della radiazione elettromagnetica

https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm

Ecco quindi che si delinea meglio la premessa fatta in precedenza sull'uso improprio del termine "luce". La luce è solo una piccola frazione della radiazione elettromagnetica, compresa nell'intervallo dello spettro che va da 380 nm a 780 nm, cioè è la parte di radiazione elettromagnetica in grado di stimolare il sistema visivo dell'uomo. Andando più nello specifico possiamo però dire che all'interno della radiazione elettromagnetica, ad avere effetti sull'uomo è il range della radiazione ottica ovvero la parte che intercorre tra i raggi X e le onde radio. Quando parliamo invece di radiazione elettromagnetica nella sua interezza intendiamo anche gli effetti chimici, termici o di qualsiasi altro tipo in tutti gli esseri viventi e nei materiali. Sebbene sia quindi incoerente utilizzare il termine luce in modo generico per i motivi descritti, nei capitoli che seguono verrà utilizzato in modo semplificato "luce" per riferirci alla parte della radiazione responsabile di tutti gli effetti sull'uomo.

Uomo + Luce

Nel corso del tempo in cui i fenomeni della luce venivano studiati da scienziati per dare delle risposte ai quesiti sulla sua natura, le nostre città, le botteghe e le abitazioni avevano la necessità di essere illuminate e se per secoli e millenni l'illuminazione era solamente di origine naturale tramite il Sole o dal fuoco, dopo la scoperta dell'elettricità, le cose cambiarono radicalmente. Fino a circa due secoli fa la maggior parte del tempo le persone lo trascorreva all'aperto e anche il lavoro si svolgeva per lo più all'esterno degli edifici. L'economia era basata su attività agricole, di commercio, costruttive o artigianali, poche di queste richiedevano di essere svolte al chiuso e in tal caso si limitavano alle ore diurne, dall'alba al tramonto. Con l'invenzione della luce elettrica e lo sviluppo industriale, si svilupparono anche le tecnologie costruttive, le città si ampliarono e aumentò anche il numero delle persone che vi si trasferivano, abbandonando la campagna, stravolgendo le abitudini di lavoro e spostando le attività della maggior parte degli individui all'interno degli edifici. Sulla base di questo nuovo stile di vita è stato chiaro che l'architettura iniziava a svolgere un ruolo molto importante sulla salute e il benessere degli occupanti, in quanto disciplina con lo scopo di costruire e organizzare lo spazio. In passato nel secolo scorso, ci furono grandi aziende che prestarono particolare attenzione a questo aspetto ma rimasero dei casi isolati sebbene ancora oggi siano spesso riconosciuti a livello internazionale, come ad esempio l'architettura Olivettiana, presente ad Ivrea, con le sue fabbriche totalmente vetrate per illuminare il più possibile i reparti di lavoro tramite luce naturale. Si era capito che, svolgendo attività indoor, l'attenzione alla luce, specie quella del Sole aveva un impatto positivo sui lavoratori e portava ad una migliore qualità del lavoro svolto.

Tutti questi momenti storici che segnarono degli importanti sviluppi nella società e nelle abitudini delle persone vengono indentificati in tre periodi: età preindustriale, industriale e post industriale. Nel primo periodo, la luce diurna era la fonte primaria di illuminazione quando la forma degli edifici era concepita per soddisfare i bisogni di aria, calore e luce al loro interno. Durante il corso della storia ci furono alcune popolazioni che costruivano le loro case con terrazze e spazi aperti verso il cielo per

ricevere la radiazione del Sole sia per illuminare che per riscaldare oppure sfruttavano la conformazione naturale del terreno addossando gli edifici a scogliere o all'interno di canyon che fornivano ombreggiamento in estate o nelle ore del giorno più calde. Erano dei precursori dell'architettura bioclimatica. Una cultura simile si ritrova anche nell'antica Grecia e nei Romani dove le case erano composte da due sezioni, una meridionale che veniva utilizzata nell'inverno e una settentrionale abitata nei mesi caldi estivi. In questo modo si poteva fruire degli ambienti interni a seconda delle condizioni climatiche e stagionali per avere sempre condizioni di confort ottimali. I Romani fecero un ulteriore passo in avanti introducendo un concetto di proporzione tra le dimensioni delle aperture finestrate a seconda della attività interne svolte e degli ambienti.

Figura 4

Kaufmann house
Farnworth house
Villa Savoye

Nel secondo periodo, già dal 1814, l'invenzione dell'illuminazione elettrica ha cambiato le città ma la vera rivoluzione avviene nel 1879 grazie a Humphry Davy e Thomas Edison con la lampada ad incandescenza illuminando la notte di New York per la prima volta in un quartiere di Wall Street. Il cambiamento della struttura sociale e del lavoro, in seguito a questa invenzione, ha determinato la realizzazione di nuovi edifici per le attività lavorative come fabbriche ed uffici dove i lavoratori vi soggiornavano per la maggior parte della giornata. Nell'età industriale, si è sviluppata la produzione manifatturiera e la popolazione si è trasferita dalla campagna alle città per cercare lavoro. Le richieste di abitazioni ebbero un enorme aumento portando ad una urbanizzazione incontrollata con aree densamente edificate che si affacciavano su strade strette, dove le condizioni igieniche erano terribili e l'esposizione alla luce solare non era garantita. Questa situazione drammatica persistette fino al XX secolo con la riscoperta del dialogo tra architettura e ambiente grazie all'intervento di architetti oggi molto noti. Gli esponenti di maggior spicco come ad esempio Frank Lloyd Wright, Le Corbusier, Louis Kahn, Mies van del Rohe, Alvar Aalto e molti altri hanno riportato l'orientamento del sito, la ventilazione naturale e l'illuminazione diurna fattori primari nella progettazione come già avveniva in passato ma reinterpretati grazie alla nuova possibilità costruttive del calcestruzzo armato. Con questa invenzione furono sviluppate le strutture a telaio degli edifici che rese possibile svuotare le pareti riducendo gli elementi di chiusura murari portando aria e luce all'interno degli ambienti. Molto hanno contribuito in questo i *cinque punti dell'architettura* teorizzati da Le Corbusier.

Nella metà del '900 però, l'idea che l'illuminazione elettrica potesse sostituire quella naturale del Sole come fonte primaria di luce era diffusa nelle città: *"It is inevitable that artificial light must become the primary light source where efficiency of vision is combined with an economic analysis of building function. Natural lighting is becoming a luxury"* [19] È inevitabile che la luce artificiale diventi la fonte primaria di illuminazione quando a confrontarsi con l›efficienza della visione ci sono maggiori possibilità economiche legate alla funzione dell›edificio. L›illuminazione naturale era diventata un lusso e questa linea di pensiero ha portato alla realizzazione di fabbriche e scuole senza finestre.

19. Phillips, D. Lighting in Architectural Design; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1964

L'ultimo periodo post-industriale rivede un ritorno al contatto con la natura e la sostenibilità ne fa da padrone ricercando l'uso di fonti di energia rinnovabile per contribuire a rallentare la crisi energetica e ambientale emerse durante i convegni e conferenze degli anni '90 e 2000 in tutto il mondo. Essendo che il settore edile rappresenta una fetta cospicua dei consumi totali di energia, la necessità di ridurre questi consumi ha decretato un'inversione di tendenza. Ma la sostenibilità non riguarda solamente la salvaguardia dell'ambiente ed energia green ma anche il wellness, il benessere delle persone che vivono e fruiscono uno spazio architettonico è un punto cruciale per garantire gli aspetti di "safety" e "security". Tra le "nuove" necessità che guidano le scelte progettuali in architettura troviamo naturalmente l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione e naturalmente per l'illuminazione ma anche scelte progettuali che promuovono il confort individuale in ambienti indoor. Nel ramo del lighting design aumenta l'impegno di associazioni specializzate nel settore per diffondere la nuova consapevolezza dell'importanza di approcciarsi ad un sistema di illuminazione con finalità qualitative allo stesso livello del tipico approccio quantitativo affermatosi fin ora come principale linea guida nella progettazione illuminotecnica. Già da quarant'anni si sono susseguite ricerche scientifiche in corso ancora oggi che ci hanno condotto ad un ampliamento delle nostre conoscenze e competenze in merito alle risposte dell'uomo agli effetti della radiazione luminosa di tipo visivo ma anche e soprattutto di tipo biologico non visivo. Queste scoperte non sono state semplici e sono tutt'altro che concluse, la comprensione della natura della relazione e il rapporto tra benessere dell'uomo e luce si è sviluppata lentamente ed è in continua evoluzione grazie al lavoro degli studiosi del settore.

HUMAN CENTRIC LIGHTING

Lo studio della radiazione ottica e gli effetti che ha sull'uomo rappresenta quindi un tassello essenziale in architettura essendo gli edifici il luogo principale in cui viviamo, lavoriamo, ci svaghiamo, trascorriamo gran parte del nostro tempo. Contribuisce alla sostenibilità ambientale ed economica e al benessere delle persone. Ma per comprendere meglio le azioni da seguire in una progettazione dell'illuminazione interna che sia realmente benefica anche dopo ore di esposizione è necessario comprendere tutte le fasi della percezione di tale radiazione. Definita la natura della luce, o per meglio dire la radiazione ottica, è l'occhio il responsabile della sua percezione e più precisamente le cellule fotosensibili contenute al suo interno, i fotorecettori.

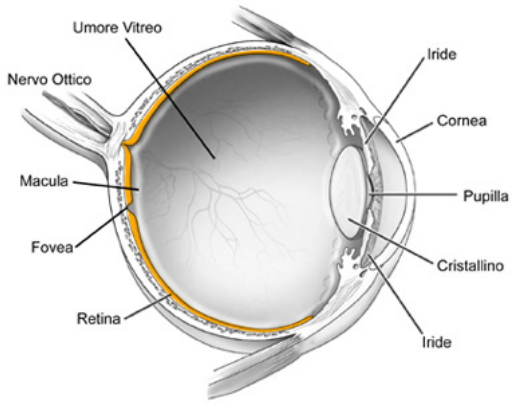


Figura 5

Sezione dell'occhio umano
https://www.microchirurgiaoculare.com/anatomia-dell-occhio/

Il sistema di ricezione della luce

L'occhio

Parallelamente alla scienza che si occupava dello studio della radiazione elettromagnetica, un'altra scienza studiava come l'occhio umano percepiva la luce: "Gli effetti fisiologici della luce sono mediati dall'occhio negli esseri umani. La luce che entra nell'occhio stimola i fotorecettori retinici che convertono le informazioni fotiche in segnali neuronali, che vengono trasmessi attraverso le cellule gangliari a varie regioni del cervello" [01]. L'anatomia dell'occhio è composta da diverse parti che, collaborando tra loro, sono in grado di assorbire la radiazione, tradurla in un linguaggio elettrochimico e inviare lo stimolo al nostro sistema nervoso centrale. Come in una macchina fotografica, l'occhio tramite il suo obbiettivo costituito dalla cornea, la pupilla e il cristallino proiettano la luce sulla retina, lo strato posteriore dell'occhio che contiene i fotorecettori e le cellule nervose, trasforma il segnale e lo invia tramite il nervo ottico al cervello che elabora i dati. "La via visiva impiega il nervo ottico, il chiasma è il tratto che invia informazioni alle strutture coinvolte nella formazione dell'immagine, tra cui il nucleo genicolato laterale (LGN), il foglietto intergenico (IGL) e la corteccia visiva del lobo occipitale. Il tratto retinoipotalamico (RHT) è responsabile del trasporto di informazioni luminose dalla retina ai nuclei soprachiasmatici (SCN) nell'ipotalamo. L'SCN funge da orologio biologico in mammiferi e ha numerose connessioni a valle con altre strutture del sistema nervoso centrale, tra cui il midollo spinale e il cervello (ad esempio setto, talamo, mesencefalo e altre regioni dell'ipotalamo)." [01] È la retina quindi a contenere il segreto della visione che avviene grazie ai fotorecettori retinici, i responsabili della funzione visiva e degli effetti non visivi sull'organismo. È importante precisare ora che tutti i fotorecettori vengono stimolati simultaneamente e contribuiscono collettivamente ad influenzare le risposte umane sia visive e sia

1. Alessandra Giacomina Ferruccia Casetto, Effetti visivi e non visivi della luce sull'uomo: aspetti teorici e implicazioni progettuali, 2013

non visive alla radiazione luminosa ma in misura ed in percentuale differente. Sebbene ogni tipo di fotorecettore è incaricato di percepire una specifica parte della radiazione, è errato dichiarare che alcuni influiscano solo sulle risposte visive e altri solo su quelle non visive in modo indipendente.

Si è sempre pensato che nel nostro organo visivo ci fossero due tipi di fotorecettori: i coni, di cui ne esistono tre tipi diversi, e bastoncelli, raggruppati come RGC; ora sappiamo invece che esiste un terzo fotorecettore molto diverso, scoperto due decenni fa: ipRGC è il nome di queste cellule. Ciascuno di loro contiene un pigmento diverso per le sue caratteristiche chimiche, funzionali e per la capacità di assorbire lunghezze d'onda differenti. I pigmenti visivi, contenuti nei coni e bastoncelli, hanno la capacità di modificare la propria struttura molecolare dopo aver assorbito i fotoni di luce e produrre sostanze chimiche che stimolano il sistema nervoso, avviene una reazione fotochimica. Durante questo processo avviene una reazione fisica di sbiancamento del pigmento tramite cui il cervello riceve le informazioni relative alla luminosità degli oggetti: tanto più è elevato il grado di luminosità, tanto più il più il pigmento subirà uno sbiancamento che produrrà impulsi nervosi più frequenti permettendo di determinare l'intensità luminosa dell'oggetto. Successivamente il pigmento ritorna al suo stato iniziale e il ciclo si ripete anche perché, in caso contrario, ci ritroveremmo incapaci di vedere in poco tempo.

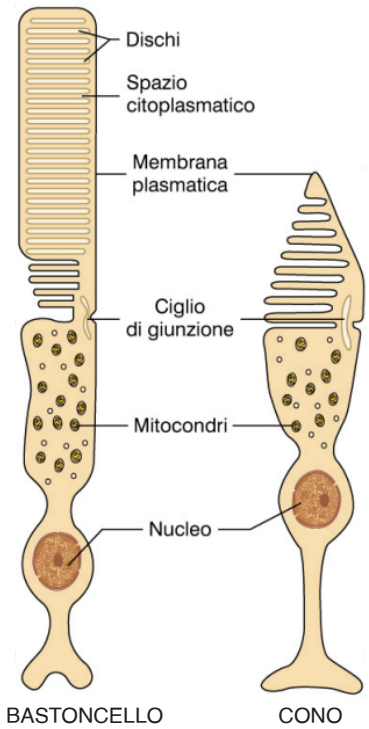


Figura 6

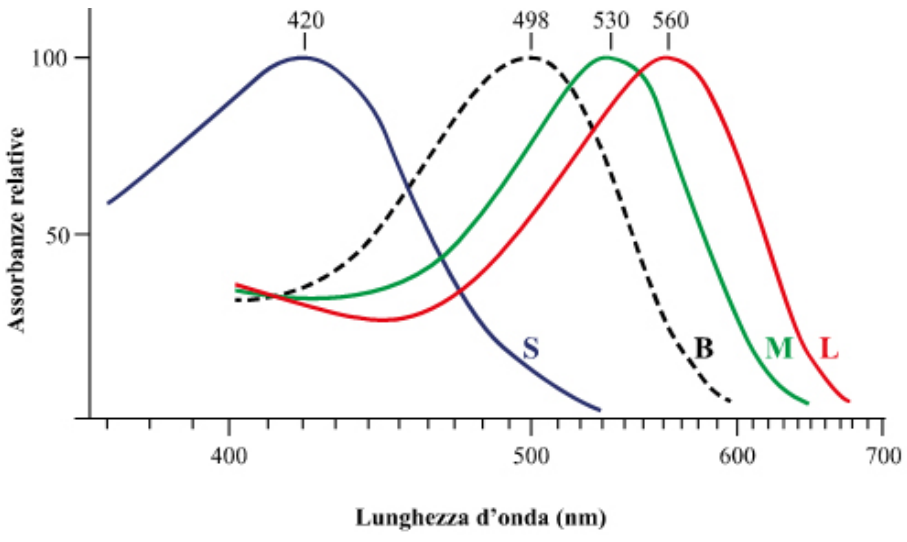
I fotorecettori retinici
https://e-l.unifi.it/pluginfile.php/702086/mod_resource/content/1/La%20fotorecezione.pdf

I Bastoncelli

I quattro fotorecettori responsabili principalmente della funzione visiva svolgono compiti differenti. La visione vera e propria che permette di definire i contorni degli oggetti osservati è svolta dai bastoncelli e lo si può dimostrare in situazioni di penombra quando i colori perdono di vivacità ma distinguiamo ancora le forme in modo nitido, ci permettono una visione notturna (visione scotopica). Il pigmento in questione prende il nome di rodopsina ed è molto più sensibile rispetto ai pigmenti dei coni, questa sensibilità è misurata con un picco a 510 nm di lunghezza d'onda che all'interno dello spettro visibile si traduce nel colore verde-blu mentre le risposte a lunghezze sopra a 600 nm, cioè di colore rosso, sono quasi nulle. Proprio per questo motivo quando le giornate tendono verso le ore serali e la luce diminuisce, i colori caldi ed in particolare il rosso sono i primi a scomparire dalla nostra vista tendendo al grigio.

I Coni

A definire la percezione dei colori intervengono principalmente i coni che al contrario dei precedenti sono più attivi in condizioni di luce diurna (visione fotopica) e si differenziano in tre tipologie differenti per le loro caratteristiche di sensibilità spettrale: il cono-S ha un picco di sensibilità a 430 nm, blu; il cono-M ha un picco di 530 nm, verde; infine il cono-L con il picco a 560 nm è più sensibile al rosso. Le curve di sensibilità di ciascun pigmento sono ampie e si sovrappongono parzialmente tra loro, così facendo, quando un flusso luminoso stimola la retina, si attivano in percentuali diverse tutti e tre questi fotorecettori permettendoci di identificare tutto lo spettro dei colori e il colore dell'oggetto. È doveroso sottolineare e definire meglio che cosa si intende per percepire i colori, i coni non ci fanno vedere i colori bensì assorbono e selezionano le diverse lunghezze d'onda della radiazione riflessa dagli oggetti che il nostro sistema nervoso associa a dei colori, gli oggetti infatti non hanno un "colore" bensì trattasi di una parte della radiazione riflessa dal



LEGENDA

- *Bastoncello*
- *Cono S*
- *Cono M*
- *Cono L*

Figura 7

Curva di assorbimento dei fotorecettori retinici
https://www.daltoneyes.it/cos-e-il-daltonismo_la-visione-umana.html

Figura 8

Sintsi additiva e sottrattiva dei colori.
https://bazardelpittore.wordpress.com/teoria-del-colore/

corpo stesso che ci permette di percepirne la colorazione. Per spiegare meglio questo concetto dobbiamo introdurre la teoria dei colori che spiega come dai tre colori primari si ottengono i secondari e complementari facendo la distinzione tra due diverse interpretazioni concettuali. L'interpretazione secondo la sintesi additiva considera come colori primari il rosso, verde e blu (RGB) che sono anche gli stessi della massima sensibilità dei fotorecettori e proiettando un fascio di luce per ognuno di questi colori otteniamo una luce bianca. Dall'altra c'è un'interpretazione secondo la sintesi sottrattiva, in questo caso i colori primari sono il ciano, magenta e giallo (CMYK) e che rappresentano i colori secondari della teoria additiva e viceversa. In questo caso mescolando i colori primari otteniamo il nero e quindi alla sottrazione del colore dei pigmenti. Per capire meglio come i diversi coni si attivano simultaneamente e ci fanno vedere gli oggetti colorati è sufficiente fare l'esempio del confezionamento di una vernice, una gialla e una ciana. La vernice gialla assorbe maggiormente le lunghezze d'onda nello spettro del blu e riflette quelle gialle, arancio, rosso e verde; la vernice ciana assorbe invece le radiazioni di lunghezze d'onda gialle e riflette quelle viola, blu e verde. Entrambi i colori riflettono la radiazione verde che è il colore che percepisce il nostro occhio nella miscelazione dei due composti.

Gli ipRGC

I fotorecettori, non sono solo responsabili della visione della radiazione ottica ma, dalle recenti scoperte, sono in grado di influenzare e regolare i cicli biologici del nostro organismo agendo sulle risposte non visive e i principali responsabili sono gli ipRGC. Questi fotorecettori retinici sono intrinsecamente fotosensibili come i precedenti e composti da cellule gangliari che contengono la melanopsina. Gli studi sin ora condotti mostrano una interazione complessa tra i classici fotorecettori e gli ultimi scoperti, in termini semplificati lo definiamo come il fotorecettore maggiormente responsabile delle risposte circadiane e sono più sensibili alle lunghezze d'onda corte (blu), caratterizzati da una sensibilità spettrale che ha il picco a 490 nm (ricordando che lo spettro visibile all'uomo è compreso tra 380 e 780 nm). Per questo motivo le sorgenti luminose, con una distribuzione spettrale a lunghezze d'onda più corte, sono in grado di stimolare e modificare il sistema biologico interno.

Nonostante i fotorecettori siano i primi responsabili della visione, la loro distribuzione all'interno sulla retina permette di avere delle differenze di sensibilità. È stato dimostrato che la retina inferiore, più di quella superiore, è in grado di stimolare gli iprgc e lo stesso accade tra la parte nasale e laterale, pertanto la parte della retina che attiva maggiore questi fotorecettori è la inferiore nasale. Naturalmente questo può variare significativamente a seconda di dove si rivolge lo sguardo, da una direzione all'altra o alzandolo e abbassandolo. Inoltre guardare fuori da una finestra produrrà uno stimolo luminoso biologicamente più potente che rivolgere lo sguardo su una parete interna scarsamente illuminata.

Gli obiettivi di questi studi sono quelli di identificare e definire le cause e gli effetti della radiazione sull'organismo umano e all'occorrenza fornire degli standard univoci per poter realizzare un'illuminazione interna degli edifici che porti benefici agli occupanti. Finora questi valori hanno sempre dato un quadro di riferimento quantitativo della luce in ambiente ma purtroppo oggi, per il tempo che trascorriamo al chiuso, non è più sufficiente. Si delinea sempre di più l'esigenza di definire meglio i parametri legati all'illuminazione in grado di dare risposta ai fabbisogni biologici dell'uomo che fino ad ora non sono stati presi in considerazione. Sono necessari dei valori di riferimento per migliorare gli aspetti qualitativi dell'illuminazione per le risposte biologiche. Complessivamente esistono due tipi di risposta dell'uomo a questi due diversi approcci e sono rispettivamente gli effetti visivi e gli effetti non visivi, questi ultimi ancora in fase di studio.

Risposte umane alla radiazione ottica

Effetti visivi

Una risposta visiva è una risposta occhio-cervello che consente la vista, il contributo alle prestazioni visive, l'esperienza visiva, comprese le risposte emotive e il comfort visivo. queste risposte sono suscitate dall'elaborazione del nostro cervello degli impulsi inviati dai fotorecettori in particolare dai coni e bastoncelli. La risposta visiva è definita dalle seguenti qualità luminose: una direzionalità dell'illuminazione riferita al flusso luminoso e una gerarchia di illuminazione che modella la luce degli oggetti portando ombre distinte che migliorano la tridimensionalità. L'atmosfera percepita è definita come l'esperienza soggettiva e l'effetto generato sull'essere all'interno di uno spazio architettonico, in relazione al benessere psicologico e all'esperienza visiva. Comunemente ci relazioniamo con la luce per gli effetti visivi che suscita, in quanto è più immediato definire una luce buona o cattiva a seconda del nostro gradimento di illuminazione interna. In altre parole, l'esperienza visiva corrisponde alla risposta percettiva agli ambienti illuminati cioè le emozioni e le sensazioni che evoca: rilassamento, spaziosità, ecc. Inoltre poiché è più facile definire una situazione di disconfort, un ambiente visivamente confortevole è un ambiente che non crea disagio visivo. L'illuminazione visiva ha l'obiettivo di illuminare e/o valorizzare gli ambienti e contribuire all'estetica di un edificio e, in questo caso, l'illuminazione ha lo scopo di generare delle emozioni nell'osservatore. Ma il sistema illuminotecnico pone l'attenzione anche su altri aspetti legati alla visione altrettanto importanti di tipo funzionale concentrandosi sul confort visivo in un ambiente per svolgere le attività quotidiane. Come detto una cattiva illuminazione è più facile da identificare in quanto può causare affaticamento della vista se è troppo fioca oppure situazioni di abbagliamento cioè il risultato di eccessivi contrasti di luminanza all'interno del campo visivo dell'osservatore dalla luce solare o dal cielo luminoso ma anche derivata da sorgenti elettriche. Per valutare la corretta illuminazione in ambiente per sostenere gli effetti visivi esistono ad oggi tabelle e normative che guidano un progetto di illuminazione, questo grazie anche al fatto che ogni essere umano risponde in modo simile alla luce tramite gli effetti visivi. I punti chiave per la sua valutazione sono la quantità di luce su un

piano orizzontale e la sua omogeneità sulle superfici di lavoro. La norma che guida la progettazione dell'illuminazione in ambienti lavorativi è la EN 12464-1 aggiornata nel 2021.

Effetti non visivi

Nonostante gli aspetti visivi siano saldamente studiati e consolidati tramite standard che garantiscono un corretto studio dell'illuminazione all'interno degli edifici, esistono ulteriori aspetti della luce che possono portare a conseguenze negative sulla salute delle persone che trascorrono molto tempo al chiuso, sono gli effetti non visivi. Le risposte non visive possono anche essere chiamate" non image forming" (NIF) oppure risposte circadiane con effetti biologici ed effetti fisiologici. A differenza di quelle visive, sono gestite principalmente dagli ipRGC che sono in grado di trasformare un segnale luminoso in segnale neurochimico attraverso la melatopsina, una proteina sensibile alla luce. Quando leggiamo il termine "melanopsina" o "risposta melanopica" si sta parlando della risposta intrinseca delle cellule ipRGC. Quando invece si usano i termini "ipRGC", "risposte ipRGC" o "segnali ipRGC" ci si riferisce alle risposte sia intrinseche che estrinseche combinate. Questi effetti sono influenzati dal sistema visivo tramite i fotorecettori dove, in questo caso, gli iprgc ricevono input dai coni e bastoncelli.

Sappiamo ora che lo stimolo luminoso è direttamente connesso con la soppressione di melatonina cioè l'ormone intrinsecamente connesso alla sincronizzazione del ritmo circadiano, la luce infatti è il fenomeno che più di tutti influisce sulla sua regolazione. Questo sistema indicato in modo generico come risposta biologica, si riferiscono al sistema circadiano, un processo interno che controlla le risposte neuroendocrine cioè la regolazione della produzione ormonale, come la melatonina, e le risposte neuro comportamentali riferite alla relazione tra sistema nervoso e comportamento. A loro volta questi processi interni sono in grado di generare delle risposte fisiologiche più o meno evidenti negli individui, controllano molti aspetti del benessere fisico e psicologico e sono meno evidenti delle risposte visive. Essi vengono comunemente associati ad altri stati fisici o ad altri eventi avvenuti nel corso del giorno e inoltre si verificano in tempi posteriori rispetto al momento dell'esposizione luminosa. Anche per questo motivo è più difficile valutare se la luce è buona o cattiva per sostenere le risposte non visive e di conseguenza il regolare ritmo circadiano.

Sistema circadiano

Ogni mammifero, ma più nello specifico ogni essere umano, segue dei cicli che si ripetono quotidianamente con una durata di circa 24 ore, ogni cellula del corpo ha dei ritmi naturali guidati dal nostro orologio naturale scientificamente denominato orologio circadiano cellulare. Esso regola il metabolismo cellulare, le risposte immunitarie, la funzione mitocondriale e la riparazione del DNA. Altri studi recenti hanno dimostrato che al di là di questo orologio del nostro corpo, l'SCN (nuclei soprachiasmatici) insieme a una rete di altri orologi negli organi periferici, coordina varie funzioni biologiche, compresa la temperatura corporea interna (CBT), livelli ormonali (ad esempio melatonina, cortisolo), modelli di metabolismo energetico, cicli riproduttivi e variabilità della funzione immunitaria nel corso della giornata.

Ma che cos'è che mantiene questo orologio sempre sincronizzato? La luce è principale responsabile dei ritmi circadiani umani e questo timer a sua volta permette di avere una regolazione circadiana stabile. Questo delicato equilibrio però è molto suscettibile all'esposizione luminosa e ad altri fattori esterni che sono le cause primarie di tanti studi che si occupano degli effetti biologici. Basta infatti un solo e breve impulso di luce per disturbare questo delicato sistema e spostare l'orologio in avanti e sia l'entità che la direzione dello spostamento è direttamente proporzionale ai tempi di somministrazione della luce. Ad esempio, la radiazione con una potenza più elevata all'inizio della notte biologica cioè durante le ore buie del giorno, provoca un ritardo nei ritmi circadiani: un anticipo di fase porterà un anticipo del sonno mentre un ritardo di fase, viceversa, ritarderà questo evento. Infatti la luce durante le ore notturne biologiche, luce elettrica, può essere la causa dell'aumento dei disturbi del sonno e insonnia: la melatonina, ormone responsabile di questi fenomeni del sonno, è intensamente soppressa da alti livelli di luce nella maggior parte degli individui che hanno condotto sperimentazioni. I dati utilizzati per queste ricerche della relazione tra impulsi luminosi e soppressione di melatonina comportano la raccolta di sangue, saliva o urina durante la notte quando si riscontra una maggior percentuale dell'ormone in individui sani.

Quasi tutto quello che conosciamo sul sistema circadiano umano si basa su studi dell'impatto della luce sui soggetti e sulla produzione della melatonina. Essa circola nel flusso sanguigno ed è facilmente assorbita da tutte le singole cellule del nostro corpo, fungendo da segnale di regolazione del tempo durante l'intero giorno in tutto il corpo. Quando la luce viene assorbita dai fotorecettori retinici tramite i fotopigmenti ipRGC segnala l'ora biologica ai nuclei soprachiasmatici (SCN) dell'ipotalamo per sopprimere la produzione di melatonina da parte della ghiandola pineale. La melatonina infatti aumenta lo stato di sonnolenza e per questo motivo la sua soppressione comporta l'aumento dello stato di veglia. La sensibilità spettrale dei fotorecettori ipRGC, maggiormente responsabili della riduzione dell'ormone in questione, ha un picco a 460 nm e una banda di assorbimento larga 110 nm, valori a metà della sensibilità massima verificati da due studi differenti che riportano quasi gli stessi risultati [24].

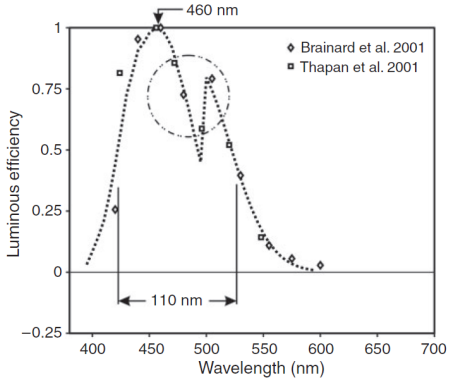
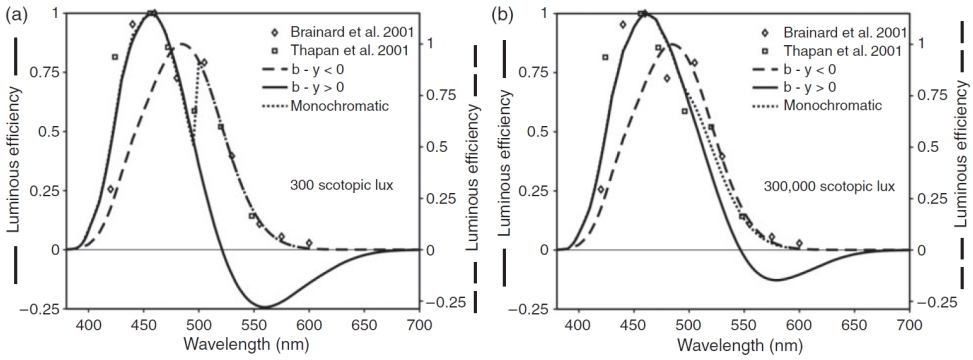


Figura 9 [24]

Alla riduzione della melatonina e allo stimolo circadiano contribuiscono tutti i fotorecettori come già citato in precedenza in quanto tutti hanno una sensibilità spettrale. Nessuna singola cellula retinica, comprese le ipRGC, possono essere responsabili della foto trasduzione circadiana: i risultati di alcuni esperimenti che utilizzano stimoli elettrofisici laser mostrano che gli assioni relativi agli ipRGC sono i principali fotorecettori che influenzano l'orologio biologico mentre i dendriti, relativi sempre agli ipRGC, ricevono degli input indiretti provenienti dai coni e dai bastoncelli più distanti. Anche gli effetti visivi supportano la teoria quando la sensibilità del sistema visivo aumenta con un'esposizione ad uno spettro con lunghezze d'onda più corte (visivamente tendenti al blu) e/o con intensità maggiori.

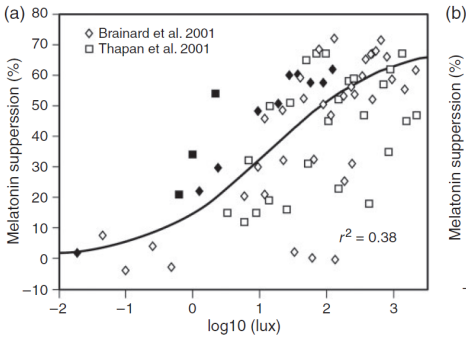
24. Light as a circadian stimuls for architectural lighting

Figura 10 [24]



Questi grafici mostrano la sensibilità spettrale del sistema modellato a diversi livelli scotopici di illuminamento differenti per valutare la soppressione di melatonina. Partendo dalla Figura 10, si può vedere come la sensibilità spettrale cambi con il livello di saturazione dei bastoncelli; a livelli di luce più elevati, essi mostrano un maggiore sbiancamento del pigmento del fotorecettore e ne consegue il cambiamento nella sensibilità spettrale complessiva da cui dipendono le risposte biologiche.

Figura 11 [24]
Mostra i valori di soppressione notturna della melatonina per i diversi spettri a banda stretta in funzione dell'illuminamento



Analizzando questi aspetti su un piano pratico, dagli studi condotti sono emersi risultati comuni tra gli individui sebbene le risposte, tuttavia, possono essere diverse tra loro. I ritardi di fase maggiori si sono verificati quando lo stimolo luminoso è stato somministrato con la temperatura corporea interna degli individui al valore minimo giornaliero cioè nella fase critica; al contrario, i progressi di fase si sono verificati quando la stessa radiazione luminosa è stata concentrata dopo la fase critica e allo stesso tempo non ci sono stati spostamenti di fase nello stesso periodo. Considerando che una persona generalmente dorme da mezzanotte alle 08:00 di mattina, il momento in cui

la temperatura corporea interna raggiunge il valore minimo si aggira alle ore 06:00. Inoltre il giorno può essere suddiviso in diversi periodi: prima mattina (06:00-10:00 h), quando una sufficiente potenza biologica può servire a far avanzare l'orologio in modo graduale nella maggior parte delle persone; da metà mattina a prima sera (10:00-18:00 h), durante la quale alti livelli di illuminamento possono portare ad un aumento della vigilanza soggettiva senza provocare evidenti effetti di sfasamento; tarda sera e notte (18:00-06:00 h), quando l'esposizione alla luce potrebbe innescare risposte non visive che devono essere evitate, per non interrompere il naturale ciclo veglia-sonno. La radiazione luminosa con lunghezza d'onda più corta è biologicamente più potente e aumenta la soppressione di melatonina.

La riduzione dell'ormone del sonno per esposizione alla radiazione ottica non rappresenta un valore che proporzionalmente influisce sulle risposte come lo spostamento di fase circadiano, mentre lo stimolo circadiano potrebbe rappresentare la relazione diretta tra somministrazione della radiazione e la soppressione di melatonina notturna. Fatta chiarezza sulla relazione tra illuminazione, soppressione dell'ormone e risposte umane e supponendo che ci sia un rapporto tra la soppressione melanopica e le risposte circadiane, va specificato che lo stimolo luminoso non genera sempre le stesse risposte: la luce intensa al mattino sostiene la salute e il benessere sostenendo il normale ritmo biologico mentre la sera l'illuminamento è dannoso per la sincronizzazione circadiana. Inoltre il sistema circadiano umano ricorda le esposizioni precedenti durante il corso della giornata, l'esposizione alla luce all'inizio del giorno influisce sulla potenza biologica della luce durante il corso delle successive ore, così come condizioni di scarsa illuminazione avranno impatti negativi sul sonno che saranno differenti per ogni individuo.

www.3bmeteo.it

Risposte del sistema circadiano

Le risposte biologiche intrinseche del sistema circadiano, possiamo ricondurli a determinati stati emotivi/psicologici e fisici comuni a tutte le persone e raggruppati in due categorie principali, gli effetti a breve termine che si manifestano durante il corso della giornata e quelli a lungo termine che possono emergere anche dopo anni. Queste risposte biologiche sono la vigilanza, la produttività, i ritmi di sonno e veglia, l'umore e lo stato di salute fisico generale che rappresentano le conseguenze finali a breve e a lungo termine dell'esposizione alla luce sia naturale che artificiale. Tuttavia, è doveroso precisare che questi stati soggettivi non sono solo influenzati da uno stimolo fotico, altri fattori agiscono su questi fenomeni come ad esempio l'alterazione dei tempi dell'assunzione di cibo o delle attività che si stanno svolgendo. Analizzando delle routine in cui gli individui sono svegli durante il giorno e dormono nella notte, il miglioramento dello stato fisico e psicologico è anche associabile ad uno stile di vita più sano come le scelte dietistiche o ad uno stato mentale meno stressato.

I ritmi del sonno

Se la luce naturale è il sistema migliore per illuminare in ambienti interni in quanto supporta meglio i ritmi circadiani, una non corretta progettazione e gestione dell'illuminazione elettrica potrebbe provocare effetti negativi sulla salute e sul benessere individuale. Nella nostra quotidianità ogni individuo vive situazioni differenti di luce dovute ai diversi sistemi di illuminazione che spesso presentano caratteristiche molto diversificate. Inoltre, dall'inizio di questo secolo, non si può trascurare l'esistenza dei dispositivi elettronici dotati di schermi luminosi che fanno parte delle nostre vite e di cui facciamo uso per svariati motivi anche per molte ore al giorno. Quasi ognuno di noi la sera e prima di coricarsi ha interagito con uno di questi apparecchi che sia una tv, un tablet, pc o smartphone andando ad interferire con la regolare produzione di melatonina notturna e il normale ciclo di sonno. Il loro uso durante la giornata può spostare i ritmi circadiani e portare ad un sonno abbreviato e/o interrotto; questo avviene anche se attenuiamo la luminosità del

dispositivo e riduciamo le lunghezze d'onda corte, la luce blu (modalità notturna). Studi di laboratorio hanno dimostrato che un'esposizione alla luce diurna più elevata durante il giorno aiuta a ridurre l'entità degli effetti negativi che una non corretta esposizione alla luce può determinare durante la notte sul ciclo del sonno. Le ricerche sul campo, sebbene siano ancora limitate, mostrano dati chiari e rilevanti poiché i disturbi del sonno e del sistema circadiano sono effettivamente riconducibili alla alle caratteristiche di esposizione alla luce e sono premonitori di salute e benessere.

Vigilanza

Se da un lato la produzione di melatonina aumenta la sonnolenza soggettiva, dall'altro diminuisce la vigilanza e attenzione – alertness. Con un'adeguata illuminazione in ambiente si contribuisce al processo di soppressione della melatonina e ci si sente appunto meno stanchi o affaticati, una proprietà che in linea di massima può essere osservata anche dopo il consumo di caffeina. La luce ha dimostrato di ridurre negli individui i tempi di reazione e incrementare i livelli di attenzione in modo significativo. Secondo studi di laboratorio si ritiene che lo stato di attenzione vari a seconda dell'ora del giorno in cui si riceve la luce, con risposte che si possono manifestare durante la notte (ad esempio quando l'esposizione alla luce sia nelle ore pre-serali e serali). Inoltre questi effetti sia nelle ore diurne che notturne sono più lievi se siamo ben riposati. L'attenzione e la vigilanza sono risposte non visive alla luce che svolgono un ruolo importante in ambienti educativi e lavorativi in quanto migliorano le prestazioni e la sicurezza. Dalle prove di laboratorio è stato dimostrato che la luce, con determinate caratteristiche fotiche, aumenta l'attenzione diminuendo la sonnolenza e migliorando le prestazioni. Vedremo in un secondo momento come questi effetti si relazionano con le proprietà della luce.

Produttività

Dalla maggiore vigilanza come conseguenza di alti livelli di illuminazione ne deriva anche una maggior attenzione e concentrazione migliorando le prestazioni individuali. Se consideriamo gli ambienti scolastici è stato riscontrato che una buona illuminazione nelle aule influenza positivamente efficienza degli studenti nel prestare attenzione alle attività svolte. Basandoci sul rapporto causa-effetto della variazione delle caratteristiche

della radiazione, l'illuminazione nelle scuole con maggior contenuto energetico a lunghezze d'onda più corte è in grado di aumentare la velocità di elaborazione cognitiva negli studenti soprattutto quelli degli istituti superiori e migliorare la concentrazione e le prestazioni nella lettura nei bambini delle scuole primarie. Quest'ultimo aspetto è anche intuibile considerando solo gli aspetti visivi, una superficie ben illuminata aiuta la fluidità della lettura in tutte le fasce di età. L'apprendimento degli studenti può quindi essere fortemente influenzato dall'illuminazione e l'incremento nella prestazione può essere accentuato maggiormente in presenza di un'illuminazione variabile in intensità e spettro durante le ore del giorno, soluzione possibile specialmente se l'ambiente è ben esposto alla luce naturale. Non di meno, gli stessi effetti si ripresentano nei lavoratori: in recenti studi sperimentali, gli impiegati hanno dichiarato di essere soggetti a disturbi del sonno se gli ambienti lavorativi sono privi di finestre e di illuminazione naturale.

Effetti a lungo termine

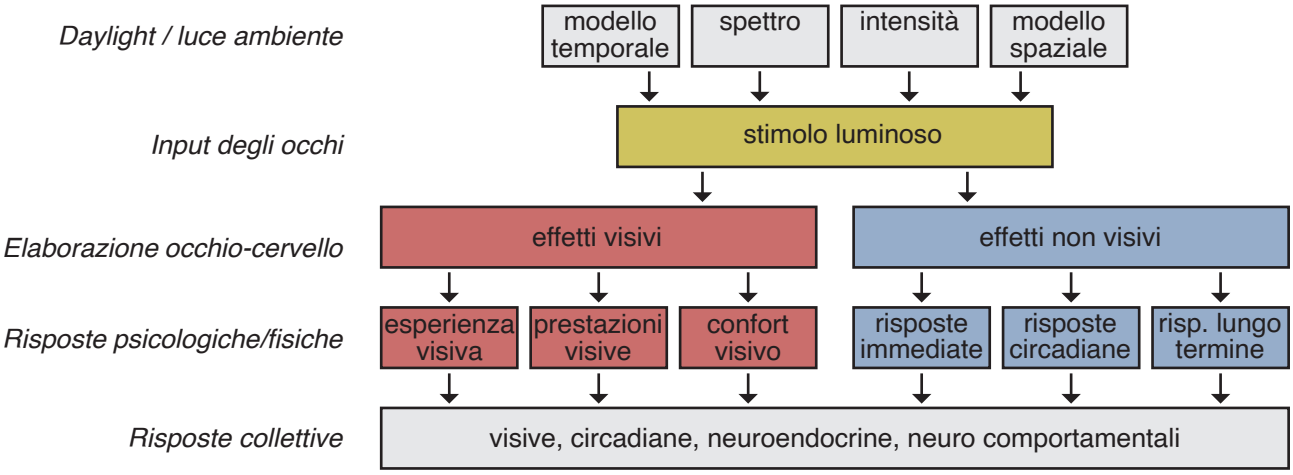
La perturbazione del sistema circadiano è considerato un fattore di rischio emergente. Può provocare disturbi metabolici e cardiovascolari ed agendo sul sistema neuroendocrino è considerata causa per alcuni tipo di tumori ormono-sensibili in studi sia sull'uomo che su animali. L'esposizione alla luce nelle ore notturne emessa quindi da sorgenti di natura artificiale, è stata dichiarata come possibile fattore di rischio per il cancro al seno, possibilmente mediato dalla soppressione di melatonina, dalle alterazioni a valle del sistema immunitario e/o da altri tipi di alterazione endocrina. Tali rischi sono stati considerati ed analizzati dall'OMS (organizzazione mondiale della sanità) cercando di capire quali potessero essere i luoghi da considerarsi più a rischio. Nel 2007 sono stati identificati in tal senso i lavori a turni notturni a lungo termine e questa valutazione è stata riconfermata anche nel 2019 dalla stessa organizzazione. Nel 2012 l'AMA (American Medical Association) ha pubblicato un "position paper"sugli effetti fisiologici umani influenzati dall'illuminazione notturna. Nello specifico, l'associazione ha riconosciuto la necessità di condurre ulteriori studi multidisciplinari sull'esposizione luminosa notturna in ambienti lavorativi per valutare i possibili rischi tumorali e/o di malattie croniche. Ai lavoratori notturni specie per i lavoratori con turni a rotazione, di solito si richiede di essere svegli e attivi e per questo spesso gli ambienti presentano alti livelli di illuminamento. I lavori notturni però non sono gli unici a rischio, è il fatto che trascorriamo molto tempo in ambienti indoor con situazioni di illuminazione

non sempre adeguate di giorno e sere/notti molto più luminose che genera delle possibili conseguenze di questo tipo, il sottile contrasto tra “luce” e “buio” può ridurre la durata dell’orologio biologico considerato come una perturbazione fisiologica pertinente al rischio di cancro e ad altre malattie. L’ideale sarebbe quindi essere attivi di giorno in ambienti luminosi e dormire la notte in ambienti bui.

Il focus da tenere in considerazione per le risposte non visive riguarda l’uomo che si è evoluto nei millenni autoregolando i propri processi interni utilizzando la luce emessa dal Sole, divenendo il modello di riferimento per ogni altro tipo di illuminazione. Questo pone la luce artificiale nella posizione di dover rispecchiare le stesse caratteristiche della luce naturale per sostenere il sistema circadiano agendo sulle caratteristiche principali della radiazione. E sono proprio le caratteristiche della radiazione ottica che è possibile manipolare per sostenere i ritmi circadiani anche in ambienti interni illuminati da sorgenti di luce artificiale.

Caratteristiche della radiazione luminosa che influenzano il sistema circadiano

Sono principalmente quattro le caratteristiche che influenzano le risposte visive e le risposte non visive alla luce: l'intensità, lo spettro e il modello temporale di esposizione, ovvero il tempo di esposizione e la sua durata. Queste sono le variabili che è possibile gestire in fase di progettazione di un sistema di illuminazione. Oltre alle proprietà fisiche intrinseche della radiazione elettromagnetica, esiste un secondo insieme di fattori che influiscono le risposte circadiane e comprendono le caratteristiche dell'organo visivo umano (oculare e neurale), le risposte soggettive agli stimoli luminosi, riflessi, dilatazione pupillare, sensibilità e distribuzione dei fotorecettori, integrazione neurale su tempo e spazio e adattamento retinico e neurale o storia fotica. L'evidenza empirica tratta da studi in contesti reali non è numerosa purtroppo: gli studi in campo sono resi complessi dalla presenza di molteplici fattori che non possono essere controllati come negli ambienti di laboratorio, tra cui la complessità e variabilità della radiazione elettromagnetica presente negli ambienti (ad esempio la luce naturale dinamica nell'arco della giornata e dell'anno) e la difficoltà di misurare l'esposizione alla luce a livello individuale sul campo essendo questa influenzata molto da fattori esterni che riguardano altri organi sensoriali e percettivi.



Le quattro categorie all'inizio del grafico sopra riportato contribuiscono in modo differente alla potenza biologica di uno stimolo luminoso. Questa può essere alterata in primo luogo intervenendo sull'intensità e successivamente sullo spettro luminoso in quanto questa quantità è funzione sia della potenza assoluta della luce che della lunghezza d'onda. Considerando queste riflessioni e avendo l'obiettivo di controllare i ritmi circadiani, la potenza biologica dovrebbe essere controllata in primo luogo tramite l'intensità e successivamente agendo sullo spettro. Dagli studi emerge infatti che queste risposte sono influenzate specialmente dall'intensità luminosa ma non è chiaro in che entità influisca lo spettro, nessuno studio mostra una correlazione dello stato psichico individuale al variare della lunghezza d'onda. Altre ricerche al contrario, mostrano che la luce intensa a lunghezze d'onda più lunghe mantengono la vigilanza e l'attenzione soggettiva senza soppressione di melatonina.

Intensità

La soppressione della melatonina, l'aumento dell'attenzione, la sincronizzazione circadiana sono tutti fenomeni che si verificano in modo diretto all'aumentare dell'intensità della luce. I dati ricavati dagli studi sulla relazione dose-risposta possono essere rappresentati su un modello parametrico e fornire un intervallo dinamico di reattività entro i limiti della risposta massima e la soglia limite. Quest'ultima è la quantità di luce necessaria per suscitare una differenza tra zero e la risposta massima ottenibile ovvero la quantità di illuminazione oltre la quale non si riscontrerebbe un ulteriore aumento dell'effetto che ha sull'or-

ganismo. La costante di mezza saturazione (ED50) è la dose fotica che suscita una risposta semi-massima ed è spesso usata come punto di confronto per determinare la sensibilità relativa. [01] La maggior sensibilità negli individui viene dedotta quando un minimo aumento di intensità provoca una risposta equivalente.

Spettro

Lo spettro d'azione, definito come la risposta relativa di un organismo vivente a diverse lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica visibile e quasi visibile [01], è utilizzato come metodo per la determinazione della sensibilità spettrale dei fotorecettori. Gli studi che hanno trattato questo argomento hanno riportato risultati che vedono una maggiore sensibilità del fotopigmento melanopsina alla luce con lunghezza corta con un picco di risposta a 480 nm.

Un sistema semplice per ridurre l'intensità luminosa necessaria per svolgere determinate attività mantenendo lo stesso stato fisico è indurre un particolare effetto fisiologico ottimizzando lo spettro luminoso. È infatti provato che la durata e la grandezza di una risposta che suscita queste sensazioni dopo essere stati esposti alla luce può variare a seconda dello spettro, si avvertono effetti fisiologici più duraturi se la lunghezza d'onda è più corta rispetto a quelle più lunghe. Lo spettro della luce può essere messo in relazione alla sua temperatura di colore correlata (CCT). Luci ricche di radiazione alle alte lunghezze d'onda hanno generalmente una bassa CCT, mentre, al contrario, luci con alta temperatura di colore, risultano più ricche di radiazione a basse lunghezze d'onda. Per definire quando un flusso luminoso risulta caldo o freddo riferendosi alla temperatura di colore si può considerare che una bassa temperatura di colore correlata, percepita come calda, è compresa tra 2000 e d 3300 K, CCT neutra è da 3300 a 5300 K e un colore freddo è superiore a 5300 K. Nell'ottica di riprodurre un sistema di illuminazione human-centric, ovvero in grado di supportare una corretta sincronizzazione dei ritmi circadiani, è importante che lo spettro della radiazione, e quindi la CCT, possa variare nel tempo in funzione delle esigenze di produzione o soppressione della melatonina da parte del nostro organismo. Si deduce che sistemi di illuminazione caratterizzati da una singola temperatura di colore non si prestano a questo scopo poiché lavorano su uno spettro specifico. Diverso invece è il caso in cui sia possibile integrare sorgenti con temperature di colore differenti. Gli

1. Alessandra Giacomina Ferruccia Casetto, Effetti visivi e non visivi della luce sull'uomo: aspetti teorici e implicazioni progettuali, 2013

ambienti con sistemi di illuminazione elettrica a più temperature di colore forniscono una realtà molto più simile a quella che si può vivere in condizioni di illuminazione naturale. Per fare un esempio, in uno studio condotto da Smith e Eastman è stata confrontato una sorgente con CCT elevata e intensità bassa (17000K e 4000 lux) con una a CCT molto più bassa e un'intensità più elevata (4100 K e 5000 lux) riportando che in entrambi i casi si riscontra un simile ritardo della soppressione di melatonina spostando in avanti l'orologio biologico circadiano. In merito a questo aspetto, altri studi sono stati condotti per definire quindi quale potesse essere il migliore rapporto tra queste due grandezze in grado di stimolare maggiormente le risposte non visive esaminando la luce con diverse lampade a diversa temperatura di colore correlata (CCT). L'esito riporta che in condizione di luce a 6500 K, si riscontrano tempi di reazione più rapidi e una maggiore soppressione melanopica. Anche con l'utilizzo di una illuminazione dinamica a diversi livelli di CCT, il maggior livello di alertness è stato riscontrato con lunghezze d'onda più corte ovvero con valori di CCT più elevati. L'intensità resta però una variabile fondamentale in questa equazione, il che rende la CCT insufficiente per valutare gli effetti fisiologici se considerata singolarmente.

Tempo di esposizione

Un altro fattore che influenza significativamente sia la grandezza che la direzione dello sfasamento circadiano da parte della luce è il momento di somministrazione dello stimolo luminoso negli individui. La maggior parte delle ricerche condotte ha somministrato lo stimolo luminoso durante la notte biologica. La ricerca sulla luce diurna, pur ricevendo sempre maggiore attenzione, è ancora attualmente poco studiata. In generale però possiamo appurare con certezza dagli studi condotti che l'esposizione alla luce dopo il tramonto, nelle ore serali che precedono e seguono l'ora di coricarsi, spinge l'orologio circadiano in avanti rendendo difficoltoso addormentarsi e talvolta riducendo le ore di sonno e la qualità.

Ma il momento di esposizione non riguarda solo il tempo presente, il nostro organismo registra e risponde diversamente a seconda delle esposizioni passate durante le ore del giorno. La storia fotica è il fenomeno di esposizione e si definisce come la proprietà addizionale degli stimoli luminosi che si sono verificati nel tempo di un ciclo e che si rispecchiano sulle risposte biologiche in tempi successivi in un nuovo ciclo. La

maggior parte degli studi che hanno iniziato ad affrontare questo problema hanno riportato risultati piuttosto robusti. Chang et al. (2011) ha condotto un esperimento facendo trascorrere ai partecipanti tre giorni in laboratorio con scarsi livelli di illuminazione e un tempo di esposizione luminosa più intensa 6,5 ore prima della notte. Hanno concluso che la soppressione di melatonina è stata ritardata di 40 minuti quando sono stati esposti a luce debole prima dell'esposizione alla luce più intensa. Altre ricerche vedono la partecipazione degli animali, gli sfasamenti nei roditori sono potenziati dopo molti giorni nel buio continuo. Questo periodo esteso va ben oltre qualsiasi periodo di adattamento dei fotorecettori noti e quindi suggerisce che il precedente stato di esposizione può anche alterare la risposta ad un nuovo stimolo luminoso. Anche esperimenti sui criceti mostrano una sensibilità alla luce 40 volte superiore per il ripristino di fase dopo essere stati mantenuti in condizioni luminose di una breve giornata invernale rispetto ad un fotoperiodo estivo più lungo. Un lavoro suggerisce che la lunghezza del giorno precedente in termini di esposizione luminosa diurna (cioè il fotoperiodo) può esercitare un'influenza sul sistema circadiano del giorno attuale. Si sa ancora poco purtroppo sull'incidenza della storia dell'esposizione alla luce che influenza la fisiologia e il comportamento in contesti estranei ai laboratori, uno dei primi esperimenti sull'uomo in questo campo in contesti reali è stato eseguito su una piccola popolazione in Antartide nel 1992 rilevando una maggiore soppressione della melatonina da parte della luce in inverno verso estate. Lavori più recenti nello stesso continente suggeriscono che una privazione della radiazione ottica diurna per un mese aumenterebbe la sensibilità retinica alla luce con lunghezze d'onda più corte e di conseguenza una maggiore influenza sulle risposte circadiane.

Durata di esposizione

Le risposte fisiologiche alla luce non sono solo influenzate dal momento della giornata in cui avviene l'esposizione fotica ma anche dalla durata della stessa andando ad accentuare ulteriormente gli effetti sull'organismo dell'orologio biologico. Facendo riferimento ad altri esempi di studi trattati [12], durante la notte biologica una sorgente luminosa da 4100 K può generare un ritardo di fase di un'ora con solo 10 minuti circa di esposizione alla radiazione ottica (7.669 lux) e un ritardo di fase di circa 2 ore e mezza con 4 ore di esposizione ad intensità simile (8.396 lux). Questi risultati suggeriscono che uno stimolo di durata più breve è in grado di generare uno

spostamento del ritmo circadiano proporzionalmente molto più elevato. Tuttavia, le esposizioni brevi sono più convenienti in quanto, sebbene la curva di risposta cresce notevolmente all'inizio dell'esposizione, essa continuerà ad aumentare nel tempo se la somministrazione fotica permane (curva logaritmica) causando una risposta fisiologica elevata con conseguenti effetti collaterali indesiderati come mal di testa, affaticamento degli occhi e in alcuni casi anche nausea. Per le applicazioni di illuminazione architettonica in contesti lavorativi, educativi e residenziali, è probabile che la durata dell'esposizione sia prolungata, mentre possono essere necessari scenari con esposizioni tipicamente più brevi in altri contesti come luoghi di collegamento e di servizio. Pertanto, la durata dell'esposizione fotica rappresenta un importante fattore da considerare quando si approccia una progettazione di un sistema di illuminazione per ottimizzare gli effetti fisiologici della luce.

Caratteristiche dello spazio fisico che influenzano le risposte umane

Senza dimenticare tutti i fattori elencati in precedenza ossia il momento della giornata in cui ci si espone (timing), la durata di questa esposizione, l'intensità e lo spettro, che sono fattori intrinseci della radiazione ottica, esistono però altri fattori che influenzano l'esperienza della luce sull'uomo. L'habitat: la nostra casa, il posto di lavoro, i viaggi, le abitudini sociali, l'accesso alle tecnologie di illuminazione, sono tutti luoghi con un diverso sistema di illuminazione che interagiscono con il nostro benessere fisico e psicologico. La luce diurna esterna è mediamente 5 - 10 volte superiore rispetto a quella interna e con uno spettro completamente diverso dalla luce elettrica se consideriamo una tipica sorgente a singola temperatura di colore correlata mentre quella naturale varia in lunghezza d'onda e intensità.
In ambienti chiusi la composizione spettrale della luce che raggiunge gli occhi degli occupanti è dovuta oltre che dalla sorgente anche dalla conformazione interna e dai colori delle superfici. La citazione di Andersen et al. in merito a questa relazione tra luce e ambiente in [21]:

> *"Architecture and the eye perform parallel roles in regulating light input to the brain. Just as the pupil fine-tunes the amount of light that enters the eye, the intensity and quality of light reaching internal surfaces are determined by the size and shape of building openings, the light-transmitting qualities of the glazing chosen, and the presence and sizing of shading"*

L'architettura e l'occhio svolgono ruoli paralleli nel regolare l'ingresso della luce al cervello. Così come la pupilla regola la quantità di luce che entra nell'occhio, l'intensità e la qualità della luce che raggiunge le superfici interne sono determinate dalle dimensioni e dalla forma delle aperture dell'edificio, dalle qualità di trasmissione della luce delle vetrate scelte e dalla presenza e dal dimensionamento delle ombreggiature.

21. Andersen, M.; Gochenour, S.J.; Lockley, S.W. Modelling "non-visual" effects of daylighting in a residential environment. 2013

Se si analizzasse una città dalla sua interezza e scendendo di scala fino alla dimensione di una stanza, è possibile leggere la luce e la sua variazione indotta dalla presenza dell'ambiente costruito. A scala urbana, gli edifici, i parchi e le piazza con le loro dimensioni e orientamenti modificano la quantità di luce che penetra fino ad arrivare all'occhio umano, le superfici influenzano lo spettro luminoso, la radiazione riemessa dalle pareti di un fabbricato sarà diversa a seconda che sia intonacato bianco o se è in mattoni a vista. Inoltre impongono dei tempi specifici nel momento in cui il sole sorge da un edificio e tramonta dietro ad un altro. Tuttavia questi fattori sono validi quando analizziamo l'illuminazione in un punto specifico ma se ci muovessimo tutto cambia in quanto non si possono stabilire valori specifici durante l'arco di un anno. Scendendo a scala architettonica, scelte come la distribuzione planimetrica degli spazi e la posizione delle aperture influiscono sullo spettro e la quantità di luce. Un edificio orientato secondo l'asse nord-sud verrà irradiato in maniera differente rispetto allo stesso edificato orientato a est-ovest; ad esempio, nel secondo caso, durante la mattina gli ambienti interni saranno illuminati già alle prime luci dell'alba, quando l'intensità del sole è più debole e lo spettro avrà lunghezze d'onda più lunghe rispetto al primo caso di orientamento e lo stesso fenomeno accade al tramonto. Al contrario un'esposizione nord-sud, riceverebbe livelli di luce maggiori durante il giorno ma solo sulla facciata sud. Anche le dimensioni delle aperture svolgono un ruolo significativo per l'illuminamento interno, finestre più ampie illumineranno di più e a seconda della loro posizione in altezza permetteranno alla luce di raggiungere profondità maggiori; inoltre, la conformazione stessa dell'edificio viene coinvolta quando genera ombreggiamento sulle facciate e di conseguenza sulle aperture vetrate. L'aspetto architettonico dell'involucro edilizio non è l'unico fattore esterno all'illuminazione ad influire sulla radiazione e sulle risposte circadiane, anche gli arredi e i colori degli ambienti interni sono altrettanto coinvolti. Influiscono sulla distribuzione interna della luce, sulla luminanza e sullo spettro in quanto ogni materiale ha caratteristiche intrinseche di assorbimento e riflessione di una parte della radiazione luminosa (spettralmente selettivi) come già visto. Nella progettazione illuminotecnica non bisogna dimenticare di considerare la configurazione interna degli spazi che modifica le caratteristiche sia della luce diurna naturale e della luce elettrica, in altre parole lo spazio architettonico modella la luce.

カラオケ
SHIDAX
雷門東部

Human-Centric Lighting

La luce artificiale sebbene sia un rischio per l'insorgenza di patologie gravi nel lungo termine o causi disturbi del sonno può anche essere la soluzione e potenzialmente in grado di assecondare le esigenze richieste allo svolgimento delle attività rispettando i fabbisogni del nostro organismo. Esperti neuroscienziati e cronobiologi ci hanno insegnato gran parte di quello che sappiamo in merito alle risposte biologiche della luce e recentemente hanno compiuto un ulteriore sforzo che ha avuto il suo apice nel concetto di illuminazione integrativa definito della CIE come *"Illuminazione che integra specificamente effetti sia visivi che non visivi e produce effetti fisiologici e/o benefici psicologici sull'uomo"* [20]

Il settore dell'illuminazione ha introdotto nuove terminologie per definire questa strategia come "illuminazione circadiana" e nel mondo internazionale "human-centric lighting". Queste nuove definizioni hanno suscitato dibattiti sul loro significato specifico.

> *"A circadian lighting strategy is one where lighting design supports the human diurnal need for illumination and darkness cycles in tune with their circadian system. This strategy should include both natural and artificial lighting and should take into account the changes in colour spectrum, intensity and directionality over the course of a day."* [17]

Nella sua traduzione significa che una strategia di "illuminazione circadiana" è quella in cui la progettazione illuminotecnica supporta il bisogno diurno umano di luce e i cicli di buio per sostenere il sistema circadiano individuale. Questo sistema dovrebbe includere sia l'illuminazione naturale che quella artificiale e dovrebbe tenere conto dei cambiamenti nello spettro dei colori, nell'intensità e nella direzionalità nel corso di una giornata.

Ma la Human-centric lighting è più una frase di marketing o una reale strategia progettuale? Entrambi danno un sostegno pratico alla teoria, viene utilizzata dai produttori delle nuove tecnologie illuminotecniche per ampliare il bacino di apparecchi di illuminazione sul mercato e aumentare le vendite ma allo stesso tempo hanno anche permesso, tramite il loro utilizzo, di

17. Circadian Lighting Definition and Strategy

20. Light and Lighting—Integrative Lighting—Non-Visual Effects; ISO/CIE 2020

aiutare a confezionare progetti di un'illuminazione integrativa. Tuttavia, Human-centric è anche il focus delle nuove strategie illuminotecniche che mirano a sostenere gli aspetti visivi e non visivi della luce per migliorare le risposte umane in fase di progettazione di un sistema illuminotecnico, talvolta tramite anche l'utilizzo delle nuove tecnologie innovative "Human-centric". Si potrebbe quindi dire che il termine racchiude due concetti con un obiettivo comune anche se presentano sfumature differenti, il primo mira più a massimizzare le vendite mentre il secondo mira prima di tutto al benessere. oggettivamente la progettazione "Human-centric" si porta un passo avanti in quanto considera una strategia che si riferisce all'intero sistema di illuminazione e che include la progettazione del sistema di illuminazione e del suo controllo. Il lavoro di ricerca svolto nel recente periodo sull'integrative lighting non è mirato a definire delle caratteristiche del prodotto di illuminazione, ma sono prodotti studiati in ottica "integrative lighting" abbinati ad una buona progettazione e a sistemi di gestione dedicati che permettono di migliorare il confort visivo e fisiologico con un'attenzione anche alla sostenibilità energetica. Questa strategia per essere tale ha dei confini all'interno dei quali può operate con la dicitura di integrative lighting e la definizione rilasciata dalla ISO/CIE [25] si rivela attualmente come la più accreditata sostenendo che:

> *Note 1: The term 'integrative lighting applies only to humans.*
>
> *Note 2: Lighting primarily for therapeutic purposes (light therapy) is not included.*
>
> *Note 3: The term 'human centric lighting is used with a similar meaning.*

Viene definito quindi che il termine "illuminazione integrativa si applica solo alle persone e che l'illuminazione a scopo prevalentemente terapeutico (terapia della luce) non è inclusa, infine il termine "Human-centric lighting" è utilizzato come sinonimo in quanto ha un significato simile.

L'illuminazione integrativa antropocentrica va ad agire sulle proprietà della luce: intensità, spettro, modello temporale e altri fattori architettonici all'interno dell'ambiente. In ordine di importanza troviamo il modello temporale (luce e buio), seguito dall'intensità di luce e lo spettro. Ne deriva quindi, dalle difficoltà di caratterizzazione dell'illuminazione artificiale aggiunto al fatto che la luce naturale è la miglior illuminazione per mante-

25. Human-centric lighting Myth, magic or metaphor

ner sincronizzato il ritmo circadiano umano, che sia necessario promuovere prima di tutto l'utilizzo e l'ottimizzazione dell'illuminazione naturale negli edifici. Per questo motivo la progettazione architettonica per migliorare l'illuminazione naturale deve considerare determinati fattori essenziali: orientamento, posizione geografica, le stagioni dell'anno e dimensione delle finestre sono fattori fondamentali per mantenere un livello di illuminazione naturale interno in grado di sostenere il benessere soggettivo ed il confort degli ambienti interni. Questi requisiti relativi alle caratteristiche della radiazione ottica e dello spazio architettonico sono stati recepiti nel tempo da progettisti e aziende produttrici di apparecchiature per l'illuminazione rendendo disponibili risposte pratiche a esigenze che sempre più si rivelavano necessarie per migliorare il confort e benessere delle persone. Ne sono scaturite nuove tendenze, che vedono l'illuminazione artificiale come un "surrogato" della luce naturale del Sole, che mettono l'uomo al centro delle riflessioni progettuali relative a sistemi e prodotti e che per questo assumono il nome di Integrative lighting o Human-centric lighting, illuminazione antropocentrica.

Questo tipo di strategia per l'illuminazione cerca quindi di risolvere le problematiche legate alla luce esaminate in precedenza: risposte visive e non visive, a breve e lungo termine. Oggi disponiamo di un numero maggiore di studi sull'illuminazione incentrata sull'uomo che studia gli effetti visivi e non visivi che ne derivano, tuttavia alcune linee di pensiero trovano ancora prematuro basarsi sulla progettazione illuminotecnica per risolvere i problemi legati alle risposte circadiane della luce. Le motivazioni riguardano ad esempio la mancanza di un approccio standardizzato alla progettazione di un'illuminazione artificiale antropocentrica, dovuta anche alla mancanza di standard per caratterizzare la potenza biologica dei sistemi di illuminazione o perché esistono ancora incognite sui reali effetti soggettivi della luce.

Quantificazione della potenza biologica

Come ogni aspetto nell'architettura contemporanea, al di là del linguaggio e lo stile, esistono delle regole da rispettare e l'illuminazione human-centric non è da meno. Ci sono stati diversi tentativi nell'ultimo decennio di definire dei valori di riferimento in modo chiaro e univoco, standard a cui si potesse attingere per progettare l'illuminazione artificiale integrativa. Purtroppo questo tipo di informazione è complessa da definire in quanto, a differenza delle risposte visive, quelle non visive oltre a variare tra un soggetto e l'altro e vengono influenzate da molteplici altri fattori esterni, rendendo, allo stato attuale della ricerca, molto difficile il raggiungimento di tale risultato. La potenza biologica riguarda infatti la capacità di un input luminoso di influenzare una risposta umana dell'organismo. Esistono delle associazioni internazionali che si occupano di questi aspetti sia in ambito puramente illuminotecnico ma anche legati al benessere generale in ambienti interni e tra questi troviamo il WELL e la CIE. Entrambi riconosciuti a livello internazionale, il primo è un protocollo che contiene indicazioni per supportare il benessere e confort in ambienti interni, il secondo tratta invece in modo specifico tutte le implicazioni della luce in architettura. Queste, pur essendo ancora la ricerca scientifica in questo ambito in corso, hanno proposto delle prime linee guida per approcciare la progettazione di un sistema Human-centric lighting. Queste raccomandazioni si basano sulla definizione di nuove metriche di misura della luce: l'Equivalent Melanopic Lux (EML) e il melanopic Equivalent Dayòlight Illuminance (m-EDI). Entrambe le grandezze hanno come scopo quello di misurare l'effetto biologico della luce incidente su una superficie (normalmente si considera la superficie dell'occhio), ma solo il m-EDI è concepito in modo da essere coerente con il Sistema Metrico Internazionale.

Validità di uno stimolo luminoso

Durante i processi di sperimentazione su persone ed animali per stabilire gli effetti non visivi della luce sull'organismo è emerso come non sia semplice definire degli standard illuminotecnici per sostenere le risposte circadiane poichè ogni individuo risponde in modo differente agli stimoli fotici. Il problema che subentra è che le risposte non visive, come già anticipato, non sono solo influenzate dalla luce ma anche da altri fattori esterni. La validità di uno studio scientifico è la misura in cui i risultati possono essere applicati ad altre persone o contesti che differiscono dalle circostanze specifiche di un esperimento, al di fuori delle impostazioni di laboratorio le risposte alla luce non si verificano in ambienti isolati. Lo stesso stimolo luminoso può influenzare contemporaneamente nessuna o molte risposte biologiche e una risposta biologica può o non può tradursi in un cambiamento nelle prestazioni o nella salute generale. Uno qualsiasi degli effetti non visivi può anche essere influenzato da fattori diversi dalla luce come età, clima, dieta, malattia, esercizio fisico, genetica, farmaci, salute mentale, gravidanza, abitudini del sonno, stress e viaggi. Le risposte suscitate dalla luce possono anche essere favorite da altri input sensoriali come una risposta all'attenzione stimolata dall'udito o dall'olfatto e va anche notato che più lungo è l'intervallo tra lo stimolo e la risposta, più alta sarà l'opportunità per gli altri fattori non connessi all'illuminazione di influenzare la risposta. La luce è davvero potente, è importante considerare i suoi effetti in un contesto più ampio che include altri input sensoriali e non. Alcuni di questi input che ci influenzano maggiormente ogni giorno sono i dispositivi dotati di schermo luminoso: uno studio ha dimostrato che l'uso di dispositivi luminosi come pc, tablet o smartphone, dopo circa un'ora di utilizzo, provocano una soppressione di melatonina in media del 3%.

Il target di persone meno coinvolte da effetti non visivi sono adulti sani con stili di vita che assecondano il normale ritmo circadiano, lavorano durante il giorno e dormono la notte. Per questo gruppo in condizioni di luce diurna o luce elettrica che rispetta i requisiti minimi per la visione, non è chiaro quanto e in che entità saranno influenzate le risposte fisiologiche al cambiamento dell'illuminazione. Ciononostante la luce ha il potenziale per influire i risultati non visivi.

Metriche di valutazione

Le risposte umane alla luce sono una conseguenza di uno stimolo luminoso indotto ai fotorecettori dell'occhio che inviano un segnale al cervello: le risposte visive sono in gran parte elaborate da coni e bastoncelli mentre le risposte non visive sono maggiormente elaborate dalle cellule gangliari retiniche fotosensibili (ipRGC). Per quantificare la luce come stimolo non visivo esistono due metodi: il primo si basa sulla risposta spettrale dei quattro fotorecettori (coni, bastoncelli, ipRGC) mentre il secondo si basa sulla soppressione di melatonina notturna. Per poter quindi calcolare questo effetto non visivo si può utilizzare l'Equivalent Melanopic Lux (EML) introdotto da Lucas et al. che viene calcolato come il prodotto dell'illuminamento fotopico E, e il rapporto melanopico R, dove:

$$EML = (E)(R)$$

L'EML è espresso nell'unità di misura lux melanopico (m-lux). R è calcolato come il rapporto tra la radiazione che attiva la proteina melanopsina indotta da una sorgente luminosa e la sua radiazione fotopica attivante, moltiplicata per il coefficiente 1,218, che permette di garantire R = 1,0 per l'illuminante a uguale energia. R è adimensionale e varia da circa 0,45 a 1,70. Le sorgenti luminose con lunghezze d'onda più corte hanno mediamente anche un valore più alto di R. Tuttavia, questa formula di quantificazione fotica non è riconosciuta dal Sistema Internazionale di Unità (SI). La CIE ha proposto una grandezza conforme al SI in sostituzione dell'EML: il Melanopic Equivalent Daylight Illuminance, melanopic EDI, $E_{v,mel}^{D65}$, o "mel-EDI". In breve, corrisponde all'illuminamento prodotto da una luce diurna standard (6500 K) in grado di determinare la stessa risposta biologica dell'illuminamento prodotto dalla sorgente in esame [23]. Per fare un esempio, questo significa che una sorgente luminosa che determina in un punto un mel-EDI uguale di 100 lx produce la stessa quantità di radiazione che attiva la melanopsina di una luce diurna a 6500 K che produce in quello stesso punto un illuminamento di 100 lux.

23. Human-centric lighting Foundational consideration and a five step design process

Le nostre competenze in merito al EML e mel-EDI e di come si rapportano agli effetti non visivi in contesti reali è tutt'ore incompleta. L'unico "standard" ad oggi riconosciuto è fornito dalla CIE per progettare la potenza biologica di uno stimolo luminoso istantaneo ma resta il fatto che non è possibile dichiarare con certezza le risposte non visive che ne conseguono in contesti reali. Il sistema proposto utilizza una teoria di *equivalenza fotometrica*, in cui lo spettro di azione α-opico di una qualsiasi risposta dei tre fotorecettori dovute al loro rispettivo fotopigmento basato sull'opsina viene impiegato per pesare la distribuzione spettrale assoluta di una sorgente luminosa. Il risultato può essere messo in relazione con una ponderazione comparabile del modello matematico fornito dalla CIE che considera una CCT luce diurna a 6500K (D65) dallo stesso spettro d'azione α-opico. Ciò consente il calcolo dell'illuminamento della luce diurna α-opico equivalente, indicato come $E_{v,\alpha}^{D65}$ o abbreviato in m-EDI con unità di misura lux [25].

Basandosi su queste metriche, ad oggi valori di riferimento e indicazioni a supporto dei progettisti per la realizzazione di un'illuminazione circadiana Sono riportati nel protocollo WELL, che come dice la parola, si occupa del wellness nella sua interezza in ambienti indoor degli spazi architettonici e la CIE, Commission Internationale de l'Eclairage, è la commissione internazionale dell'illuminazione.

25. Human-centric lighting Myth, magic or metaphor

Riferimenti in ambito internazionale: CIE e Protocollo Well

Da quando esiste il concetto dello sviluppo sostenibile e della sostenibilità in edilizia, sono stati sviluppati dei protocolli di certificazione atti a misurare, valutare e certificare prodotti e servizi con l'obiettivo si salvaguardare l'ambiente. Uno standard di certificazione è uno strumento attraverso cui un ente rilascia un marchio di garanzia ad un prodotto che rispetta le prestazioni energetico-ambientali previsti da standard e normative internazionali. Tra i principali protocolli certificatori e standard normativi ritroviamo ad esempio il LEED, l'ECOLABEL, EPD che hanno come obiettivo la riduzione dell'uso e della produzione di ciò che mette a rischio la salute delle persone, che contribuisce all'inquinamento dell'ambiente e ai cambiamenti climatici. Un altro obiettivo delle certificazioni è promuovere il riciclo e il riuso dei materiali per i motivi precedenti descritti attraverso l'economia circolare o l'LCA (Life Cycle Analysis) ovvero processi che valutano la quantità di energia impiegata da un prodotto/servizio nella loro intera vita. Insomma, questi standard hanno sempre fornito dei requisiti per migliorare principalmente la sostenibilità globale del settore edilizio.

Da non molti anni, questa tendenza della sostenibilità si è ampliata abbracciando anche il benessere e la salvaguardia della salute personale aumentando l'interesse delle certificazioni e degli standard su questo aspetto. Valutare come l'uomo vive all'interno degli edifici porta l'attenzione ad aspetti fondamentali legati all'edilizia e del loro impatto sugli occupanti in ambienti interni che prima erano considerati con minor importanza. Concentrando l'attenzione sull'illuminazione, al di fuori di ambienti di laboratorio non possiamo ancora affidarci a dati certi, nella realtà ad oggi si fa ancora riferimento alle valutazioni fotometriche, ovvero basate sugli effetti visivi della luce, un sistema di valutazione da tempo consolidato ma inappropriato per valutare gli effetti fisiologici della luce. Come introdotto in precedenza, la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) e il protocollo WELL redatto dall'International WELL Building Institute (IWBI), sono due riferimenti che trattano l'illuminazione all'interno degli edifici fornendo indicazioni per progettare un sistema di Human-Centric Lighting.

Il protocollo WELL si riassume in un documento che contiene tutte le informazioni e gli standard utili e necessari per la salute delle persone in ambienti interni, è uno dei principali strumenti di valutazione degli edifici che ha l'obiettivo di fornire informazioni e standard per creare spazi che supportino il benessere degli occupanti. L'IWBI trae la sua esperienza dagli utenti che usufruiscono del protocollo, da professionisti della sanità e scienziati che svolgono attività nel campo edile in tutto il mondo. Il WELL viene lanciato per la prima volta nel 2014 e nel 2018 esce il progetto pilota del WELL v2 che racchiude tutti i feedback della precedente versione e gli approfondimenti per migliorare ulteriormente questo protocollo. Da sempre, si pone tra i suoi obiettivi, quello di promuovere un'illuminazione negli edifici che sostenga al meglio la salute visiva. In questa nuova versione il concetto del WELL Light integra anche l'illuminazione circadiana, oltre a quella funzionale, fornendo dei valori a cui far riferimento nella progettazione o nella verifica delle condizioni di illuminazione di un edificio tenendo in considerazione anche il tipo di attività da svolgere. I requisiti relativi all'illuminazione circadiana mirano a ridurre l'interruzione del ritmo circadiano, migliorare lo stato di sonno-veglia e influire positivamente sull'umore e la produttività degli occupanti. Questo aspetto rappresenta una nuova opportunità per i professionisti per poter fornire delle condizioni di luce per migliorare il benessere individuale degli occupanti e lavoratori.

Il protocollo WELL prevede un'analisi delle condizioni di illuminazione per punti partendo da aspetti visivi, si sposta ad analizzare il sistema circadiano promuovendo innanzitutto l'illuminazione naturale deli ambienti interni, con suggerimenti per il controllo dell'ombreggiamento ed infine sostenendo la necessità di realizzare un'illuminazione artificiale integrata a quella naturale. Inizialmente i requisiti relativi agli aspetti circadiani della luce erano espressi attraverso la metrica Equivalent Melanopic Lux (EML) approvata nel 2014, ora è sostituita dall'm-EDI (Melanopic Equivalent Daylight Illuminance) nella versione v2, secondo la definizione data dalla CIE nel 2018. I dati sono raggruppati per tipologia di illuminazione e descritti in nove punti in cui vengono identificati gli obiettivi, analizzati i problemi e proposte delle soluzioni differenziate per uso abitativo e non abitativo. Ogni punto del capitolo inerente all'illuminazione fornisce varie opzioni per calcolare e verificare la quantità e qualità della luce in ambienti interni. Ciò permette di raggiungere lo stesso risultato tramite diverse strategie di valutazione.

L01: Esposizione Luminosa

Obiettivo: fornire un'illuminazione appropriata in ambienti interni con strategie di illuminazione naturale e artificiale.

Questo "Concept" analizza il sistema circadiano delle persone, le cause e gli effetti della luce su di esso e indica i requisiti necessari a garantire un'illuminazione funzionale alle esigenze di regolazione del sistema circadiano umano. Le verifiche per questo Concept prevedono diverse alternative:

Opzione 1 - Simulazione della luce diurna:

La verifica attraverso simulazione, è soddisfatta se gli spazi interni rispettano i requisiti minimi secondo l'allegato A dello standard CEN 17037:2018 oppure IES LM-83-12, sulla disponibilità di luce naturale.

Opzione 2 – Disposizione interna:

- Almeno il 30% dell'area regolarmente occupata si trova entro una distanza orizzontale di 20 piedi dalla vetrata dell'involucro in ciascun piano.
- Gli spazi comuni hanno posti a sedere non assegnati e possono ospitare almeno il 15% degli occupanti regolari in qualsiasi momento. Almeno il 70% di tutti i posti a sedere negli spazi si trova entro una distanza orizzontale di 16 piedi dalla vetrata dell'involucro

Opzione 3 - progettazione degli edifici:

- L'area vetrata dell'involucro non è inferiore al 7% della superficie del pavimento regolarmente occupata.
- La superficie del pavimento non si trova a più di 20 m da pareti vetrate trasparente dell'involucro e non ci sono ostruzioni opache più alte di 1 metro entro una distanza orizzontale di 6 metri dalla vetrata trasparente dell'involucro.

Queste soluzioni riguardano tutti gli spazi ad eccezione delle unità abitative, per queste ultime cambiano alcuni parametri come la superficie delle vetrate dell'involucro che non deve essere inferiore al 7% della superficie calpestabile regolarmente occupata per ogni unità abitativa.

L02 Progetto illuminotecnico – aspetti visivi

Obiettivo: fornire confort visivo e mantenere un livello elevato di percezione dei dettagli, agendo sull'illuminazione sul piano di lavoro orizzontale per tutti gli utenti.

È necessario quindi in primo luogo identificare le attività svolte in un determinato ambiente e anche l'età degli occupanti che porta ad una riduzione della percezione della luce. Anche in questo caso sono differenziate le verifiche a seconda che ci si riferisca ad unità abitative o non abitative.

Opzione 1: Progettazione della luce – aspetti visivi

- Tutti gli spazi interni ed esterni (comprese le aree di transizione) sono progettati in modo da essere conformi alle soglie di illuminamento specificate in una delle seguenti linee guida di riferimento per l'illuminazione:
  - IES X edizione
  - EN 12464-1&2: 2011 o EN 12464: 2021
  - ISO 8995-1:2002(E) (CIE S 008/E:2001)
  - GB50034-2013
  - CIBSE SLL Codice per l'illuminazione
- Le soglie di illuminamento tengono conto delle mansioni e delle fasce di età degli occupanti

Opzione 2: livelli di luce predeterminati

Sono rispettate le seguenti condizioni:

- Più del 50% degli occupanti ha meno di 65 anni.
- Almeno il 90% dell'area del progetto è costituito dai seguenti tipi di spazio e soddisfa le soglie di illuminamento associate:

L03 Progettazione illuminotecnica – aspetti circadiani

Obiettivo: fornire confort non visivo mantenendo il ritmo circadiano sincronizzato attraverso l'esposizione alla luce naturale all'interno degli ambienti, questo in quanto l'essere umano si è evoluto ai modelli di luce fornita dal Sole. Per fare ciò, a differenza del punto precedente che considera unicamente la quantità di luce sulle superfici, in questo Concept vengono analizzati anche i valori riferiti allo spettro e la durata e tempo di esposizione, i punti che influenzano il sistema circadiano. Come già anticipato, i dati in questo caso vengono considerati sul piano verticale e all'altezza dell'occhio per valutare la luce entrante.

Per tutti gli spazi, ad eccezione delle unità abitative, i livelli di luminosità (intensità) sono raggiunti per una durata di almeno quattro ore (a partire da mezzogiorno al più tardi) ad un'altezza di circa 45 centimetri sopra il piano di lavoro per tutte le attività lavorative in spazi normalmente occupati:

Points	Soglia		Soglia per i progetti con luce diurna potenziata
1	Almeno 150 EML [136 M-EDI(D65)]	o	Il progetto raggiunge almeno 120 EML [109 M-EDI(D65)] e L05 Parte 1 o L06 Parte 1
3	Almeno 275 EML [250 lux M-EDI(D65)]	o	Il progetto raggiunge almeno 180 EML [163 M-EDI(D65)] e L05 Parte 1 o L06 Parte 1

Per le unità abitative la luce elettrica deve raggiunge i livelli di intensità:

- Almeno 150 EML [136 lux M-EDI(D65)] oppure Almeno 240 EML [218 lux M-EDI(D65)] mentre i valori di soglia per i progetti con luce diurna potenziata restano invariati rispetto agli altri tipi di spazi non abitativi ad eccezione del punto 1 dell'L06 che non viene considerato; si aggiunge però un punto dell'L05 dovendo quindi rispettare almeno due punti della tabella in questione.
- flusso luminoso dimmerabile. Se viene utilizzata l'illuminazione automatizzata, viene automaticamente attenuata dopo le ore 20:00.
- I livelli di luce devono essere garantiti nei soggiorni e nelle cucine ad un'altezza di 150 cm al centro della stanza. Se sono presenti postazioni di lavoro, i livelli di luce devono essere garantiti ad un'altezza di 45 centimetri sopra il piano di lavoro.

L04 Controllo dell'abbagliamento della luce elettrica

Obiettivo: ridurre al minimo i contrasti di luce cioè l'abbagliamento prodotto dagli apparecchi elettrici utilizzando strategie di calcolo o più semplicemente valutando il tipo di illuminazione e la sua posizione nell'ambiente. In questo paragrafo viene fatta la differenziazione tra ambienti industriali e non cioè non viene fatta distinzione tra terziario e civile abitazione. Partendo da tutti gli spazio ad eccezione delle industrie vengono introdotte due opzioni:

- Opzione 1: considerazioni sugli apparecchi di illuminazione

Ogni apparecchio di illuminazione (esclusi gli apparecchi wall-washer, gli apparecchi nascosti e gli apparecchi decorativi installati come specificato dal produttore) all'interno di tutti gli spazi regolarmente occupati soddisfa i seguenti requisiti se misurato a un'emissione luminosa rappresentativa delle seguenti condizioni d'uso regolari:

    - Il 100% della luce viene emesso sopra il piano orizzontale.
    - Classificato con Unified Glare Rating (UGR) di 16 o inferiore.
    - Luminanza che non supera i 6.000 cd/m 2 a qualsiasi angolo compreso tra 45 e 90 gradi dal nadir.
- Opzione 2: Considerazioni sullo spazio

In tutti gli spazi regolarmente occupati deve essere soddisfatto il requisito Unified Glare Rating (UGR) di 16 o inferiore

Per le attività industriali i valori di riferimento sono gli stessi dei precedenti con un'unica differenza nel requisito UGR che deve di 19 o inferiore sia nell'opzione 1 che l'opzione 2.

L05 Strategie di progettazione della luce diurna

Obiettivo: fornire all'interno degli ambienti luce naturale tramite strategie di progettazione architettonica in modo da poter contribuire a sostenere risposte visive insieme all'illuminazione elettrica. L'intento è quello fornire un'illuminazione naturale sostenendo il benessere delle persone anche restando all'interno degli edifici dove trascorriamo gran parte del nostro tempo.

Per tutti gli spazi ad eccezione delle unità abitative:

Livello	disposizione interna		Progettazione di facciata
1	Il 70% di tutte le postazioni di lavoro devono collocarsi entro 7,50 metri dalla vetrata trasparente dell'involucro. Il fattore di trasmissione luminoso del componente trasparente (VLT) è superiore al 40%	o	La superficie vetrata dell'involucro non è inferiore al 15% della superficie del pavimento regolarmente occupata o della singola unità. Il fattore di trasmissione luminosa (VLT) delle finestre è superiore al 40%.
2	Il 70% di tutte le postazioni di lavoro devono collocarsi entro 5 metri dalla vetrata trasparente dell'involucro. La trasmissione della luce visibile (VLT) è superiore al 40%.	o	La vetratura dell'involucro non è inferiore al 25% della superficie del pavimento regolarmente occupata o della singola unità. La trasmissione della luce visibile (VLT) delle finestre è superiore al 40%.

Per le unità abitative:

- La vetrata verticale dell'involucro non è inferiore al 15% della superficie di ogni unità abitativa. La trasmissione della luce visibile (VLT) è superiore al 40%
- La vetrata verticale dell'involucro non è inferiore al 25% della superficie di ogni unità abitativa. La trasmissione della luce visibile (VLT) è superiore al 40%

Per tutti gli spazi l'illuminazione naturale necessita però di sistemi di ombreggiamento per evitati condizioni di abbagliamento o effetti negativi sul confort termico per questo necessitano sistemi di controllo della luce naturale che possono essere manuali controllate dagli occupanti o automatizzati.

L06 Simulazione della luce diurna

Obiettivo: fornire all'interno degli ambienti un'illuminazione che simula il daylight. Questa caratteristica WELL richiede di svolgere calcoli di simulazione della luce naturale per fornire informazioni e stabilire decisioni sulla progettazione di finestre e schermature solari per un corretto ombreggiamento al fine di fornire agli occupanti un'appropriata esposizione alla luce naturale.

Per tutti gli spazi eccetto unità abitative

Livelli	Calcoli secondo IES LM-83-12		Calcoli secondo l'allegato A di CEN 17037:2018
1	Media sDA300,50% viene raggiunta per > 55% della superficie calpestabile regolarmente occupata	o	L'illuminamento target di 28 fc viene raggiunto per >50% delle aree regolarmente occupate durante il 50% delle ore diurne dell'anno
2	Media sDA300,50% viene raggiunta per > 75% della superficie calpestabile regolarmente occupata	o	L'illuminamento target di 28 fc viene raggiunto per >50% dell'area totale e l'illuminamento medio di 9 fc viene raggiunto per >95% dell'area totale durante il 50% delle ore diurne dell'anno

Per le unità abitative non cambiano i calcoli secondo IES LM-83-12 mentre cambiano i parametri secondo l'allegato A di CEN 17037:2018:

- livello 1: L'illuminamento target 280 luxviene raggiunto per >50% dell'area della singola unità durante il 50% delle ore diurne dell'anno
- livello 2: L'illuminamento target di 280 lux per >50% dell'area unitaria individuale e l'illuminamento medio di 90 lux sono raggiunti per >95% dell'area unitaria individuale durante il 50% delle ore diurne dell'anno

L07 Equilibrio visivo

Obiettivo: creare ambienti ottimali per il confort visivo tramite strategie di illuminazione si naturale che artificiale per ottenere atmosfere richieste per lo svolgimento delle attività e mantenere prestazioni energetiche elevate. In questo paragrafo non vengono fatte distinzioni degli spazi.

- Opzione 1: parametri per l'equilibrio visivo

L'illuminazione ambientale in tutti gli spazi regolarmente occupati soddisfa almeno tre dei seguenti requisiti:

  - I rapporti di contrasto della luminanza orizzontale e verticale per un sistema di illuminazione ambientale non sono superiori a 10 tra zone adiacenti controllate in modo indipendente.
  - Un rapporto di uniformità dell'illuminamento di almeno 0,4 o 1:2,5 (livello di luce minimo: livello di luce medio) viene raggiunto su qualsiasi piano di lavoro orizzontale all'interno di uno spazio.
  - I cambiamenti automatici delle caratteristiche di illuminazione, come i livelli di luce, i cambiamenti di colore e la distribuzione, avvengono in un periodo di almeno 10 minuti.
  - La temperatura di colore correlata (CCT) in ogni stanza per dispositivi simili è costante (±200 K) in qualsiasi momento.

- Opzione 2: Design per l'equilibrio visivo

L'illuminazione è progettata tenendo in considerazione:

  - Rapporti di luminanza su zone adiacenti verticali e orizzontali.
  - Uniformità di illuminamento su piani di lavoro orizzontali.
  - Cambiamenti nelle caratteristiche di illuminazione, come livelli di luce, cambiamenti di colore e distribuzione.
  - Temperatura colore delle luci utilizzate

L08 Qualità della luce elettrica

Obiettivo: nei punti precedenti sono stati trattati aspetti della luce per sostenere il benessere visivo e non visivo senza fare distinzione sul tipo di sorgente. In questo concept viene analizzata l'illuminazione elettrica in modo specifico fornendo i requisiti che essa deve soddisfare nell'ambito della resa cromatica (CRI) e lo sfarfallio. L'uso di sorgenti elettriche con elevato CRI permette di migliorare la percezione degli spazi e degli oggetti con anche un miglioramento della percezione dei colori dovuto al fatto che l'essere umano è abituato alla resa cromatica fornita dalla luce naturale. Lo sfarfallio invece è associato all'affaticamento degli occhi con conseguenti disturbi come mal di testa, emicranie e in casi peggiori a crisi epilettiche. La distinzione in questo caso viene fatta sugli spazi di collegamento e circolazione.

- Migliore qualità di resa cromatica: tutti gli apparecchi di illuminazione negli spazi occupabili (ad eccezione degli apparecchi decorativi, delle luci di emergenza e di altra illuminazione per la segnaletica) soddisfano almeno uno dei seguenti requisiti di resa cromatica. Se si utilizza l'illuminazione a luce bianca regolabile, i requisiti vengono soddisfatti a intervalli di 1.000 K dall'estremità inferiore (con un minimo di 2.700 K) all'estremità superiore (con un massimo di 5.000 K):
  - IRC (Ra) ≥90.
  - CRI (Ra) ≥ 80 con R9 ≥ 50.
  - IES R f ≥ 78, IES R g ≥ 100, -1% ≤ IES R cs,h1 ≤ 15%.

- Gestione dello sfarfallio: Tutti gli apparecchi di illuminazione (ad eccezione delle luci decorative, delle luci di emergenza e di altra illuminazione per la segnaletica) e i relativi controlli all'interno degli spazi occupabili soddisfano almeno uno dei seguenti requisiti:
  - Classificato come "funzionamento a sfarfallio ridotto" per California Title 24, quando testato secondo i requisiti dell'appendice comune JA-10.
  - Pratiche consigliate 1, 2 o 3 come definito dallo standard IEEE 1789-2015 LED.
  - Pst LM ≤ 1.0 e SVM ≤ 0.6 per applicazioni indoor secondo NEMA 77-2017.

Per gli spazi di circolazione viene considerato solo la resa cromatica che scende ad un IRC ≥80

L09 Controllo dell'illuminazione da parte degli occupanti

Obiettivo: fornire una personalizzazione degli ambienti tramite apparecchiature innovative per modificare i parametri per sostenere le risposte circadiane e adattarsi alle preferenze degli utenti. Inoltre creare ambientazioni che migliorino la produttività, l'umore e il benessere. Questi requisiti sono validi per tutti gli spazi.

Migliorare la controllabilità da parte degli occupanti

1. Zone di illuminazione, i sistemi di illuminazione ambientale soddisfano i seguenti requisiti:

Tutti gli spazi regolarmente occupati devono contenere delle zone di illuminazionecome mostrato nella tabella seguente (nota: le singole stanze più piccole delle aree sottostanti e/o che hanno occupazioni inferiori a quelle elencate nella tabella sono considerate zone separate):

Livello	Numedo di zone		Numero di zone
1	una ogni 200 metri	o	una ogni 10 occupanti
2	una ogni 100 metri	o	una ogni 5 occupanti

2. Sistema di controllo dell'illuminazione, ogni zona di illuminazione soddisfa i seguenti requisiti:

- I sistemi di illuminazione hanno almeno tre livelli o scene di illuminazione che consentono di modificare i livelli di luce e hanno la capacità di modificare almeno uno dei seguenti elementi:
  - Colore.
  - Temperatura di colore.
  - Distribuzione della luce tramite il controllo di diversi gruppi di luci o tramite scenari preimpostati.
- Tutti gli occupanti regolari hanno il controllo del proprio ambiente di illuminazione immediato attraverso almeno uno dei seguenti:
  - Comandi manuali (es. interruttori o pannelli di controllo) situati nello stesso spazio di ciascuna zona di illuminazione.
  - Interfaccia digitale disponibile su computer o telefono.
- L'illuminazione per le pareti di presentazione o proiezione è controllata separatamente

Il protocollo WELL con il di calcolo dell'illuminamento secondo la metrica EML ha inserito all'interno del documento, sin dalla prima versione, un capitolo molto dettagliato riguardo all'illuminazione sia naturale che artificiale fornendo molti metodi differenti di valutazione della luce all'interno degli ambienti. Fino ad ora è mancato un parere scientifico ampiamente condiviso per realizzare una progettazione illuminotecnica che sostenesse le risposte biologiche alla luce, solo grazie ai recenti studi sull'argomento iniziano ad essere disponibili delle raccomandazioni in merito ma che come indica il termine stesso non definiscono dei requisiti minimi. Questi valori non sono ancora degli standard da rispettare in fase di progettazione in quanto non sono ancora definiti in modo dettagliato i fabbisogni di illuminazione soggettivi e per questo motivo non è da escludere la possibilità che determinati livelli di illuminazione possano essere benefici per alcune persone e dannosi per altre. Solo nel 2018, come indicato in precedenza, è stato proposto un sistema di metriche basate sull'irradianza della luce ponderata sulla base della sensibilità spettrale dei fotorecettori e valutando gli effetti sulle cinque proteine dell'opsina retinica umana (melanopsina, rodopsina, opsina del cono S, M e L). Questo sistema di metriche è stato reso conforme al sistema internazionale CIE. Le proprietà della luce diurna standard (D65) corrispondono ai tassi effettivi di cattura fotonica per ciascuna opsina e sono espresse come luce diurna equivalente α-opica di illuminamento (EDI α-opic). La sensibilità alla luce delle risposte fisiologiche umane può essere approssimata in modo affidabile dall'irradianza α-opica per melanopsina o dal corrispondente m-EDI (EDI melanope) [32]. la maggior parte dei risultati ottenuti da studi recenti supportano l'opinione che il miglior riferimento, disponibile attualmente, delle risposte non visive è l'EDI melanopico e vale sia per il giorno che per la notte. Questi esiti sono delle conclusioni di studi scientifici condotti in laboratori controllati per migliorare gli effetti non visivi, tuttavia per poter avere dei riscontri concreti per valutare l'impatto dell'illuminazione in ambienti reali sono state condotte prove sul campo. L'illuminazione elettrica all'interno degli edifici è associata ad una ridotta esposizione alla luce in cui la società moderna si è adattata sperimentando abitualmente un m-EDI <250 lx durante il giorno. Nelle prove condotte sono stati quindi somministrati livelli di luce arricchiti di luce blu e ad intensità maggiori: negli uffici normalmente illuminati da livelli <150 lx, sono state utilizzate sorgenti tra 3000-4000K e condizioni tra circa 170-290 lx. Nelle scuole sono stati impiegati valori simili con luce arricchita di lunghezze d'onda corte a 17000 K e un EDI melanopico >500 lx. Nelle case di cura livelli come i precedenti si sono rivelati eccessivi per migliorare la qualità del sonno.

32. Recommendations for Healthy Daytime, Evening, and Night-Time Indoor Light Exposure

Obiettivi CIE [44]:

1. Fornire un forum internazionale per la discussione di tutte le questioni relative alla scienza, alla tecnologia e all'arte nei settori della luce e dell'illuminazione e per lo scambio di informazioni in questi campi tra paesi.
2. Sviluppare standard e procedure di base della metrologia nei settori della luce e dell'illuminazione.
3. Fornire orientamenti nell'applicazione di principi e procedure nello sviluppo di standard internazionali e nazionali nei settori della luce e dell'illuminazione.
4. Preparare e pubblicare standard, relazioni e altre pubblicazioni riguardanti tutte le questioni relative alla scienza, alla tecnologia e all'arte nei settori della luce e dell'illuminazione.
5. Mantenere il collegamento e l'interazione tecnica con altre organizzazioni internazionali che si occupano di questioni relative alla scienza, alla tecnologia, alla normalizzazione e all'arte nei settori della luce e dell'illuminazione.

Gli standard e le relazioni tecniche sviluppate da queste divisioni internazionali della CIE sono accettati in tutto il mondo, i dati forniti dalla CIE sono riconosciuto come standard di riferimento su tutti gli aspetti della luce e dell'illuminazione.

Raccomandazioni sulla luce diurna

Durante il giorno, l'EDI melanopico minimo dovrebbe essere di 250 lx misurato sul piano verticale al 1,2 m di altezza. La luce diurna se disponibile dovrebbe essere la principale fonte di illuminazione e solo se necessario integrare un'illuminazione artificiale

Raccomandazioni per la luce serale

A partire da almeno tre ore prima di coricarsi, l'EDI melanopico raccomandato è di 10 lx misurati all'occhio a 1,2 m sul piano verticale. In questo caso la luce dovrebbe essere povera di lunghezza d'onda corte per non disturbare la sincronizzazione del ritmo circadiano.

Raccomandazioni per la luce notturna

La notte è preferibile che sia priva di luce, in caso contrario è preferibile che non sia superiore a EDI melanopico di 1 lx, nel caso sia necessaria una visione durante la notte, il livello massimo è di 10 lx misurati allo stesso modo dei precedenti.

44. cie222_2017 _lighting controls

Considerazioni aggiuntive

- Queste raccomandazioni dovrebbero essere applicate ogni giorno alla stessa ora per quanto possibile proprio per adattarsi al ciclo giorno-notte.
- Con questi nuovi valori non si intende sostituire i requisiti fotometrici per il compito visivo esistenti, le risposte non visive dovrebbero costituire un livello aggiuntivo di considerazioni a condizione che gli standard visivi vengano rispettati. Le attuali specifiche da rispettare nel progetto illuminotecnico sono le esigenze visive quantitative, l'abbagliamento, la resa cromatica e la distribuzione della luminanza. Queste specifiche hanno la finalità di permettere lo svolgimento delle attività in modo efficiente
- Queste raccomandazioni sono destinate a persone adulte che seguono orari diurni regolari

Quest'ultima considerazione è l'attuale limitazione dei requisiti illuminotecnici in quanto queste raccomandazioni dovrebbero essere destinate a tuti e ampiamente applicabili in tutti i contesti lavorativi ed educativi. Il problema si presenta a causa della diversa sensibilità soggettiva alla luce che possono variare anche di dieci volte tra una persona e l'altra: l'età, ad esempio, è uno dei principali fattori, un bambino necessita di livelli di luce inferiori rispetto ad una persona anziana che ha una sensibilità alla luce minore. Un'altra limitazione è rivolta alle attività lavorative notturne per le quali non ci sono ancora studi maturi e per la quale queste raccomandazioni non sono rivolta a questo settore. Infine ci sono alcune situazioni in cui le raccomandazioni le risposte circadiane entrano in conflitto con i requisiti per le risposte visive le quali hanno la precedenza in materia attuativa del progetto dell'illuminazione.

La ricerca di sistemi di illuminazione artificiale che metta al primo posto gli effetti non visivi della luce ha determinato lo sviluppo dell'integrative lighting, che sia derivata da un prodotto di illuminazione o che derivi da un accurato studio della luce in ambiente, l'obiettivo è quello di sostenere i ritmi circadiani umani. Per fare questo si utilizza come modello di riferimento il daylight ossia il modello di luce naturale. L'illuminazione human-centric quindi è una situazione di illuminazione dinamica nelle caratteristiche intrinseche della radiazione ottica al fine di adattarsi alle varie ore della giornata e simulare l'andamento del sole per sostenere meglio le risposte circadiane. La tecnologia in questo caso ci viene in aiuto con l'avvento di questi apparecchi illuminotecnici e sistemi intelligenti e personalizzabili, si sta diffondendo una maggiore consapevolezza nelle persone dell'esistenza di mezzi per migliorare le condizioni di luce indoor. L'illuminazione dinamica è una strategia di illuminazione che risponde alle esigenze imposte dall'illuminazione circadiana che abbina un apparecchio luminoso di nuova generazione ad un sistema di controllo dedicato. Questi sono i soggetti che lavorano insieme per riprodurre un'esperienza visiva ottimale per i nostri fabbisogni biologici restando in spazi chiusi e continuando a svolgere le nostre attività quotidiane.

SISTEMI DI ILLUMINAZIONE E GESTIONE

Illuminazione Dinamica

Il nostro sistema circadiano è molto delicato e la luce è il maggior fattore che influenza il suo equilibrio tramite le proprietà della radiazione (intensità, spettro, tempo e durata di esposizione), le caratteristiche architettoniche (posizione geografica, orientamento, aperture) e le variazioni metereologiche e stagionali per quanto riguarda la luce naturale; questi aspetti agiscono sulla sincronizzazione circadiana in termini di fase e ampiezza. Per questo motivo è necessaria una nuova risposta ad una domanda molto esigente di qualità dell'illuminazione. La luce dinamica nasce con l'obiettivo di sostenere in primis gli effetti non visivi e visivi in ambienti lavorativi, in istituti educativi e in strutture sanitarie, cioè in quei luoghi molto frequentati da persone che vi soggiornano per diverse ore del giorno. La strategia dietro all'impiego di un'illuminazione dinamica non è stata discussa in modo definitivo [34] ma resta il fatto che ormai sono molte le possibilità che questo sistema può fornire dal punto di vista sia visivo che fisiologico e la motivazione implicita è "more light when needed, less light when possible" (più luce quando necessario, meno luce quando possibile). L'illuminazione dinamica è un sistema di illuminazione artificiale che vede l'impiego di apparecchi in cui è possibile modificare le impostazioni di intensità (dimmer) e dello spettro (tunable white). Durante il corso del giorno è quindi possibile simulare l'illuminazione naturale variando durante l'arco della giornata i parametri di potenza e CCT.

Fermo restando la mancanza di risultati chiari e coerenti che permetterebbero di definire dei requisiti di riferimento per sostenere i ritmi circadiani, sono state proposte possibili soluzioni che vedono l'uso di questa strategia. Alcune di queste ricerche hanno testato l'effetto della CCT su vari compiti. Simili sono anche i risultati ottenuti da studi sull'intensità della luce in cui si ritrovano miglioramenti su compiti più semplici ma pochi per lavori difficili. Ad esempio in alcuni studi è stata utilizzata una luce a lunghezza d'onda più corta durante il mattino e in alcuni casi le ricerche sono state condotte variando la CCT durante tutta la giornata compresa tra circa 3700 K e 6000 K con un illuminamento tra 200 e 1100 lux.

34. A sistematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios

Inoltre gran parte degli studi condotti sull'illuminazione dinamica hanno però dimostrato di poter influenzare positivamente il sonno se vengono tenuti in considerazione i fattori che ormai sappiamo essere basilari in un'illuminazione human-centrc: la potenza biologica, la durata e il momento della somministrazione della radiazione. È stato stabilito saldamente il miglioramento del sonno nelle persone che vengono esposte anche ad una illuminazione con graduale aumento e variazione di temperatura di colore che corrisponde ai valori dell'alba. Non si sono verificati miglioramenti nella vigilanza e attenzione a seguito dell'esposizione all'illuminazione dinamica ma tuttavia, secondo i principi che influenzano gli effetti non visivi, restano validi questi miglioramenti a seguito di esposizioni a potenze biologiche più elevate.

Sistemi di controllo dell'illuminazione

I sistemi di illuminazione circadiani sono più complessi rispetto un tipo di illuminazione tradizionale a cui spesso siamo abituati, non sono costituiti solamente da apparecchi di illuminazione gestiti con sistemi di accensione/spegnimento manuali, ma operano grazie ad una sua gestione automatica dedicata tramite tecnologie di controllo. Questo sottosistema è indispensabile per il funzionamento di un apparecchio di tipo dinamico e ne esistono di molteplici tipologie dai più semplici che controllano un singolo dispositivo a impianti di controllo per interi edifici. Essendo però di primaria importanza la luce naturale, per sostenere i ritmi circadiani, l'introduzione dell'illuminazione elettrica interviene solo per soddisfare le esigenze di illuminamento quando quella proveniente dal Sole non è sufficiente o talvolta provoca situazioni di disconfort per lo svolgimento delle attività all'interno degli edifici. Per questo si rende necessaria anche una maggiore qualità nel controllo della luce entrante dalle finestre in quanto potrebbe essere causa di abbagliamento e surriscaldamento termico estivo anche se questo aspetto si rivela utile in stagioni fredde come apporti termici.

Senza dubbio ricopre un ruolo fondamentale l'integrazione dell'illuminazione elettrica con quella naturale controllata mediante l'uso di schermature solari mobili, di tende e vetri elettro-cromici per regolare la luce diurna. Questi sistemi hanno un diretto collegamento con i sistemi di illuminazione interna come regolatori della luce diurna e specialmente dell'abbagliamento e controllo termico. Ad esempio in aree geografiche con climi freddi, l'uso di schermature può avere un impatto negativo sul consumo di energia poiché riduce l'ingresso della luce diurna e di conseguenza aumenterà la necessità di riscaldamento per i minor apporti gratuiti. Al contrario nei climi temperati e caldi, come il Mediterraneo, l'uso di tende o altri sistemi possono portare risparmi energetici, anche se il fabbisogno energetico per l'illuminazione può aumentare, poiché i carichi di raffreddamento diminuiscono significativamente.

Come per l'illuminazione interna, il controllo di questi componenti può essere automatica (tramite sensori come crepuscolari), manuale attivato dall'utente o mista con una gestione automatica ma in cui l'occupante può agire manualmente nel caso in cui le condizioni di illuminazione interne non dovessero rispecchiare le necessità. Utilizzare sistemi di gestione dell'illuminazione naturale per il rilevamento e controllo dell'abbagliamento in modo automatico o semiautomatico richiede di misurare il valore di abbagliamento in uno spazio, compreso il livello di adattamento dell'osservatore. Nella maggior parte dei casi, i sistemi di gestione controllano esclusivamente l'illuminazione mentre i sistemi di schermatura e quindi il controllo della luce naturale sono comandati in modalità manuale. La gestione completamente automatica anche dei sistemi di ombreggiamento diurno crea disagio tra gli utilizzatori che desiderano comunque poter mantenere il possibile controllo dei sistemi. Il controllo dell'illuminazione naturale può essere integrato ad un sistema di illuminazione artificiale e, sebbene possano far parte di due strutture di controllo differenti, la gestione delle schermature per la regolazione dell'ombreggiamento delle finestre o con tendaggi può essere abbinata ad un controllo e regolazione dei livelli di illuminazione elettrica ottimizzando così il confort dell'utente.

Ma la luce naturale per quanto sia piacevole e salutare non sempre è sufficiente negli ambienti interni: l'uomo in molti casi utilizza le proprie strutture in orari serali e notturni, non solo nelle ore centrali della giornata, per questo risulta molto importante curare la progettazione dell'illuminazione artificiale. Generalmente gli ambienti lavorativi specie quelli turnisti e le scuole richiedono un'illuminazione che integra la mancanza di luce naturale.

Tutte le soluzioni illuminotecniche mirate a migliorare il confort visivo e il benessere soggettivo generale puntano a rendere gli ambienti interni sempre più adatti alla vita indoor che stiamo conducendo. Nonostante l'ambiente di lavoro di oggi stia diventando sempre più delocalizzato e i lavoratori valutano i vantaggi del lavoro in remoto tramite connessione via Internet, ci saranno sempre professioni che non beneficeranno dell'opportunità mutevole di lavorare in smart-working, come tutte le attività industriali, di servizio o di vendita e molte altre. Tra le attività che più di tutte permetteranno sempre più questo "lusso" ci sono gli uffici mentre gli spazi per riunioni molto probabilmente rimarranno richiesti per supportare il lavoro

di squadra e una comunicazione efficace. Per queste attività svolte in ambienti prettamente lavorativi, l'illuminazione è un fattore fondamentale per sostenere il benessere degli utenti. Il sistema di illuminazione in sé però non è sufficiente, poiché in ottica integrative lighting risulta essenziale il controllo e una gestione dinamica dell'illuminazione, tramite un sistema impiantistico che controlli tutte le sue parti e le metta in comunicazione tra loro. L'utilizzo dei sistemi di gestione non è cosa nuova, da quando esiste la lampadina elettrica per illuminare le nostre città son stati necessari da dispositivi per controllare tali luci tramite il classico interruttore di accensione e spegnimento. Nel tempo sono state sviluppate altre tecnologie che permettono una gestione sempre più complessa, la concezione di sistema di controllo automatizzato è la nuova frontiera che mette le sue radici a partire dagli anni '80 dallo sviluppo delle automazioni nell'ambito della produzione industriale. Oggi il principale scopo di questi sistemi è il risparmio energetico per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici mantenendo standard di illuminazione adeguati al confort visivo. Attualmente questi requisiti si limitano al soddisfacimento delle necessità di visione per lo svolgimento delle attività, i controlli operano su parametri quantitativi in termini di potenza (flusso luminoso emesso). In base alla tipologia di queste strategie di controllo della luce che sia naturale o artificiale, può influire la qualità globale di un progetto illuminotecnico e a trarne vantaggi sono i risparmi energetici in termini di corrente elettrica consumata. È stato stimato, ad esempio, che dal 30% al 50% dello spazio disponibile in un edificio per uffici rimane inutilizzato nel corso di una giornata lavorativa e questo comporta sprechi importanti di elettricità. Se progettate correttamente, queste strategie di illuminazione potrebbero promuovere migliori comportamenti per ridurre i carichi di energia elettrica e aumentare l'uso di strategie di l'illuminazione diurna riducendo il consumo di energia durante i periodi di punta di occupazione. Le possibili applicazioni di sistemi di illuminazione con controlli automatici o semi-automatici sono numerose a partire da uffici e scuole come principali strutture in cui il benessere fisiologico è al primo posto ma trovano sicuramente spazio anche in centri commerciali, industrie, magazzini, in edilizia civile e strutture sanitarie. Quest'ultimo settore potrebbe trarre grandi benefici come ad esempio la gestione della luce blu per sostenere meglio il sonno o il rilevamento di presenza con l'integrazione di dispositivi indossabili per evitare cadute dei pazienti e ottimizzare le risposte visive per il personale sanitario. Questi apparecchi di rilevamento potrebbero anche essere utilizzati per monitorare i segni vitali delle persone ricoverate in ambienti sanitari.

Senza dubbio questa tecnologia aumenta notevolmente le potenzialità di dinamicità dell'intero sistema di illuminazione degli ambienti interni, le esigenze di illuminazione possono cambiare nel corso della giornata e dell'anno, sia in funzione delle attività svolte e sia a seconda delle disponibilità di luce naturale. Purtroppo però negli studi condotti sulle analisi di mercato finalizzate all'individuazione delle attività che utilizzano sistemi di controllo automatizzato, è emerso che sono poche queste strategie di illuminazione e quelle esistenti sono realizzate in impianti di grandi dimensioni e molto complessi.

Ma che cos'è un sistema di controllo? Un sistema di gestione e controllo della luce è definito da un insieme di dispositivi atti a ricevere dati e a rielaborarli in segnali in grado di modificare le condizioni di funzionamento dei sistemi di illuminazione naturale o artificiale [45]. Questi dati, in un sistema automatizzato, vengono raccolti dall'ambiente stesso (presenza/assenza di persone o disponibilità di luce diurna) oppure possono provenire dalla programmazione delle azioni di gestione della luce. Non è l'utente a decidere quando limitare l'ingresso di luce naturale o in che entità aumentare o diminuire la potenza degli apparecchi elettrici.

Il problema attuale dei sistemi di controllo automatici risiede nella difficoltà di accettazione di questi meccanismi nelle persone. Anche in ambienti extra residenziali, dove l'illuminazione già da tempo è spesso automatizzata, in particolare nei sistemi più complessi, è emersa la difficoltà da parte degli occupanti nell'utilizzo e soprattutto nell'accettazione di questo tipo di gestione dell'illuminazione. Essendo che queste strategie di controllo dell'illuminazione hanno un effetto intrinseco con i consumi energetici è sempre più importante informare gli utilizzatori sull'uso di questi sistemi soprattutto perché è proprio l'utente la variabile che influisce maggiormente sui risparmi energetici. A seguito di questa carenza di formazione degli utenti, nel giugno 2009 il comitato tecnico CIE ha approvato una nuova proposta per uno schema di decisione per il controllo dell'illuminazione in ambienti non residenziali. Gli obiettivi sono quindi offrire delle linee guida al fine di bilanciare la qualità dell'illuminazione, il confort dell'utente e l'efficienza energetica e lavorare sulle esigenze dell'utente per determinare la soluzione di controllo più efficacie anche ai fini energetici. Gli studi condotti hanno indicato che l'efficacia di questi controlli viene raggiunta solo se l'utente ha la possibilità di poter intervenire con i controlli manuali quando richiesto. La possibilità di una gestione "tradizionale" è essenziale quando si applicano sistemi di controllo dell'illuminazione automatici. Definire i controlli dell'illuminazione tradizionali in contesti di impianti automatizzati non è semplice in quanto il termine stesso riconduce ad apparecchiature che ci sono comuni e che utilizziamo quo-

45. sistemi di gestione e controllo della luce naturale e artificiale, C. Aghemo, A. Pellegrino, S. Cammarano, Novembre 2009

tidianamente come pulsanti, interruttori o sensori di movimento. Oggi questi sistemi sono molto più ampi e il sistema di controllo riceve input di comando da apparecchi come schermi posti in luoghi strategici dell'edificio da dove è possibile gestire tutto il sistema o tramite connessioni wi-fi e bluetooth utilizzando dispositivi portatili come smartphone, tablet e pc. Nel percorso di una progettazione dell'illuminazione, che comprende quindi controlli automatici con scenari e controlli manuali, ci si deve imbattere con le preferenze degli utenti. Spesso le persone preferiscono scegliere le condizioni di illuminazione piuttosto che essere costretti ad accettare le condizioni pre-impostate: la scoperta più importante ed evidente è l'effetto positivo dei controlli personali sulla soddisfazione, confort e prestazioni. Gli studi sul campo hanno fatto emergere che ciò può comportare un umore migliore, meno problemi di salute e una maggiore soddisfazione sul lavoro tra i dipendenti e trovavano scomode le condizioni che non possono controllare. Pertanto, l'uso del controllo personale influisce indirettamente sulla produttività organizzativa inoltre esiste una forte correlazione tra il non utilizzo di controlli dell'illuminazione per paura del conflitto con la tecnologia e sentimenti di insoddisfazione dovuti alla mancanza di controllo. La letteratura mostra fortemente la necessità di avere sistemi progettati in modo da massimizzare la probabilità di utilizzo dei controlli da parte di tutti utenti in uguale misura e in modo chiaro e semplice. Le persone ricercano l'opportunità di avere il controllo e per questa ragione, per evitare difficoltà, il più semplice è di solito il migliore utilizzando apparecchiature comuni a tutti. Quando sono combinati con i controlli manuali, il tasso di gradimento aumenta nei confronti di questi sistemi. Quindi un impianto progettato in modo ottimale è un impianto che abbina una gestione generale automatica e il controllo manuale, che dovrebbe essere ben spiegato all'utente cosi che possa utilizzarlo alle massime possibilità. Tuttavia, ci sono anche molte persone che trovano comodo non doversi preoccupare di cercare gli interruttori per spegnere le luci, ma per poter accontentare tutti e avere un alto grado di accettazione e gradimento i controlli manuali restano comunque necessari, anche per sopperire a eventuali problemi con altri dispositivi di rilevamento di dati input.

Un altro aspetto che appoggia l'uso di questi sistemi di controllo è la flessibilità nella progettazione e nella gestione dell'impianto di illuminazione in quanto permette di riconfigurare un'installazione senza dover intervenire sul cablaggio fisico degli apparecchi, al variare delle esigenze e delle attività svolte in ambiente. Inoltre è possibile ridurre i costi di manutenzione dell'impianto di illuminazione in quanto, pur essendo maggiori i costi iniziali di realizzazione, la manutenzione dell'intero sistema sarà facilitata nell'eventuale verifica e sostituzione di

dispositivi, sorgenti di illuminazione o reattori elettronici degli apparecchi.

Riassumendo, le ragioni per cui un proprietario dell'edificio o una committenza può decidere di optare per una gestione della luce, lo fa per i seguenti motivi:

- Un notevole risparmio energetico grazie al controllo che si traduce in risparmi economici anche per l'installazione stessa dei dispositivi
- Migliora la soddisfazione degli utenti sostenendo le risposte visive e non visive
- Supporta l'aspetto dell'edificio, l'ambiente e nel caso di ambienti lavorativi anche dell'immagine dell'azienda
- Aumenta la sicurezza

Ognuno di questi motivi avrà comunque un'importanza diversa nei vari gruppi di decisori come gestori di strutture, proprietari, gestori di risorse umane, architetti, lighting designer, produttori e molti altri. In altri contesti come possono essere musei o edifici di importanza storica o semplicemente per dare importanza a determinati elementi architettonici, la luce ha come obiettivo primario la valorizzazione e l'enfatizzazione, per produrre una stimolazione visiva nell'osservatore tramite questa illuminazione scenografica. I sistemi finalizzati alla valorizzazione degli ambienti che dominano il mercato sono le sorgenti con controllo RGB che permettono di variare l'intensità e il colore della luce. Non è quindi possibile soddisfare requisiti di illuminazione human-centric non essendo l'obiettivo di questi sistemi di illuminazione.

Strategie di controllo dell'illuminazione

Come sistema di controllo sono state identificate diverse possibili strategie, sia per l'illuminazione diurna che elettrica, per fornire delle indicazioni su quale strada sarebbe più efficace percorrere a partire dalla definizione dello spazio architettonico nel caso di nuove costruzioni o le tecnologie più idonee da utilizzare per l'illuminazione elettrica.

Strategia di integrazione luce naturale - elettrica

I luoghi di lavoro in prossimità di aperture vetrate o in generale vicino a fonti di luce diurna possono generalmente sopperire al fabbisogno di illuminamento interno consentendo lo spegni-

mento totale degli impianti di illuminazione artificiale per gran parte della giornata. Nelle restanti ore del giorno e in condizioni metereologiche sfavorevoli, questo meccanismo non è applicabile e necessita di un'integrazione elettrica supplementare temporanea per garantire i livelli minimi visivi necessari. Diverso è il discorso in ambienti molto ampi dove le postazioni di lavoro sono situate lontano dalla luce del giorno e hanno bisogno di illuminazione artificiale aggiuntiva durante tutte le ore della giornata o di lavoro per bilanciare la distribuzione della luminosità della stanza. Questa tecnologia è identificata con l'acronimo PSALI (Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors) che viene abbinata sempre a sistemi di controllo per mantenere i valori minimi richiesti e ridurre i consumi di energia elettrica. I due sistemi abbinati possono essere completamente automatizzati grazie alla raccolta di dati della luce diurna. L'efficacia di questa gestione è influenzata da diversi fattori:

- forme, dimensioni e posizionamenti delle finestre nelle costruzioni,
- dimensioni e forma delle stanze,
- dimensione e posizione delle ostruzioni davanti alle finestre,
- vegetazione e suoi cambiamenti stagionali,
- orientamento della finestra,
- proprietà ottiche dei materiali trasparenti nelle aperture,
- proprietà ottiche delle superfici riflettenti interne ed esterne,
- proprietà ottiche dei dispositivi per la schermatura, il reindirizzamento e il trasporto di luce solare
- requisiti di attività visive e protezione dall'abbagliamento negli interni,
- dimensioni e ubicazione dei luoghi di lavoro,
- orario di lavoro
- manutenzione dei materiali trasparenti, dispositivi di luce diurna e sistema di controllo dell'illuminazione.

Alcuni dispositivi sono più semplici prendendo in considerazione solo la luce diurna media disponibile, altri hanno approcci più complessi e sofisticati basati comunque sul daylight come i precedenti ma che considerano anche i dati geografici e persino metereologici per valutare la distribuzione della luminanza del cielo. Questi sensori per funzionare correttamente in modo ottimale possono essere incorporati negli apparecchi di illuminazione o installati esternamente, in questo caso il posizionamento è essenziale in modo da fornire una vera indicazione della luce diurna e della luce elettrica combinati non solo per valutare il livello stesso di luce ma anche per tenere in considerazione, ad esempio, l'emissione incoerente delle sorgenti che generano situazioni scomode per la visione dell'occupante. Lo scopo di questa funzione di controllo è quello

di assicurare un livello di illuminamento richiesto sul luogo di lavoro come combinazione di luce diurna ed elettrica [44]. In questi specifici casi, essendo questa una strategia che integra la scarsità di l'illuminazione diurna in ambienti molto grandi con l'illuminazione elettrica, non richiede uno studio "human-centric"; gli apparecchi di illuminazione utilizzati regolano l'intensità che è la maggior responsabile degli spostamenti di fase dei ritmi circadiani.

Strategia di regolazione pre-impostata

La regolazione del livello di illuminazione messa a punto tramite set point con programmi pre-impostati è una strategia di controllo del risparmio energetico in cui l'emissione luminosa massima di un singolo apparecchio o gruppo di apparecchi è programmata per fornire la quantità di luce appropriata per un determinato ambiente. In questo caso è possibile ipotizzare che solo il personale autorizzato può modificare le impostazioni di sistema. Inoltre si presta ad essere flessibile a seconda della attività, i valori di illuminazione possono essere modificati grazie a degli scenari per soddisfare le varie esigenze invece di aggiungere o rimuovere apparecchi.

Strategia di pianificazione temporale

A seconda della giornata, si possono optare delle scelte di illuminazione definite da degli specifici orari. Cambiare o attenuare l'illuminazione è un modo semplice per risparmiare energia che è il principale obiettivo negli ambienti lavorativi dove spesso si verificano casi di sprechi di corrente in illuminazione. Questo risparmio sarà più attenuato durante l'uso di un ufficio ma è molto più alto verso sera quando sono possibili intensità di illuminamento inferiori. Per applicare un programma di questo tipo sono necessari apparecchi in grado di variare le caratteristiche di illuminazione.

Controllo della domanda

Spesso le attività in una stanza variano nel corso della giornata e per ognuna di queste è possibile che l'illuminazione richiesta sia differente e che possa quindi essere cambiata. Se il controllo è manuale si parla di "task demand" o "user demand". Per le diverse richieste di attività o dell'utente è possibile offrire diverse impostazioni di illuminazione con livelli di luce per adattarsi alle diverse. Questa strategia di modulazione statica viene scelta per eliminare la sovra illuminazione e agire positivamente sui risparmi energetici.

44. cie222_2017 _lighting controls

Strategia di illuminazione algoritmica

L'illuminazione algoritmica è definita come una variazione preimpostata dell'intensità di luce regolando le condizioni di illuminazione nel tempo in un'impostazione specifica del sistema di illuminazione all'interno di uno spazio. Le condizioni di illuminazione possono variare nel tempo in modo conseguente alla variazione della luce presente in ambiente: maggiore illuminamento, distribuzione della luminanza e spettro della luce diurna e/o illuminazione artificiale. Per spiegare meglio il concetto si tratta di un sistema di illuminazione caratterizzato da impostazioni di luce (scene) differenziate richiamabili a seconda della necessità che a loro volta lavorano in un regime dinamico per adattarsi all'illuminazione naturale entrante mantenendo livelli di illuminamento sulle superfici di lavoro costanti. L'illuminazione algoritmica può stimolare le persone e può avere un impatto positivo sul benessere umano e sono comunemente collegati ai sistemi circadiani umani. Questi sistemi di illuminazione possono essere collegati a sistemi di rilevamento dell'occupazione e rilevamento della luce diurna. I programmi di illuminazione algoritmica possono essere gestiti manualmente o automaticamente per determinati periodi durante il giorno.

Rilevamento dell'occupazione

Con i sistemi di rilevamento dell'occupazione, l'illuminazione viene automaticamente accesa, spenta o attenuata da un dispositivo attivo del sistema di controllo in base alla presenza di persone in un ambiente che viene rilevata. Con i sistemi di rilevamento dell'occupazione occorre specificare se agire in condizioni di assenze o di presenza. Se si basa sull'assenza, il sistema spegne automaticamente le luci quando nessuno è in giro, ma devono essere accese manualmente quando necessario. Con il rilevamento della presenza il sistema accenderà automaticamente il sistema quando qualcuno entra nella zona di rilevamento e spegnerà automaticamente le luci quando non è presente nessuno. Questa strategia di controllo è consigliata in spazi utilizzati occasionalmente o normalmente non occupati. Sistemi più sofisticati integrano funzioni più avanzate in cui se i sensori di presenza rilevano un posto vacante le luci vengono abbassate per un periodo di tempo prima dello spegnimento oppure con la funzione corridoio può anche attenuare l'illuminazione a un livello basso senza spegnerla completamente. La necessità di utilizzare questi sistemi di controllo è messa in evidenza dal fatto che gli occupanti spesso non spengono diligentemente le luci quando si spostano tra gli spazi, in generale è stata riscontrata un'ampia variabilità del potenziale di risparmio energetico, dal 10 % all'85 %.

Strategie di controllo costante della luce

I controlli dell'illuminamento mantenuto regolano l'output luminoso per mantenere il livello minimo di illuminamento, per fare ciò si possono adoperare due procedure. La prima consiste nell'attenuare il lighting artificiale all'aumentare del daylight in modo da mantenere un illuminamento complessivo costante (basata sulla strategia di raccolta diurna), il secondo regola l'intensità in base al livello di vecchiezza e mantenimento degli apparecchi. Inizialmente i livelli sono attenuati e aumentano gradualmente durante tutta la durata dell'installazione per bilanciare la perdita di rendimento dovuta all'invecchiamento e allo stato di pulizia. Questo sistema di applicazione è chiamato controllo del mantenimento del flusso luminoso o compensazione dell'ammortamento del flusso luminoso [44]. Avere la possibilità di attenuare automaticamente la luce iniziale di un nuovo impianto di illuminazione si traduce in un risparmio energetico senza compromettere i livelli di illuminazione necessari. I risparmi ricavabili da un'illuminazione costante derivano quindi dalla tecnologia installata in quanto, non avendo momenti di spegnimento durante l'uso dell'edificio, i sistemi di controllo non incidono nei consumi.

Telecamere

Un nuovo sviluppo della tecnologia di controllo di sistemi di illuminazione automatizzati in una prossima generazione potrebbe riguardare l'integrazione di telecamere infrarossi e ad immagini per l'acquisizione di dati basati sulla luminanza utilizzando l'imaging HDR per migliorare con accuratezza il rilevamento dell'abbagliamento visivo, promuovere il confort visivo, ottimizzare il dosaggio circadiano per gli occupanti negli edifici e prevenire incendi e migliorare la sicurezza. Queste telecamere wi-fi e/o bluetooth aggiuntive potrebbero rappresentare un'implementazione dei sensori e potrebbero essere posizionate in modo indipendente. Trovano impiego dove sia necessaria una rappresentazione più precisa del campo visivo verticale o essere utilizzati per decisioni automatiche di controllo di schermature solari mobili. Tuttavia, sono sempre più in aumento le preoccupazioni sulla privacy che stanno diventando sempre più rilevanti e potrebbero ostacolare alcune future integrazioni e/o applicazioni avanzate. Le maggiori preoccupazioni sono rivolte alla proliferazione delle telecamere nella sfera pubblica: mentre i controlli dell'illuminazione tramite la lettura di dati forniti dalle telecamere mostrano un elevato potenziale per migliorare il comfort visivo degli occupanti, rappresentano anche un rischio per la privacy e la sicurezza. Utilizzare dati visivi a bassa risoluzione potrebbero potenzialmente affrontare queste preoccupazioni, ma necessiterebbero di introdurre sistemi di

44. cie222_2017 _lighting controls

controllo ulteriori e più complessi a causa delle ulteriori incertezze che deriverebbero dall'uso di queste telecamere.

Quasi tutte queste strategie di controllo dell'illuminazione sono focalizzate al risparmio energetico garantendo livelli visivi adeguati allo svolgimento delle varie attività ma non prendono in considerazione gli aspetti non visivi. Per valutare questa strategia di illuminazione devono essere migliorate le modalità di rilevamento dei sensori (generalmente fissati a soffitto) come quelli utilizzati per la raccolta di luce diurna. Attualmente le tecnologie automatizzate esistenti si basano su letture della luce sul piano orizzontale per verificare la quantità di illuminamento sui piani di lavoro o al piano di calpestio, misura quindi la quantità. La tendenza dovrebbe parallelamente concentrarsi anche sugli effetti fisiologici e integrare sensori che leggono valori di luminanza su piani verticali che come le telecamere verificherebbero situazioni di abbagliamento o livelli di luce incoerenti rispetto a quelli necessari per sostenere il sistema circadiano. Questi sensori, più si avvicinano al campo visivo sperimentato dagli occupanti, più sarà accurata la valutazione dell'abbagliamento percepito. Le strategie elencate, sia che abbiano l'obiettivo di rispondere ad esigenze visive sia non visive o che siano mirate al risparmio energetico, lavorano in modalità automatica o semi-automatica, ciò significa che le funzioni da eseguire avvengono a seconda delle logiche di acquisizione dei dati input. Queste azioni dei sistemi di illuminazione costituiscono la "scena".

Scene di luce

Un progetto con controlli dell'illuminazione ha rilevato che l'impostazione delle scene è piuttosto impopolare tra gli utenti, la cultura in merito alle tecnologie di controllo presenti sul mercato da circa venti anni a questa parte è molto scarsa e per questo non è chiaro il significato di scena di luce. Si fa ricorso ad una scena in tutti quei casi in cui l'illuminazione ha la necessità di essere modificata durante il corso della giornata o a seconda delle attività svolta in ambiente. Nel caso siano note le attività e/o gli orari di occupazione degli ambienti di un edificio sono possibili delle programmazioni di accensione e spegnimento o anche di diminuzione e aumento della quantità di illuminamento per adattarsi alle diverse esigenze. Queste programmazioni

nel gergo dei sistemi di controllo sono chiamate “impostazione della scena” che nell’ambito dell’illuminazione rappresentano una situazione luminosa statica. In una scena sono definite le configurazioni di ogni apparecchio o gruppi di apparecchi che l’impianto attua nel momento in cui vengono chiamate dall’utente che ne ha esigenza o da altri input del sistema come sensori di occupazione o di illuminamento. È anche possibile riprodurre una situazione luminosa dinamica riproducendo una serie di scene in sequenza simulando l’andamento del daylight. La strategia prevede una successione di un numero variabile di scene statiche che gradualmente diminuiscono o aumentano l’intensità e/o la CCT, dopo aver programmato ogni singola scena e i parametri di transizione tra esse; il tempo di questa transizione definisce la durata della singola scena. Ad esempio una sequenza cromatica dinamica è un’alternanza di colore nel tempo.

La situazione più comune per questo tipo di soluzione la si ritrova in ambienti di lavoro dove queste scene possono identificare delle situazioni di luce a seconda delle diverse attività attuando un controllo della domanda come ad esempio impostazioni alternative nelle sale riunioni per offrire un’illuminazione adatta per presentazioni di gruppo o sessioni di brain storming o riunioni. L’impostazione della scena viene anche applicata per supportare la creazione di atmosfere e per migliorare il design o il comfort dell’utente. In generale, un approccio dell’impianto che si basa su scene se viene gestito nel modo corretto analizzando le funzioni che dovrà assolvere il sistema di illuminazione, permetterà di aumentare notevolmente i risparmi di energia totali.

Tecnologie di controllo

Sia le strategie che le scene di illuminazione sono quindi delle azioni del sistema illuminotecnico che vengono impartite da un sistema di controllo che è strutturato con un hardware e software. La parte impiantistica, cioè l'hardware, è composta da diversi dispositivi che svolgono ruoli altrettanto differenti: ci sono parti che acquisiscono dati di input, parti che rielaborano questi dati e parti che attuano i comandi fino al sistema di illuminazione finale. I dispositivi che occupano il primo posto nell'ordine di funzionamento della gestione sono quelli che apprendono il segnale di input e possono essere di due categorie:

I **dispositivi attivi** acquisiscono e inviano il segnale di comando in base alle condizioni in ambiente in cui sono installati e ai programmi di impostazione, non necessitano quindi di un intervento da parte dell'utente nella gestione dell'illuminazione. I dispositivi che permettono questa strategia di controllo sono i fotosensori che sono in grado di rilevare la quantità di luce naturale sul sensore ed è quindi importante considerare diversi fattori per un corretto posizionamento del dispositivo. Altri possono essere i sensori di occupazione o sensori di presenza il cui funzionamento è simile a quello dei rilevatori di presenza per gli impianti anti intrusione con tecnologia ultrasuoni o infrarossi. Un ulteriore metodo è tramite l'utilizzo di timer dell'impianto di illuminazione che, a seconda dell'ora pre-impostata, il sistema agisce sull'accensione e lo spegnimento.

Figura 12-13

Figura 12
Sensore di luminosità
https://www.somfypro.it/prodotti/-/e-cat//9013075

Figura 13
Sensore di movimento
www.vimar.it

Figura 14
Pulsanti e dimmer
www.vimar.it

Figura 15
Pannello touch
www.vimar.it

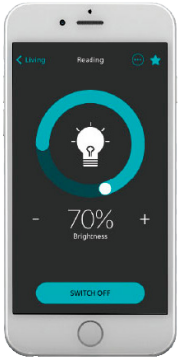


Figura 16
App domotica

I **dispositivi passivi** al contrario necessitano di una gestione a comando manuale dell'utente affinché vengano attuati i programmi predefiniti. Per questo motivo i dispositivi di comando sono progettati per essere semplici e alla portata di tutti, per rendere intuitiva la gestione del sistema di illuminazione con un approccio "tradizionale". I dispositivi caratteristici di questa strategia di controllo sono i classici interruttori e pulsanti o le tastiere oppure tramite dei telecomandi. Gli ultimi arrivati, ma che nascono insieme al concetto delle scene e di programmi predefiniti, sono i dispositivi touch screen mentre se si desidera avere un controllo remoto dell'impianto intervengono smartphone e tablet per la quale necessità una connessione wireless locale o wi-fi. Entrambi questi ultimi permetto un controllo totale di tutto l'impianto di illuminazione dell'intero edificio mentre i primi elencati gestiscono esclusivamente un apparecchio o un gruppo di apparecchi o una scena.

Figura 14-16

Ma quali sono gli elementi che elaborano questi flussi di segnali? Qual è il cervello che permette tutto questo? Abbiamo detto che i dispositivi attivi e passivi corrispondono alla parte dell'impianto che tramite input esterni inviano un comando al sistema di controllo mentre i terminali corrispondono all'altra estremità ovvero gli apparecchi di illuminazione e i sistemi di schermatura. Al centro ecco che troviamo la centralina di comando che contiene tutte le programmazioni e le scene ed è questo il cervello che riceve i segnali dai dispositivi di controllo e li rielabora per inviarli ai terminali controllati. Nel percorso tra la centralina e i terminali si trovano poi gli attuatori che rappresentano i dispositivi che ricevono i dati elaborati dalla centralina e li trasforma in azioni dirette sui terminali.

Architettura dei sistemi di controllo

Nel corso degli ultimi anni sono stati fatti notevoli passi in avanti per fornire una maggiore sicurezza e semplicità di programmazione e gestione degli edifici, sono aumentati i produttori e sono stati realizzati sistemi in grado di adattarsi ad ogni necessità. Per questa ragione le tecnologie di controllo possono essere inserite nell'edificio in diversi modi e con differenti strutture di comunicazione a seconda della dimensione e la situazione esistente dell'impianto di illuminazione de controllare. Oggi questa tecnologia permette una gestione da una scala urbana per il controllo dell'illuminazione pubblica, ad una dimensione

di edificio con sistemi molto grandi e complessi come ospedali, uffici o scuole fino a quelli più piccoli, economici e semplici per il controllo residenziale. Le diverse tecnologie in commercio finalizzata al controllo dei sistemi di illuminazione vengono sviluppate a seconda dell'architettura con cui questi impianti sono progettati e realizzati. Nell'ultimo decennio c'è stato un forte upgrade per alcuni di queste strategie di controllo, alcuni più di altri come vedremo in seguito, e i motivi sono determinati dall'aumento della sicurezza e alla semplicità di installazione. In base quindi alla dimensione del sistema di illuminazione, livello di complessità e gli obiettivi che si intende ottenere si sceglie il tipo di architettura del sistema di controllo più adatta alla situazione che porta a suddividere le tipologie in commercio in cinque categorie:

- sistemi base e/o integrati negli apparecchi
- sistemi centralizzati
- sistemi centralizzati integrati in building automation
- domotica ad intelligenza distribuita
- domotica smart

sistemi base

questi sistemi sono anche i più semplici, sono costituiti da dispositivi che ricevono i dati di input dall'utente o dall'ambiente tramite interruttori, tastiere, sensori, ecc. convertendoli direttamente in segnale per gli apparecchi di illuminazione, si tratta di un sistema stand-alone. I singoli sistemi, costituiscono una rete in cui i dispositivi lavorano in modo indipendente. I dispositivi che inviano un segnale di comando di tipo attivo possono essere collocati direttamente negli apparecchi di illuminazione oppure possono essere inseriti in ambiente. Nel secondo caso l'architettura è poco più complessa e generalmente vanno a gestire dei gruppi di apparecchi di illuminazione. In questo tipo di sistema, il segnale tra i componenti è analogico in un intervallo tra 1 e 10 V di corrente elettrica. È un modo di dialogare tra dispositivi che utilizzano un variatore in ambiente o un variatore integrato nelle lampade tramite gli alimentatori (driver) elettronici, che ricevono il segnale dal sensore o dall'utente che manda una quantità di corrente al variatore che a sua volta regola l'intensità luminosa dell'apparecchio.

Sistemi centralizzati

I sistemi centralizzati costituiscono una tecnologia totalmente differente: mentre i sistemi stand-alone ricevono un segnale analogico, questi necessitano di un segnale digitale per eseguire i comandi, inoltre un'altra differenza sostanziale è da attri-

buire al numero di azioni che il sistema è in grado di gestire e alle dimensioni dell'impianto. Questa intelligenza centralizzata è da considerarsi come una rete di sistemi distribuiti che si relazionano tra loro e sono controllate attraverso un computer chiamato "supervisore". L'architettura dei sistemi centralizzata vede tutti i dispositivi di controllo (apparecchiature domotiche), centralina e attuatori, in un unico punto nel quadro generale che fanno capo per i dispositivi di comando e i terminali collocati in ambiente. I sistemi centralizzati sono da considerarsi più semplici e piccoli, utilizzati ad esempio in impianti residenziali.

Domotica

A differenza di un sistema di controllo centralizzato, la domotica si differenzia nell'architettura dell'impianto: mentre nel primo tutti gli apparecchi fanno riferimento ad una centralina, l'intelligenza distribuita spartisce questo cervello in una rete di dispositivi di controllo più piccoli distribuiti all'interno dell'edificio e connessi tra loro. Lo sviluppo di questa tecnologia ha l'obiettivo di migliorare la sicurezza dei sistemi di controllo, avendo tanti piccoli apparecchi elettronici che gestiscono i dati di input e i terminali controllati, in caso di guasto di uno di questi dispositivi impedirà solo le funzioni dipendenti da quel singolo segmento dell'intero impianto. Al contrario, in un sistema centralizzato, in caso di guasto della centralina di controllo o del supervisore, il suo controller, tutto il sistema si blocca. I dispositivi della domotica sono dei "moduli" che elaborano e attuano direttamente i comandi ed essendo connessi tramite cavi (LAN o Bus) permettono di svolgere funzioni simultanee.

Di fatto quindi, le differenze che questa caratteristica di architettura attribuisce ai due tipi di impianto di gestione fa sì che nel modello centralizzato tutti i sistemi di controllo sono indipendenti e connessi tra loro in centrale di controllo mentre un sistema domotico è una rete di "neuroni" sparsi nell'edificio senza un cervello principale e tutti i sistemi sono interconnessi. Per questa ragione la domotica è più semplice e più adatto ad usi residenziali o impianti di gestione medio-piccoli.

Sistemi Smart

I sistemi di controllo base, centralizzati o domotici sono tutti strutturati in modo differente ma che hanno in comune una rete di connessione delle apparecchiature di tipo filare. Ciò significa che tutti i dispositivi sono connessi tra loro tramite dei cavi di segnale di tipo LAN o Bus. Questo aspetto può rivelarsi una limitazione importante in edifici esistenti soprattutto per il fatto che, restando nell'ottica di un'ottimizzazione dell'illumi-

nazione, le apparecchiature luminose esistenti spesso sono sufficienti per lo svolgimento delle attività garantendo requisiti minimi adeguati. In queste situazioni l'obbiettivo di un progetto di illuminazione potrebbe riguardare unicamente la gestione delle sorgenti o delle schermature solari per migliorare i risparmi energetici e per sostenere anche i ritmi circadiani degli occupanti. Intervenire con i sistemi di controllo descritti in precedenza comporterebbe elevati costi di realizzazione. In una situazione di questo tipo esiste un'altra strada da percorrere che è in continuo sviluppo specialmente nell'ambito civile e permette di intervenire in modo poco invasivo sull'impianto esistente, questa strategia è la domotica "smart". Questo tipo di domotica si configura come la quella ad intelligenza distribuita ma la connessione tra i dispositivi, cioè il dialogo dei moduli, avviene in modalità wireless. Con questa tecnologia è possibile ampliare i sistemi di controllo esistenti indipendentemente che essi siano di tipo tradizionale (senza una gestione automatica) o che siano già di tipo domotico.

Sistemi centralizzati in building automation

A fare da coordinatore dei dispositivi di controllo interviene l'architettura a "Building Automation" che fa riferimento ad un sistema di controllo superiore che gestisce in maniera coordinata tutti gli altri impianti di gestione sottostanti, in altre parole consiste in più sistemi centralizzati o domotici indipendenti connessi tra loro e coordinati da una forma di automazione totale o parziale cioè il Building automation. Questa connessione tra i vari sistemi indipendenti viene fatta sempre tramite connessione LAN o Bus che mette in comunicazione tutti i singoli centri dei sistemi. Questa struttura impiantistica è sviluppata per gestire impianti medio-grandi a scala di edificio per renderli più efficienti come nel caso di un condominio per ridistribuire dei servizi comuni ai singoli appartamenti in modo "comunitario" con la possibilità di risparmiare sui costi. L'automazione degli edifici non riguarda solo l'uso abitativo ma è nato e sviluppato per rendere efficiente qualsiasi tipo di edificio come palazzi per uffici, industrie, scuole, alberghi e ospedali. In un edificio si possono trovare numerosi impianti coordinati dal sistema di automazione:

- impianti tecnologici (climatizzazione invernale ed estiva, illuminazione, schermature, fornitura di elettricità etc.)
- sistemi di sicurezza (incendio e fumi, videosorveglianza, antintrusione, etc.)
- sistemi di comunicazione

Facendo un esempio pratico si deve immaginare, in un complesso destinato ad uffici, gli apparecchi di illuminazione d'ambiente generale costituiscono un sistema autonomo e le schermature solari costituiscono un secondo sistema autonomo. Il Buiding automation, connesso a questi due sistemi di livello inferiore, permette di far lavorare simultaneamente i due sistemi indipendenti come un unico sistemi di controllo. La strategia di gestione con una struttura a Building automation sono ottimizzati in impianti di medio-grande dimensione data la sua complessità.

Protocolli di comunicazione

I protocolli di comunicazione dei sistemi di controllo, sono la lingua con cui i dispositivi di controllo dialogano tra loro e gestiscono il funzionamento dei sistemi, per questo rappresentano un aspetto fondamentale, spesso è motivo di sostanziali differenze tra i sistemi di controllo. Questi segnali possono essere di tre tipi: analogici, come descritto in precedenza nei sistemi base stand-alone, digitale utilizzati nei sistemi centralizzati e nella domotica distribuita e wireless per la domotica smart. Per riprendere il concetto di funzionamento del segnale analogico, esso consiste nella trasmissione di corrente elettrica tra 1 e 10 V tra il dispositivo di comando, l'alimentatore elettronico e il terminale comandato che può essere un apparecchio di illuminazione singolo o un gruppo di apparecchi. Per quanto riguarda i protocolli digitali, la categoria è ulteriormente identificabile in due sotto categorie: i protocolli proprietari e i protocolli standard.

I protocolli proprietari vengono sviluppati dalle case produttrici di dispositivi domotici, è il caso in cui si producono sia hardware che software e si possono utilizzare solo apparecchiature del produttore del protocollo. Questo tipo di segnale viene utilizzato per impianti medio-piccoli in quanto sono in grado di gestire un numero minore di dispositivi rispetto a protocolli standard e anche la loro architettura è più semplice. La tecnologia proprietaria compresi i moduli di controllo sono sviluppati per connettere l'intero edificio, non solo l'illuminazione; tramite la domotica si possono gestire luci, impianto di riscaldamento e climatizzazione, impianti antintrusione, schermature, etc. Questa tipologia di comunicazione viene utilizzata per diversi aspetti tra cui la fidelizzazione della clientela e per semplificare la programmazione e renderli così utilizzabili da un maggior numero di installatori. spesso però, i prodotti di marchio diver-

so hanno difficoltà con la comunicazione tra loro e attualmente sono necessarie più interfacce e piani di integrazione dei dati specifici del progetto. Una delle principali sfide per le tecnologie è lo sviluppo di sistemi che permettano la compatibilità e l'interfaccia tra sensori, moduli aggiuntivi.

Subentrano quindi i protocolli standard che vengono sviluppati da enti differenti dai produttori di dispositivi di controllo, per fare un esempio pratico è come parlare di un sistema operativo per computer. Questo "linguaggio comune" è il modo con cui dispositivi con funzioni, tipologia e costruttore diversi dialogano tra loro per comunicare informazioni e funzioni avanzate integrate nell'edificio. Alcuni tipi di questi segnali digitali sono DALI, DMX, Konnex o KNX.

DALI

Il protocollo DALI (Digital Addressable Lighting Interface) è un'interfaccia di comunicazione dedicato ai sistemi di illuminazione, pensata per aziende costruttrici di apparecchiatura per l'illuminazione e mettere sul mercato un segnale di comunicazione standard condivisa da tutta l'industria del settore per poter diversificare un sistema di lighting senza precludere le possibilità di controllo. Il DALI nasce negli anni '90 per sostituirsi ai sistemi di controllo analogici 0-10 V e gestire tramite controlli digitali i reattori dei tubi fluorescenti. Nel tempo si è evoluto divenendo un protocollo standard ad oggi aggiornato al DALI v2 e utilizzato comunemente nel settore dell'illuminazione e inserito nella norma IEC 62386 per rendere compatibili i dispositivi di controllo di marche e costruttori differenti. È un sistema di controllo ad intelligenza distribuita e i singoli apparecchi comunicano con questa lingua di comunicazione tramite una connessione bus. Con questa tecnologia, i dispositivi saranno alimentati a corrente alternata 220V presente in ogni edificio, a loro volta messi in comunicazione tra di loro tramite connessione condivisa (bus) alimentata da un modulo dedicato che prende il nome di gateway. Tramite il protocollo DALI v2 sono possibili la configurazione e l'interrogazione dei comandi e degli scenari ed essendo un sistema bidirezionale, ogni dispositivo DALI può segnalare un guasto o inviare il suo stato di funzionamento. Inoltre è facilmente interfacciabile ad un altro protocollo standard, DALI e KNX possono essere messi in comunicazione tramite un gateway per svolgere i comandi impartiti dal sistema di controllo DALI in un sistema building automation gestito dal KNX.

DMX

il protocollo DMX invece (Digital Multiplex Signal) veniva utilizzato per l'illuminazione scenografica dei palcoscenici nei teatri o per l'illuminazione delle facciate di edifici. Viene acquisito dall'ESTA (Entertainment Services and Technology Association) che rappresenta l'industria dell'intrattenimento. Il DMX ancora oggi è un protocollo standard riservato a specifici impieghi prevalentemente nell'industria dell'intrattenimento.

KNX

Il protocollo digitale maggior utilizzato è il Konnex in quanto standard riconosciuto a livello internazionale e che non si sofferma alla gestione unica dei sistemi di illuminazione ma si estende al controllo di tutte le automazioni connesse al sistema, come anche i protocolli proprietari. Il KNX è lo standard mondiale sviluppato per la home come sistema ad intelligenza distribuita e il Building automation nei grandi edifici, è stato riconosciuto conforme agli enti di standardizzazione europea come ISO/IEC o CEN da fine 2003 e approvato anche come standard cinese. Il sistema di controllo KNX è definito complesso per la sua programmazione ma permette di inserire nel sistema oltre 60.000 dispositivi e permette di controllare e mettere in comunicazione impianti di illuminazione, riscaldamento, ventilazione, sistemi di allarme, gestione di energia e molti altri.

Sempre restando nello standard internazionale, nel caso della domotica Smart, la comunicazione dei dispositivi di elaborazione e gestione dei dati di input in modalità wireless avviene in due modi differenti. La più semplice è via bluetooth negli impianti piccoli in quanto limitati dalla portata del segnale mentre in impianti medio-grandi viene utilizzato un protocollo standard chiamato Zigbee. La tecnologia di questo protocollo consiste nel far rimbalzare il segnale da un modulo all'altro fino a raggiungere il dispositivo di controllo interessato permettendo una portata di segnale illimitata all'interno dell'edificio.

I sistemi di controllo analizzati fin ora nelle loro diverse tecnologie e architetture hanno sempre riguardato la gestione dell'illuminazione ma all'interno degli edifici sono tanti gli strati che compongono la totalità degli impianti di gestione di un edificio nella sua interezza. Solo per l'illuminazione esistono almeno due strutture, la prima che controlla l'illuminazione elettrica e l'altra l'illuminazione naturale ma, come per l'illuminazione, anche altri sistemi necessitano di simili controlli come gli impianti di climatizzazione estiva e invernale, antincendio, antintrusione, videosorveglianza, fumi e comunicazione, come anticipato in precedenza nel Building automation. Quando si parla di con-

trollo dell'illuminazione ci riferiamo ad un sistema che parallelamente comunica e controlla anche altre funzioni, l'illuminazione è quindi solo una parte di un sistema molto più ampio. Grazie a questa strategia possiamo godere però di maggiori comodità e confort visivi e termici. Il processo che si aggiunge alla fase di realizzazione di un impianto di gestione di questo tipo è la configurazione o la messa in funzione. Proprio come per le scene di illuminazione si possono programmare delle scene di controllo in cui diverse funzioni da svolgere vengono messe in relazione, interagiscono tra loro, attuando azioni di sistemi differenti richiamando una unica scena di controllo. A differenza delle scene di illuminazione che permettono un'impostazione specifica della potenza e temperatura del flusso luminoso, la scena di controllo mette in relazione le scene di luce con scenari di altre strutture impiantistiche. Al termine della giornata lavorativa, uscendo dall'ufficio, posso potenzialmente attuare una scena di controllo da un comune interruttore che spegnerà tutte le luci (sistema centralizzato 1), chiuderà tutti gli oscuranti (sistema centralizzato 2) e accenderà il sistema antintrusione (sistema centralizzato 3).

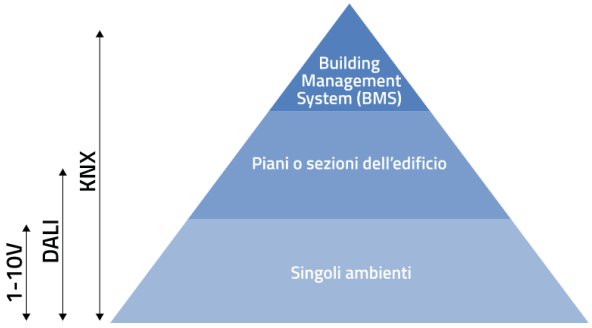


Figura 17
Gerarchia delle architetture dei sistemi di controllo e dei diversi protocolli di comunicazione

Sistemi di controllo dell'illuminazione Human-Centric

I sistemi di controllo trattare in precedenza hanno come principale obiettivo il risparmio energetico ma proprio grazie alle potenzialità che offrono, permettono di gestire un sistema di illuminazione con l'obiettivo di sostenere i ritmi circadiani. Ora sappiamo che i presupposti per migliorare i sistemi di illuminazione HCL ottimizzando le risposte non visive degli osservatori tramite i sistemi di controllo esistono e le tecnologie sono in continuo sviluppo. Per fare ciò sono stati sviluppati prodotti di illuminazione dinamici che oltre a lavorare sull'intensità, intervengono anche sullo spettro.

Per il controllo di questi apparecchi di illuminazione sono necessari dei sensori che leggono i valori di daylight o programmi preimpostati con ad esempio sequenze di scenari di illuminazione. Tra i diversi prodotti che permettono un'impostazione dinamica dell'illuminazione elettrica ci sono gli apparecchi LLLC. Questa tecnologia innovativa Luminaire Level Lighting Control (LLLC) utilizza un sistema di sensoristica come dati input in cui tutti i sistemi sono dotati di apparecchi a LED in cui è possibile modulare in modo indipendente l'intensità luminosa e la distribuzione spettrale (tunable white). Sono a tutti gli effetti dei sistemi di illuminazione dinamica. La particolarità di questi sistemi è che ogni apparecchio di illuminazione è dotato al suo interno della sensoristica, installati già nella loro fase di produzione con la possibilità di connetterli tra loro via rete o via filo o con connessione wireless. Poiché tutti gli apparecchi sono in grado di rilevare e rispondere alle condizioni ambientali, i sistemi LLLC sono in grado di fornire luce solo dove necessario risparmiando elevate quantità di energia mantenendo però alti standard di illuminazione. Questa tecnologia può essere identificata come stand-alone in quanto ha la possibilità di lavorare in modo indipendente avendo a bordo nell'apparecchio sensore e sorgente ma più evoluti con la possibilità di connessione ad altri dispositivi presenti nell'edificio per integrare diverse funzioni. Tra queste troviamo il controllo della luce diurna tramite schermature o tendaggi e il controllo di impianti termici. Questo tipo di approccio permette di ottenere elevati standard di illuminazione con costi iniziali di installazione contenuti, que-

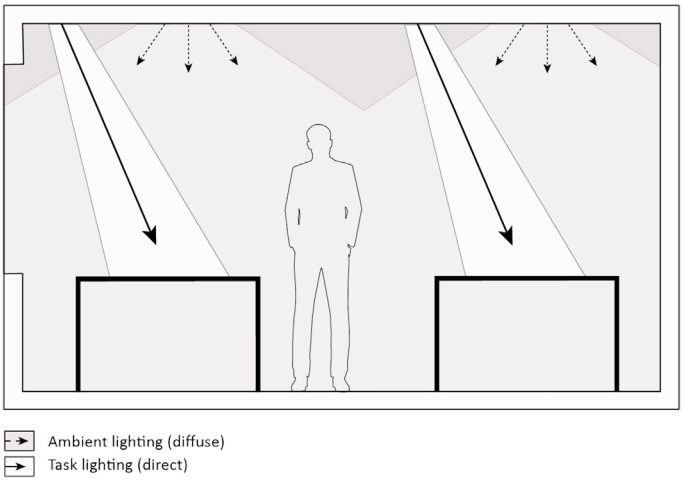
sti apparecchi “all in one” non richiedono l’utilizzo di sensori di terze parti e complesse programmazioni che comporterebbero un aumento del costo iniziale di investimento. Le applicazioni esistenti sono predisposte per controlli automatizzati in uffici, centri commerciali e scuole con l’obiettivo primario del risparmio energetico mantenendo le quantità e soprattutto le qualità visive negli ambienti per sostenere la salute degli occupanti.

Un nuovo e recente ramo degli studi della luce dinamica ha condotto uno studio sperimentale utilizzando sistemi di illuminazione come quelli LLLC che introduce l’importanza non solo della radiazione diretta ma anche quella indiretta proveniente dalla volta celeste al fine di simulare in modo ancora più realistico il daylight e migliorare quindi ancora di più il benessere soggettivo e i ritmi circadiani.

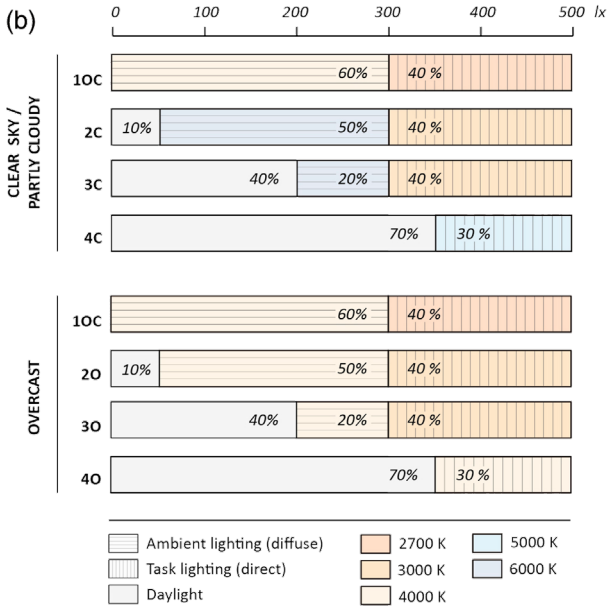
Figura 18a mostra l’allestimento dello studio condotto da iGuzzini che utilizza un’illuminazione diffusa a soffitto e dispositivi di luce diretta sul piano di lavoro per le attività con un flusso direzionale simile a quello della luce diurna.
Figura 18b Sono sette impstazioni di luce in relazione alle condizione di luce naturale (<C> sereno; <O> coperto)
Figura 18c rapporto diretto - diffuso della luce artificiale a seconda delle condizioni esterne di luce naturale

https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X21991198
https://cdn4.iguzzini.com/getmedia/00aa42d0-603b-436c-8a1d-056505b2e0da/White-Paper_Double_Dynamic_Lighing_February2021-pdf

(a)



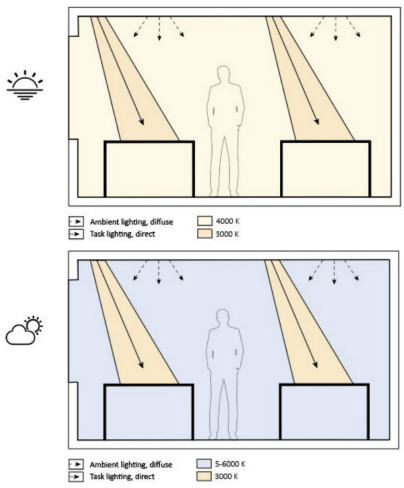
(b)



Double Dynamic Lighting

Recentemente è stato discusso e studiato un metodo di illuminazione parzialmente già utilizzato cioè la dynamic lighting. La nuova strategia “double dynamic lighting” DDL combina due tipi di illuminazione naturale: la luce più calda diretta del sole e la luce fredda diffusa dalla volta celeste. Queste componenti hanno dato un input che ha permesso di capireche il modo migliore per simulare un tipico daylight in ambiente interno utilizzando l’illuminazione artificiale è combinare assieme un sistema di luce indiretta tendenzialmente fredda e una diretta con una radiazione più calda. Per realizzare un sistema DDL si utilizzano apparecchi in grado di rilevare la quantità di luce naturale esterna per regolare il flusso luminoso di luce artificiale all’interno. In particolare sono 3 i sensori: uno che misura i livelli di luce diurna, uno scanner del cielo e un sensore per misurare i livelli di luce interna. In generale, è stato confermato che la combinazione tra illuminazione ambientale diffusa fredda abbinata ad un’illuminazione direzionale più calda, risponde al tipo di esperienza visiva che si prova all’esterno per i livelli di luce misurati nello spazio indoor. La novità introdotta è lasciare che la variazione del rapporto diretto-diffuso e la CCT dell’illuminazione dinamica simulino le dinamiche del cielo e i livelli di luce diurna. Per definire questa recente strategia è stato condotto uno studio sperimentale derivato dalla collaborazione di Tridonic, iGuzzini, Fagerhult e Zumtobel, tutti grandi produttori di apparecchi di illuminazione, con l’Università di Aalborg. L’obiettivo che ha spinto a ricercare un migliore confort visivo è il miglioramento della produttività in ambienti di lavoro. L’esperimento condotto ha trattato principalmente due studi pilota: il primo cercava di trovare il giusto equilibrio di intensità tra luce diretta e luce diffusa, l’altro la combinazione di temperatura più naturale possibile. Nel complesso sono emersi cinque criteri

Figura 18



principali per definire una progettazione DDL:

- il flusso diretto, luce operativa, che illumina il piano di lavoro è emesso da apparecchi tipo faretti montati a soffitto con un'inclinazione di circa 30° per replicare la naturalezza della radiazione solare entrante in ambiente interno. Viene quindi abolito il tradizionale sistema "downlight" dove gli apparecchi a soffitto proiettano il fascio a 90° rispetto al piano orizzontale (in direzione perpendicolare al piano di lavoro). A questa viene abbinato un sistema di illuminazione indiretta diffusa che completano l'afflusso di luce e la sua qualità.
- Il rapporto diretto-diffuso è in un rapporto tra 20/80 e 40/60 che simula meglio il daylight e evita contrasti scomodi di colore della luce.
- Un'illuminazione artificiale neutra applicata (< 5000 K) in condizioni di cielo nuvoloso per compensare l'atmosfera fredda e viceversa un'illuminazione fredda applicata (> 5000 K) in condizioni di cielo sereno per completare l'atmosfera naturale.
- Luce calda diretta abbinata ad una luce fredda diffusa per simulare le condizioni naturali
- I livelli di intensità luminosa in una combinazione di 500 lx per l'illuminazione diretta sul piano di lavoro e 300 lx nell'ambiente per rimanere conformi alla norma EN 12464. Tuttavia la sorgente luminosa diretta deve avere la possibilità di essere gestita manualmente per rispondere meglio alla esigente dell'utilizzatore.

L'altro aspetto che analizza il sistema DDL è riferito al risparmio energetici, essendo questa strategia una combinazione di luce naturale ed artificiale. Si ricollega alla citazione del DL con più luce quando serve e meno quando è possibile. L'esperimento sopra riportato cerca di ricreare un daylight utilizzando l'illuminazione artificiale, ma come si relaziona con la vera luce naturale? Grazie ai sensori, gli apparecchi regolano l'intensità di luce per mantenere dei livelli costanti di illuminamento di 500 lx all'interno che sono stati riassunti in tre intervalli di luce diurna:

- minore di 50 lx durante le ore di transizione luce-buio in cui l'illuminazione elettrica è operativa al massimo.
- tra 50 e 250 lx durante le ore mattutine e serali con l'illuminazione elettrica a metà della potenza
- tra 250 e 550 lx durante le ore diurne con l'illuminazione elettrica al minimo.
- se la luce diurna supera i 550 lx, come nelle ore centrali della giornata, l'illuminazione elettrica è spenta.

Sostenibilità energetica

Gli studi dei sistemi di illuminazione e dei sistemi di controllo dell'illuminazione, da sempre hanno come principale obiettivo il risparmio energetico, nell'interesse collettivo per ridurre i consumi energetici ed essere "sostenibili" mentre per le tasche dei proprietari degli edifici per consumare meno sulle bollette. Sebbene il focus di questa tesi sposta l'attenzione sugli effetti della luce sull'organismo umano, non sempre è il motivo principale di una progettazione dell'illuminazione. Solo con l'introduzione della human-centric lighting è possibile fare unicamente un tipo di ragionamento mirato unicamente al miglioramento del benessere personale. Per attivare delle risposte circadiane sono infatti necessarie intensità di luce maggiori di quelli necessari per assolvere ai requisiti visivi, come visto in precedenza, ma questo maggior illuminamento, che si traduce in maggior consumo di energia elettrica, viene compensato da una scelta accurata delle strategie di illuminazione in base all'occupazione o alla domanda per esempio. Tuttavia, questi tipi di controllo dell'illuminazione sono indipendenti e quindi applicabili ad un sistema human-centric come ad un sistema tradizionale di illuminazione statica. Per questo motivo, nella rinnovata teoria della progettazione illuminotecnica viaggiano di pari passo il supporto delle risposte visive e non visive e il risparmio energetico ed è proprio attraverso i sistemi di controllo che ci è possibile far coesistere questi obiettivi nella progettazione. L'illuminazione deve essere studiata a misura d'uomo senza compromettere i consumi elettrici, l'uno non deve danneggiare l'altro.

Il risparmio di elettricità è il risultato della relazione tra l'illuminazione, la durata di accensione e spegnimento e la qualità del flusso emesso. Per ottimizzare questo aspetto è necessario analizzare l'edificio su due aspetti differenti: le modalità di utilizzo degli ambienti e la disponibilità di luce naturale. Il primo permette di quantificare e posizionare i dispositivi di illuminazione in modo ottimale per garantire i requisiti minimi di visibilità e impostare dei programmi di accensione, spegnimento o dimmer della luce artificiale per sostenere le risposte umane non visive. Il secondo invece si relaziona con il primo per massimizzare l'illuminazione naturale e quindi minimizzare l'uso dei sistemi di illuminazione artificiale per ridurre i consumi nelle ore diurne migliorando anche la qualità visiva e non visiva. Un cor-

retto studio dell'intero sistema di illuminazione dalla gestione alle sorgenti al controllo del daylight può determinare anche il confort termico riducendo o aumentando l'ingresso della radiazione luminosa naturale diretta in ambiente riducendo così i consumi di climatizzazione o di riscaldamento a seconda della stagione. Inoltre l'adozione di sistemi di controllo per l'illuminazione degli ambienti interni o il loro ampliamento, devono tuttavia considerare l'investimento iniziale di realizzazione contestualmente con gli obiettivi previsti.

Sin dal 1993, l'unione europea ha iniziato ad affrontare il tema dell'efficienza energetica ma solo nel 2002 arrivano le prime leggi a regolare questo tema che forniscono obblighi e requisiti prestazionali da rispettare. La prima legge dell'UE per il settore dell'edilizia è la EPBD (Energy performance of buildings directive), con le direttive sull'efficienza energetica (EED) e sulle energie rinnovabili (RED). Venne rivista nel 2018 e mira a migliorare le prestazioni di edifici nuovi ed esistenti riducendo al minimo le quantità di energia elettrica. La revisione più recente della legge in questione è la terza versione in vigore anche in Italia con il D.Lgs. 10 giugno 2020, n.48 in cui si promuove l'installazione di sistemi di gestione per l'automazione ed il controllo degli impianti tecnologici negli edifici. Da questo momento, l'integrative lighting diventa una parte integrante dell'edilizia all'interno della legge anche se limitata al risparmio energetico senza quindi considerare l'aspetto non visivo della luce. Al suo interno infatti viene disposta una norma che include il calcolo dell'efficienza energetica. A permettere di calcolare le prestazioni energetiche di sistemi di illuminazione artificiale in impianti residenziali e non residenziali ottenibile con i sistemi di controllo automatizzati facendo una stima dei consumi di energia elettrica interviene la norma Europea 15193-1:2017, usando l'indicatore LENI (Light Energy Numeric Indicator). Questo indicatore indica il consumo effettivo di corrente elettrica di un impianto di illuminazione in kWh per metro quadrato annuo e può essere calcolato con la seguente formula:

$$LENI = \Sigma\ (P_n\ f_c\ )\ ((t_d\ f_o\ f_d\ ) + (t_n\ f_o\ ))\ /\ A$$

Dove:

LENI = indicatore numerico energia luminosa [kWh / (m^2anno)]

P_n = potenza installata [kW]

F_c = fattore di riduzione dovuto all'uso del controllo della luce diurna (<1)

T_d = ore annue di utilizzo giornaliere [h]

F_o = fattore di riduzione dovuto all'uso del controllo basato sul presente (<1)

F_d = fattore di riduzione dovuto all'uso del controllo di mantenimento dell'illuminazione costante (<1)

T_n = ore annue di utilizzo notturno [h]

A = area [m^2]

Recentemente questa norma è stata rivista con la UNI EN 15193-1 nel 2021 che sottolinea anche l'importanza di considerare la conformità delle pratiche di illuminazione nelle nuove installazioni. Un'altra norma che sostiene la EPBD è la UNI EN 15232 per le prestazioni energetiche degli edifici, specifica la metodologia per valutare il risparmio energetico attraverso i sistemi di controllo Building Automation e monitorare i consumi degli edifici. Tramite quest'ultima infatti, viene mostrato come sia possibile ottenere una riduzione di elettricità utilizzata per le utenze tramite l'uso di sistemi di gestione automatici o semiautomatici. Inoltre, la UNI 15232 introduce una classificazione di efficienza energetica, che è diversa dalla classe energetica dell'edificio:

- Classe D non energy efficient: identifica gli impianti senza controlli o automazione e quindi energeticamente poco efficienti
- Classe C standard: è la classe di riferimento e corrisponde agli impianti che soddisfano i requisiti minimi con un numero minimo di controlli.
- Classe B advanced: impianti con sistema di controlli automatizzati avanzati con sistemi centralizzati in building automation che coordina i singoli sistemi
- Classe A high energy performance: è come la classe B ma con livelli di precisione maggiori per aumentare le prestazioni energetiche.

Come per la radiazione luminosa, anche nel risparmio energetico ci sono fattori che influiscono maggiormente sui consumi che sono già stati anticipati in precedenza e sono:

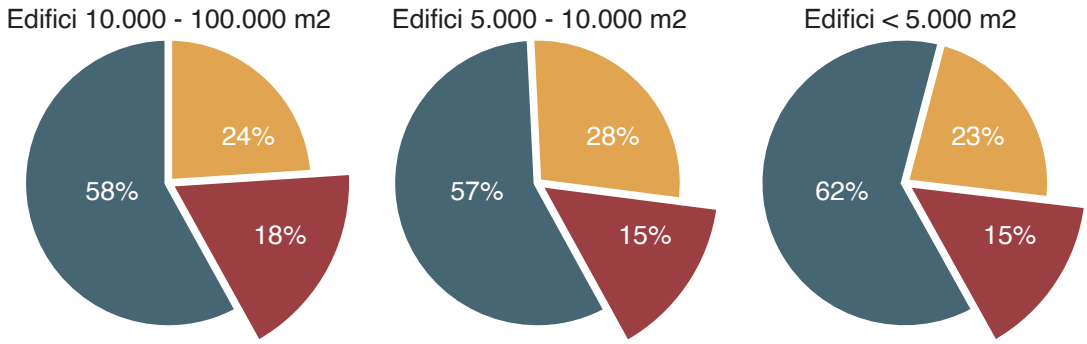
- il tipo di area: Si ottengono maggiori risparmi nei tipi di spazio che vengono occasionalmente visitati
- caratteristiche degli occupanti e funzioni lavorative
- numero di occupanti
- il ritardo di spegnimento / attenuazione automatica
- comportamento degli occupanti

Ma come è possibile quantificare il risparmio energetico di un edificio che utilizza sistemi di gestione automatizzati rispetto ad uno con impianti di illuminazione tradizionale? È necessario fare un'analisi della situazione attuale e per fare ciò, l'ENEA ha recentemente svolto un'analisi con questo obiettivo.

Consumi energetici Enea

Per fare un quadro dei consumi di elettricità per l'illuminazione sono disponibili rapporti ENEA, l'ente per la ricerca e lo sviluppo delle energie, che ha redatto un rapporto per sintetizzare i risultati di uno studio condotto con la finalità di esaminare i consumi energetici degli edifici in Italia destinati ad uffici. I 123 campioni sono stati analizzati tramite una diagnosi energetica in rapporto con il vettore energetico utilizzato, la posizione geografica e ovviamente la dimensione dell'edificio. Gli edifici presi in analisi sono situati su tutto il territorio nazionale e i dati raccolti sono stati forniti dal portale Audit 102 di ENEA come da art.8 del D.lgs 102/2014. Lo studio ha considerato i principali usi finali di elettricità da cui è emerso che l'illuminazione ha un peso del 17% sul consumo totale di energia con una media di 24,7 ± 16,5 kWh/m^2 in edifici di superficie compresa tra 500 e 95.700 m^2. Questo valore varia a seconda delle aree climatiche e latitudine, il controllo dell'illuminazione naturale per ridurre i consumi per l'illuminazione può andare in contrasto con i fabbisogni di riscaldamento con valori troppo alti o troppo bassi di apporti gratuiti. Questo dato fa riferimento all'illuminazione utilizzata per aree ufficio e spazi di transito/connettivo.

Nel calcolo dell'indice di prestazione energetica (IPE) per i consumi di illuminazione non è stato necessario suddividere i risultati per aree geografiche in quanto non influiscono in modo sostanziale sulla variazione valori, inoltre l'affidabilità è stata indicata come media.

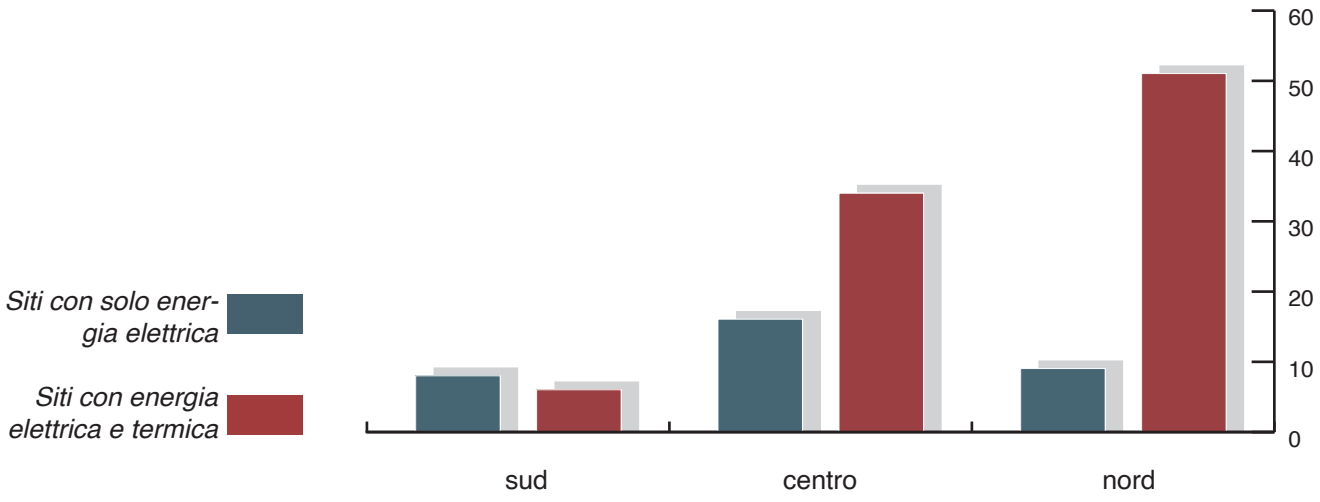


LEGENDA

Climatizzazione

Utenze

Illuminazione



Energia Elettrica per l'illuminazione ITALIA				
Unità misura utilizzate	Superficie		m^2	
	Energia		kWh	
	IPE		kWh/m^2	
Campo variazione produzione		IPE	Campo di variazione indice	
Min	Max		Min	Max
m^2	m^2	kWh/m^2	kWh/m^2	kWh/m^2
500	95.700	24,66 ± 16,49	8,17	41,16

ESEMPI PROGETTI Human-Centric Lighting

Nel panorama mondiale non sono ancora molti i progetti realizzati che vedono l'impiego di sistemi di illuminazione all'avanguardia con sistemi di controllo automatizzati e apparecchi di illuminazione dinamici tunable white progettati con l'obiettivo di sostenere le risposte circadiane delle persone all'interno degli edifici: dagli uffici, alle scuole agli ospedali e molti altri. Attualmente i sistemi di controllo automatizzati sono molto diffusi ma allo scopo di migliorarne l'utilizzo e ottimizzare i risparmi energetici. Tuttavia sono stati realizzati impianti di illuminazione human-centric come casi studio all'interno di laboratori e università ma anche in edifici sanitari e scolastici. Di seguito sono proposti alcuni esempi di installazioni e progetti di illuminazione per il benessere indoor migliorando la vigilanza, le prestazioni lavorative e migliorare il sonno nonché l'umore delle persone. Ci sono tuttavia delle eccezioni in cui l'illuminazione dinamica svolge come ruolo principale la valorizzazione dello spazio interno.

Valiant Bank AG, Berna

Tridonic, soffitto luminoso

Dali x/e-touch panel 02

QLE G2 Premium, modulo LED

La sala sportelli della banca Valiant a Berna era caratterizzata da un ampio lucernaio che per necessità era stato chiuso negli anni ’70. Successivamente durante dei lavori di ristrutturazione, questo elemento caratterizzante l’ambiente dell’edificio è stato ripristinato senza però compromettere l’aspetto funzionale ai piani superiori. Questo è stato possibile tramite l’installazione di pannelli LED Tunable White di Tridonic che porta il “sole” all’interno dell’ambiente. L’illuminazione è stata realizzata tramite pannelli luminosi quadrati collocati all’interno dei cassettoni 90x90 del lucernaio. Il fine è quello di riprodurre il daylight che innondava lo spazio alle origini e tramite questi apparecchi è possibile variando la temperatura di colore e l’intensità da 10% al 100% della potenza disponibile. Il protocollo di gestione è il DALI nelle versioni DT8, DSI, switchDIM e colourSWITCH e gestita tramite un pannello già programmato in cui è necessario indicare gli orari di funzionamento.

Obiettivo
Architettura - Atmosfera: Ripristinare il lucernaio simulando l’illuminazione naturale con l’utilizzo di apparechiature elettriche per uno spazio pubblico

Apparecchi
Tridonic
QLE G2 Premium, modulo LED quadrato
Flusso luminoso apparecchio: 1.250 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 134 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K

Gestione
Dali PS2, alimentatore
Dali x/e-touch panel 02

Policlinico, Poitiers

Tridonic, soffitto luminoso

QLE G2 Premium, modulo LED

Il policlinico universitario francese di Poities si è adoperato per fornire un'illuminazione confortevole per i pazienti oncologici utilizzando le più innovative tecnologie di illuminazione. Gli apparecchi tunable white caratterizzano gli ambienti dell'ospedale che simulano l'illuminazione naturale per migliorare il benessere degli occupanti.
In particolare in un locale che ospita terapie non provvisto di finestre e nello spazio connettivo del reparto, l'illuminazione è realizzata tramite l'installazione a soffitto di moduli QLE Premium LED Tridonic che variano spettro e intensità dal 10% al 100%. Su di loro è fissato un pannello decorato come un cielo parzialmente nuvoloso per rendere ancora più realistica l'esperienza visiva. Il sistema di controllo dedicato connecDIM e cloud permette una gestione da remoto. Il servizio tecnico ospedaliero ha programmato oltre 100 scenari di illuminazione per simulare l'illuminazione naturale negli ambienti senza finestre.

Obiettivo
Architettura - Atmosfera - Salute: Migliorare il benessere dei pazienti ricoverati aiutando un recupero migliore e più rapido e migliorare anche l'ambiente.

Apparecchi
Tridonic
QLE G2 Premium, modulo LED quadrato
Flusso luminoso apparecchio: 1.250 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 134 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K

Gestione
Dali PS2, alimentatore
connect DIM Gateway G1

Università professionale, Lucerna

Tridonic, illuminazione a sospensione

LLE G2 Premium, modulo LED

L'ambiente era caratterizzato da un'illuminazione troppo debole per svolgere le attività di ricerca, progettazione e lezioni per questo nel 2018 è stato fornito dei sistemi di illuminazione dinamici con la progettazione sviluppata da Björn Schrader e Anina Bigler. Questo è stato possibile grazie all'impiego di apparecchi lineari a sospensione che montano una sorgente luminosa tunable White LLE PRE KIT di Tridonic. La loro potenza può variare tra il 10% e il 100% mentre la CCT dal 3% al 100% dello spettro tramite l'utilizzo di apparecchi costituiti da driver DALI. Il controllo di questo sistema illuminotecnico è gestito dalla connect DIM Gateway di Tridonic per essere controllato da smartphone, tablet o PC tramite app dedicata con una sequenza automatica di simulazione del daylight. Resta la possibilità del controllo manuale tramite pulsanti
La finalità del progetto oltre a sostenere la salute degli studenti è anche quello di essere sé stesso un laboratorio per condurre ricerche sulla Human-centric lighting e studiare il miglioramento del benessere delle persone.

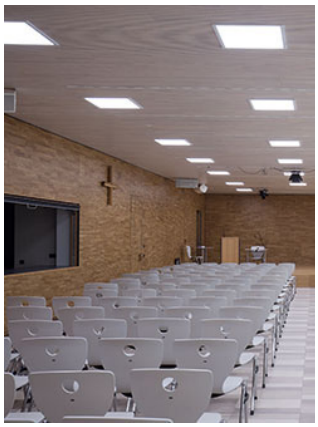
Obiettivo
Atmosfera - Salute - Attività: Aumentare l'illuminamento sui piani di lavoro del laboratorio migliorando anche la qualità del sistema di illuminazione con tecnologia tunable white.

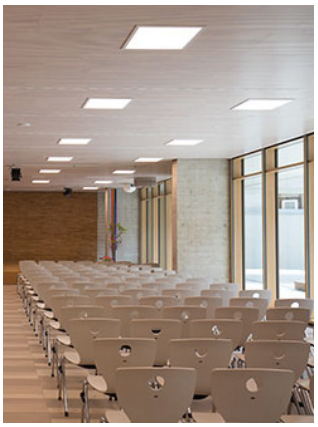
Apparecchi
Tridonic
LLE G2 Premium, modulo LED lineare
Flusso luminoso apparecchio: 1.500 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 126 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K

Gestione
Dali XC
connect DIM Gateway G1

Scuola media, Bamberga

Tridonic, illuminazione a incasso





QLE G2 Premium, modulo LED

Le scuole medie e superiori della città di Bamberga sono caratterizzate da un'aula magna comune con un sistema di illuminazione Tunable white. Il sistema di illuminazione è composto da moduli quadrati QLE Tunable white a quattro piastrelle per ogni lampada incassata a soffitto per ottenere le scene di luce ideale per ogni esigenza e attività. la tonalità può essere impostata a seconda dell'ora del giorno grazie ad i moduli LLE di Tridonic presenti all'interno delle lampade.

Obiettivo
Atmosfera - Salute: illuminazione tunale white in uno spazio comune per eventi e riunioni

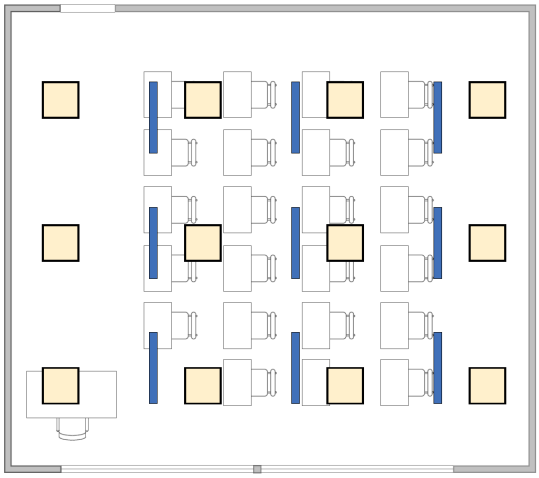
Apparecchi
Tridonic
QLE G2 Premium, modulo LED quadrato
Flusso luminoso apparecchio: 1.250 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 134 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K

Gestione
Dali PS2, alimentatore

Scuola di medicina Icahn

iGuzzini - LHRC

Classi, illuminazione ad incasso

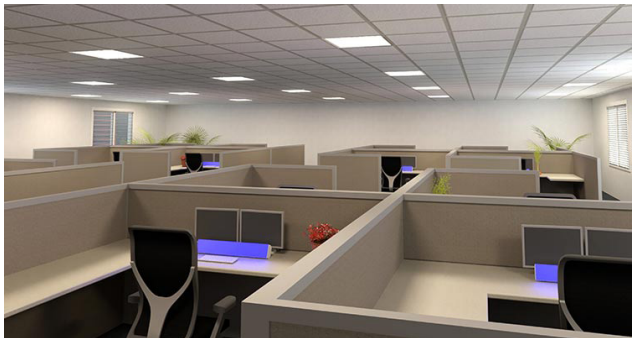


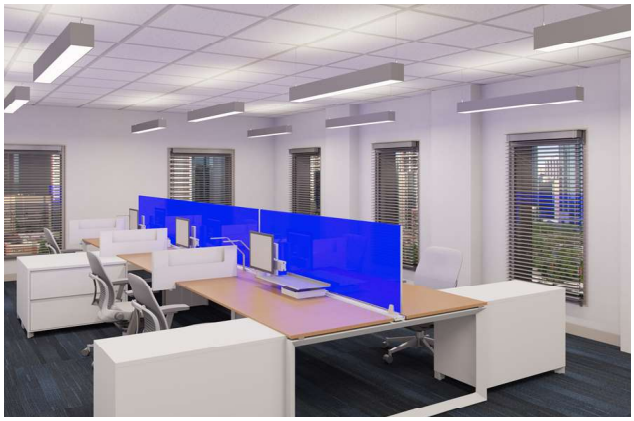
In questa scuola è stato approcciata una strategia differente che vede l'integrazione ad un sistema di illuminazione tradizionale esistente, costituito da apparecchi a pannelli led ad incasso con luce fissa monocromatica, con un secondo sistema caratterizzato in questo caso da apparecchi a led dimmerabili e con regolazione dello spettro luminoso, è una stratificazione di luce. In questo modo è possibile mantenere livelli luminosi più bassi risparmiando sui consumi elettrici ed eliminare le sensazioni di abbagliamento ma stimolando i ritmi circadiani aumentando la tonalità di blu dell'illuminazione secondaria.
L'illuminazione di questa scuola è fornita da iGuzzini in quanto collaboratore del Light & Health Research Center (LHRC) nel Mount Sinai.

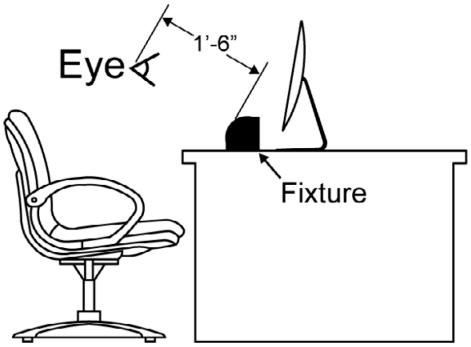
Scuola di medicina Icahn

iGuzzini - LHRC

Uffici, illuminazione desk



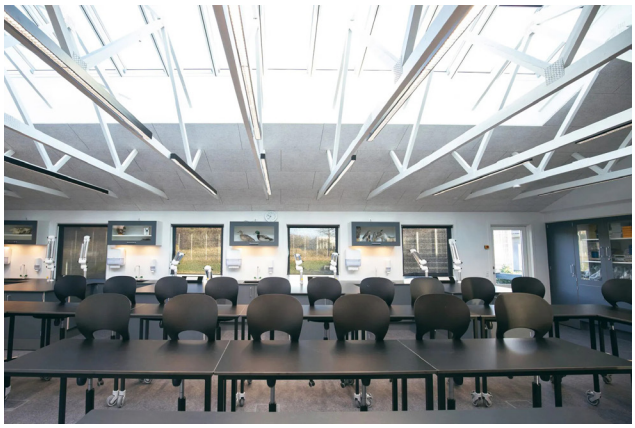


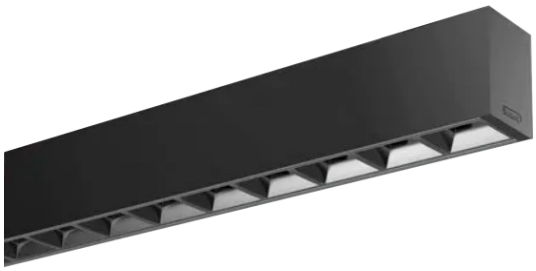


La scuola di medicina ha applicato la strategia dell'illuminazione individuale HCL per gli ambienti ufficio che vede l'integrazione ad un sistema di illuminazione tradizionale esistente, costituito da apparecchi a pannelli led ad incasso con luce fissa monocromatica, con un secondo sistema caratterizzato in questo caso da apparecchi a led dimmerabili e con regolazione dello spettro luminoso. A differenza dei comuni sistemi di illuminazione che generalmente proiettano luce dall'alto verso, questo sistema individuale desk è direzionato perpendicolarmente rispatto al piano del'occhio caratterizzato da luce "blu".
L'illuminazione di questa scuola è fornita da iGuzzini in quanto collaboratore del Light & Health Research Center (LHRC) nel Mount Sinai.

Scuola privata, Herlev

Disano illuminazione





Liset 2.0 TW

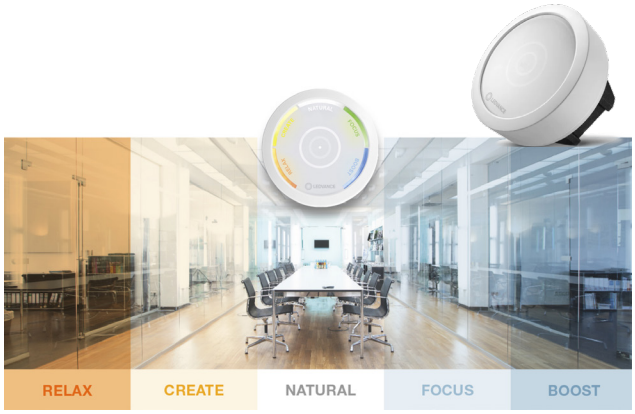
Le scuola con sede in Danimarca si è dotato degli innovativi sistemi Human Centic Lighting firmati Fosnova all'interno delle aule tematiche. Gli apparecchi a sospensione Dark Light producono una luce priva di abbagliamento e integra l'illuminazione solare dal lucernaio quando questa non è sufficiente essendo in grado di varare spettro ed intensità. A questo sistema viene affiancato una seconda illuminazione a luce calda per illuminare le singola postazioni di lavoro sul perimetro dell'aula.

Obiettivo
Atmosfera - Salute: innovazione in ambiente scolastico

Apparecchi
Fosnova
Liset 2.0 TW, plafone
Flusso luminoso apparecchio: 3.512 lm
Potenza apparecchio: 29 W
Tunable white: 4.000 K
Ra: >80
UGR: <19

Associazione artigiani, Schleswig

Ledvance, Osram
Illuminazione ad incasso



Biolux HCL PL 625 - unità di controllo Biolux HCL

All'interno dell'istituto professionale per artigiani era necessario sostituire la vecchia illuminazione lineare. È stata sostituita dai 90 nuovi prodotti HCL marchiati Ledvance composti da pannelli quadrati 60x60 da 43 W ciascuno distribuiti su 3 aule. In questo caso la scelta di questi prodotti ha consentito la loro installazione senza ricorrere alla programmazione di un sistema di controllo complesso che ricreasse un'illuminazione circadiana. Grazie al protocollo Zigbee infatti è stato possibile associare i pannelli ad un modulo di controllo in modalità wireless su cui erano già precaricati degli scenari: relax (luce calda), create, natural, focus, boost (luce frdda).

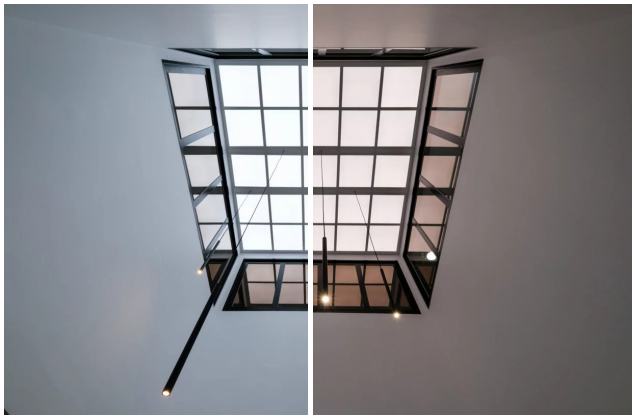
Obiettivo
Attività - Salute: illuminazione HCL nelle aule per migliorare la concentrazione e le prestazioni senza compromettere una visione ottimale senza abbagliamento.

Apparecchi
Ledvance
Biolux HCL PL625
Flusso luminoso apparecchio: 4.000 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 95 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K
Ra: 90
UGR: <19

Gestione
Zigbee
unità di controllo deidata Biolux
App da smartphone

Scuola, Bordeaux

Ledvance, Osram
Soffitto luminoso



Biolux HCL PL 625 - unità di controllo Biolux HCL

la scuola Francese aveva un problema di scarsa illuminazione naturale nel locale mensa e i vincoli tecnici ed economici non permettevano la realizzazione di un lucernaio. Per questo motivo, nella stessa posizione dell'ipotetico tetto vetato, sono stati collocati dei pannelli HCL di Ledvance che riproducono il daylight. L'esperienza visiva evocata è quella di un reale lucernaio con vetri satinati a cui viene abbinato un secondo sistema di illuminazione in questo caso quasi esclusivamente estetico per dare forza al progetto rendendo ancora più realistico il soffitto luminoso. La gestione di questa illuminazione HCL viene svolta dall'unità di controllo dedicata e grazie al sistema Zigbee ne deriva una elevata semplicità di installazione e programmazione.

Obiettivo
Architettura - Atmosfera - Salute: produrre un'illuminazione artificiale che rendesse come un lucernaio all'interno della mensa scarsamente illuminata da luce naturale.

Apparecchi
Ledvance
Biolux HCL PL625
Flusso luminoso apparecchio: 4.000 lm
Efficienza luminosa apparecchio: 95 lm/W
Tunable white: 2.700 - 6.500 K
Ra: 90
UGR: <19

Gestione
Zigbee
unità di controllo deidata Biolux
App da smartphone

Sede centrale Paulig, Helsinki

Light Cognitive

Lampada Light Cognitive

Agli uffici sotterranei della sede Pauling ad Helsinki serviva un'illuminazione adeguata al tipo di ambiente in quanto questi locali sono privi di finestre in cui si svolgono attività come eventi, corsi di formazione, seminari. L'azienda Light Cognitive si è occupata del progetto e ha fornito i suoi prodotti HCL composto da due pannelli LED. Questi apparecchi sono in grado di simulare le condizioni di luce naturale producendo una differenza cromatica sulla superficie del pannello luminoso. Sebbene sembra che emettano luce blu, come la volta celeste produce luce a più lunghezze d'onda così che anche la percezione degli oggetti e dei colori risulti come illuminata dalla luce naturale. Per rendere ancora più realistico l'ambientazione sono stati installati dei tendaggi.

Obiettivo
Architettura - Atmosfera - Salute: ricreare il daylight in ambienti privi di affacci verso l'esterno.

Apparecchi
Light Cognitive
Tunable white: 1.700 - 30.000 K

Gestione
Dali 8

Bibliografia / Sitografia

1. Tesi: Alessandra Giacomina Ferruccia Casetto, Effetti visivi e non visivi della luce sull'uomo: aspetti teorici e implicazioni progettuali, 2013
2. Tesi: Angeleri Francesca, Light and Wellness: Applicazione del protocollo WELL in ambito illuminotecnico
3. Tesi: Obertino Miriam, Sistema integrato e portabile per il monitoraggio dei potenziali evocati visivi
4. https://scienzapertutti.infn.it/concorso-2014-2015/706-approfondimento-la-luce/1933-la-luce-storica-dell-evoluzione-del-pensiero-scientifico
5. https://www.edscuola.eu/wordpress/?p=136546
6. https://storiografia.me/2013/11/11/storia-della-luce/
7. https://www.astronomiamo.it/DivulgazioneAstronomica/Area/Universo%20e%20sua%20osservazione/Lo-spettro-elettromagnetico-e-le-radiazioni-dei-corpi-celesti
8. https://www.chimica-online.it/download/spettro-elettromagnetico.htm
9. https://www.lastampa.it/native/tecnologia/2018/05/30/news/siamo-la-generazione-indoor-e-non-ci-fa-bene-1.35906459/
10. https://www.ilsole24ore.com/art/viviamo-22-ore-giorno-chiuso-e-non-ce-ne-rendiamo-conto-AE4y9HIF?refresh_ce=1
11. https://www.ansa.it/canale_lifestyle/notizie/design_giardino/2020/04/29/vivere-in-una-casa-sana-ai-tempi-del-coronavirus_2fe4955d-a54c-4975-a67f-0c6473be88e8.html
12. A Review of Human Physiological Responses to Light
13. https://www.microchirurgiaoculare.com/anatomia-dell-occhio/
14. https://medicinaonline.co/2018/01/28/fotorecettori-differenza-tra-coni-e-bastoncelli/
15. https://www.daltoneyes.it/cos-e-il-daltonismo_la-visione-umana.html
16. https://www.adobe.com/it/creativecloud/design/discover/secondary-colors.html#:~:text=I%20colori%20primari%20da%20considerare,fascio%20di%20luce%20color%20violetto.
17. Circadian Lighting Definition and Strategy
18. Good places to live and sleep well
19. Phillips, D. Lighting in Architectural Design; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1964
20. Light and Lighting—Integrative Lighting—Non-Visual Effects; ISO/CIE 2020
21. Andersen, M.; Gochenour, S.J.; Lockley, S.W. Modelling "non-visual" effects of daylighting in a residential environment. 2013
22. Phillips, D. Daylighting: Natural Light in Architecture; Architectural press: Oxford, UK
23. Human-centric lighting Foundational consideration and a five step design process
24. Light as a circadian stimuls for architectural lighting
25. Human-centric lighting Myth, magic or metaphor
26. Brown T, Brainard G, Cajochen C, Czeisler C, Hanifin J, Lockley S, et al., Recommendations for healthy daytime, evening, and night-time indoor light
27. CIE, OP67, Washington DC, 2019 (https://files.cie.co.at/x046_2019/x046-OP67.pdf)
28. https://www.luceweb.eu/2020/03/06/human-centric-lighting-design-nel-contesto-internazionale/
29. https://cie.co.at/
30. https://council.science/it/member/cie-commission-internationale-de-leclairage/
31. CIE, Recommending proper light at the proper time, 2019 (https://cie.co.at/files/CIE%20Position%20Statement%20-%20Proper%20Light%20at%20the%20Proper%20Time%20(2019)_0.pdf)

32. Recommendations for Healthy Daytime, Evening, and Night-Time Indoor Light Exposure (https://www.preprints.org/manuscript/202012.0037/v1)
33. Protocollo WELL v2, (https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/light)
34. A sistematic literature review on the rationale for and effects of dynamic light scenarios
35. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X21991198
36. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2020.1808014
37. https://www.ies.org/research/fires/double-dynamic-lighting-bringing-qualities-of-natural-light-into-the-office/
38. White-Paper Double Dynamic Lighing, February2021, (https://cdn4.iguzzini.com/getmedia/00aa42d0-603b-436c-8a1d-056505b2e0da/White-Paper_Double_Dynamic_Lighing_February2021-pdf)
39. https://www.iguzzini.com/double-dynamic-lighting-research-2020/
40. https://www.iguzzini.com/lighthinking-well-being/office-life-is-in-an-important-transition-phase-ellen-kathrine-hansen/
41. https://www.lighting.philips.it/sistemi/tematiche-lighting/illuminazione-dinamica
42. FINAL-LLLC-HealthyBuildings-whitepaper
43. https://lightingcontrolsassociation.org/2022/06/15/introduction-to-luminaire-level-lighting-controls/
44. cie222_2017 _lighting controls
45. sistemi di gestione e controllo della luce naturale e artificiale, C. Aghemo, A. Pellegrino, S. Cammarano, Novembre 2009
46. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2020.1808014
47. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X21991198
48. Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need, 2016
49. https://www.bticino.it/smart-home-o-domotica
50. https://www.bticino.it/smart-home-o-domotica?gclid=Cj0KCQiA99ybBhD9ARIsALvZavUAOqZDatcFpffWo-q-ygSSge9e81PqCPWOpKelTZxY47FuZhXS6jkaAi0TEALw_wcB
51. https://kblue.it/
52. https://www.came.com/global/itex/public/soluzioni/domotica-e-termoregolazione/edifici
53. https://www.vimar.com/it/it/smart-home-and-building-12534122.html?gclid=Cj0KCQiA99ybBhD9ARIsALvZavWO3IEh2RrySZrUN3GUJYSgNiL9GFgnjsIC0FNz6Ty3-Ug36eTJgfkaAlBxEALw_wcB
54. https://www.knx.org/knx-it/per-la-tua-casa/index.php?gclid=Cj0KCQiA99ybBhD9ARIsALvZavUvpCn-blJaimtneppW23ht9xcCWypxxL5beB8PzX4Tzr9TnW2PkeUaAjI9EALw_wcB
55. Protocollo KNX (https://impiantoelettrico.co/assets/adhoc/uploads/2013/09/KNx.pdf)
56. https://www.ekinex.com/
57. https://www.domoticafull.it/zigbee-cose-e-come-funziona/
58. https://quifinanza.it/innovazione/building-automation-cose-differenze-domotica/574280/
59. Protocollo KXT, Contatto Elettrico, agosto-settembre 2013
60. https://new.abb.com/buildings/it/edifici-aumentati?utm_source=search&utm_medium=google&utm_content=uffici&utm_campaign=2021_edifici_aumentati
61. Building automation nell'ottica del risparmio energetico, Torino 2007 (https://library.e.abb.com/public/be575fe4b1332de2c12573a200305d58/building_automation_energy_efficiency_20071030.pdf)
62. https://www.ekinex.com/soluzioni-ekinex-per-il-controllo-smart-dellilluminazione/il-protocollo-dali.html
63. https://www.ekinex.com/soluzioni-ekinex-per-il-controllo-smart-dellilluminazione/il-protocollo-dmx.html
64. https://blog.arrediorg.it/luce-calda-o-luce-fredda-qual-e-la-migliore-per-

leggere-e-studiare/
65. http://www.miglioralatuavista.it/la-luce-migliore-per-i-tuoi-occhi-e-la-tua-salute/
66. https://www.italtesla.it/induzione-vs-led-sfida-vinta-partenza/
67. ILLUMINAZIONE PUBBLICA E INDUSTRIALE un confronto tra LED e Induzione Magnetica, Angelo Nogara- AGE International srl, Novembre 2016
68. https://www.testo-unico-sicurezza.com/luci-a-led-sono-dannose-per-gli-occhi.html
69. https://cielobuio.org/articolo-1034/
70. https://www.lumi4innovation.it/piu-risparmio-energetico-in-azienda-con-lo-smart-lighting/
71. https://www.aecilluminazione.it/sistemi-di-controllo-illuminazione-pubblica/
72. https://www.pell.enea.it/lenicalc
73. https://www.engineeringtoolbox.com/leni-lighting-energy-numeric-indicator-d_2151.html
74. Benchmark di consumo energetico degli edifici per uffici in Italia, maggio 2019, ENEA (https://www.enea.it/it/Stampa/File/Rapporto_BenchmarkConsumiUffici_EneaAssoimmobiliare_2019.pdf)
75. Le sfide della luce connessa: il confort, il risparmio energetico e le sue norme (https://www.assets.signify.com/is/content/Signify/Assets/philips-lighting/italy/20211123-editorial-light-connected.pdf)
76. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Lighting_energy_numeric_indicator_LENI#:~:text=LENI%20is%20calculated%20based%20on,lighting%20in%20watts%20(Pl).
77. https://www.tridonic.it/it/app-2018-tunable-white-lucerna-ch.asp
78. https://www.tridonic.it/it/download/PR_2018_Tridonic_Hochschule_Luzern_Tunable_White_IT.pdf
79. https://www.tridonic.it/it/download/brochures/Leaflet_TunableWhite_EN.pdf
80. https://www.tridonic.it/it/download/Tridonic_Hospital_Poitiers_TunableWhite_IT.pdf
81. https://www.tridonic.it/it/app-valiant-bank-ch.asp
82. https://www.tridonic.it/it/progetti-2018-maria-ward.asp
83. https://www.tridonic.it/it/app-2018-policlinico-universitario-poitiers.asp
84. https://z.lighting/en/group/news-insights/zumtobel/zumtobel-spectrum/
85. https://z.lighting/en/group/news-insights/zumtobel/custom-made-light-concept-staedel-museum/
86. https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/IT/Lightlife_07_2012.pdf
87. https://www.zumtobel.com/PDB/teaser/it/PanosInfinity.pdf
88. https://www.zumtobel.com/PDB/Teaser/IT/AWB_Health_Care.pdf
89. https://www.iguzzini.com/us/news/iguzzini-partners-with-the-mount-sinai-light-and-health-research-center/
90. https://icahn.mssm.edu/research/light-health/programs/light-for-human-health
91. https://icahn.mssm.edu/files/ISMMS/Assets/Research/Light-Health/LHRC-ClassroomGuidance.pdf
92. https://icahn.mssm.edu/files/ISMMS/Assets/Research/Light-Health/LHRC-OfficeGuidance.pdf
93. https://www.youtube.com/watch?v=TNDhL4lJISI&ab_channel=LightingAgora
94. https://www.lightcognitive.com/
95. https://www.disano.it/it/p/realizzazioni/scuola-privata-herlev/
96. https://www.glamox.com/en/pbs/human-centric-lighting/research-projects/
97. https://www.ledvance.com/professional/lighting-projects/intelligent-biolux-hcl-system-in-the-schleswig-districts-craftsmen%27s-association
98. https://www.ledvance.com/professional/lighting-projects/ensegid-school
99. https://www.erco.com/en/service/human-centric-lighting-7320/

CASO STUDIO

È appurato che l'esposizione alla luce diurna è fondamentale per mantenere sincronizzato l'orologio biologico per questo è importante che ogni individuo sia incoraggiato a cercare luce diurna o ambienti con luce interna a EDI melanopica elevato ogni volta che sia possibile durante il giorno biologico. Poiché numerosi studi dimostrano una maggiore sensibilità del nostro organismo alla luce con lunghezza d'onda più corta, spettro che non viene utilizzato abitualmente e inoltre l'illuminazione interna degli edifici spesso non fornisce un EDI melanopico sufficiente ovvero non c'è luce con una CCT sufficiente per sostenere il nostro sistema circadiano in modo corretto. Questi fattori di bassi livelli di intensità insieme ad una temperatura di colore tipicamente calda provocano condizioni fotiche che potenzialmente possono compromettere la sincronizzazione del regolare ritmo circadiano. È chiaro che la luce solare deve essere un modello di esempio per la progettazione di sistemi di illuminazione artificiale human-centric in quanto giorni luminosi e notti buie sono le linee guida per sostenere la nostra salute e il nostro benessere. In una prospettiva di progettazione del sistema di illuminazione circadiano, è desiderabile quindi avere un'illuminazione con elevato EDI melanopico nelle prime ore del giorno che via via vada ad attenuarsi in intensità e con uno spettro a lunghezza d'onda più lunga. Un problema che si potrebbe riscontrare procedendo verso questa direzione risiede nella difficoltà da parte degli utenti ad accettare livelli di illuminazione elevati. Ciò comporterebbe problemi estetici o di confort visivo dovuto a intensità luminose superiori a quelli attualmente raccomandate nelle linee guida delle progettazioni illuminotecniche per il compito visivo sebbene i progressi nella tecnologia delle sorgenti luminose permettono di progettare sistemi in grado di supportare gli aspetti visivi e non visivi.

La progettazione architettonica per ovviare a questo problema è fondamentale, una composizione architettonica studiata per massimizzare l'ingresso della luce diurna permette di evitare l'uso massivo di apparecchi di illuminazione artificiale che potrebbe provocare disagi visivi negli occupanti senza contare gli alti livelli di consumi energetici. Tuttavia valutare le relazioni tra architettura e luce è molto complesso per definire gli effetti sul sistema circadiano. Quello che emerge è che la progettazione dell'illuminazione diurna per sostenere gli effetti non visivi sono simili a quelle che sostengono gli effetti visivi tra cui orientamento e rapporto superficie degli ambienti e superfici finestrate, a cui necessitano interventi aggiuntivi per ottimizzare i valori circadiani, anche tramite scelte di colori e materiali neutri che contribuiscono a massimizzare i livelli di luce interni. Derek Phillips in [22] afferma che è possibile delineare un progetto di illuminazione diurna basandosi su: decisione sull'ubicazione dell'edificio tenendo conto dell'orientamento valutando i tempi e l'incidenza della radiazione del Sole e posizione di edifici esistenti e del paesaggio circostante. disposizione e dimensionamento delle finestre per garantire il controllo della radiazione entrante in ambiente, del guadagno di calore e dell'abbagliamento. Nello spazio interno, determinazione delle dimensioni e delle suddivisioni degli ambienti facendo con particolare attenzione al rapporto tra altezza e profondità, cruciale per la penetrazione della luce diurna in base alla funzione dell'edificio, considerando esigenze presenti e future.

Quando invece ci si concentra in modo specifico sulla progettazione illuminotecnica artificiale, il processo non è molto diversa dalle fasi di una progettazione architettonica; anche se, ipoteticamente parlando, un progetto architettonico può essere sviluppato senza considerare o considerando in minima parte l'aspetto illuminazione elettrica, quest'ultima per essere veramente funzionale deve considerare ogni aspetto spaziale degli ambienti interni per scegliere adeguatamente gli apparecchi e ottimizzare i fattori direttamente correlati alla sorgente luminosa. In una situazione ottimale è importante che anche la luce elettrica sia coinvolta precocemente nel processo di progettazione complessivo. Il design illuminotecnico determina in gran parte il possibile risparmio energetico, la qualità dell'illuminazione e il comfort degli occupanti. Quando il progetto illuminotecnico non è appropriato i potenziali risparmi, derivanti da una corretta gestione dell'illuminazione, non saranno ottimizzati. L'installazione di questi sistemi di controllo, agiscono sia sull'ingresso di luce diurna (per evitare abbagliamento e surriscaldamento) sia sull'emissione dei sistemi di illuminazione elettrica, garantendo l'efficienza dell'interazione tra la fonte naturale e quella artificiale".

22. Phillips, D. Daylighting: Natural Light in Architecture; Architectural press: Oxford, UK

Fasi di progetto Human-Centric Lighting

"l'ingrediente principale per buoni risultati umani è un buon design, guidato da un team di progettazione". [25] Un progetto di illuminazione nella fase di definizione degli obiettivi deve saper rispondere alle domande di Quanta luce, Quando, Dove, Per chi e Come illumino. Nel caso in cui il progetto di illuminazione riguarda la sostituzione o l'ampliamento di uno già esistente occorre però prima analizzare lo stato di fatto per determinare l'entità dell'intervento di miglioramento:

- Analisi dello spazio fisico: dimensione ambienti, materiali presenti (colori e finiture), allestimenti degli arredi, funzioni e usi, utenza.
- Quadro esigenziale: definizione dei risultati attesi e gli obiettivi del progetto in riferimento alle norme vigenti.
- Concept di progetto: definizione di massima dell'idea progettuale per identificare le eventuali criticità e le possibilità di intervento (modalità e strategie di illuminamento e i sistemi di illuminazione e modalità di controllo)
- Progetto: scelta degli apparecchi di illuminazione e del layout, simulazione e calcoli di illuminamento e verifica dei risultati rapportandosi con i requisiti normativi

Analisi dello spazio fisico e dell'utenza

Dimensione – materiali – allestimenti

I processi per una progettazione illuminotecnica di ambienti interi si possono raggruppare in due macro categorie a partire dalla luce naturale per poi analizzare quella artificiale a sostegno della prima. All'interno degli ambienti, per approcciare una valutazione della luce naturale entrante, è fondamentale considerare i fattori fisici dell'edificio che influenzano la radiazione luminosa e le risposte umane: l'orientamento, le superfici finestrate e la posizione geografica, ma è altrettanto importante studiare lo spazio interno: i colori e le trame delle superfici

25. Human-centric lighting Myth, magic or metaphor

per misurare come essi modificano lo spettro della radiazione, la geometria della stanza. I punti da includere nella prima categoria sono: un accesso alla luce solare quanto più possibile specie in ambienti dove non si richiede una protezione o controllo dall'abbagliamento, delle strategie di ombreggiamento flessibili e l'accesso ad una vista preferibilmente verso l'esterno o in alternativa su un atrio molto luminoso per stabilire una connessione visiva. Se solo una parte di un grande spazio è illuminata dalla luce del giorno, potrebbe essere meglio dividere lo spazio in zone illuminate da giorno e non illuminate e considerare separatamente i controlli di illuminazione per ciascuna zona.

A dimostrazione della forte connessione tra progettazione architettonica e progettazione illuminotecnica è sufficiente esaminare l'orientamento di un edificio o di una stanza: il sistema circadiano trarrebbe maggiori benefici se le superfici finestrate fossero rivolte verso est nel periodo compreso tra le 6,00 e le 10,00 del mattino mentre nell'intervallo 10,00-18,00 la posizione ottimale è verso sud in quanto la posizione del Sole nella volta celeste varia nel corso della giornata. Questa situazione gioverebbe certamente anche alla valorizzazione degli spazi interni e produrrebbe livelli di luce adeguati per i compiti visivi.

Funzione – usi

Una volta analizzati gli aspetti fisici che caratterizzano lo spazio occorre identificare la destinazione d'uso dell'ambiente in cui si interviene e le attività svolte all'interno, da ciò derivano i risultati desiderati e gli obiettivi operativi. Nelle applicazioni illuminotecniche sebbene condividono lo stesso obiettivo, possono essere richiesti valori di luminanza differenti a seconda delle funzioni assolte. Ad esempio, se esposti ad una luce con una CCT di 17000 K rispetto ad una a 4000 K mostrano un miglioramento della vigilanza soggettiva e una riduzione della sonnolenza diurna. Questo evento si rivela interessante in ambienti utilizzati nelle ore notturne per i lavoratori turnisti in cui l'aumento della vigilanza aumenta la sicurezza dei dipendenti nonché la qualità del lavoro. Questo però è quello che accade quando si parla di lavoro notturno costante nel tempo ma lo stesso non può essere riferito agli stessi ambienti con turni di lavoro a rotazione. I tentativi di adattarsi fisiologicamente ad un ciclo invertito, di veglia durante la notte e sonno durante il giorno, non sono ottimali, possono condurre a stati di jetlag cronico indicato come perturbazione circadiana. Sono quindi necessarie soluzioni impiantistiche di illuminazione elettrica ottimizzate,

spettralmente studiate appositamente per i lavoratori turnisti tenendo conto dei diversi effetti fisiologici e comportamentali della luce. Ciò mette in evidenza che uno stesso ambiente con un obiettivo comune, cioè l'illuminazione di ambienti lavorativi notturni, può richiedere strategie di illuminazione differente. Per questo proposito è stato studiato un approccio che consiste in una illuminazione individuale in ambienti con popolazione eterogenea per migliorare a livello soggettivo le risposte circadiane e di conseguenza tutti gli effetti correlati. Consisterebbe nel manipolare l'intensità e lo spettro della luce individuale piuttosto di progettare soluzioni collettive. Esistono però già da tempo apparecchi di illuminazione individuale come le lampade desk che, anche se non sono state ancora valutate a larga scala per l'efficacia nella regolazione dei ritmi circadiani né per la conformità dell'utente o la fattibilità a lungo termine, si rivelano un'altra possibile strategia.

Un'altra categoria di edifici che necessitano di un'attenzione particolare sull'illuminazione riguardano le strutture sanitarie dove si combinano pazienti che dormono con infermieri del turno notturno che devono fornire assistenza a cui si aggiungono medici che seguono turni differenti. Per sostenere i ritmi circadiani delle persone che dormono sono necessari spazi bui ma allo stesso tempo deve esserci abbastanza luce per potersi muovere in sicurezza nel caso in cui ci siano anche persone attive nella stessa stanza. In questi specifici casi è essenziale identificare delle priorità illuminotecniche per identificare gli eventuali compromessi da considerare. Potrebbero quindi essere utili dei sistemi di illuminazione generale d'ambiente con una potenza minima tale da poter permettere una discreta visione senza innescare risposte circadiane.

Utenza

Un altro aspetto da valutare parallelamente alle funzioni presenti, è la definizione del target degli utenti, le fasce di età, in quali orari è maggiore la loro presenza. Il primo passaggio è valutare i tassi di occupazione nei diversi ambienti individuando quelli con un basso utilizzo durante il periodo in cui l'edificio è in uso. Questo per evitare che ci siano spazi illuminati dove non è necessario. Il secondo è identificare le fasi orarie in cui gli ambienti sono fruiti, spazi attivi di giorno, di notte o entrambi. Nel primo caso, le persone attive di giorno beneficiano di un'elevata potenza biologica della luce diurna durante la mattina e pomeriggio, questo può significare che il focus della progettazione si basa principalmente sulla luce naturale. Al

contrario per le persone attive di notte, in ambienti lavorativi, la situazione cambia molto in quanto necessitano di elevati livelli di illuminazione elettrica per svolgere le attività in modo produttivo e in sicurezza evitando esiti negativi sulla salute umana innescati da modelli di luce che influiscono malamente sui risultati visivi e fisiologici. Per le persone attive sia di giorno che di notte, le soluzioni progettuali devono considerare nella stessa misura le soluzioni precedenti a cui partecipano anche soluzioni architettoniche. In questo caso la progettazione illuminotecnica deve includere sistemi di gestione avanzati con il controllo di zone o di scena di luce intervenendo anche su intensità e spettro delle sorgenti luminose e/o l'inserimento di barriere fisiche come partizioni temporanee o permanenti per creare delle zone di lavoro e bloccare la luce invadente. Questi ragionamenti sono da valutare però a seconda dei tipi di turni lavorativi. Per tutte le attività che si svolgono prevalentemente nelle ore centrali del giorno biologico, le loro necessità di illuminazione sono quelle fornite dalla luce naturale indirizzando la progettazione a considerare in prima battuta gli aspetti architettonici e il controllo della luce naturale e successivamente valutare l'integrazione di sistemi di illuminazione artificiale.

Quadro esigenziale

Un buon studio dello stato di fatto guiderà in modo corretto la progettazione instaurando una gerarchia delle decisioni quando tutti i risultati previsti non possono essere soddisfatti contemporaneamente. Prima di procedere con la progettazione occorre definire gli obiettivi e le esigenze della committenza, in questa fase deve già essere noto l'eventuale riallestimento degli spazi. Questo permetterà di individuare le varie aree di lavoro o svago o decidere quali attività si svolgeranno nel medesimo spazio come brainstorming o riunioni o lavoro individuale al pc o di lettura. L'attenta valutazione di questi compiti permetterà di decidere il tipo di illuminazione da inserire e creare le scene di luce per la gestione della domanda di illuminamento a seconda delle attività svolte. A questo punto, la fase successiva, è valutare quali sono le possibilità impiantistiche e i sistemi di controllo e gestione della luce naturale e artificiale e per fare ciò è possibile seguire i concetti guida della human-centric lighting. I principali riferimenti sono sicuramente le organizzazioni come la Society for Light and Lighting e la

Illuminating Engineering Society (IES) che forniscono standard incentrati sui requisiti minimi dei risultati visivi mentre per la progettazione circadiana, per la quale non esistono degli standard dichiarati, si fa riferimento a raccomandazioni del protocollo WELL v2 e dalla CIE. In una fase di progettazione dei sistemi di illuminazione non è necessaria una precisione accurata, è già noto da manuale IES che al momento di utilizzo degli apparecchi, le misurazioni di illuminamento entro una tolleranza del 30% rispetto al valore dichiarato è sufficiente per la maggior parte dei sistemi. Per fare quindi un quadro chiaro sui metodi di valutazione dell'illuminazione, la IES fornisce standard dei requisiti visivi misurati sul piano orizzontale di lavoro mentre il WELL e la CIE suggeriscono strategie progettuali che prevedono anche delle valutazioni sull'occhio verificate sul piano verticale per sostenere le risposte non visive.

Requisiti visivi

Per soddisfare le esigenze al fine di svolgere le attività nel miglior modo possibile, i requisiti di illuminazione sono ben espressi nella norma UNI EN 12464 aggiornata al 2021. La norma in questione specifica i requisiti minimi di illuminazione in ambienti interni specifici per i posti di lavoro per soddisfare le esigenze di prestazione visiva. I valori espressi al suo interno non si limitano a indicare la quantità di luce necessaria ma anche la qualità per una corretta visione, da non confondere con gli aspetti qualitativi intrinseci per le risposte circadiane ma finalizzati a rendere l'esperienza visiva piacevole. In particolare analizza l'illuminamento e la sua distribuzione sulle superfici, la direzione del flusso luminoso per non generare abbagliamento, resa cromatica della luce, lo sfarfallio dei dispositivi di illuminazione artificiale e la variabilità della luce.

Partendo dalla luminanza e la sua distribuzione, essi influiscono sull'adattamento degli occhi e il confort visivo: livelli di luce troppo elevati possono provocare abbagliamento e lo spesso vale in situazioni di luce troppo concentrata. Se il fascio luminoso è troppo elevato e/o concentrato produce contrasti di luminanza che affaticano la vista e genera fenomeni di abbagliamento anche causato dalla riflessione delle superfici verticali delle pareti o del soffitto.

Per ogni tipo di attività la EN 12464 prevede dei valori di riferimento di illuminamento che devono essere sempre garantiti sull'intera superficie in analisi per il compito visivo che sia un tavolo di lavoro o il pavimento, questo valore è l'illuminamento medio mantenuto E_m.

Per l'abbagliamento, il posizionamento delle sorgenti luminose è importante in quanto il contrasto di luminanza che provoca questo fenomeno è generato dalla presenza di tale sorgente nel campo visivo o da lucernai o da superfici molto riflettenti (abbagliamento riflesso). Anche in questo caso la norma ci viene in aiuto indicando tramite l'UGR, l'indice unificato di abbagliamento molesto.

Le ulteriori indicazioni fornite riguardano lo spettro cioè la cromaticità della luce emessa da sorgenti elettriche che viene scelto dal progettista: luce calda se la temperatura è minore di 3300 Kelvin, fredda se è maggiore di 5300 K e intermedia tra i due valori. La resa cromatica Ra che valuta la naturalezza della luce artificiale per migliorare qualitativamente la prestazione visiva dell'ambiente circostante e degli oggetti. Il valore massimo di Ra è 100 e in ambienti interni non deve scendere al di sotto di 80 dove le persone vi trascorrono molto tempo.

In generale le categorie interessate dalla EN 12464 sono:

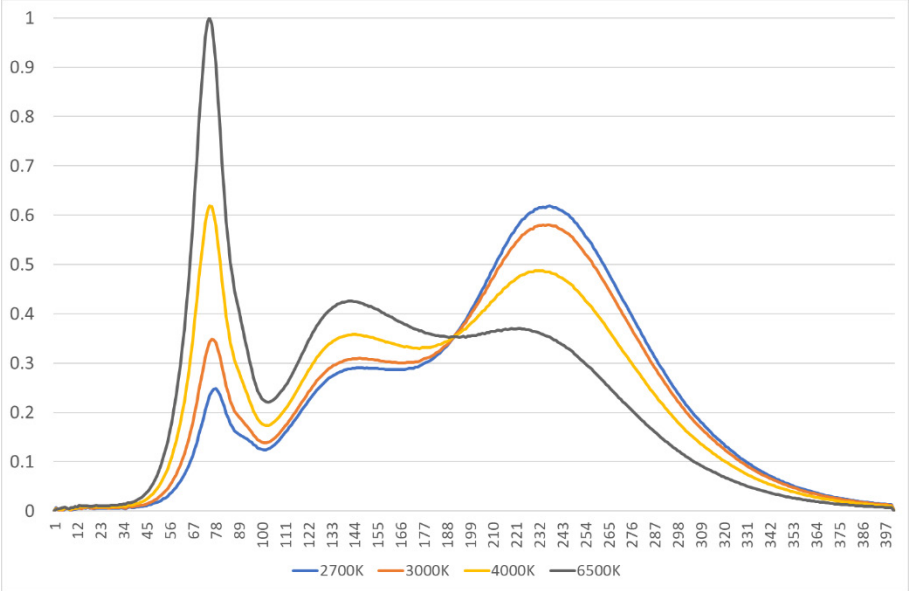
- zone di circolazione e spazi comuni all'interno di edifici
- attività industriali e artigianali
- uffici
- vendita al dettaglio
- luoghi pubblici
- edifici scolastici
- edifici di cura
- trasporti e stazioni ferroviarie

Requisiti non visivi

Richiamando i valori raccomandati dalle associazioni e protocolli per sostenere le risposte circadiane, i criteri di calcolo utilizzati dal WELL v2 e la CIE fanno riferimento al mel-EDI. Tuttavia le soluzioni di illuminazione basate sul WELL non sono testate e nel tempo sono stati modificati gli standard dei valori di soglia. Inoltre le indicazioni WELL hanno lo scopo di promuovere il regolare ritmo circadiano includendo, in questo caso, anche criteri espliciti relativi all'illuminamento, all'abbagliamento, al comfort visivo, all'accesso alla luce del giorno, alle viste, alla qualità del colore, sfarfallio e controllo personale. Entrambi i gruppi si sforzano di lanciare un nuovo approccio globale all'illuminazione incentrata sull'uomo. Queste associazioni forniscono raccomandazioni recenti e degne di nota sull'esposizione alla luce limitate però ad adulti sani attivi durante il giorno. Complessivamente raccomandano mel-EDI ≥ 250 lx diurni, mel-EDI ≤ 10 lx 3 ore prima di dormire e durante il sonno ambienti il più possibile privi di luce (mel-EDI ≤ 1 lx). Tutte le misurazioni sono prese al piano dell'occhio dell'osservatore che viene semplificato tramite un piano verticale a circa 1,2 m di altezza.

Per ottenere il valore mel-EDI o M-EDI è necessario trasformare l'illuminamento medio E_m sul piano verticale dell'occhio nel risultato atteo tramite il coefficiente per l'efficienza melanopica m-DER emesso dalla sorgente. Il valore m-DER espresso in lux varia a seconda dello spettro della luce ricevuta sull'occhio. In via semplificata (senza considerare l'incidenza del colore delle superfici dell'ambiente) il mel-EDI è uguale alla moltiplicazione dei due valori precedenti:

$$\text{mel-EDI} = E_m \times \text{m-DER} \qquad [\text{lux}]$$



2700 K: m-DER = 0.49

3000 K: m-DER = 0.55

4000 K: m-DER = 0.72

6500 K: m-DER = 0.96

L'equilibrio tra i due tipi di risultati umani, visivi e non visivi, è delicato. Ad esempio, se le esigenze di illuminazione per sostenere i risultati circadiani ci porta ad avere intensità di luce molto elevate, questo potrebbe essere causa di abbagliamento visivo per gli occupanti; inoltre richiederebbe anche un fabbisogno di energia maggiore che non sempre è compatibile con le esigenze del proprietario oltre ad essere impattante per l'ambiente se non si ricorre a fonti rinnovabili.

Concept

Modalità di illuminazione

Quando tutte le variabili sono state prese in considerazione, dalle caratteristiche architettoniche, alle funzioni e attività svolte e il target di utenza è possibile dare vita ad un'idea di progetto. Una volta definito l'eventuale nuovo allestimento dell'ambiente

e le funzioni sono due i primi a aspetti da mettere in campo: la gestione dell'illuminazione di zona in base alle attività svolte nell'rea interessata e le scene di luce e il tipo di illuminazione: diretta, proveniente direttamente dalla sorgente, indiretta ovvero la luce riflessa delle superfici circostanti o entrambe le soluzioni. Queste ultime due scelte progettuali di illuminazione spesso non sono studiate per sostenere le risposte biologiche degli individui ma considerano solo le risposte visive.

Quando viene redatto un progetto illuminotecnico in un ambiente già edificato, in cui quindi non è possibile agire in maniera significativa sull'involucro edilizio, il progettista può operare in modo indipendente sulle variabili di illuminazione: per sostenere le risposte visive è possibile scegliere apparecchi di illuminazione più adeguati per il compito visivo degli occupanti e/o agire sulla luminanza spaziale attraverso colori e finiture delle superfici per rafforzare i risultati visivi o creare scene di luce per enfatizzare aspetti architettonici o suscitare sensazioni dell'umore. Mettendo a confronto diversi tipi di superfici di pavimento e delle pareti con colorazioni differenti per valutare la riflessione della luce, i risultati ottenuti dagli studi [18] suggeriscono che le peggiori risposte si sono verificate con il giallo seguito dal blu e il grigio ma che questi valori sono ulteriormente influenzati dalla posizione della finestra e dell'osservatore: maggiore è la distanza, maggiore è la riduzione delle risposte sul sistema circadiano. Queste variabili restano valide anche per sostenere le risposte non visive a cui si aggiungono ulteriori strategie agendo sul controllo degli apparecchi di illuminazione mediante orologi, sensori di occupazione o sensori che rilevano l'intensità della luce diurna. Nel caso in cui occorresse correggere errori sui sistemi di illuminazione che provocano disagio visivo è possibile adottare differenti soluzioni per mitigare il problema spostando banalmente la sorgente eccessivamente intensa, cambiare la distribuzione, lo spettro o ancora riducendo la luminanza o aumentando quella della superficie di fondo per ridurre il contrasto.

L'ultima analisi spetta al team di progettazione in accordo con la committenza, proprietario dell'edificio, per verificare che le esigenze visive e non visive siano soddisfatte avendo un occhio di riguardo sui risparmi energetici che ad oggi non possono mancare grazie anche alle nuove tecnologie ma anche ai costi di investimento dell'intervento di progettazione e realizzazione dell'impianto di illuminazione e controllo.

18. Good places to live and sleep well

Sistemi di illuminazione

Con la premessa che è possibile realizzare un'illuminazione human-centric utilizzando apparecchi "tradizionali" in modo corretto senza doversi affidare a prodotti con caratteristiche dinamiche, questa strategia comporterebbe però la pianificazione di una gerarchia di illuminazione che aumenterebbe i costi di realizzazione e per questo è preferibile optare per i prodotti dinamici. Per esprimere meglio il concetto, supponiamo di utilizzare una sorgente elettrica che fornisce una radiazione a lunghezze d'onda corte sopra i 10.000 K per suscitare risposte non visive più forti negli occupanti/osservatori. Queste caratteristiche possono essere positive in effetti per persone che seguono un normale ciclo di veglia di giorno e sonno di notte, ma se la stessa luce viene somministrata poche prima di coricarsi avrebbe degli effetti molto dannosi per il sistema circadiano. Allo stesso modo una semplice lampada da scrivania utilizzata la sera non influenzerà la visibilità di un libro se una persona ha trascorso la mattina all'aperto in una giornata soleggiata, al contrario la sincronizzazione dell'orologio circadiano influenzato dalla stessa lampada sarà a sua volta condizionato dalla luce solare assorbita durante il giorno. Con un semplice dimmer sarebbe possibile variare l'intensità riducendo già molti rischi per le risposte non visive ma per poter cambiare anche lo spettro ecco che entrano in gioco le sorgenti tunable white.

Per risolvere invece il problema dell'illuminazione in ambienti profondi o con poca disponibilità di luce diurna, sistemi che modulano la potenza tra un apparecchio e l'altro all'interno dello stesso gruppo, permettono di mantenere la stessa quantità luminosa sui piani di lavoro in rapporto alla disponibilità di luce naturale entrante. Per fare ciò intervengono i sensori di rilevamento della luce naturale che acquisiscono i dati di input e regolano l'intensità degli apparecchi di illuminazione. Lo spazio illuminato da luce solare si trova normalmente entro 6 m dalla parete finestrata, a condizione che l'area vetrata sia almeno del 20 % delle pareti. In alternativa, lo spazio può essere illuminato dal tetto tramite lucernai, con un'area vetrata di almeno il 10% della superficie del pavimento. La normale trasmittanza luminosa dei vetri deve essere almeno del 70% e se la trasmissione della luce è inferiore a questo valore, la superficie trasparente può essere aumentata proporzionalmente.

Nei luoghi in cui le persone dormono come residenze, alberghi o strutture mediche, le soluzioni possono essere più complesse. Oltre ad una illuminazione con potenza biologica elevata durante la mattina per sostenere i bisogni fisiologici e visivi

diurni, occorre anche un sistema di illuminazione che sia in grado di influenzare positivamente anche le risposte serali. Come per gli esempi precedenti, anche questi due scenari di luce possono richiedere due set di apparecchi se le sorgenti sono tradizionali monocromatiche e non dimmerabili oppure si può ricorrere anche in questo caso alle nuove tecnologie "Human-centric" che in questa configurazione possono esprimere al meglio il loro potenziale. Integrando un sistema di gestione, è sufficiente un unico sistema di illuminazione capace di modificare intensità e spettro a seconda delle ore del giorno e delle necessità visive per sostenere tutte le risposte della luce.

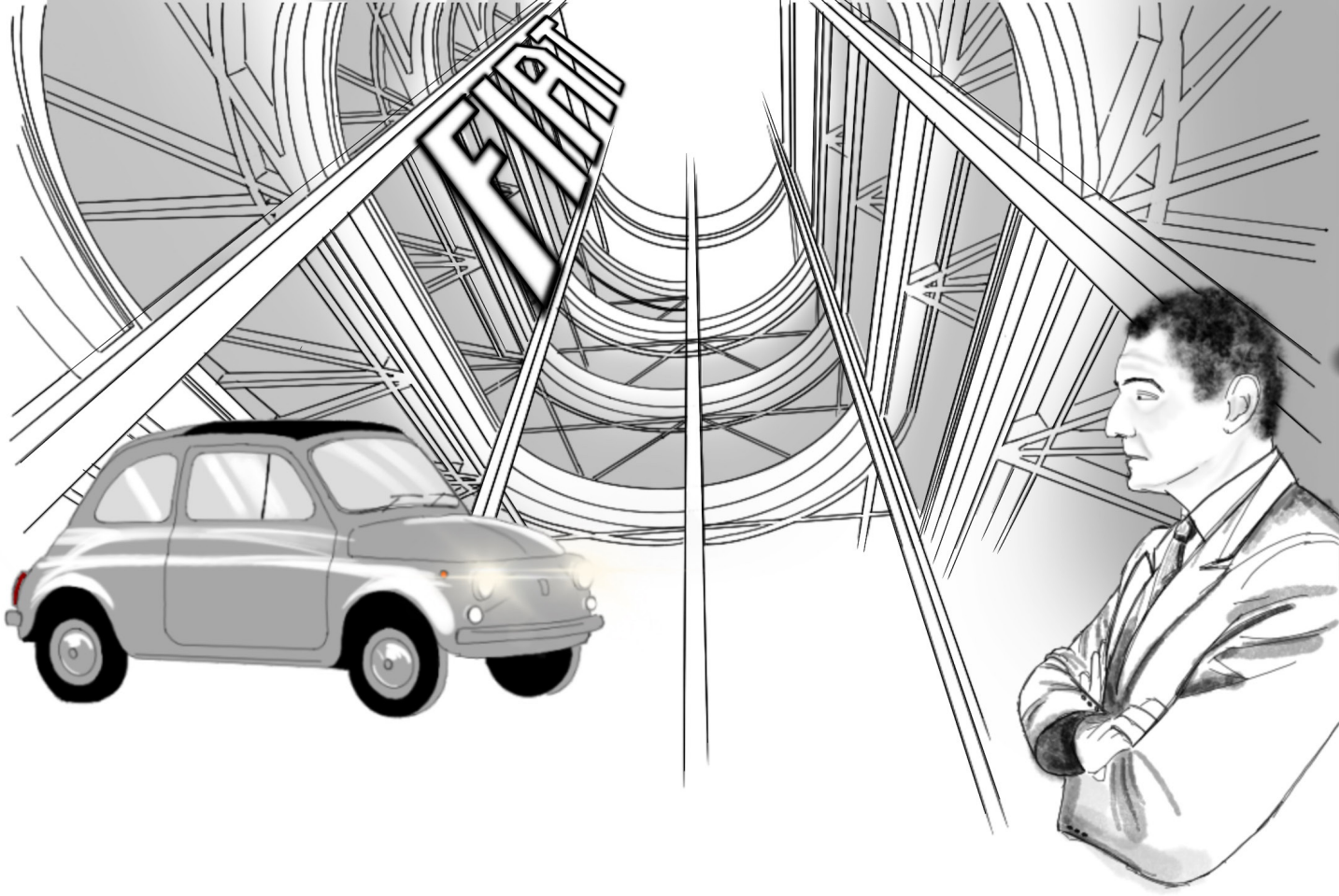
Il problema indipendente da qualsiasi tecnologia e soluzione progettuale sarà la volontà delle persone di accettare i sistemi di controllo dell'illuminazione o cambiare le proprie abitudini di illuminamento diurno e serale in ambienti lavorativi. Una passeggiata all'aperto durante il giorno resta sempre il modo migliore per sostenere il nostro sistema circadiano e portare risultati positivi alla luce.

Progetto

La fase di progetto è l'ultimo step del processo complessivo in cui vengono prese tutte le analisi fisiche e funzionali e gli apparecchi di illuminazione contestuali alle idee di progetto e inseriti nei software di calcolo per la verifica dei risultati. In questa fase vengono messi a confronto i dati forniti dai programmi di simulazione con i valori forniti dalle tabelle normative. I dati di input per i software per i progetti dell'illuminazione oltre ad avere valori numerici sono caratterizzati da valori grafici in quanto la simulazione avviene in uno spazio tridimensionale all'interno del modello dell'ambiente reale. Questo dato intrinseco di ogni apparecchio di illuminazione è il solido fotometrico fornito dalle case produttrici dei dispositivi. nel caso in cui i valori del sistema progettato siano rispettati il lavoro è concluso, in caso contrario potrebbe rendersi necessario la modifica delle strategie o degli apparecchi di illuminazione ripetendo la procedura di simulazione fino al raggiungimento dei risultati attesi.

Sede Lingotto

Politecnico di Torino



L'edificio Lingotto di Torino apre nel 1922 come stabilimento ufficiale della Fiat per la realizzazione di automobili e rimase tale fino al 1982 in seguito allo spegnimento della linea di produzione. Pochi anni dopo, nel 1985, venne incaricato l'architetto Renzo Piano di dare nuova vita all'enorme complesso industriale torinese puntando alla nuova frontiera degli anni in corso volgendo verso il settore terziario. Oggi questo landmark, questo punto di riferimento dell'industria della città, accoglie diverse funzioni tra cui spazi fieristici per grandi eventi, un centro commerciale, cinema ma anche uffici e polo universitario del Politecnico di Torino. Ed è proprio qui che si sviluppa il concept del nuovo sistema Human-Centric Lighting delle aule studio.

Analisi dello spazio fisico

Situato all'estremità nord del complesso, il centro universitario si sviluppa su sei livelli compreso il piano terreno, con al centro un ampio atrio a tutta altezza e un lucernaio nella copertura che illumina gli ambienti più interni. Mentre le aule sono situate sul perimetro e godono di ampie vetrate, gli spazi connettivi, i locali tecnici e di servizio ma soprattutto le aule studio sono localizzate al centro della struttura affacciando sul piano terreno come un ballatoio. Questi ultimi richiamano molti studenti nell'intervallo tra una lezione e un'altra e sono il punto di riferimento per studiare o per incontrarsi con i compagni e colleghi e discutere di progetti. Per questo necessitano di un'illuminazione adeguata allo svolgimento di tali attività. Nonostante queste aule siano situate in un luminoso spazio interno, la disposizione dei locali e la conformazione architettonica compromette la loro illuminazione dal lucernaio contando in gran parte se non totalmente su sistemi illuminotecnici artificiali.

Le aule studio, focus del progetto, sono tre in totale: due situate al secondo piano e una al terzo. Dall'analisi fotografica svolta in diverse ore del giorno con condizioni meteorologiche nuvolose, è stato chiaro che mentre al terzo piano l'aula, essendo situata proprio a ridosso del ballatoio e più vicino in altezza al lucernaio è la più luminosa, per le aule del secondo piano non si può dire lo stesso. Al secondo livello dell'edificio, i locali dedicati allo studio sono situati nello spazio in modo molto differente: una presenta condizioni viste simili al terzo piano ma con la criticità di essere situata in profondità e non vicino all'atrio; l'ultima non ha affacci sul lucernaio e non ha ampie vetrate, l'aula studio meno illuminata da luce naturale è circondata da una sala docenti sul lato est, dalla caratteristica rampa per auto del Lingotto a sud, le aule a ovest e il locale tecnico a nord.

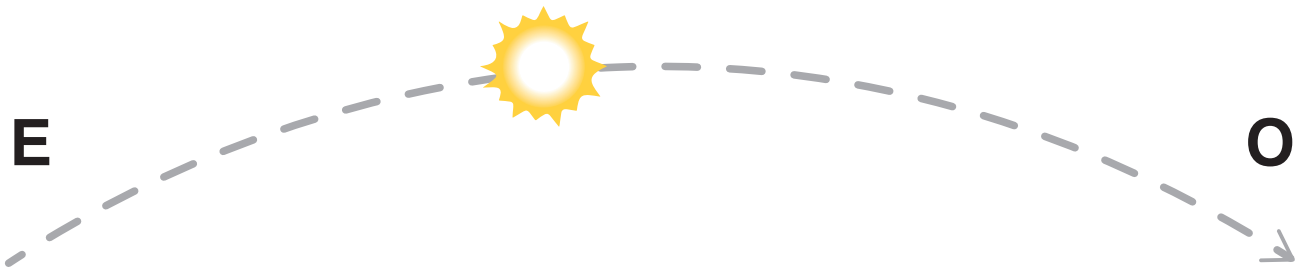
Potendomi basare sul sopralluogo e sull'analisi fotografica ho concluso che questa è l'unica aula studio priva di ampie vetrate verso l'esterno e di zone molto luminose, per questo viene identificata come locale critico su cui intervenire per studiare un nuovo sistema di illuminazione circadiana artificiale da riproporre poi nelle altre aule.

SEZIONE

Sezione longitudinale manica nord (Politecnico di Torino)

Fuori scala

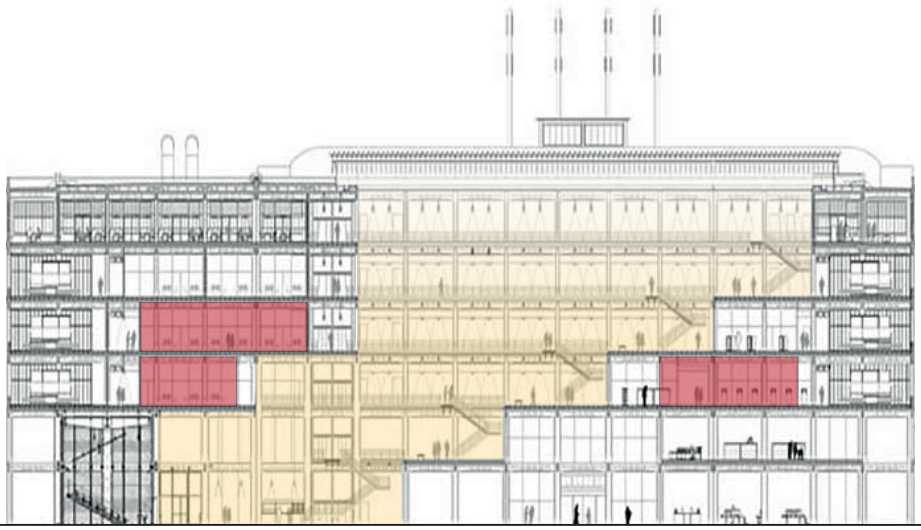
https://www.archilovers.com/projects/204094/lingotto-university.html#drawings



LEGENDA

Vano centrale con lucernaio

Aula studio



PIANTA PIANO SECONDO

Aule studio piano secondo

Scala 1:500

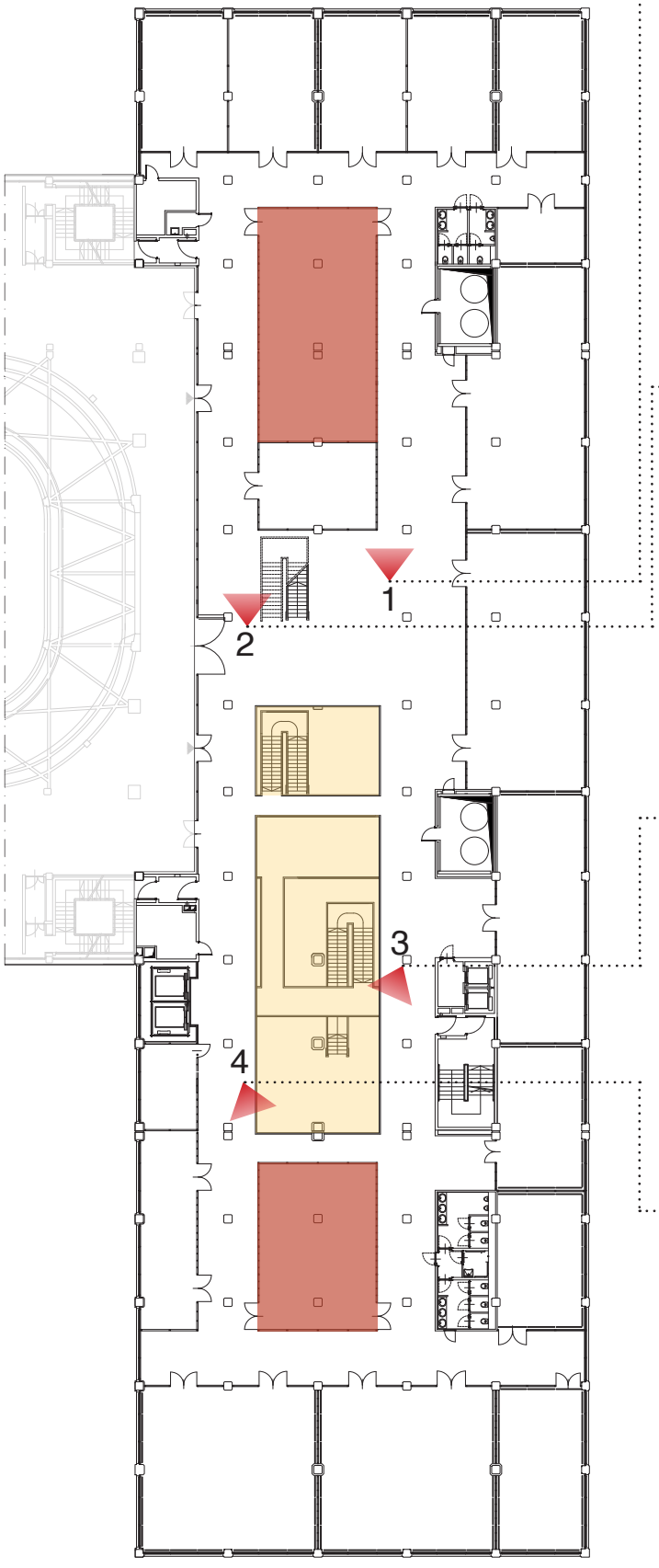


Foto 1

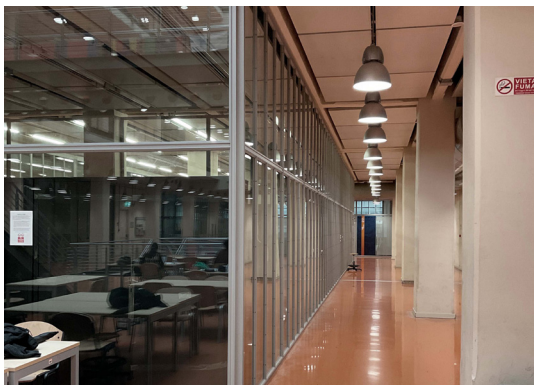


Foto 2

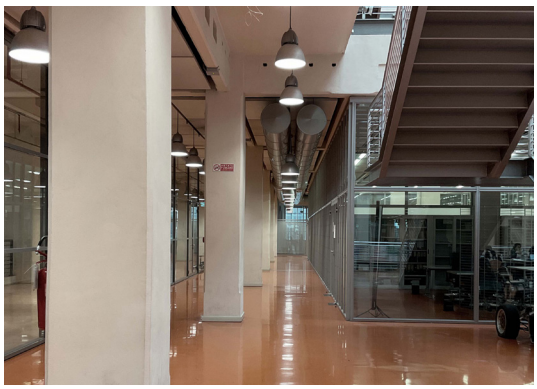


Foto 3

Foto 4

PIANTA PIANO TERZO

Aule studio piano terzo

Scala 1:500

LEGENDA

Vano centrale su piano terra

Aula studio

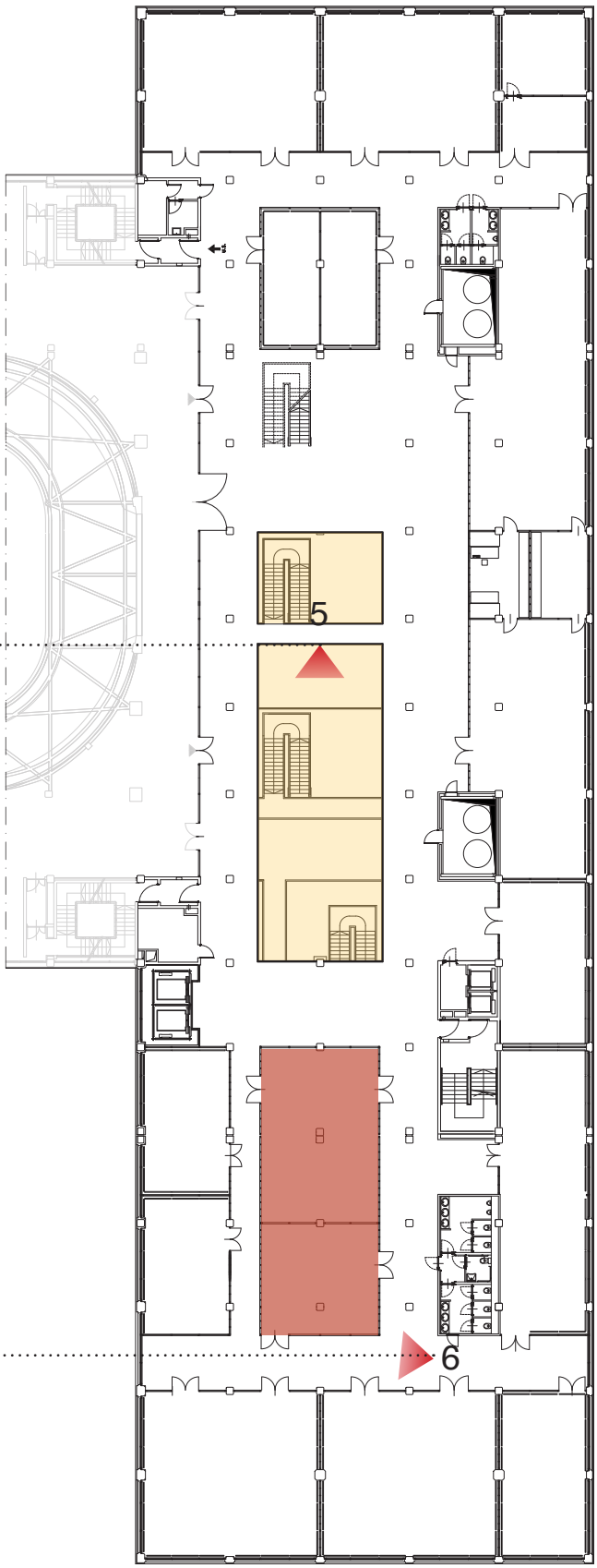


Foto 5

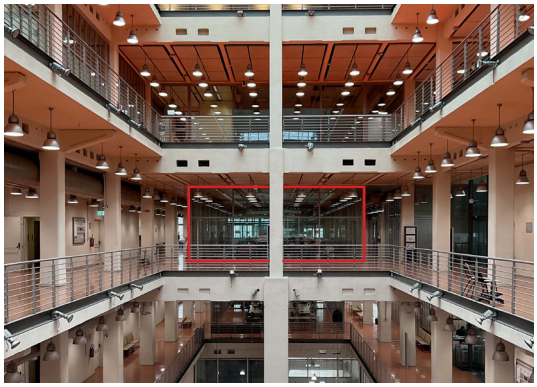


Foto 6

PIANTA PIANO SECONDO

- Aula studio oggetto di intervento. Analisi delle superfici su cui affaccia il locale

- Analisi fotografica

Scala 1:200

LEGENDA

- *Vetrata verso esterno*
- *Vetrata su aule + tenda*
- *Vetrata su rampa Lingotto*
- *Muratura intonacata chiara*
- *Vetro singolo*
- *Vetro satinato*

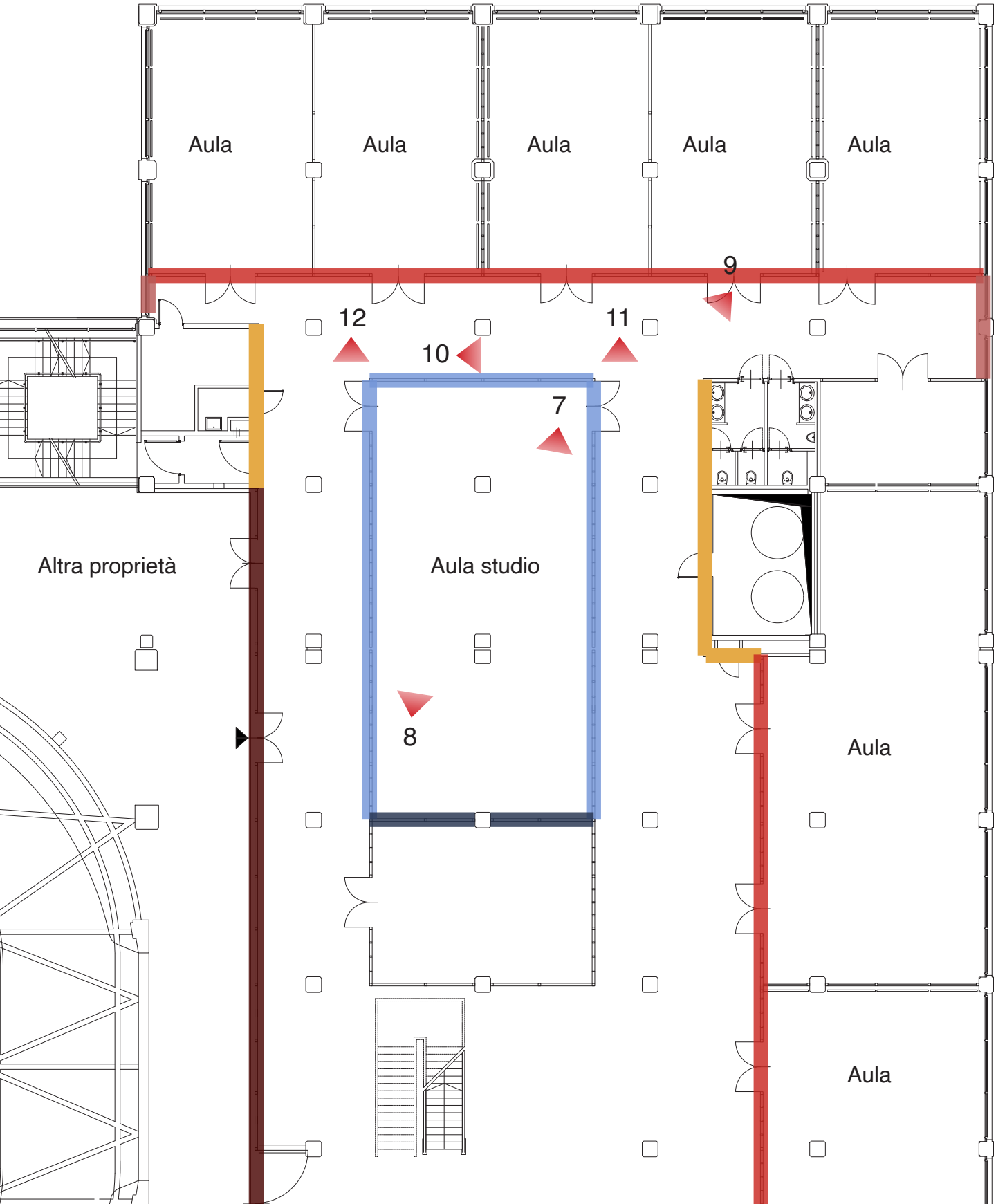


Foto 7

Foto 8

Foto 9

Foto 10

Foto 11

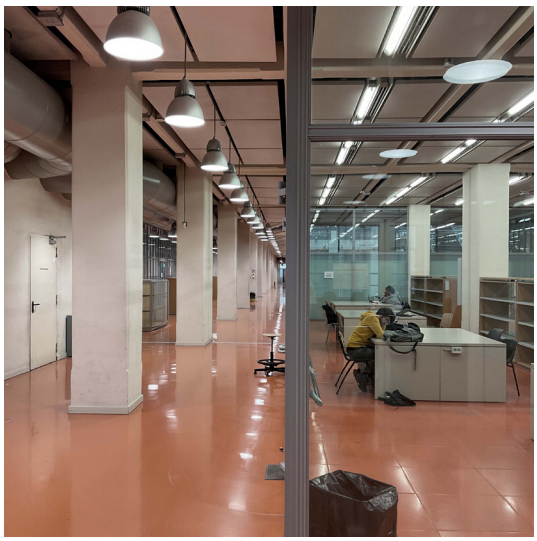


Foto 12

Dall'analisi fotografica si evidenzia subito la presenza ridondante di apparecchi di illuminazione per il raggiungimento dei requisiti di illuminazione necessari a causa dell'assenza di luce naturale. Dal punto di vista compositivo, l'ambiente è definito da divisori totalmente vetrati che affacciano sui corridoi, all'interno dello spezio gli elementi strutturali spezzano la continuità visiva dell'ambiente, il soffitto in cemento armato con travi a vista ribassate creano un cassettonato nella quale sono alloggiati i sistemi impiantistici mentre le finiture sono tendenzialmente neutre sulle superfici verticali con una colorazione chiara mentre sulla pavimentazione lucida spicca un arancione scuro. Il sistema di illuminazione esistente è caratterizzato da due tipologie differenti: la prima è identificativa dell'edificio, le lampade a sospensione firmate Iguzzini sono protagoniste su tutti i corridoi e ballatoi dell'atrio centrale mentre all'interno dell'ala studio sono installati apparecchi con sorgenti luminose fluorescenti. Queste ultime sono costituite da due gruppi di apparecchi di cui uno è stato definitivamente scollegato, l'altro che è attualmente utilizzato è comandato da un interruttore presente nel locale che controlla tutte le lampade, ciò indica l'assenza di zone differenziate o della possibilità di dimmerare della luce. Anche le emozioni e gli stati d'animo che suscita l'ambiente nella sua complessità occupa una parte delle valutazioni dello stato di fatto, soggettivamene infatti non si può paragonare lo stato psicologico provato all'interno dell'aula studio in esame con le altre e ancor meno con le aule per le lezioni che affacciano verso l'esterno. La monocromia dello spettro luminoso, la mancanza di contrasto di luminanza delle superfici, la mancanza di colore suscita una staticità anche nei pensieri. A suo favore però, la luce monocromatica tipicamente fredda (CCT >4000) presente all'interno favorisce la concentrazione, a sostegno di tutto ciò che è stato trattato nei capitoli precedenti. In questa prima battuta si deduce che la luce fredda agevola certi stati comportamentali ma è necessario un'integrazione di luce più calda per migliorare lo stato d'animo e l'esperienza visiva dell'ambiente circostante. Questo aspetto emotivo e visivo dello spazio circostante è rafforzato anche dall'utenza che normalmente occupa questi ambienti, nell'arco di un anno ho potuto riscontrare una forte preferenza da parte degli studenti, specie quelli dei corsi in architettura, verso le aule studio che si aprono sull'atrio centrale.

Complessivamente l'aula in oggetto è frequentata piuttosto costantemente durante tutto l'arco della giornata con un calare del numero di occupanti nelle ore preserali dopo le 18,00 del pomeriggio. Gli intervalli di presenze che si possono osservare sono più marcati durante la metà della giornata in cui molti studenti escono per l'ora di pranzo o per prendersi una pausa. Inoltre nel giorno di riposo delle lezioni, queste aule vengono ugualmente utilizzate ma con tassi di occupazione ridotti, questo evento suggerisce la possibilità di sospendere l'uso di una o due delle tre aule studio oppure dividendo in zone le aule più grandi per avere un controllo dell'illuminazione differenziata tramite l'uso di sensori di occupazione per poter agire sui risparmi energetici. Gli studenti che vi si recano hanno un'età approssimativa compresa tra i 23 e i 26 anni, un'età in cui anche la sensibilità del sistema circadiano è maggiore rispetto ad individui con età maggiore.

Quadro esigenziale

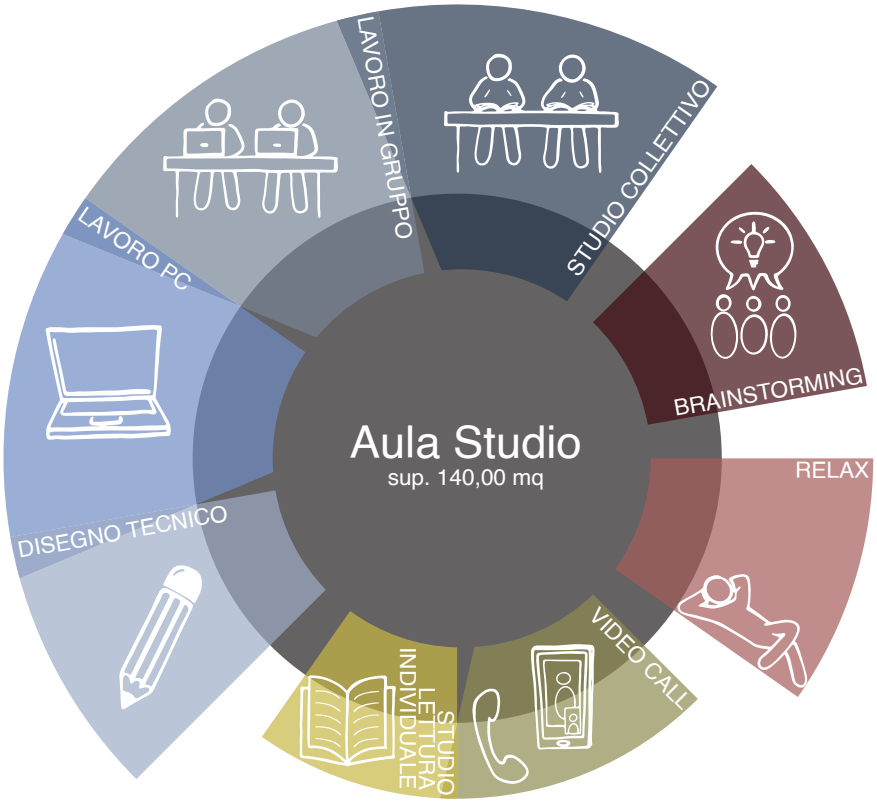
L'obiettivo di questo studio dell'illuminazione delle aule studio del Lingotto è la sostituzione delle apparecchiature esistenti con sistemi di illuminazione dinamici HCL (Human Centric Lighting) per sostenere così il sistema circadiano degli studenti senza compromettere i requisiti visivi per svolgere le attività di studio. Per fare ciò è necessario prima fare riferimento alle norme vigenti in termini di requisiti visivi e successivamente alle raccomandazioni suggerite dalla CIE per le risposte non visive. Essendo l'aula studio in oggetto priva di affacci diretti verso l'esterno o su spazi molto illuminati da luce naturale, si assumono valori del contributo di illuminazione naturale nulli andando a lavorare su un sistema di illuminazione circadiana artificiale. Per gli aspetti non visivi le raccomandazioni indicano che è necessario avere un EDI melanopico di 250 lx sul piano verticale misurati a 1,2 metri di altezza. Per gli aspetti visivi, come già citato, la norma di riferimento è la EN 12464-2021 per l'illuminazione interna in ambienti lavorativi e scolastici che fornisce tabelle dettagliate sui valori di illuminamento minimi da mantenere sui piani di lavoro.

Compito visivo attività	Em [lx] minimo	Uo	Ra	RUGL	Ēm,z [lx]	Ēm,wall [lx]	Ēm,ceiling [lx]
					Uo ≥ 0,10		
Aula - attività generica	500	0,60	80	19	150	150	100
Lavoro al computer	300	0,60	80	19	100	100	75
Disegno tecnico	750	0,60	80	19	150	150	100
Attività pratiche	500	0,60	80	19	150	150	100

Concept

Il concept di progetto cerca quindi di far coesistere i requisiti visivi con i requisiti per sostenere i ritmi circadiani e allo steso tempo migliorare i risparmi energetici. Per raggiungere questo obiettivo, i dispositivi saranno disposti secondo una gerarchia che vede al primo livello un'illuminazione omogenea diffusa con uno spettro a lunghezza d'onda tendenzialmente corta che svolgerà il compito di illuminazione generale, inoltre nelle ore in cui il locale è in uso questo tipo di illuminazione resterà in funzione ma con la possibilità di regolare intensità e spettro. Al secondo livello un'illuminazione diretta più localizzata, essa infatti sarà caratterizzata da gruppi di apparecchi LED dinamici che lavorano con sensori di occupazione. Per gli obiettivi del risparmio energetico la strategia è quella di mantenere accese le luci generali diminuendo l'intensità in caso di assenza di occupanti mentre tutti gli altri gruppi di apparecchi presenti nel locale sono normalmente spenti. Questi ultimi si accenderanno solo dove vi è la presenza di persone e si spegneranno nuovamente a postazione vuota. La strategia dell'occupazione in rapporto con le gerarchie di illuminazione indica che nel caso di presenza di utenti all'interno dell'aula, l'illuminazione generale fornirà livelli di illuminamento relativi ai luoghi di passaggio come corridoio con illuminamento minimo al piano di calpestio di 100 lx, nel momento in cui l'utente prende posto, l'apparecchio dedicato a quella zona si accenderà fornendo livelli di illuminamento totali adeguati al compito visivo. Il sistema di illuminazione è studiato su misura del nuovo allestimento e disposizione dei tavoli, esso ha l'obiettivo di differenziare le varie attività che si possono svolgere in queste aule creando delle zone di illuminazione differenti da poter controllare in modo in-

SCHEMA FUNZIONI

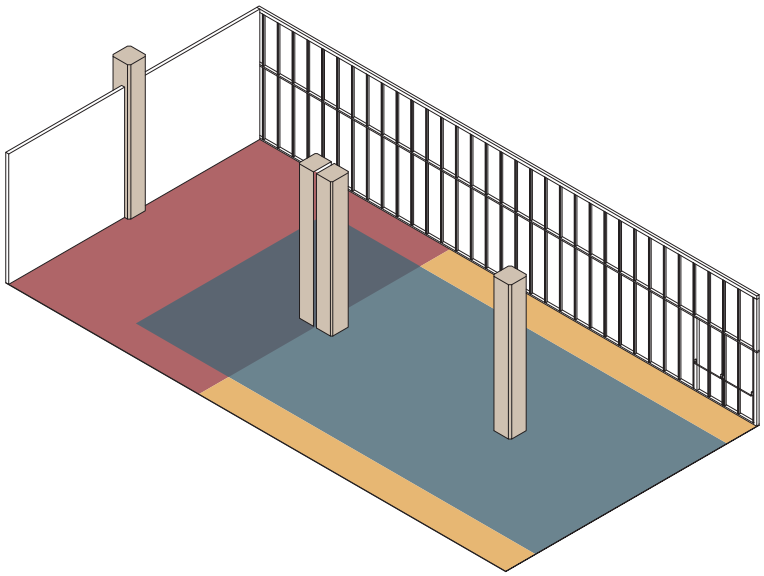


LEGENDA

Relax - Brainstorming

Studio e lettura video chiamate

Lavori di gruppo Lavoro al computer Studio collettivo Disegno tecnico



dipendente per migliorare gli aspetti energetici. Nel complesso gli esempi di zona ipotizzati sono:

- Studio individuale e/o collettivo, lettura, lavoro al PC
- Studio/progettazione in piccoli gruppi di lavoro
- Area relax, lettura, brainstorming
- Spazi silenziosi

Le caratteristiche aggiunte nel nuovo allestimento sono gli spazi silenziosi grazie all'aggiunta di "cabine" modulari, per un massimo di due persone ciascuna, in cui è possibile isolarsi per svolgere attività che provocherebbero disturbo per gli altri studenti come videochiamate oppure viceversa se sia necessario un luogo silenzioso nel caso in cui l'aula sia occupata da gruppi di lavoro. La seconda è l'inserimento di due pareti scorrevoli per dividere lo spazio fisico e ampliare le possibilità di utilizzo del locale. Questa disposizione rivista permette infatti la massima flessibilità dell'ambiente: i tavoli possono essere uniti per svolgere lavori in gruppi numerosi o per attività pratiche come realizzare modelli architettonici oppure essere separati e avere postazioni singole; allo stesso modo anche i divani, grazie alla loro conformazione, possono essere sistemati a seconda delle esigenze grazie anche a soluzioni con schienali riposizionabili e/o removibili. Nel caso l'aula debba accogliere eventi e iniziative accademiche tutto l'arredo può essere ricollocato temporaneamente nei luoghi connettivi come già sono presenti in altre aree del piano. In questo modo il sistema di illuminazione si presta ad ogni esigenza: l'illuminazione generale, posto al centro dell'ambiente, simula un lucernaio già caratteristico del fabbricato e permette di adeguarsi ad ogni esigenza impostando delle scene di luce in base alle attività. Nelle zone circostanti viene ripreso un sistema a sospensione ma con apparecchi dinamici indipendenti per attivarsi o disattivarsi a seconda della domanda e dell'utenza presente. In ultimo, le cabine sono corredate di una loro illuminazione dedicata all'interno connesse all'impianto del locale grazie al sistema di controllo con comunicazione wireless Zigbee, così facendo è necessario una semplice alimentazione alla rete elettrica (220V).

Relax - Brainstorming

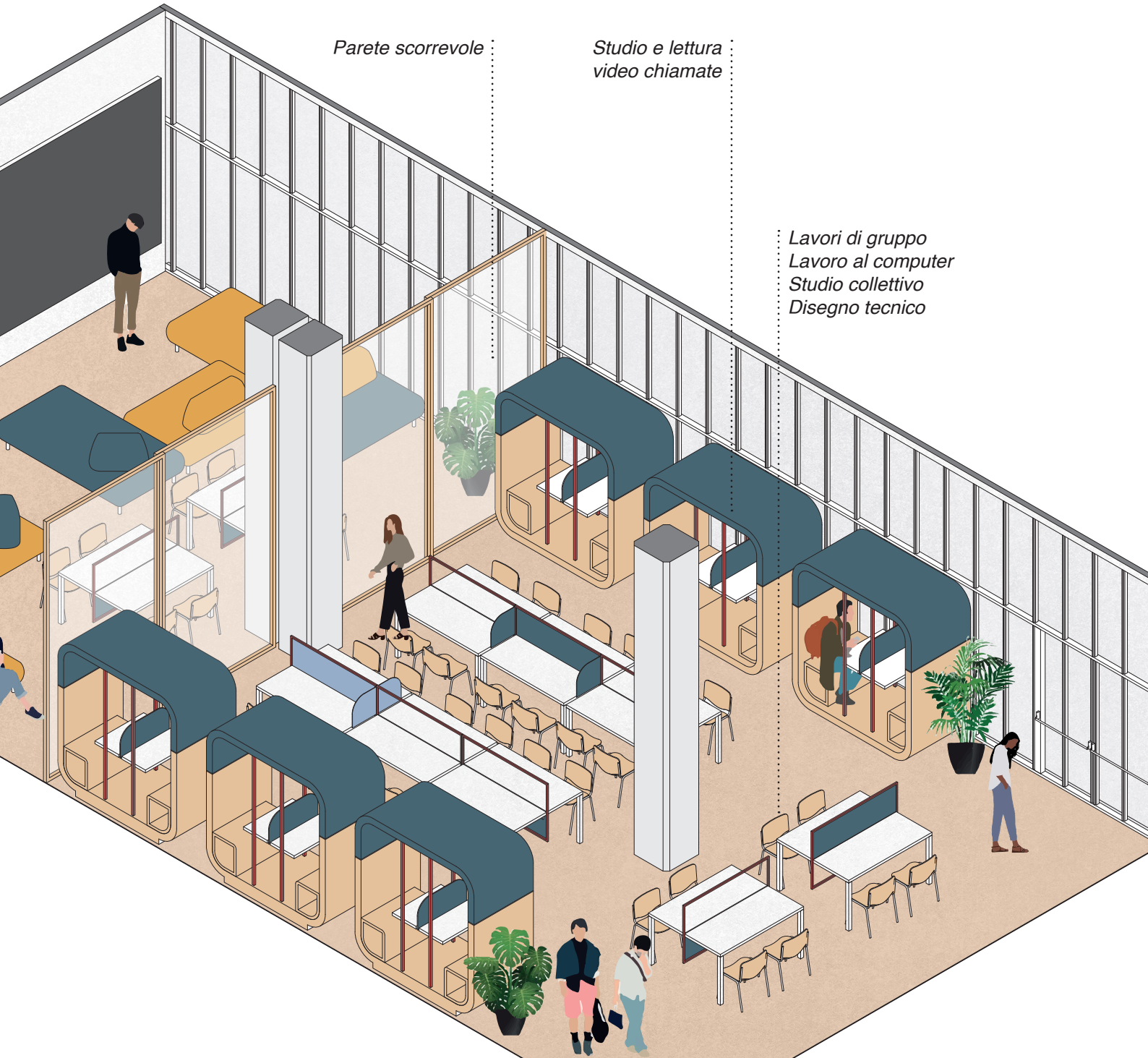
Per la gestione dell'illuminazione nel resto dell'ambiente, l'idea di progetto è un sistema di controllo semi-automatico, tramite un pannello di controllo posto nella stanza o un collegamento da smartphone in cui sarà possibile intervenire scegliendo la scena di illuminazione desiderata a seconda del compito da svolgere in una specifica zona della stanza. Il controllo manuale rappresenta un sottosistema in quanto comanderanno sem-

pre in primo luogo i sensori di occupazione: se nell'aula non sarà presente qualcuno, non è possibile agire in nessun modo sulle accensioni manuali.

Le strategie di illuminazione utilizzate sono:

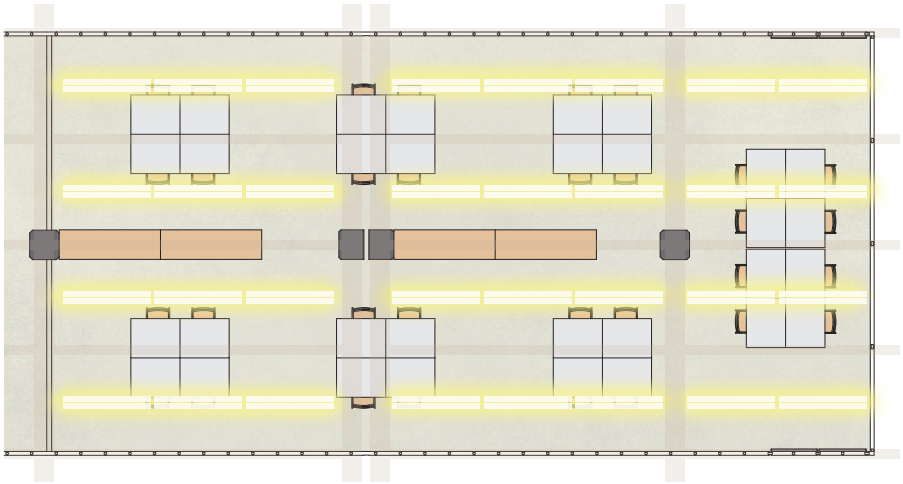
- integrazione luce naturale-artificiale
- Controllo della domanda
- regolazione pre-impostata
- Rilevamento dell'occupazione

I dispositivi necessari per un controllo semi-automatico atti a gestire queste strategie di controllo sono sia attivi che passivi.



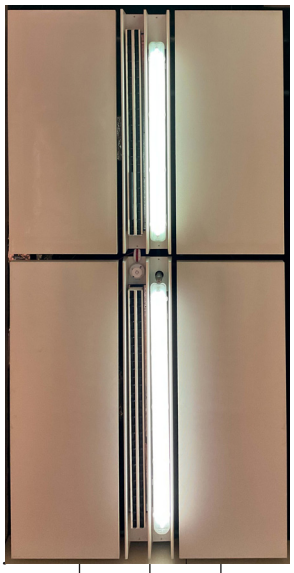
PIANTA STATO DI FATTO

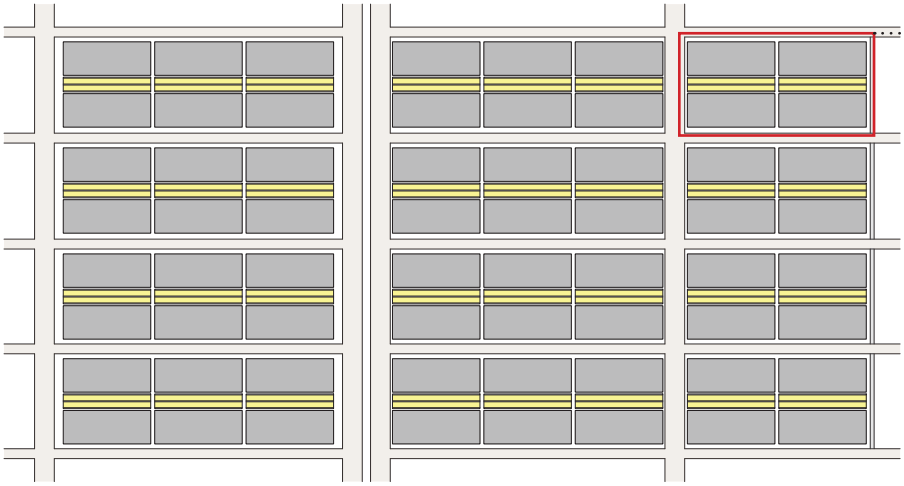
0 1,0 0,5 2,0 5,0 metri

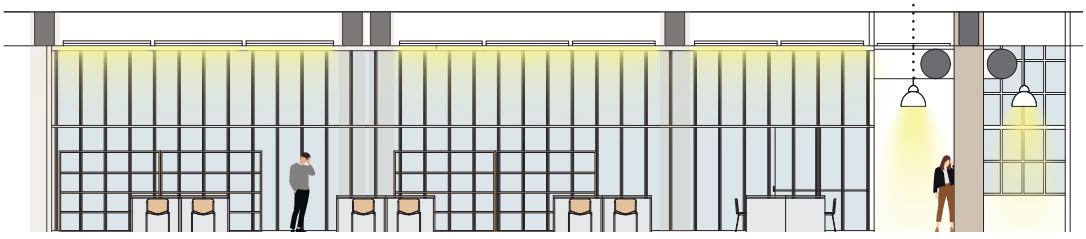


Allestimento dell'arredo interno allo stato di fatto

Foto degli apparecchi di illuminazione dello stato di fatto



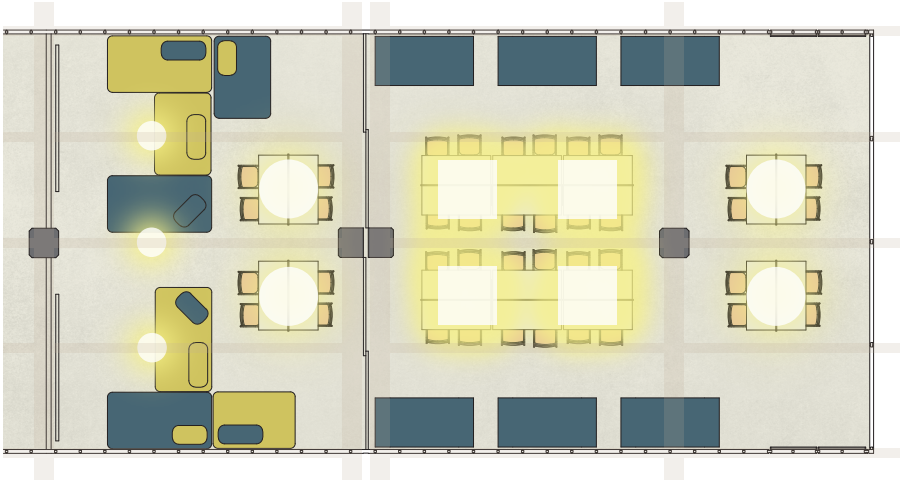




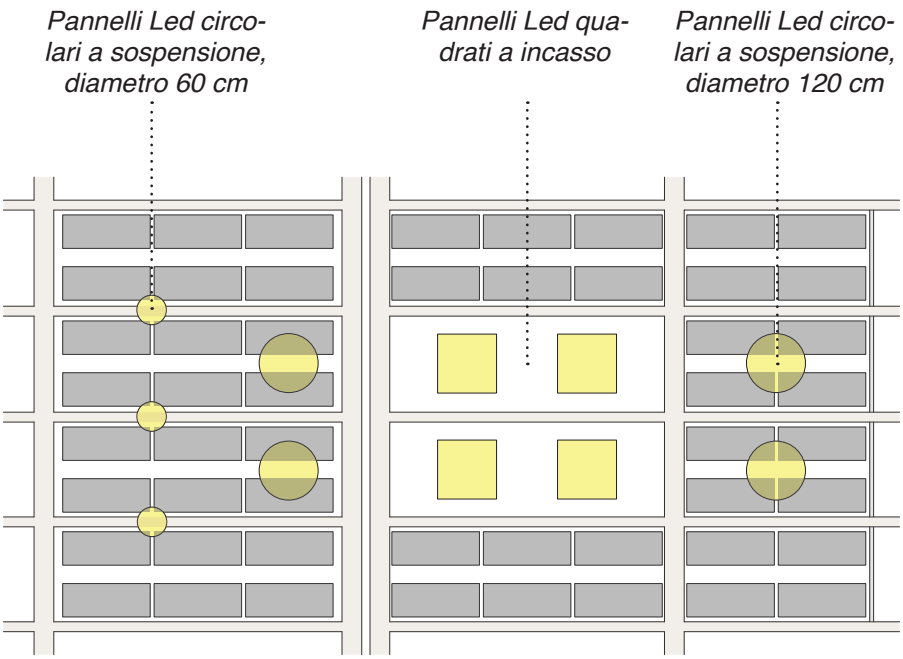
Iguzzini Berlino

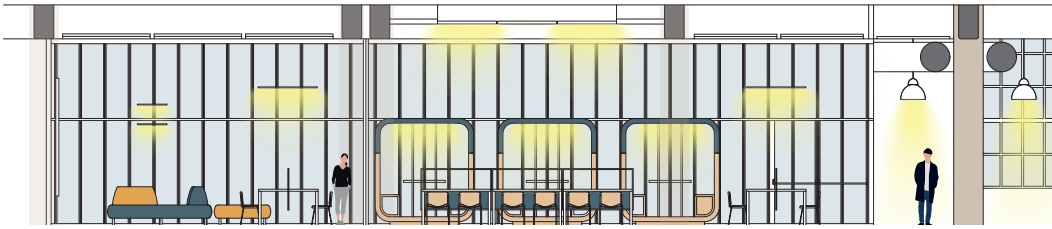
PIANTA PROGETTO

Allestimento dell'arredo interno allo stato di progetto



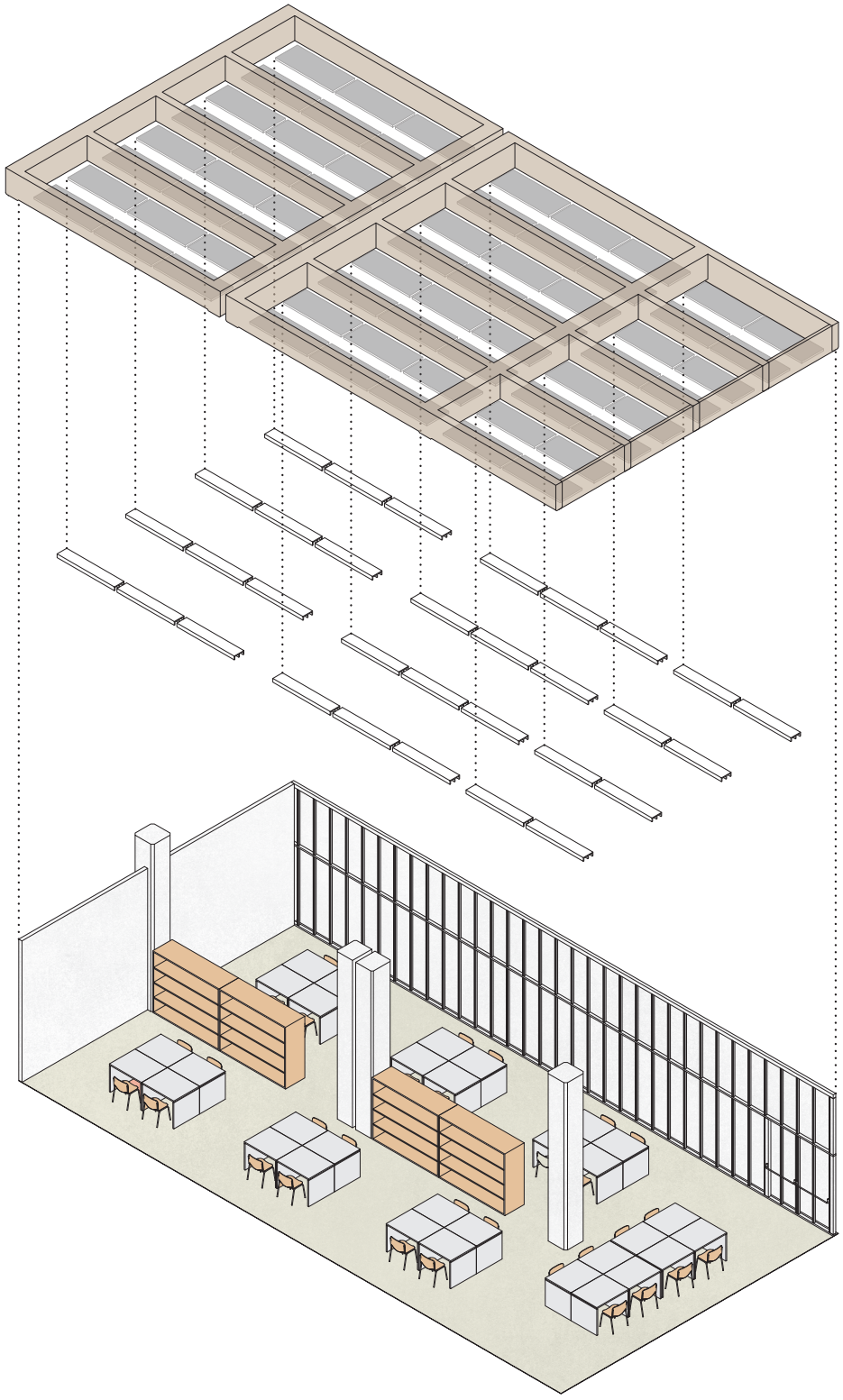
Disposizione della nuova illuminazione in rapporto con i pannelli di chiusura esistenti



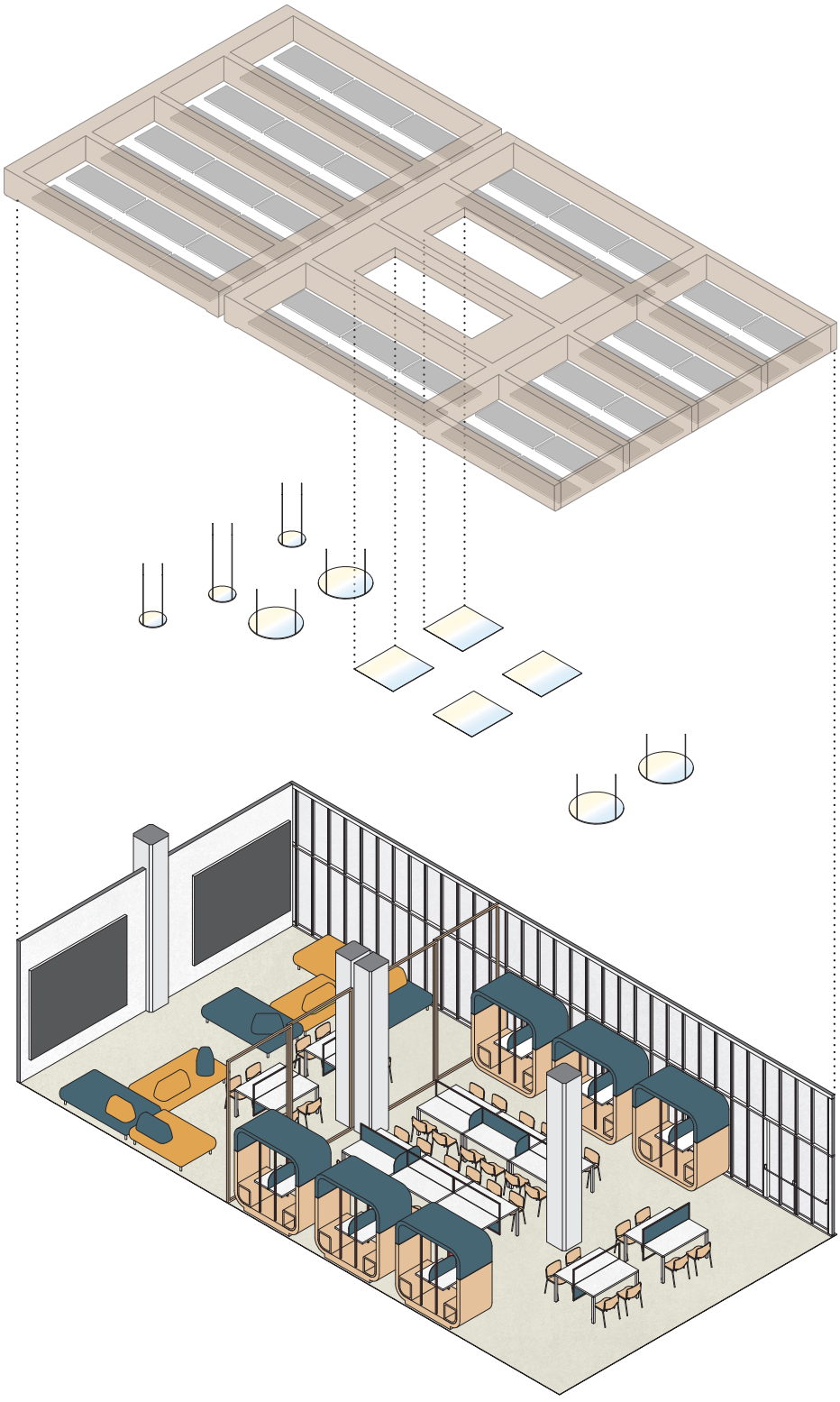


ESPLOSO ASSONOMETRICO

Rapporto planimetria, apparecchi di illuminazione e struttura del solaio



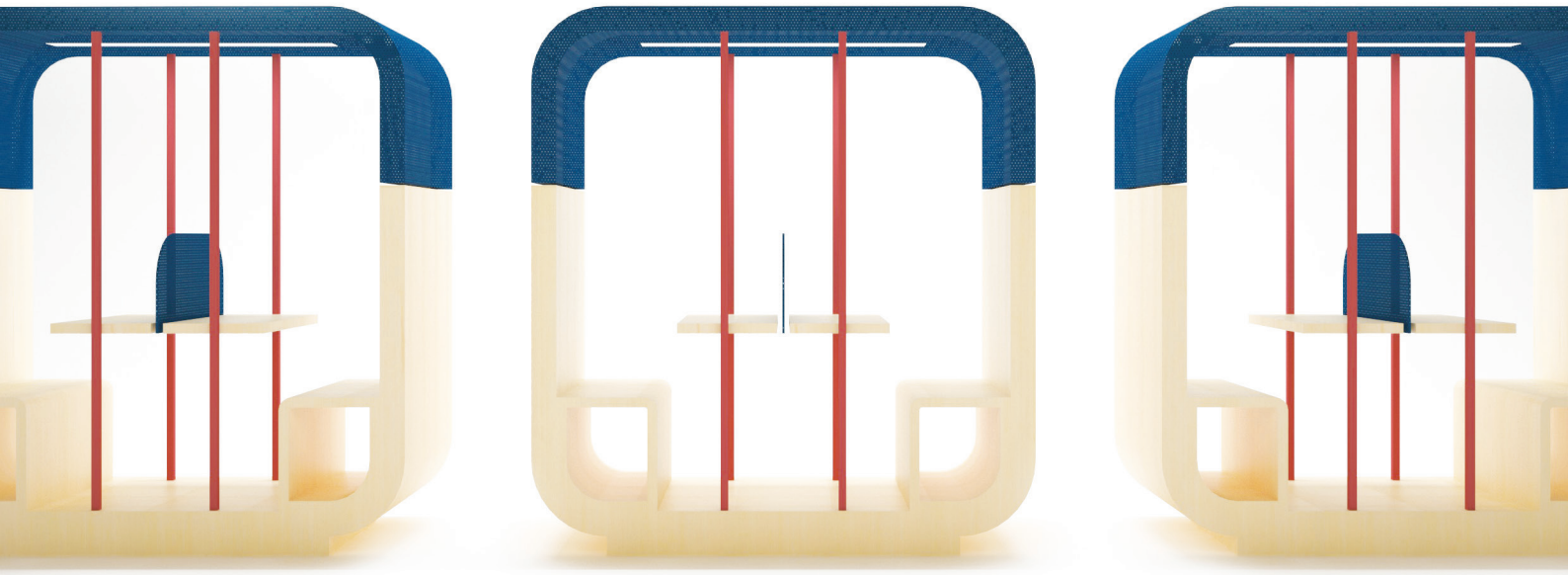
STATO DI FATTO



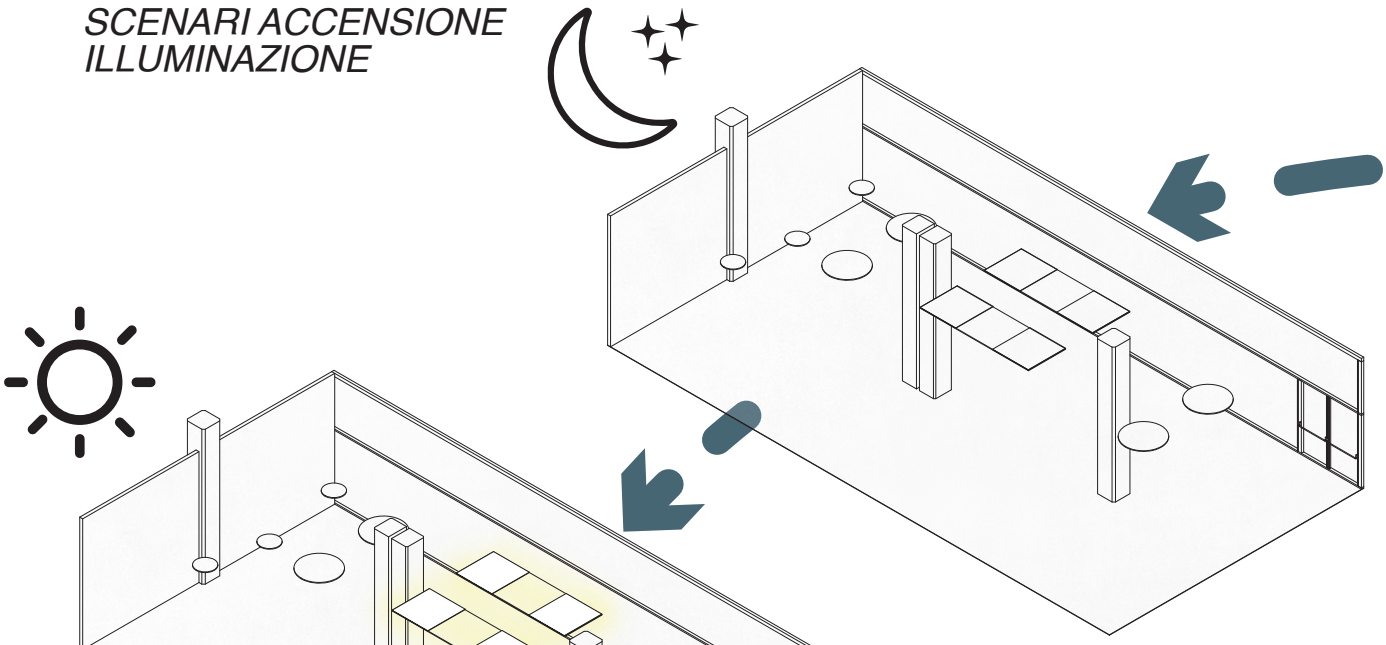
PROGETTO

BOX

Render

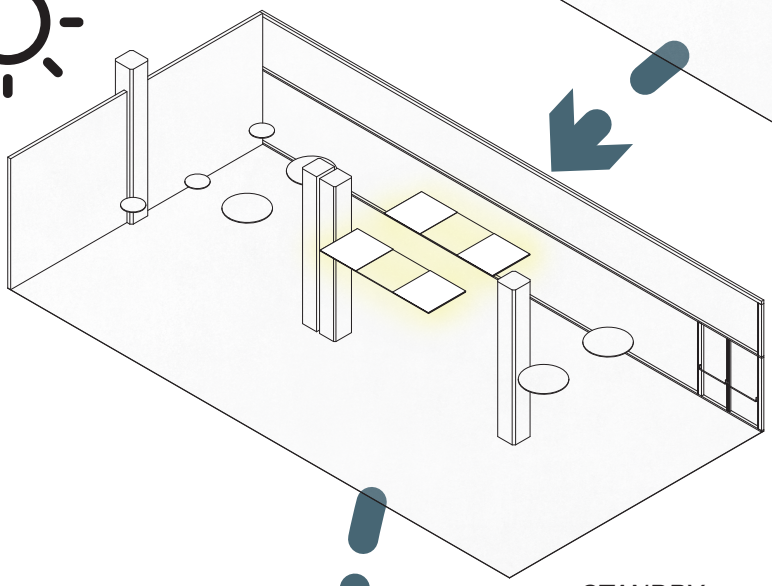


SCENARI ACCENSIONE ILLUMINAZIONE



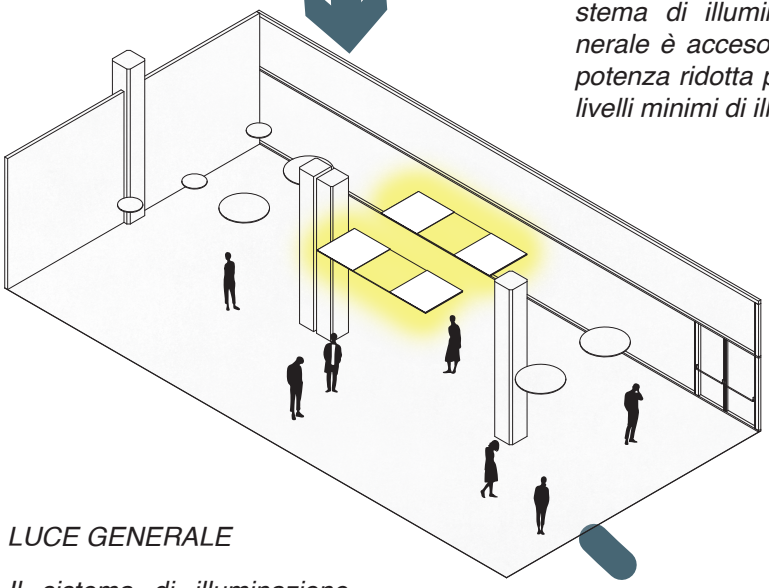
SPENTO

In assenza di occupanti e fuori orario di apertura del locale il sistema di controllo spegne tutti gli apparecchi di illuminazione



STANDBY

In orario di apertura ma in assenza di occupanti, il sistema di illuminazione generale è acceso ma ad una potenza ridotta per garantire livelli minimi di illuminazione

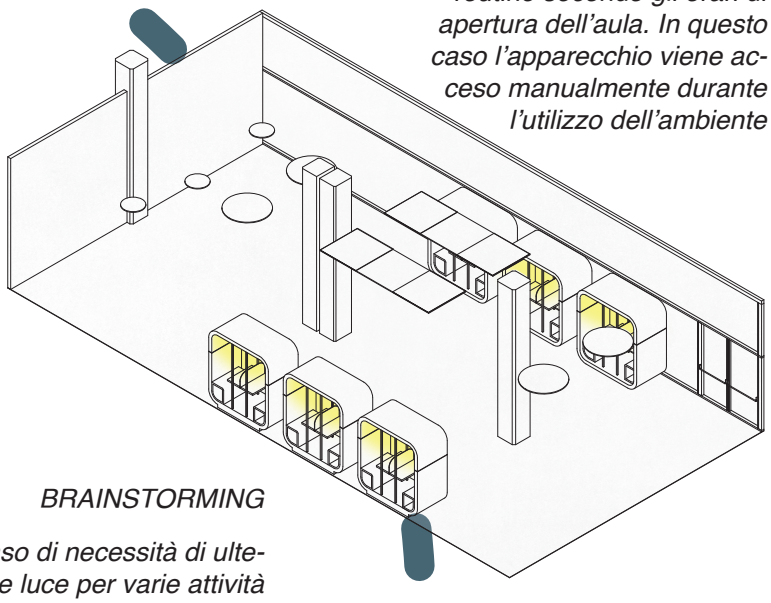


LUCE GENERALE

Il sistema di illuminazione generale è acceso alla massima potenza dell'apparecchio, in questa condizione è possibile agire manualmente sulle impostazioni per adattare l'intensita e lo spettro a seconda delle esigenze per lo svolgimento delle attività.

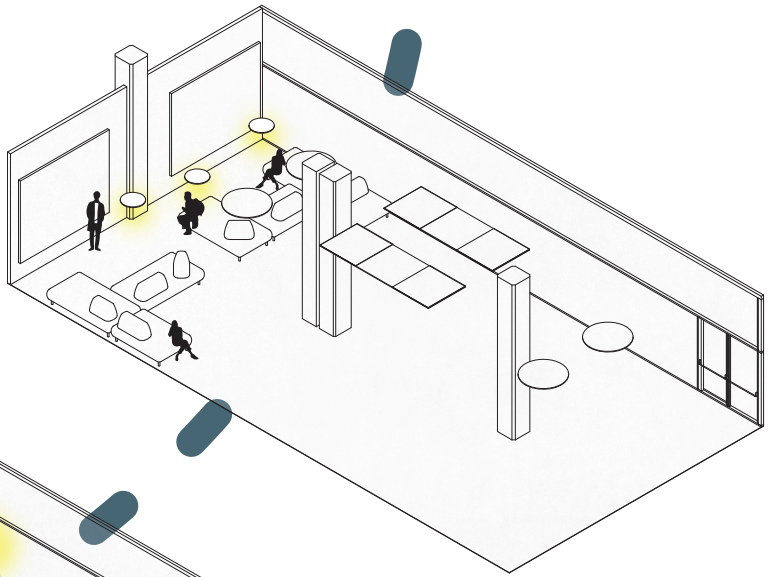
CABINE

L'illuminazione delle cabine è indipendente dai sistemi di controllo del locale eseguono ugualmente una routine secondo gli orari di apertura dell'aula. In questo caso l'apparecchio viene acceso manualmente durante l'utilizzo dell'ambiente



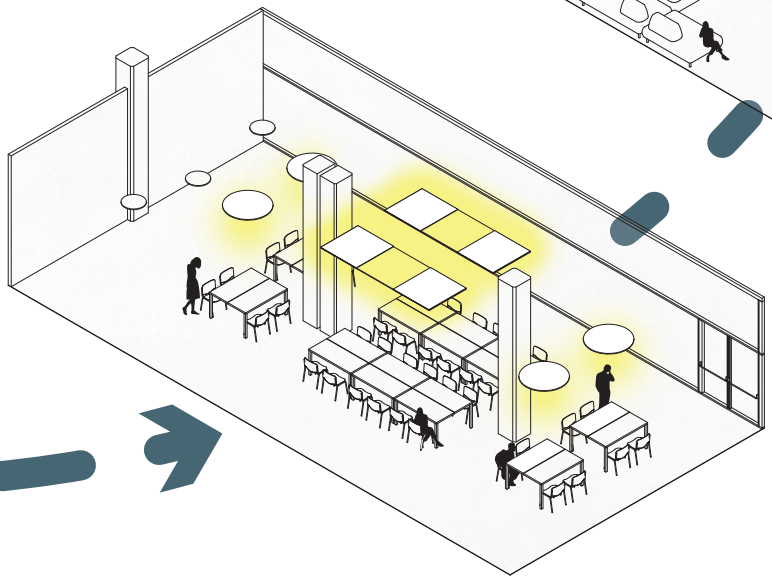
BRAINSTORMING

In caso di necessità di ulteriore luce per varie attività nell'area del divano è possibile accendere quest'ultima gerarchia di apparecchi

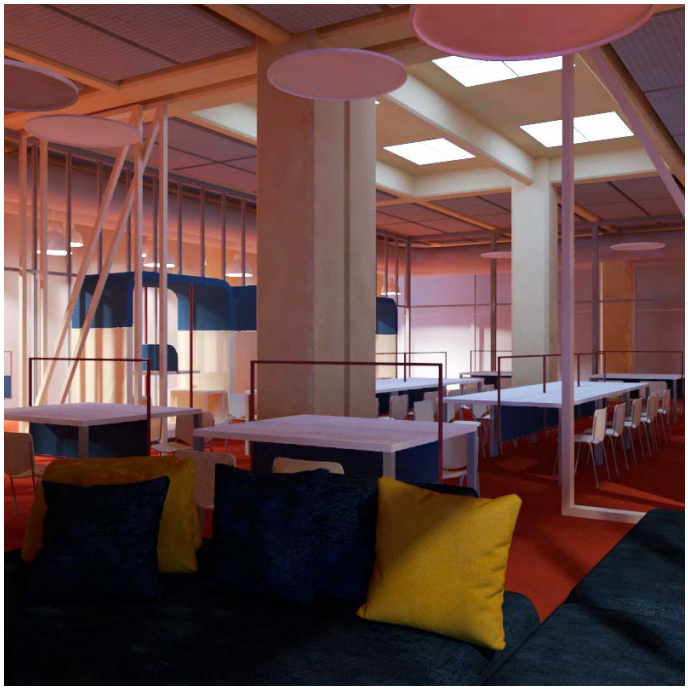


LUCE TAVOLI

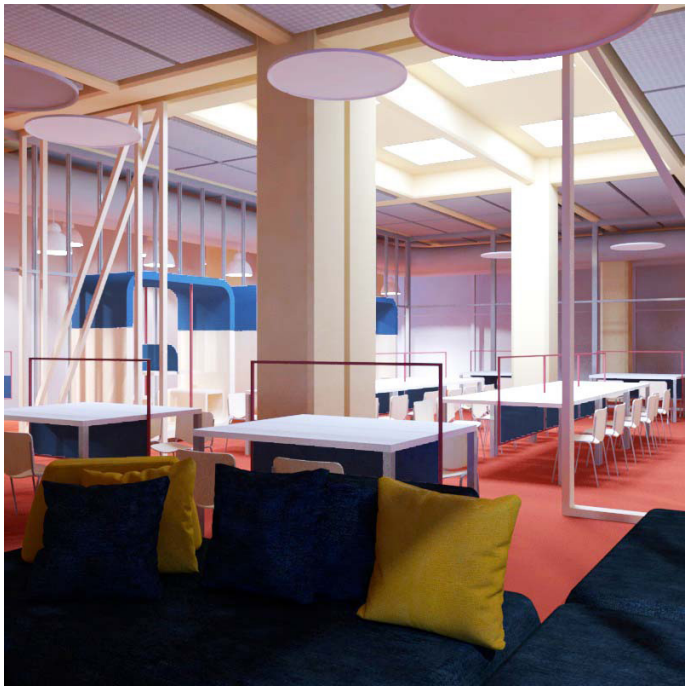
Il sistema secondario si avvia quando vengono occupate le postazioni ai tavoli e con un programma preimpostato simulano il daylight



01
Standby
(mattina)



02
Illuminazione
generale



03
Illuminazione
tavoli

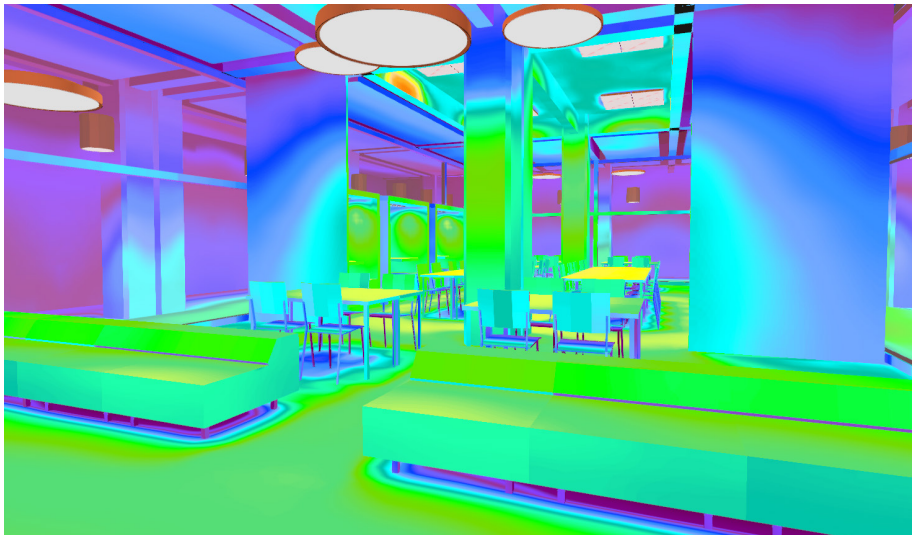
06
Standby
(sera)

05
Illuminazione
zona relax

04
Illuminazione
totale

Dialux Evo

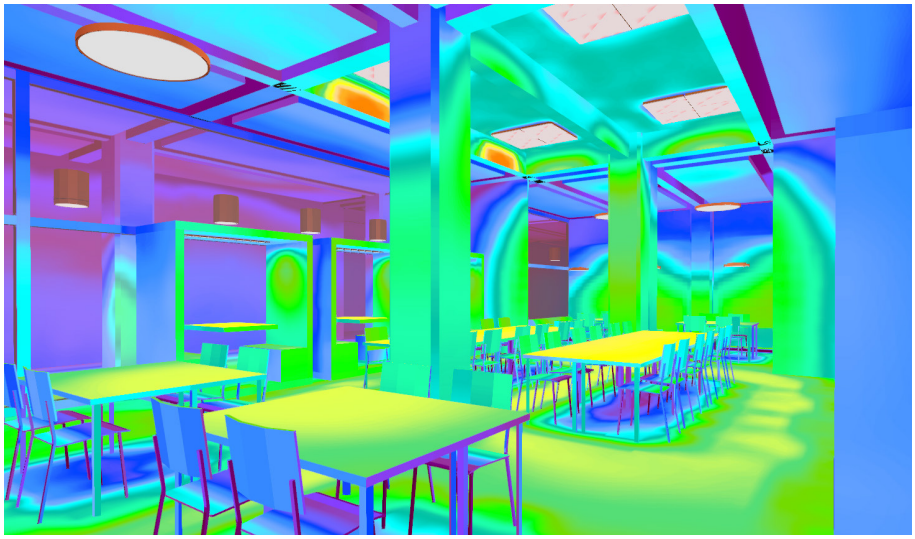
Post calcolo, distribuzione della luce nell'ambiente



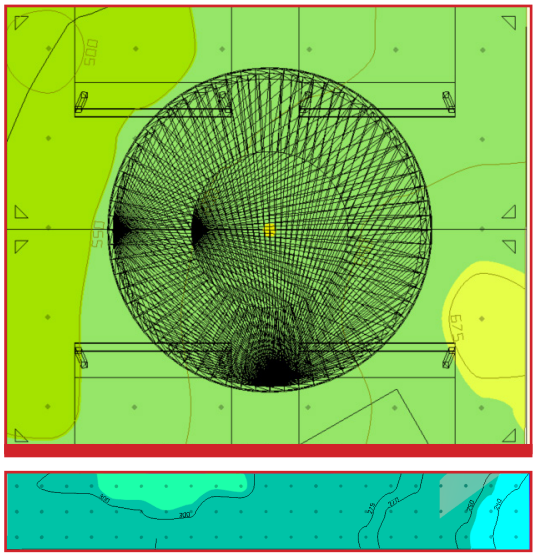
Dialux Evo

Post calcolo, distribuzione della luce nell'ambiente a colori sfalsati

Intervallo flusso luminoso:
50 - 1500 lux



TAVOLO ZONA INGRESSO



SUPERFICIE DI CALCOLO
TAVOLO INGRESSO
h 0,75 m
piano orizzontale

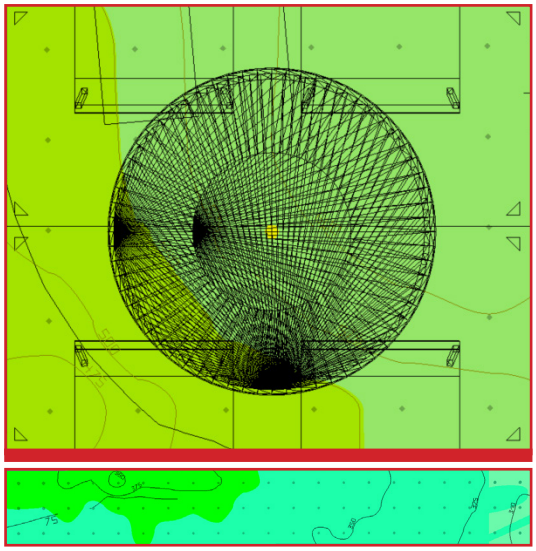
Em,min	488 lx
Em,max	680 lx
Em,medio	603 lx

h 1,2 m
piano verticale

Em,medio	282 lx
UGR	16,3

Con CCT=	6500 K
mel-EDI=	270,72 lx
Con CCT=	4000 K
mel-EDI=	203,0 lx

TAVOLO ZONA BRAINSTORMING



SUPERFICIE DI CALCOLO
TAVOLO BRAINSTORMING
h 0,75 m
piano orizzontale

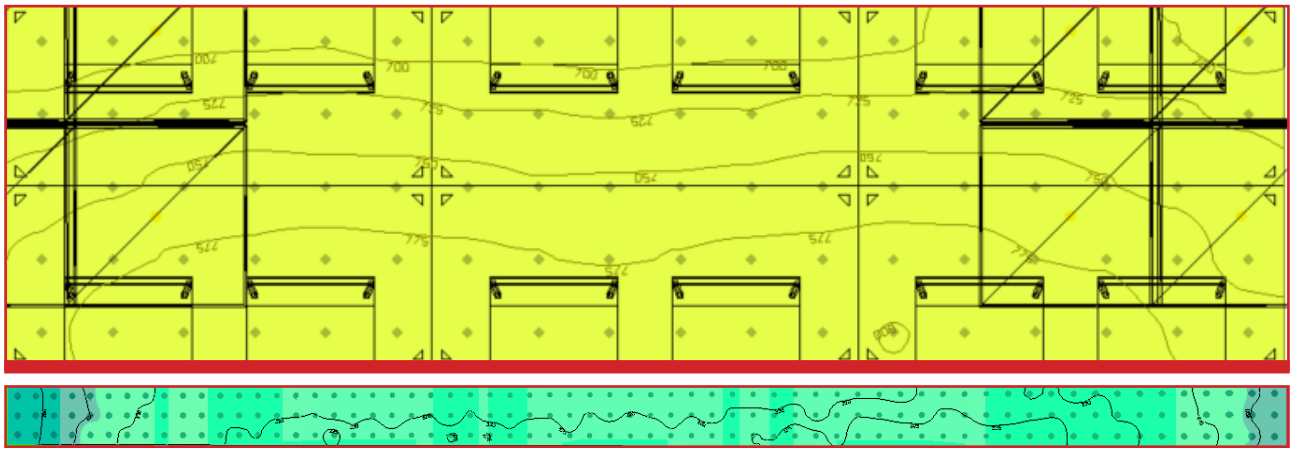
Em,min	454 lx
Em,max	623 lx
Em,medio	565 lx

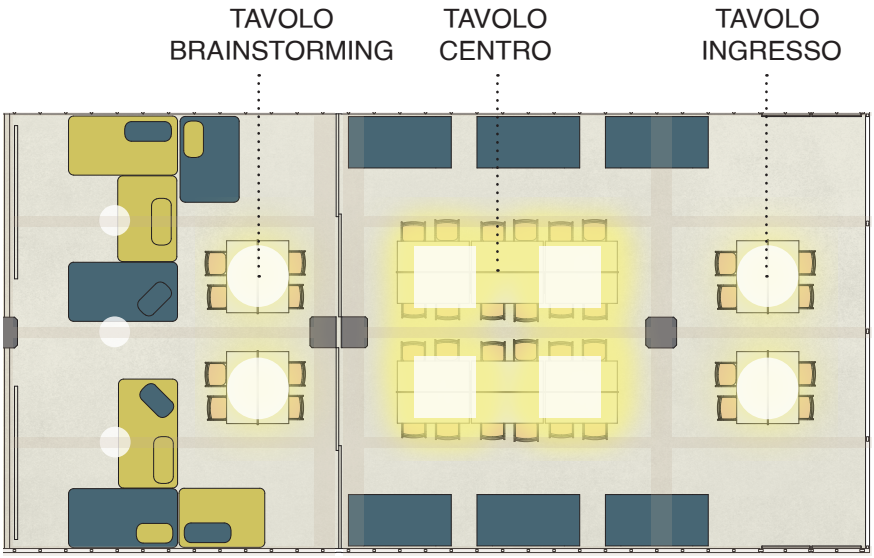
h 1,2 m
piano verticale

Em, medio	355 lx
UGR	17

Con CCT=	6500 K
mel-EDI=	340,8 lx
Con CCT=	4000 K
Mel-EDI=	255,6 lx

TAVOLO CENTRALE - Calcolo 1
Codizione di illuminamento
massimo (obiettivo Em=750 lx)





Intervallo flusso luminoso:
50 - 1500 lux

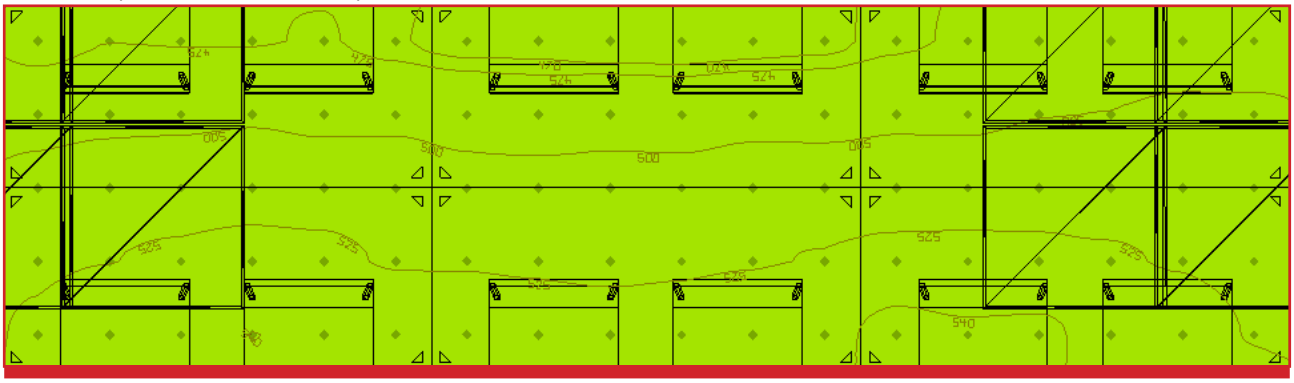
SUPERFICIE DI CALCOLO
TAVOLO CENTRALE - Calcolo 1

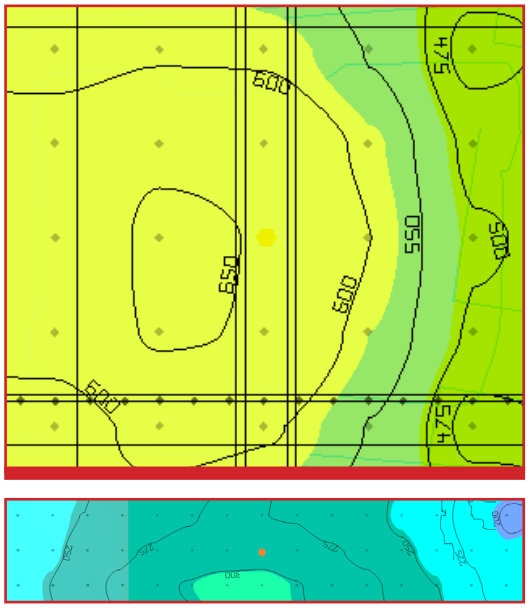
h 0,75 m	
piano orizzontale	
Em,min	700 lx
Em,max	800 lx
Em,medio	750 lx
h 1,2 m	
piano verticale	
Em, medio	316 lx
UGR	17
Con CCT=	6500 K
mel-EDI=	303,36 lx
Con CCT=	4000 K
mel-EDI=	227,5 lx

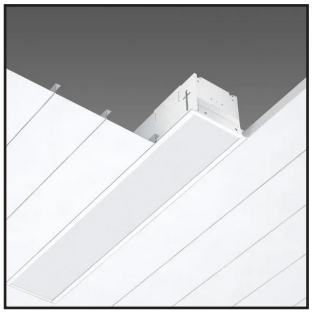
SUPERFICIE DI CALCOLO
TAVOLO CENTRALE - Calcolo 2

h 0,75 m	
piano orizzontale	
Em,min	465 lx
Em,max	543 lx
Em,medio	508 lx
h 1,2 m	
piano verticale	
Em, medio	204 lx
UGR	17
Con CCT=	6500 K
mel-EDI=	195,8 lx
Con CCT=	4000 K
mel-EDI=	146,9 lx

TAVOLO CENTRALE - Calcolo 2
Condizione di illuminamento
ordinario (obiettivo Em=500 lx)







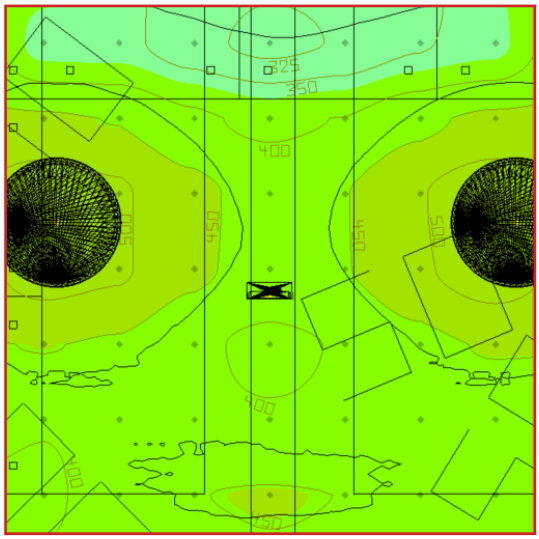
SUPERFICIE DI CALCOLO
CABINA
h 0,75 m
piano orizzontale

Em,min	425 lx
Em,max	603 lx
Em,medio	531 lx

h 1,2 m
piano verticale

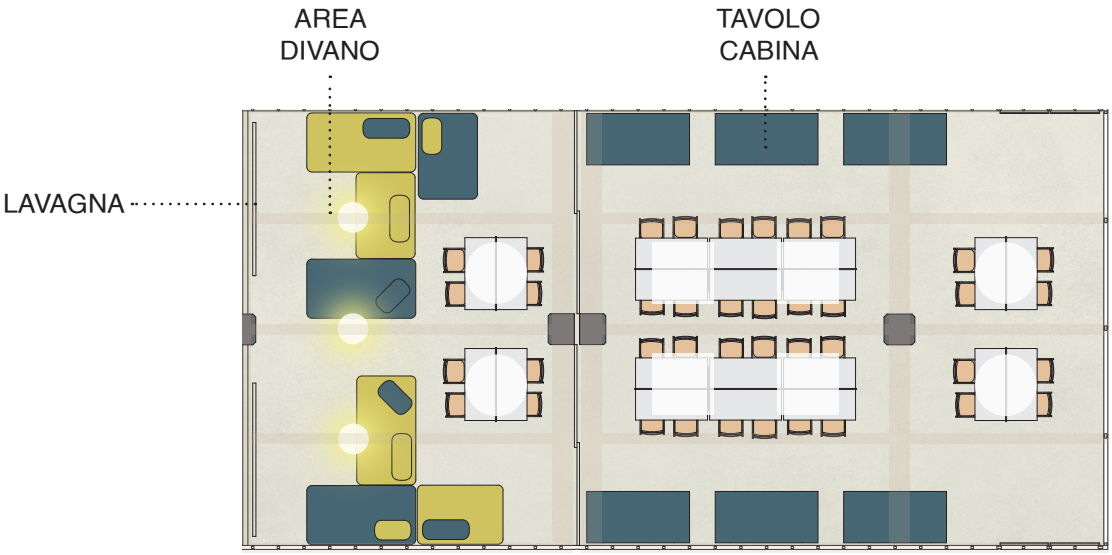
Em,medio	261 lx
UGR	18,5

Con CCT= 6500 K
mel-EDI= 250,6 lx
Con CCT= 4000 K
mel-EDI= 187,9 lx

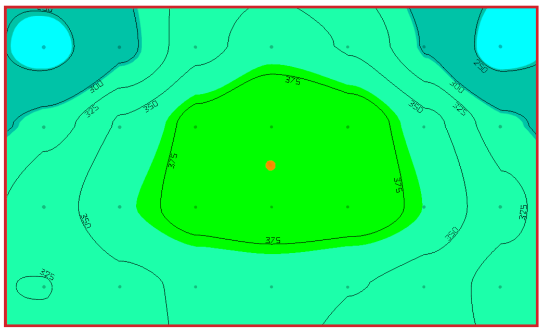


SUPERFICIE DI CALCOLO
AREA DIVANO
h 0,75 m
piano orizzontale

Em,min	331 lx
Em,max	545 lx
Em,medio	443 lx



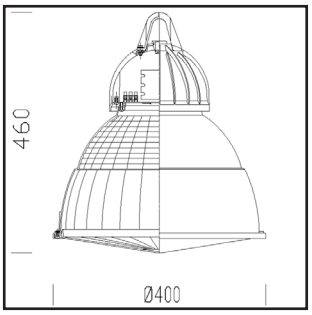
Intervallo flusso luminoso:
50 - 1500 lux

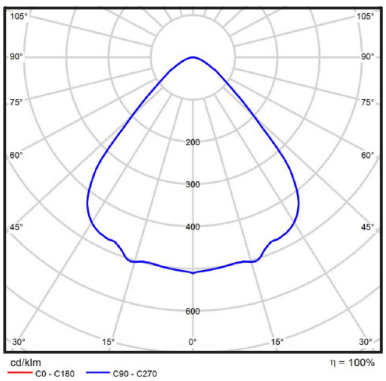


SUP. DI CALCOLO
LAVAGNA
piano verticale

Em,medio	341 lx
Em,z	212 lx

DISANO *
Ghost

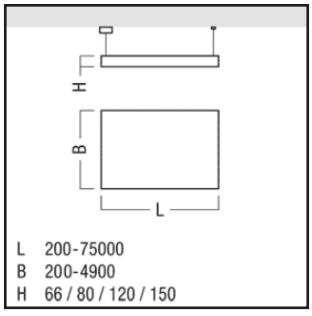


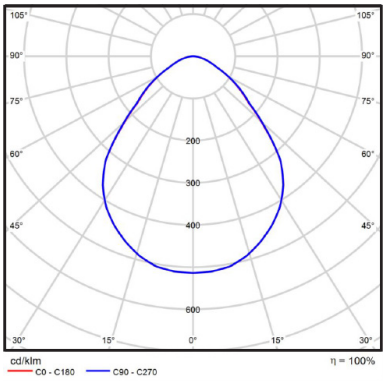


Sospensione
Tipologia Led

Potenza assorbita 28,0 W
Flusso 2040 lm
Efficienza 72,8 lm/W
CRI 90
CCT 4000 K
Rendimento 99,9 %

ZUMTOBEL **
Cieluma

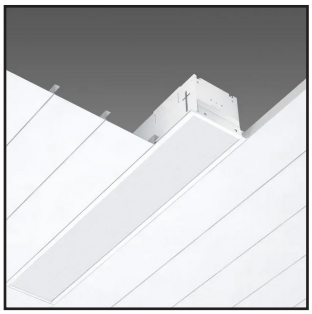


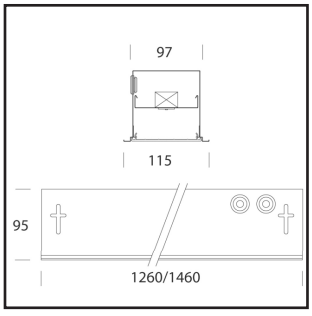


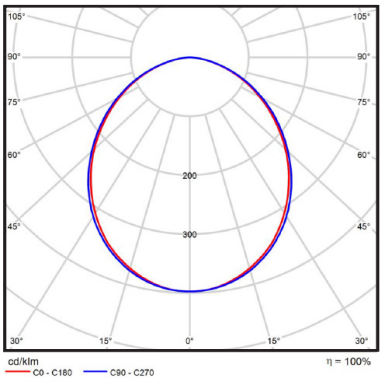
Incasso
Tipologia Led

Potenza assorbita 30,0 W
Flusso 3000 lm
Efficienza 100 lm/W
CRI 90
CCT 2700-6500 K
Rendimento 100%

DISANO
848 Superconfort





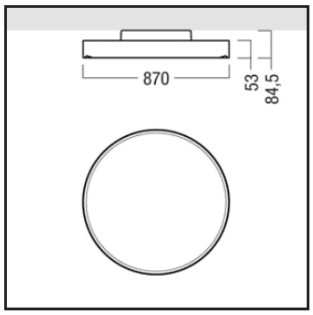


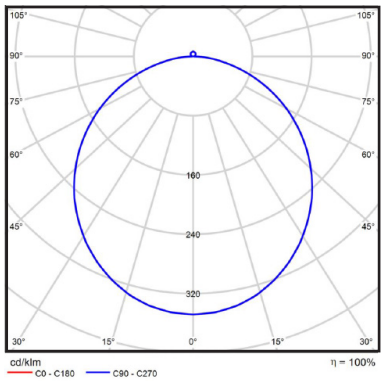
Incasso
Tipologia Led

Potenza assorbita 26,0 W
Flusso 2598 lm
Efficienza 99,9 lm/W
CRI 80
CCT 2700-6500 K
Rendimento 100%

* Indica l'utilizzo di una lampada sostitutiva a quella realmente esistente dovuto alla mancanza di dati illuminotecnici della stessa. L'apparecchio simula per potenza e diffusione della luce quello dello stato di fatto (iGuzzini Berlino)
** Indica i dati di input, output e la conformazione tecnologica dell'apparecchio necessari per assolvere ai requisiti illuminotecnico richiesti dal quadro esigenziale di 750 lx sul piano orizzontale

ZUMTOBEL
Onda

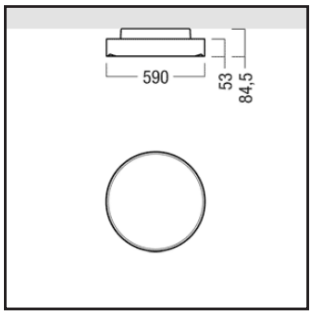


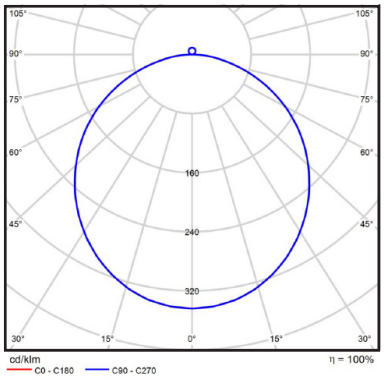


Sospensione
Tipologia Led

Potenza assorbita 66,3 W
Flusso 7690 lm
Efficienza 116,0 lm/W
CRI 90
CCT 2700-6500 K
Rendimento 99,99%

ZUMTOBEL
Onda

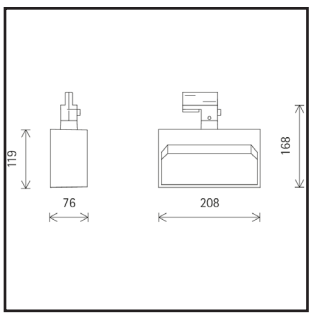


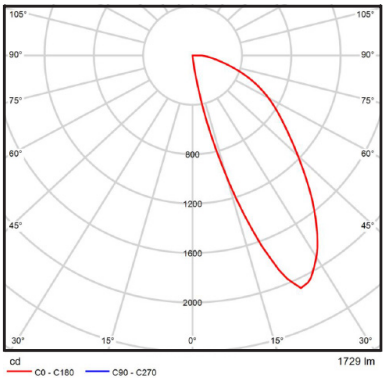


Sospensione
Tipologia Led

Potenza assorbita 32,5 W
Flusso 3694 lm
Efficienza 113,7 lm/W
CRI 90
CCT 2700-6500 K
Rendimento 99,97%

ERCO
Pantrac





Soffitto Wall Washer
Tipologia Led

Potenza assorbita 27,0 W
Flusso 1731 lm
Efficienza 64,1 lm/W
CRI 92
CCT 4000 K

Consumi energetici

Gli apparecchi di illuminazione attuali (tubi fluorescenti) hanno un consumo di 58W cadauno che moltiplicati al numero di lampadare generano un consumo totale di 1.856,0W. Nella nuova proposta, i 31 apparecchi utilizzati costituiti da:

- n.16 apparecchi Zumtobel Cieluma 60x60 cm
- n.04 apparecchi Zumtobel onda 120 cm
- n.03 apparecchi Zumtobel onda 60 cm
- n.06 apparecchi Disano 848 Superconfort 120 cm
- N.02 apparecchi Erco Pantrac

Generano un consumo complessivo di circa 890 W permettendo un risparmio superiore al 50% dello stato attuale.

Illuminazione stato di fatto	Illuminazione progetto
32 apparecchi (160 cm) 58 W/cad.	31 apparecchi
1.856,00 W	891,50 W

Considerazioni finali

Da questo nuovo studio dell'allestimento è possibile concludere che l'aula studio del Lingotto può ospitare attività che ad ora risulterebbero poco praticabili senza disturbare altri studenti. Questo è dovuto al fatto che attualmente, non essendoci partizioni fisiche dell'ambiente, nel rispetto della collettività l'aula studio è dedicata (non ufficialmente) a coloro che necessitano di un luogo silenzioso per studiare e lavorare al computer. Queste zone dell'ambiante hanno permesso non solo flessibilità di utilizzo ma anche una flessibilità nei sistemi di illuminazione favorendo il benessere degli occupanti e il risparmio energetico. Tutti gli apparecchi di illuminazione sono di tipo Led, dimmerabili e tunable white gestibili in modalità semi-automatica, questo permette di ridurre notevolmente i consumi energetici e grazie ai sistemi di gestione questo dato si abbassa ulteriormente. Inoltre, come confermato dai calcoli, il nuovo sistema di illuminazione permette di produrre un illuminamento artificiale in grado di soddisfare i requisiti della human-centric lighting sostenendo gli effetti visivi e quelli non visivi. Si può affermare quindi che un investimento di questo tipo sia un'ottima strategia per migliorare la vita delle persone in ambienti interni promuovendo il confort, il benessere, le prestazioni e la sostenibilità energetica.

Bibliografia / Sitografia

100. http://www.amstra.it/documenti/UNI%20EN%2012464-1.pdf
101. https://www.uni.com/
102. https://www.archilovers.com/projects/204094/lingotto-university.html
103. https://lingottoturingallery.com/edificio/
104. https://www.museotorino.it/view/s/2da9c2e6c07446ed89d7480f08820cae
105. https://www.ledpoint.it/it/profilo-in-alluminio-alto-8mm-con-diffusore-2-metri
106. https://www.zumtobel.com/it-it/products/lightfields.html?&GUID=8B3F-F6ED-320E-41C6-A1F6-B3301139ABD9#LIGHT%20FIELDS%20III%20incasso
107. https://www.zumtobel.com/it-it/products/product_popup.html?42932871
108. https://www.zumtobel.com/it-it/products/product_popup.html?42932870
109. https://www.zumtobel.com/it-it/products/product_popup.html?22171735
110. https://www.disano.it/it/cat/disano/10505-sospensioni-civili-e-industriali/26865-3117-Ghost-LED---Diffusore-verniciato/
111. https://www.disano.it/it/cat/disano/10502-apparecchi-da-incasso/23574-848-Supercomfort/
112. https://www.erco.com/it/?specsheet=20789.000