

Progettare la luce per la qualità della visione e la riduzione dei consumi energetici.

Caso di studio, la scuola di Sesto Fiorentino.

Carla BALOCCO*, Enrico MARMONTI*, Matteo SORGE

* Industrial Engineering Department, University of Florence.

RIASSUNTO

Negli edifici non residenziali l'energia elettrica costituisce uno dei maggiori consumi e, tra questi, le scuole rappresentano il settore edilizio più interessante per soluzioni di massimizzazione d'uso della luce naturale, nell'ottica del risparmio di energia e della garanzia di comfort visivo poiché la scuola è, a tutti gli effetti, un ambiente di lavoro molto complesso per la compresenza di differenti compiti visivi. Il presente lavoro propone un metodo utile per definire soluzioni illuminotecniche di integrazione di luce naturale ed artificiale, attraverso misure sperimentali e la simulazione dinamica della distribuzione della luce, l'impiego di sistemi di controllo e dimmeraggio è valutata l'integrazione e l'uso dinamico di luce naturale ed artificiale, garantendo uniformità dell'illuminamento ed equilibrio delle luminanze, qualità della visione, benessere per gli occupanti e quindi efficacia energetica ed economica.

ABSTRACT

The electricity in non-residential buildings, represents the main power consumption. Between non residential buildings, the schools are the most interesting research field to improve and propose lighting solution, in order to maximize the use of natural lighting. The energy efficiency and the visual comfort become fundamental in the working environments, that are complex building-plant systems, also connected to different visual tasks. The present study proposes a methodology to define lighting solution designs for the optimal mixing of artificial and natural light. The integration and mixing of artificial and natural light, using experimental measurements and dynamic simulations, using daylighting and control systems, was evaluated to guarantee indoor illuminance levels, luminance equilibrium, visual task quality, visual comfort and well-being of the occupants for the main aim of the economic and energy efficacy.

1. INTRODUZIONE

L'illuminazione artificiale negli edifici non residenziali costituisce uno dei maggiori consumi di energia elettrica, circa il 20-30% del carico totale di energia dell'edificio. A partire da ciò il grande interesse per soluzioni di massimizzazione d'uso della luce naturale e quindi la sua corretta combinazione con quella artificiale allo scopo di ridurre i consumi energetici [1,2]. È stato riportato che, nei corridoi illuminati naturalmente, un con-

trollo fotoelettrico dell'illuminazione può dare un risparmio energetico eccellente [3,4,5].

Tra gli edifici non residenziali, le scuole rappresentano il settore edilizio più interessante nell'ottica del risparmio di energia e del controllo dell'illuminazione finalizzata a garantire buone prestazioni visive, assenza di abbagliamento, uniformità dell'illuminamento, equilibrio delle luminanze. A tutti gli effetti la scuola è un ambiente di lavoro ma molto complesso per la compresenza di compiti visivi anche molto differenti tra

particolare, una luminanza di adattamento bilanciata, cioè che tiene conto delle varie aree di rilevazione, delle loro dimensioni e della posizione che queste assumono nel campo visivo, consente di migliorare visibilità di oggetti/immagini osservati; migliorare rapporti di luminanza (contrast); ridurre il sovraccarico pupillare e l'adattamento retinico. Nei luoghi di lavoro, un "ambiente luminoso" fortemente disomogeneo è spesso causa di disturbi visivi (astenopia occupazionale). In illuminotecnica tali disturbi vengono definiti "da abbagliamento". In Medicina del lavoro ed in Igiene occupazionale si preferisce il termine "disagio/disturbo da luce". La problematica è molto complessa la normativa vigente accanto ai parametri tradizionalmente considerati nella progettazione di un sistema di illuminazione, segnala anche altri parametri, in grado causare, nei soggetti esposti, un ruolo di cofattore favorente l'aumento dell'intensità e/o frequenza dei disturbi astenopici "da luce": la tipologia del compito visivo; le capacità/caratteristiche visive del soggetto; alcune proprietà (non illuminotecniche) dell'ambiente. Il tipo di illuminazione in classe, il colore della luce e delle superfici è molto importante per l'apprendimento degli alunni. Studi su piccola scala hanno evidenziato un collegamento tra illuminazione e l'applicazione dei soggetti e quindi il grado di concentrazione. Per esempio, Hathaway [7] ha trovato legami tra l'uso di lampade fluorescenti a spettro completo e il livello di concentrazione. Utilizzando un campione di grandi dimensioni, Hernandez [8] hanno trovato correlazioni significative sull'applicazione sia nei casi in cui la luce del giorno può essere controllata dal docente, sia nei casi in cui la luce risulti diffusa in tutta l'aula. Una serie di studi hanno anche osservato cambiamenti nel comportamento sotto regimi di illuminazione particolare sottolineando l'importanza di analizzare per questo tipo di ambienti l'ergonomia della visione connessa al colore della luce, allo spettro di emissione ed alla intensità del flusso luminoso. Lione ha suggerito che l'illuminazione a fluorescenza a spettro intero e basse temperature di colore, possa migliorare l'apprendimento. Renon e Robbin [9] hanno indicato che la luce diurna aiuta gli studenti a conservare e apprendere le informazioni, mentre Schulz [9] ha esaminato l'importanza di evitare un'illuminazione eccessiva. Alcuni autori hanno posto più l'accento sulla importanza della

luce naturale, ma la necessità di sistemi integrati di illuminazione diurna e artificiale è ampiamente accettata nell'ottica della riduzione dei consumi energetici. In termini generali la stima dei fabbisogni di energia elettrica di un impianto di illuminazione artificiale si basa sull'integrazione nel tempo della potenza elettrica assorbita dagli apparecchi di illuminazione funzionali, di emergenza e da tutti i dispositivi elettrici necessari per il funzionamento di questi impianti. La complessità nella stima di questo fabbisogno è insita nella difficoltà che si incontra nel definire sia l'effettivo periodo di accensione dell'impianto di illuminazione che la corrispondente potenza assorbita nel caso di regolazione dinamica del flusso luminoso. Tale complessità risulta ulteriormente accentuata nel caso dell'edilizia scolastica per la quale risulterebbe ottimale un sistema di controllo che gestisce l'illuminazione in funzione dell'occupazione, della presenza di luce naturale o di specifiche scenografie di luce richieste. Per quanto riguarda il rapporto costi/benefici risultante dall'applicazione dei sistemi di controllo, le informazioni generalmente a disposizione del progettista sono quelle, presenti in letteratura, (sovente riportate nei cataloghi dei produttori) e relative al potenziale risparmio dovuto all'utilizzo di un generico sistema di controllo in rapporto ad un sistema di illuminazione con controllo manuale. Questi dati possono fornire un'informazione di massima sulla potenzialità di risparmio energetico correlata all'uso di sistemi di controllo, ma è evidente che non consentono di stimare la prestazione effettiva risultante dall'applicazione di un sistema specifico ad un edificio specifico. Una stima accurata delle prestazioni energetiche e quindi dell'efficacia di un sistema di illuminazione dipende da diversi fattori, connessi sia alle caratteristiche dell'edificio per il quale viene progettato sia alle caratteristiche del sistema previsto (criteri di controllo adottati, componenti etc.). In particolare entrano in gioco: la disponibilità di luce naturale esterna all'ambiente, che dipende da latitudine e longitudine del luogo, giorno del mese e ora del giorno, condizioni di cielo (coperto, sereno, intermedio) disponibilità di luce naturale esterna, presenza di ostruzioni esterne, orientamento dell'ambiente-aula (nel caso si consideri la presenza di radiazione solare diretta), presenza di sistemi di schermature, conformazione dell'ambiente e disposizione delle

postazioni di lavoro, le caratteristiche dell'utenza, intese come età degli alunni e compiti visivi, profilo di occupazione, modalità di interazione tra l'utenza e i componenti schermanti, modalità di interazione tra l'utenza e i l'impianto di illuminazione, le caratteristiche e le prestazioni dell'impianto di illuminazione, la tipologia e l'architettura del sistema di controllo (controllo in base all'occupazione, alla presenza di luce naturale, alla volontà dell'utente, a scenografie predefinite, etc., tipologia di sensori adottati, raggruppamento dei terminali). Considerando il tipo di sistema di controllo della luce artificiale proponibile per un'aula in funzione delle ore di utilizzo e delle attività svolte, nonché della forma e orientamento dell'ambiente, delle caratteristiche ottiche, fotometriche e colorimetriche delle superfici e degli arredi, generalmente esso può prevedere comando esclusivamente manuale, oppure accensione e spegnimento manuali associate a regolazione automatica del flusso luminoso in base alla presenza di luce diurna. Il presente lavoro propone un metodo utile per definire soluzioni illuminotecniche di integrazione di luce naturale ed artificiale attraverso l'impiego di sistemi di controllo e dimmeraggio che garantiscono qualità della visione e percezione in un ambiente scolastico. Il lavoro, grazie alla collaborazione e disponibilità dei tecnici ed ingegneri della Provincia di Firenze, ha preso le mosse da una campagna di misure sperimentali condotte in una scuola superiore campione. Attraverso la simulazione dinamica della luce è stato possibile definire una soluzione progettuale energeticamente efficiente, economicamente sostenibile che insieme ad una importante riduzione dei consumi con introduzione di controlli automatici, di regolazione del flusso luminoso e della temperatura di colore delle sorgenti, ha garantito un clima luminoso confortevole con una corretta distribuzione ed equilibrio di illuminamento e luminanze, qualità della visione ed assenza di abbagliamento. La presenta dunque come un esempio utile ai progettisti illuminotecnici che operano proprio nell'ambito del recupero energetico del patrimonio edilizio destinato alle scuole.

2. QUADRO NORMATIVO

I documenti di riferimento nel campo della fotometria e dell'illuminotecnica sono opera di

tre organismi: la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a livello internazionale, il CEN in Europa e l'UNI [11-17]. Le normative tecniche di riferimento sono numerose, in funzione dei diversi ambiti considerati, e a seguito forniamo una sintesi sui requisiti fondamentali richiesti:

UNI EN 12464-1:2011: "Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni" specifica i requisiti illuminotecnici per garantire comfort visivo e prestazione visiva. I principali parametri che caratterizzano l'ambiente luminoso sono:

- **Livelli di illuminamento:** influenza la percezione del compito visivo e la sua esecuzione. Oltre al rispetto del valore di illuminamento medio (E_m) è importante una uniformità dei singoli valori sulla superficie in esame, con rapporti tra l'illuminamento minimo (E_{min}) e medio (E_m) E_{min}/E_m , pari a 0.7 nella zona del compito e almeno 0.5 nella zona circostante.
- **Abbagliamento e distribuzione delle luminanze:** un corretto bilanciamento, evitando luminanze eccessive, contrasti di luminanza troppo elevati, sia per la componente diretta sia per quella indiretta dovuta alla luce riflessa dalle superfici del locale, evita fenomeni di abbagliamento, che può essere molesto, se causa affaticamento, o debilitante se impedisce il corretto svolgimento del compito. L'abbagliamento molesto prodotto dai corpi illuminanti è identificato dall'UGR (Unified Glare Rating), calcolato secondo [3], con valori inferiori ai limiti di normativa (Tab.1).

Tabella 1: Prescrizioni della normativa UNI EN 12464 per i locali analizzati

	UNI EN 12464-1			UNI EN 10840	
	E_m [lx]	URGL	R_a	D_m	DGI
Aule scolastiche	300	19	80	≥ 3	21
Uffici presidenza	300	19	80	≥ 3	-
Corridoi	100	25	80	≥ 3	-

- **Resa dei colori:** La resa del colore è un indicatore della qualità visiva di una sorgente luminosa, legata alla sua capacità di far apparire persone e oggetti con colori il più possibile naturali, ed espresso dall'indice generale di resa del colore (R_a).

UNI EN 10840:2007 "Luce e illuminazione. Locali scolastici - Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale" Fornisce un maggiore inquadramento delle prestazioni nell'edilizia speciale scolastica. È qui definito un limite al fattore medio di luce diurna (η_m) ed è richiesto per il valore

minimo in ambiente (η_{\min}) un rapporto $\eta_{\min}/\eta_m \geq 0.16$. Oltre all'abbagliamento dovuto agli apparecchi di illuminazione, bisogna considerare quello causato dalla luce naturale che filtra attraverso le superfici vetrate, particolarmente quando sono molto grandi rispetto al pavimento. Il corrispettivo dell'UGR è l'abbagliamento per la luce naturale (DGI), definito $DGI = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i$ dove con G_i si identifica la costante di abbagliamento calcolata per ciascuna porzione di sorgente vista attraverso la finestra (cielo, ostruzioni, terreno). Il controllo dell'abbagliamento naturale dipende dalle condizioni di luminanza della porzione di cielo inquadrata dalla superficie vetrata, dalla dimensione e posizione della superficie vetrata, dal contrasto di luminanza tra le superfici interne dell'ambiente.

UNI EN 15193:2005: "Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione" fornisce la metodologia di calcolo del consumo energetico degli impianti di illuminazione e definisce un indicatore numerico, il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) utile per confrontare direttamente i consumi energetici per l'illuminazione di edifici con funzioni simili ma diverse dimensioni.

UNI EN 15232:2007: "Prestazione energetica degli edifici. Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici" specifica una lista strutturata delle funzioni di regolazione, automazione e gestione tecnica degli edifici che hanno un'incidenza sulla prestazione energetica degli stessi, un metodo per definire i requisiti minimi da applicare per la regolazione, l'automazione e la gestione tecnica degli edifici di diversa complessità, i metodi dettagliati per valutare l'incidenza di queste funzioni su un determinato edificio, un metodo semplificato per arrivare ad una prima stima dell'impatto di queste funzioni su edifici rappresentativi.

I sistemi di automazione e di controllo presenti nell'edificio (BACS, Building Automation and Control System) e l'eventuale implementazione di un sistema di monitoraggio e di analisi dell'impianto (TBM, Technical Building Management), hanno un grosso impatto sulle prestazioni energetiche dell'edificio stesso. A seconda del livello tecnologico dei componenti, i sistemi sono riconducibili a quattro classi, dalla decrescenti D

- Classe D: BACS non efficiente dal punto di vista energetico;

- Classe C: situazione standard di riferimento;
- Classe B: BACS avanzato e alcune funzioni TBM;
- Classe A: BACS e TBM ad elevate prestazioni.

6. UNI EN 1838:2000: "Illuminazione di emergenza" definisce i requisiti illuminotecnici dei sistemi di illuminazione di emergenza installati in luoghi destinati al pubblico o ai lavoratori per consentire l'esodo sicuro da un luogo in caso di mancanza della normale alimentazione. L'illuminazione antipanico serve ad evitare attacchi di panico tra gli occupanti e a rendere agevole l'individuazione delle vie di esodo. Discorso a parte per le aree ad alto rischio per le quali si deve garantire il tempo per la messa in sicurezza l'impianto. L'illuminazione di riserva consente invece, a fronte di un maggior dispendio energetico, la prosecuzione sicura dell'attività in corso in quanto i valori di illuminamento vengono mantenuti ad un livello sufficiente in accordo con la normativa [2].

3. LA SCUOLA STUDIATA

Il caso studio su cui si è concentrata l'analisi riguarda il liceo "E. Agnoletti" situata nel Comune di Sesto Fiorentino. Questa scuola, grazie alla distribuzione planimetrica dei locali, alla regolarità e ripetibilità dei differenti ambienti che la compongono, all'assenza di ostruzioni esterne, è stata adottata come tipologia rappresentativa delle differenti casistiche di scuole che compongono i plessi della provincia di Firenze. Sono stati analizzati quattro differenti locali: due aule campione poste al secondo piano, un corridoio parallelo agli uffici e l'ufficio di segreteria, entrambi posti al primo piano. La forte simmetria delle piante ha permesso, analizzando questi quattro locali, di coprire più del 70% dell'intero fabbricato. Al secondo piano infatti, escludendo gli atri, le aule hanno tutte la stesse caratteristiche, eccezion fatta per l'esposizione fattore preso in considerazione studiando sia l'aula esposta a Nord che quella esposta a Sud. Le analisi e le soluzioni progettuali adottate per i differenti ambienti analizzati, possono così essere estesi non solo ai rimanenti ambienti del plesso senza ulteriori analisi, ma possono fornire indicazioni per ogni altro ambiente che si presenta in simili condizioni, anche se in un altro edificio scolastico. Gli ambienti sono attualmente dotati di un sistema di control-

lo della luce naturale dall'esterno grazie a tende alla veneziana con lamelle inclinabili. Oltre alla regolazione dell'angolo di incidenza è possibile escludere completamente le veneziane impacchettandole verso l'alto. Questo sistema si rivela problematico nella stagione estiva a causa della sua collocazione interna al locale. La radiazione solare è infatti schermata ma il conseguente calore è riflesso dai vetri, opachi alla radiazione infrarossa, con il surriscaldamento dell'ambiente. Infine le aule di un sistema di illuminazione artificiale composto da due gruppi di lampade in file parallele alle finestre, sono comandate separatamente da un doppio interruttore manuale.

3.1 Misure sperimentali

Il rilievo sperimentale dei valori di illuminamento [18] è stato effettuato in data 21/03/2013 alle ore 16 circa ed è terminato alle 17:30 circa, con condizioni di cielo parzialmente coperto o variabile. Poiché non esistono modelli di cielo definiti da CIE che possano descrivere in modo esaustivo le condizioni di misura, è stato associato una condizione estremamente cautelativa considerando un cielo coperto uniforme (overcast sky). Le misure di illuminamento sono state effettuate nei diversi ambienti su piani di lavoro specifici al

compito visivo previsto per le diverse destinazioni d'uso (Tabella 4), utilizzando una griglia di dimensione 1 m. I rilievi sono stati condotti utilizzando un luxmetro Minolta T-10 (accuratezza strumento $\pm 2\%$, range di misura 0.01÷300 lux), non effettuando misure altimetriche, non previste da normativa, a causa dell'incertezza nel caratterizzare le pareti presenti in ambiente e spesso dotate di cartelloni, arredi, vestiari, che rendono variabile nel tempo e nelle stagioni la risposta dell'ambiente. Peraltro trattandosi di un posto di lavoro risulta significativa sulla postazione di lavoro.

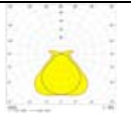


3.2 Simulazione della distribuzione della luce in ambiente.

A partire dalle caratteristiche geometriche è stato realizzato successivamente un modello solido dei differenti ambienti allo stato di fatto. Ad esso sono state associate le caratteristiche ottiche e fotometriche dei differenti materiali che li compongono, dedotti da valori di letteratura, oppure, nel caso delle finestre presenti, dalle misure sperimentali ricavando il coefficiente di trasmissione effettivo del vetro (τ) (Tabella 2). Inoltre il rilievo dei corpi illuminanti ha permesso di ricavarne le caratteristiche ottiche (Tabella 3).

Tabella 2: Caratteristiche ottiche e fotometriche superfici locali.

locale	Coefficienti di riflessione [%]				Coefficiente di trasmissione effettivo vetro (τ)
	soffitto	pareti	pavimento	Piano lavoro	
Aula	70	65	22	70	57
Corridoio	70	65	22	-	58
Segreteria	70	65	22	70	57

Tabella 3: Caratteristiche corpi illuminanti.

	Numero apparecchi	Lampade per apparecchio	Potenza lampada [W]	Flusso luminoso lampada [lm]	Temperatura di colore [K]	Indice di Resa cromatica (Ra)	Curva fotometrica
aula	4	2	36	6700	4000	80	
Corridoio	6	2	36	6700	4000	80	
segreteria	2	2	36	3350	4000	80	

La distribuzione della luce in ambiente è stata successivamente valutata con un software dedicato [19].

Il contributo di luce naturale, funzione dell'esposizione dei differenti ambienti e del modello di cielo CIE associato, ha rappresentato una fonte d'incertezza: la scelta cautelativa di cielo coperto uniforme (overcast sky) non permette un'aderenza alle mutevoli condizioni meteorologiche riscontrate nel corso della rilevazione. I modelli illuminotecnici sono stati calibrati in funzione delle misure sperimentali precedentemente descritte. Il confronto tra i valori di illuminamento medio puntuali all'interno dei differenti ambienti, mostra un errore medio, tra il dato misurato e

quello simulato, di 30 lx (pari a circa il 25%) ma con una deviazione standard contenuta di circa 16 lx. Questo valore è riconducibile a differenti fattori: ad errori strumentali (per lo strumento utilizzato pari al 2-3%), alle mutate condizioni di luce a causa dei necessari tempi di misura, al modello di cielo, estremamente cautelativo, utilizzato. Ciò ha permesso però non solo una completa valutazione del clima luminoso all'interno e la verifica dei requisiti richiesti da normativa (i cui valori sono visibili in Tabella 4), ma anche la valutazione di possibili interventi di miglioramento nelle aule. A titolo di esempio sono riportati in Figura 1 i risultati relativi al clima luminoso dell'aula.

Tabella 4: Risultati simulazione illuminotecnica per i differenti locali

Locale	Piano di lavoro	quota [m]	E_m [lux]	E_{min}/E_m	η_{medio} [%]	η_{min}/η_{max}
Aule	Zona circolaz.	0.2	295 (>300)	0.6 (>0.7)	2.8	3.00
	Banco	0.8	228 (>300)	0.6 (>0.7)	0.15	0.16
	Cattedra	0.8	245 (>300)	0.8 (>0.7)	0.27	0.16
Corridoio	Zona circolaz.	0.2	130 (>100)	0.78 (>0.7)	2.11	1.
Segreteria	Scrivania	0.8	323 (>300)	0.8 (>0.7)	0.17	0.16

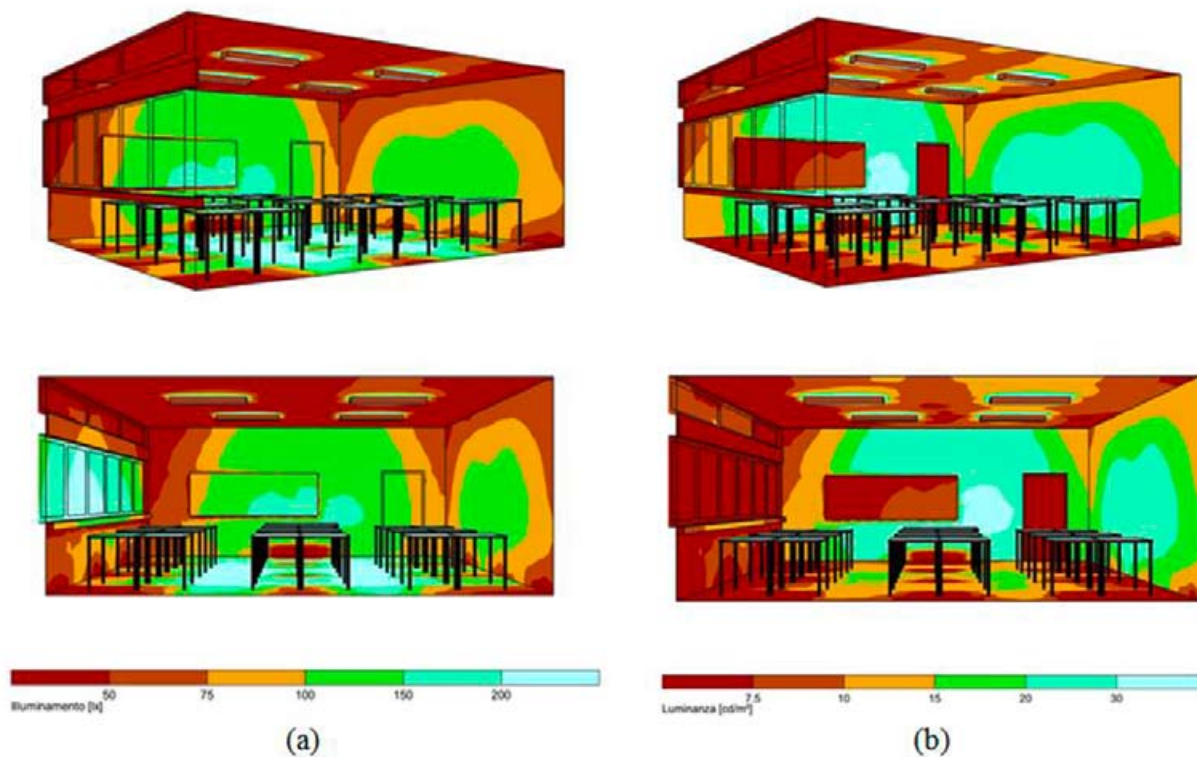


Figura 1: Aula, stato attuale: Valori di illuminamento (a) e di luminanza (b)

4. SOLUZIONE PROGETTUALE.

Allo stato attuale l'aula non è dotata di un sistema di illuminazione artificiale adeguato. Si pone l'obiettivo di ridurre i consumi per l'illuminazione artificiale attraverso la sostituzione degli apparecchi attualmente presenti con elementi più efficienti, garantendo nel contempo il rispetto delle normative, con un miglioramento della commistione tra la luce naturale ed artificiale. I risultati sperimentali e le simulazioni illuminotecniche mostrano infatti come le aule siano caratterizzate da insufficiente illuminazione e non uniforme distribuzione della luce. Una soluzione per l'incremento della commistione tra luce naturale ed artificiale può essere rappresentato dall'inserimento di sistemi di Daylighting, opportunamen-

te schermati, che incrementino il flusso di luce naturale interno, unito ad un sistema di controllo automatico dei livelli di illuminamento con sensori di presenza. Attraverso questo sistema è possibile ottenere un miglioramento delle prestazioni visive nel locale, con un risparmio energetico.

Si procede con il calcolo dell'indice LENI nella forma semplificata secondo la relazione $LENI = (F_K \times P_N \times t_o) / (1000 \times A)$ [kWh/m²anno] fornita dalla norma [13] (utilizzando i seguenti parametri: $t_D = 1800$ [h], $t_N = 200$ [h], $t_o = 2000$ [h], $\tau = 0.9$, fattore di occupazione $F_o = 0.9$). I valori di F_D , funzione dell'illuminamento medio del locale E ($E = 300$ lux), della disponibilità di luce diurna (media), della latitudine (centro) e del tipo di controllo, è assunto per la tipologia di controllo $F_D = 0.74$ (Manuale) e $F_D = 0.34$ (Automatico). I risultati sono visibili in Tab.5.

Tabella 5: Valutazione delle differenti proposte progettuali

	Tipologia apparecchio	Numero apparecchi	Flusso luminoso	E_m	E_{min}/E_m	UGR	Ra	LENI [kWh/anno]
Proposta 1	TBS160 4xTL-D18W HFP C6-1000	5	1350	335	0.7	13.8	80	653
Proposta 2	TCS198 2xTL-D36W HFP M6	5	3350	359	0.7	16.8	80	660
Proposta 3	TCS198 2xTL-D36W HFP M6	5	3350	368	0.7	16.6	80	678
Proposta 4	Atatro dud 239/D	6	3100	333	0.7	15.6	80	707
Proposta 5	Geo (91W04.154.7)	5	4450	333	0.7	15.6	80	587
Proposta 6	Efix TCS260 2xTL5-28W HFP C6	5	2625	346	0.7	18	80	414
Proposta 7	SM120v LED34S/840 PSD W20L120	5	3700	311	0.7	18.9	>80	487

Da una prima analisi comparativa sull'indice LENI e sul consumo annuo si evince che, tra le proposte per il sistema di illuminazione artificiale che rispettando i requisiti di normativa [11,12,17], quello che permette una riduzione dei consumi elettrici è la numero 6, la quale prevede l'installazione di 5 corpi illuminanti a incasso Efix TCS260 2xTL5-28W HFP C6.

4.1 Proposta luce naturale nelle aule: I sistemi di Daylighting

Attualmente sul mercato sono presenti numerosi componenti strutturali capaci di portare e regola-

re la luce naturale all'interno dei locali [20], classificati in sistemi di daylighting, basati sulla luce diffusa prodotta dalla volta celeste, e di sunlighting, che sfruttano direttamente i raggi solari. Con il termine daylighting si indicheranno, per praticità, entrambe le tipologie di prodotti. Le finestre rappresentate il più comune esempio, sistemi molto semplici ma non efficaci: grandi superfici consentono una maggiore illuminazione, ma non essendo dotate di sistemi di regolazione comportano problemi di abbagliamento o di apporti termici. Per scegliere la soluzione più opportuna occorre valutare fattori come la dimensione dell'edificio, il suo orientamento, il rapporto tra superficie e perimetro della pavimentazione, le

condizioni del cielo predominanti, la presenza di eventuali ostruzioni all'esterno. Generalmente le scuole sono caratterizzate da una limitata compattezza, che comporta una maggiore facilità a far pervenire la luce naturale in tutte le zone interne al fabbricato, anche se i locali più problematici da questo punto di vista sono le classi, generalmente con maggior sviluppo in profondità, che causa una non uniformità nella distribuzione della luce naturale. Una ulteriore distinzione tra i sistemi di daylighting riguarda i pass-through components e i conduction components: i primi, dei quali fanno parte le finestre, sono dispositivi progettati per consentire alla luce di passare da un ambiente all'altro. I conduction components, invece, guidano e distribuiscono la luce all'interno dei locali connettendo i pass-through components tra loro. La regolazione dell'apporto di luce dall'esterno in questo tipo di fabbricati i sistemi più adatti, divisi per categorie, sono:

- *conduction components* : sistemi maggiormente diffusi sono corridoi, atri o cortili. Di recente applicazione sono i light-duct e i sun-duc, condotti che per riflessione interna convogliano la luce del sole all'interno dei locali sia per l'integrazione che per la sostituzione della luce proveniente dalle finestre quando non sufficienti, o completamente (es. bagni) nel caso in cui non ci siano aperture verso l'esterno.

- *pass-through components* : in alternativa alle finestre frequentemente si possono trovare le aperture come lucernari che, rispetto alle finestre, garantiscono una migliore distribuzione della luce oppure più raramente pareti traslucide che diffondono all'interno, risolvendo il problema dell'abbagliamento, la luce naturale esterna.

In abbinamento ai pass-through components vengono spesso impiegati i control elements, per la regolazione della quantità di luce entrante. Questi sistemi nelle scuole devono essere, per motivi di sicurezza, resistenti, non pericolosi e possibilmente fissi. Si parla di "filtri solari" quando la funzione del sistema di controllo è soltanto quella di schermare dalla luce diretta e di evitare l'abbagliamento (persiane, brise-soleil, strutture fisse esterne di schermatura).

Se invece, oltre alla schermatura, si è interessati ad un miglioramento della distribuzione della luce all'interno delle classi sono particolarmente indi-

cati, per gli edifici scolastici, schermi rigidi che si distinguono a seconda della disposizione in:

- *Overhang*: parte integrante dell'edificio, costituiscono in una protrusione orizzontale al di sopra delle finestre;

- *Baffle*: a differenza dell'overhang, sono separati dall'edificio e disposti in posizione verticale;

- *Lightshelf*: elementi piani o curvi, in genere collocati orizzontalmente al di sopra del livello degli occhi, dividono la finestra in due parti con diverse funzioni: la parte inferiore (detta view window) permette di mantenere un contatto visivo con il mondo esterno, molto importante per la psicologica degli occupanti, mentre la parte superiore (clarestory window o light window), è fonte primaria di luce.

L'effetto positivo delle lightshelf sulla distribuzione della luce naturale è duplice: il soffitto, di materiale con elevata riflessione, ma anche diffusivo per non causare abbagliamento, ridistribuisce verso il basso la luce proveniente dalla light window e dalla parte superiore della parete. Essainfatti riflette i raggi solari diretti e la luce diffusa della volta celeste, ridirigendola in profondità verso il soffitto e da qui ancora verso il basso. La parte inferiore del lightshelf si comporta come un overhang riflettendo la luce proveniente dal suolo (utile soprattutto in presenza di terreni altamente riflettenti come l'acqua). Opportunamente studiate possono svolgere contemporaneamente tre funzioni:

- ombreggiamento delle zone adiacenti alle finestre schermando il sole nella stagione estiva (per evitare surriscaldamento e abbagliamento) lasciandolo penetrare in quella invernale;

- controllo della luce diffusa aumentando l'illuminamento in fondo ai locali grazie alla riflessione della luce sul soffitto e riducendolo vicino alle finestre;

- riflessione della radiazione diretta verso l'interno (sunlighting).

La lightshelf si propone quindi come un sistema semplice ed economico che, integrandosi con le finestre, rende nel complesso la gestione della luce naturale più razionale. Tale soluzione è stata ottimizzata, nella configurazione e nelle dimensioni geometriche, attraverso successive simulazioni illuminotecniche, in condizione (cautelativa) di cielo sereno CIE. E' stato optato per una so-

luzione composta da due dispositivi in alluminio posti ad una quota di 2.1 m: uno esterno inclinato di 20° capace di schermare la radiazione solare nella stagione estiva e, in quella invernale, convogliare la luce verso l'interno e verso un successivo dispositivo interno orizzontale, come visibile in Fig. 2a.

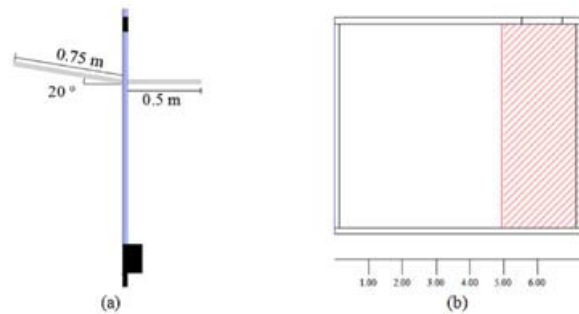


Figura 2: Dispositivo lightshelf utilizzato (a) e valutazione dell'aumento medio dell'illuminamento in fondo all'aula (b)

Una volta stabilita la configurazione definitiva è stato l'aumento dell'illuminamento medio in fondo al locale, confrontando i risultati in assenza ed in presenza di lightshelf, in riferimento ad un piano di lavoro a quota 0.8 m che copre in ampiezza tutto il locale e profondo 2 m, posto in fondo (Fig. 2b) ogni giorno 15 dei mesi dispari, alle ore 10; i risultati, visibili in Tabella 6, mostrano un aumento su base annua di circa 45 lx, pari a circa il 150%.

Tabella 6: Illuminamento medio E_m [lux] in fondo all'aula con e senza lightshelf al variare del mese

	15 Gennaio	15 Marzo	15 Maggio	15 Settembre	15 Novembre
Senza lightshelf	28	25	22	26	27
Con lightshelf	64	61	60	57	55

4.2 Valutazione della distribuzione della luce naturale con sistema lightshelf

L'efficacia nella distribuzione della luce in ambiente è stata verificata considerando come giorni significativi i due solstizi e i due equinozi, rappresentativi delle diverse stagioni, alle ore 12. Per ogni giorno sono stati confrontati i valori di illuminamento e il fattore di luce diurna nelle due configurazioni, con e senza le lightshelf, su griglia nel piano di lavoro a quota 0.8 m da terra. I risultati ottenuti mostrano una migliore distribuzione della luce naturale nell'aula, con un valore di illuminamento medio del locale diminuito per l'azione di ombreggiamento che abbassa i valori d'illuminamento in prossimità delle finestre. A titolo di esempio si riportano i grafici del fattore di luce diurna per le due configurazioni il giorno 21 Marzo (equinozio di primavera) alle ore 12 (Fig.3a,b): In essa è possibile notare come con lightshelves (Fig.2b) la forma della curva di distribuzione cambi evidenziando una traslazione più marcata verso il centro della stanza, grazie al diminuire dei valori del fattore di luce diurna in prossimità delle finestre e all'aumento degli stessi, seppur lieve, in fondo all'aula (Fig. 4).

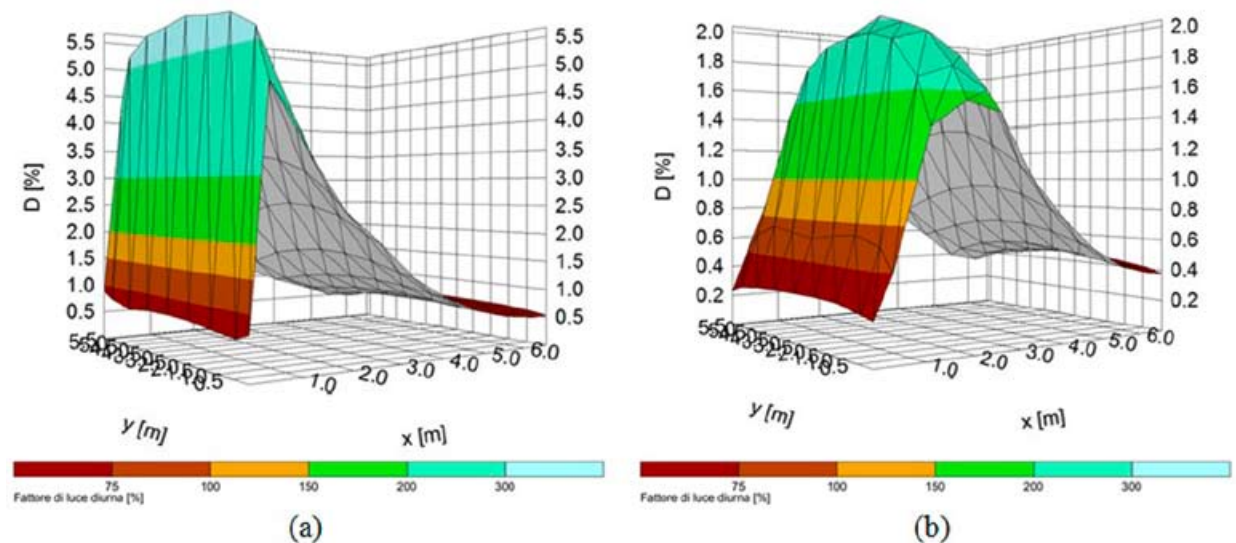


Figura 3: 21 Marzo ore 12: Fattore medio di luce diurna in assenza (a) e in presenza (b) di lightshelf.



Figura 4: Render configurazione ottimale per la luce naturale

5. Risparmio energetico conseguente alla proposta progettuale

La soluzione progettuale precedentemente descritta è nuovamente valutata in termini di risparmio di energia elettrica, per quantificare, attraverso il calcolo del LENI [13], il risparmio energetico complessivo dovuto alla presenza di un sistema di automazione e della maggiore luce naturale disponibile nell'aula per effetto delle lightshelf. Un sensore (la normativa non specifica se crepuscolare o continuo) rileva la quantità di luce naturale presente nel locale e, se insufficiente, attiva in blocco o a gruppi l'illuminazione artificiale. I locali presi in esame sono l'aula e il corridoio; per quanto riguarda l'ufficio segreteria i risultati di luce naturale e di commistione con l'artificiale rispettano già le normative ed è inoltre già dotato di un sensore di presenza. Non si ritiene quindi utile un ulteriore intervento. Per quanto riguarda invece il corridoio, si confrontano gli scenari con o senza sistemi di automazione, mentre per l'aula gli scenari analizzati sono quattro:

- 1) situazione attuale integrata con apparecchi supplementari dello stesso tipo per rispettare le normative;
- 2) sostituzione degli attuali apparecchi ad incasso con modelli più efficienti;
- 3) aggiunta alla configurazione precedente dei sistemi di automazione;
- 4) aggiunta a quest'ultima delle lightshelf;

I consumi specifici dei sistemi di automazione sono stimati nel valore di 2 kWh/(m2anno), pari al 3% della potenza installata, anziché dei 5 kWh/(m2anno) stabiliti dalla normativa, indipendentemente dal tipo di edificio. Questo perché, contra-

riamente ad edifici come gli ospedali, operativi durante tutto l'anno, una scuola rimane chiusa per alcuni mesi all'anno e durante la notte. Considerando la potenza degli apparecchi (280 W) la riduzione dei consumi per la sola presenza del sistema lightshelf è valutata nell'ordine del 18%, in caso di giornate serene in cui è presente la luce diretta. Nelle giornate nuvolose invece il sistema non porta alcun beneficio (si ipotizza che l'apporto di luce artificiale necessario non cambi); poiché le giornate soleggiate a Sesto Fiorentino corrispondono circa al 68 % del totale si ottiene quindi un risparmio annuale pari all'13.2% circa.

Tabella 7: Calcolo LENI per i differenti scenari di intervento previsti per le aule e variazione dei consumi

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
P lampade [W]	432	280	280	280
P parassita [W]	0	0	10	10
LENI kWh/(m2anno)	11.96	7.75	2.9	2.34
Δ LENI [%]		-35.2	-75	-77.8

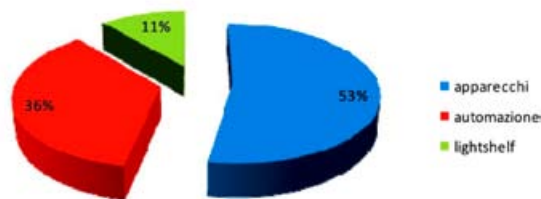


Figura 5: Ripartizione del risparmio nelle aule. (risparmio complessivo 77%)

Complessivamente, il risparmio di energia elettrica che si ottiene installando nuovi apparecchi, i sistemi di automazione ed il sistema lightshelf (caso 4) ammonta ad oltre il 70% (-77.8%) (Tabella 7), con un risparmio ripartito come visibile in Fig.5 in cui più della metà (53%) è ottenuto cambiando posizione e tipologia degli apparecchi, cui segue l'introduzione dei sistemi di automazione (36%) ed un maggior sfruttamento della luce naturale (11%).

I risultati dell'analisi sui locali "tipo" è quindi estesa a tutto il complesso scolastico effettuando un confronto tra la situazione attuale e la proposta progettuale "avanzata" in cui sono inserite tutte le proposte progettuali (Tab.8).

Tabella 8: Calcolo LENI per i differenti scenari di intervento previsti nella scuola

	LENI [kWh/m ² anno]	area [m ²]	Numero locali	area tot [m ²]	Stato attuale	Proposta progettuale
					consumi [kWh/anno]	consumi [kWh/anno]
corridoio	10.97	63	4	252	2765	910
aule (didattiche)	11.96	42	25	1050	12560	2460
				tot	15325	3370

Un qualsivoglia progetto, per essere considerato vantaggioso, deve avere un costo iniziale adeguato al risparmio che consente di ottenere. Si stimano a questo proposito i costi dei lightshelf e dei sistemi di automazione, in modo da valutare approssimativamente il payback time, numero di anni necessari ad ammortizzare l'investimento. Per l'automazione i sensori da installare sono di due tipologie: di presenza e di illuminamento. Per i corridoi sono sufficienti i primi, preferibilmente dotati di sensori crepuscolari che facciano attivare le luci solo se la luce naturale è al di sotto di una certa soglia, mentre nelle aule si aggiungono ai primi (diversi per raggio d'azione), dei sensori in grado di misurare l'illuminamento e di comandare le lampade con un segnale continuo in modo da adeguare il flusso luminoso alle necessità. Nella valutazione del payback time sono necessarie alcune ipotesi:

- il costo di investimento per automazione e lightshelf si basa sui prezzi di listino, con ipotesi di costo di installazione compensato da uno sconto applicato ai prodotti [21], giustificabile dai grandi quantitativi;
- il costo di investimento per gli apparecchi è pari all'extracosto rispetto all'adeguamento dell'attuale impianto (compresa anche la sostituzione dei reattori). L'extracosto dell'installazione è considerato nullo e pertanto si applica uno sconto sugli apparecchi del 30%;
- il costo dell'energia aumenta ogni anno del 2%.

Il risparmio complessivo annuo con l'attuazione del progetto avanzato è stimato in 10100 kWh/anno, dovuto per il 53% alla sostituzione dei corpi illuminanti (quindi 5353 kWh/anno), per il 36% all'automazione (quindi 3636 kWh/anno) e per l'11% ai lightshelf (1111 kWh/anno). Gli in-

vestimenti iniziali per l'attuazione dei tre diversi step di progettazione sono stimati in: 10500 € per la sostituzione delle lampade, 2025 € per l'automazione e 3500 € per le lightshelf. I tempi di ritorno dell'investimento risultano, rispettivamente, di 4 e 13 anni. Ad un livello intermedio si inserisce il payback relativo alla sostituzione degli apparecchi pari a 9 anni. Si noti l'andamento sempre più rapido delle curve (osservabile soprattutto nel caso delle lightshelf) dovuto all'aumento del costo dell'energia e, di conseguenza, del risparmio (Fig.6).

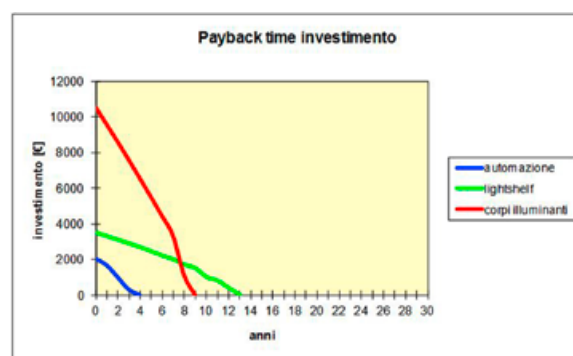


Figura 6: Tempi di ritorno per gli investimenti

6. CONCLUSIONI:

Questo lavoro mostra come con pochi ed efficaci interventi illuminotecnici sia possibile ridurre considerevolmente i consumi di energia garantendo qualità della visione ed un clima luminoso che garantisce benessere agli occupanti e condizioni lavorative migliori. Il progetto illuminotecnico basato sulla commistione di luce naturale con quella artificiale e sul loro controllo, ha permesso di migliorare le condizioni di illuminamento di tre ambienti tipo del liceo scientifico E. Agnoletti di Sesto Fiorentino, proprietà della Provincia di Firenze. Gli ambienti tipo quali i corridoi, gli uffici, la segreteria e le aule sono stati oggetto di misure sperimentali illuminotecniche e di analisi e verifiche con il supporto della simulazione dinamica. Lo studio condotto su questi ambienti campione copre più del 70% della superficie dell'edificio ed è rappresentativo anche perché comprende tutti i principali orientamenti delle aule. I consumi di energia sono stati notevolmente ridotti attraverso i tre interventi suggeriti: la sostituzione degli attuali apparecchi di illuminazione con sistemi ad alta

efficienza e migliori caratteristiche fotometriche ed ottiche, l'adozione di sistemi di automazione quali i sensori di presenza e di illuminamento con regolazione del flusso luminoso, l'utilizzo controllato della luce naturale attraverso particolari sistemi a lightshelf particolarmente adatti per gli ambienti scolastici per robustezza, modesta manutenzione, garanzie di sicurezza e basso costo. La soluzione illuminotecnica proposta garantisce una buona ed uniforme distribuzione della luce con il controllo di quella proveniente dalle aperture laterali. Mentre le zone degli uffici e la segreteria non necessitano di particolari interventi perché sia l'illuminazione artificiale che quella naturale soddisfano i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente e garantiscono l'equilibrio di illuminamento e rapporti di luminanza propri del campo visivo statico, per il corridoio si sono introdotti i sistemi di automazione utili al controllo della luce e dell'abbagliamento in capo visivo dinamico

Le aule, invece, dall'analisi dei risultati sia misurati che simulati, hanno mostrato diverse carenze: l'illuminamento medio sul piano di lavoro, che non raggiunge il valore di 300 lux previsti dalla normativa; nonostante le ampie vetrate e l'esposizione a sud, la luce naturale è insufficiente in relazione alla profondità degli ambienti, ma anche in termini di distribuzione non è uniforme e provoca abbagliamento nelle zone vicine alle finestre. L'introduzione delle scaffalature di luce progettate ad hoc, rispettando vincoli estetici e strutturali, la sostituzione degli attuali apparecchi di illuminazione e l'introduzione di sistemi di controllo dinamico della luce, hanno consentito di abbassare i consumi nelle aule del 77%. In particolare il 53% il risparmio è dovuto ai nuovi apparecchi, il 36% ai sistemi di automazione e l'11% alle lightshelf, che si sono rivelate il sistema migliore tra quelli esaminati per il controllo della luce naturale.

Dal punto di vista economico l'analisi del payback time ha mostrato come l'intervento migliore sia quello di automazione dell'impianto che si ripaga in soli 4 anni. Nove anni per il recupero dell'investimento totale richiede la sostituzione dei corpi illuminanti, mentre poco redditizia risulta l'introduzione di lightshelf. Per questo tipo di intervento l'investimento è paragonabile a quello dovuto ai sistemi di automazione, ma il risparmio non è tale da consentire un rientro

dell'investimento in tempi brevi. In effetti soluzioni che integrano l'uso dinamico e commisto di luce naturale con quella artificiale, sono le uniche che garantiscono l'uniformità dell'illuminamento e l'equilibrio delle luminanze, qualità della visione e benessere per gli occupanti, quindi efficacia energetica ed economica della soluzione progettuale proposta.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Provincia di Firenze, in particolare l'Ing. Luigi Tacconi ed il team degli uffici tecnici per la disponibilità e le informazioni utili allo svolgimento di questo studio.

7. BIBLIOGRAFIA:

- [1]. Kim SY, Mistrick R. Recommended daylight conditions for photosensor system calibration in a small office. *Journal of the Illuminating Engineering Society* summer 2001;30(2):176–88.
- [2]. Neida BV, Maniccia D, Tweed A. An analysis of the energy and cost savings potential of occupancy sensors for commercial lighting systems. *Journal of the Illuminating Engineering Society* summer 2001;30(2):111–25.
- [3]. Slater AI, Bordass WT, Heasman TA. *People and lighting controls*. BRE information paper IP 6/9. Garston: CRC; 1996.
- [4]. Murphy, P., What you need to know about classroom lighting. *School Planning and Management*, 38(4), 52–55, 1999
- [5]. Li DHW, Lam JC. An analysis of lighting energy savings and switching frequency for a daylight corridor under various indoor design illuminance levels. *Applied Energy* 2003;76(4):363–78.
- [6]. Li DHW, Lam JC. An investigation of daylighting performance and energy saving in daylight corridor. *Energy and Buildings* 2003;35:356–73.
- [7]. Hathaway, W. E., Non-visual effects of classroom lighting on children. *Educational Facility Planner*, 32(3), 12–16, 1994
- [8]. Hernandez, P., Burke, K., Owen Lewis, J., Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: an example for Irish primary schools, *Energy and Buildings* 2008;40: 249-254
- [9]. Corgnati S.P., Ariaudo, F., Fabrizio, E., Rolino, L., Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso scolastico

(medie superiori e istituti tecnici), applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani, Report RSE/2010/190, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, Settembre 2010;

[10]. UNI EN 12665:2004, Luce e illuminazione. Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici

[11]. UNI EN 12464-1:2011, Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni.

[12]. UNI 11165:2005, Luce e illuminazione. Illuminazione di interni. Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR.

[13]. UNI EN 15193:2005, Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione

[14]. UNI EN 15232:2007, Prestazione energetica degli edifici. Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici.

[15]. UNI EN 1838:2000, Applicazione dell'illuminotecnica. Illuminazione di emergenza.

[16]. UNI 15251:2008, Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

[17]. UNI EN 10840:2007, Luce e illuminazione. Locali scolastici. Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale.

[18]. C. Aghemo, A. Pellegrino, L. Blaso, V. Serra, Sistemi di integrazione della luce naturale e artificiale applicati a diverse tipologie edilizie. Rapporto sugli esiti di simulazioni numeriche e sperimentazione in campo, Report RSE/2009/12, Enea.

[19]. Relux Professional 2007, Manuale, Relux Informatik AG, Basilea, Svizzera.

[20]. D.R. Wulfinghoff, Energy Efficiency Manual, Chapter 8 "Control and use of sunlight".

[21]. Philips, Listino prezzi n.18 del 1 Aprile 2013, Apparecchi di illuminazione

Carla BALOCCO: Ricamatore in Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze

Enrico MARMONTI: Ingegnere Edile Magistrale, Dottorando di ricerca al Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze occupandosi di facciate ventilate attive in doppia pelle di vetro.