

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



Incremento della Prestazione Energetica degli Edifici
attraverso l'Uso Efficiente dell'Illuminazione Artificiale
e lo Sfruttamento Intensivo della Luce Naturale.

Il caso di un istituto scolastico nel Pordenonese.

Relatore: Prof. Lorenzo PAGLIANO

Tesi di Laurea di:

Piero FAVARETTI Matr. 725474

Anno Accademico 2010 – 2011

Sommario

Il progetto si pone come obiettivo la riduzione dei consumi relativi all'illuminazione in un edificio scolastico. Gli interventi proposti sono tre: sostituzione degli attuali apparecchi di illuminazione con modelli più efficienti, adozione di sistemi di automazione delle luci e integrazione delle finestre con particolari sistemi di daylighting chiamati lightshelf.

Strumenti di lavoro sono stati Dialux e Relux, due programmi di progettazione illuminotecnica.

Per quantificare i risultati ottenuti si è utilizzato il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator).

Parole chiave: apparecchi efficienti, automazione delle luci, lightshelf, Dialux, Relux, LENI

Abstract

In order to minimize energy consumption for lighting in an educational building, three changes are suggested: new and more efficient lights, automation and a type of daylighting system called lightshelf.

Analysis have been processed using Dialux and Relux, two lighting simulation softwares.

Results evaluation is described by the LENI (Lighting Energy Numeric Indicator).

Keywords: efficient lights, automation, lightshelf, Dialux, Relux, LENI

Prefazione

L'idea di questa tesi nasce durante lo stage che ho svolto presso la VDA di Pordenone, azienda molto ben inserita nel campo della building automation e dei servizi multimediali, e specializzata in particolare nelle strutture ricettive.

All'interno della diramazione VDA Elettronica, tra le molte attività, l'azienda si occupa con sempre maggior interesse di illuminazione. In quest'ottica si colloca il mio stage, svolto tra marzo e novembre 2010 e sfociato successivamente in un contratto di collaborazione più duraturo.

Nello specifico lo stage intendeva rispondere all'iniziativa dell'azienda di allargare la propria proposta commerciale includendo nell'offerta anche gli apparecchi di illuminazione. Partner autorevole del progetto, in veste di esperto illuminotecnico e di produttore di apparecchi è stata la Philips, in particolare il comparto Philips Lighting della sede di Monza.

Due gli obiettivi principali della mia esperienza: prendere dimestichezza con i prodotti Philips e imparare le basi della progettazione illuminotecnica, utilizzando come software di analisi Dialux. Come si vedrà, proprio per queste direttive, Dialux e Philips troveranno ampio spazio all'interno del mio lavoro.

Acquisiti in azienda i concetti cardine della materia, compreso lo studio delle principali normative vigenti, ho poi approfondito, con l'aiuto del Politecnico di Milano nella persona del prof. Pagliano, tematiche specifiche e tecnologie innovative, soprattutto nel campo dell'illuminazione naturale.

Piero Favaretti



Indice Generale

0	Introduzione	17
	0.1. La Storia.....	18
	0.2. Il Progetto.....	20
	0.3. Obiettivi.....	21
1	Fondamenti di Illuminotecnica	25
	1.1. Luce e illuminazione.....	25
	1.1.1. La luce e il fenomeno della visione.....	25
	1.1.2. Le grandezze fotometriche.....	26
	1.1.3. Le leggi fondamentali.....	29
	1.1.4. Le sorgenti luminose.....	31
	1.1.5. Gli apparecchi di illuminazione.....	32
	1.2. I sistemi di controllo della luce.....	36
	1.2.1. Funzioni svolte dai sistemi di controllo.....	36
	1.2.2. Modalità di regolazione.....	39
	1.3. Riferimenti normativi.....	42
2	L'illuminazione degli Edifici Scolastici	55
	2.1. Applicazione delle normative.....	55
	2.2. Normative specifiche.....	61
	2.3. L'importanza della luce naturale nelle scuole.....	65
	2.4. Le peculiarità dell'illuminazione scolastica.....	66
3	Strumentazione e Modelli	67
	3.1. I programmi di progettazione illuminotecnica.....	67
	3.1.1. Il metodo del RayTracing.....	68
	3.1.2. Il metodo della Radiosity.....	69
	3.2. Modellazione dei locali.....	73
	3.2.1. Le aule.....	80
	3.2.2. I corridoi.....	86
	3.2.3. L'aula magna.....	89
	3.2.4. Le scene esterne.....	95
	3.3. I sistemi di daylighting.....	98
	3.4. Il sistema lightshelf.....	103
	3.4.1. Case study.....	105

3.5.	L'attuale sistema di daylighting.....	108
4	Risultati Ottenuti: Illuminazione Artificiale.....	111
4.1.	Validazione di Dialux.....	111
4.2.	Valutazione dell'importanza dei singoli componenti.....	121
4.3.	Situazione attuale.....	125
4.4.	Potenziamento dell'illuminazione artificiale nella aule.....	130
5	Risultati Ottenuti: Illuminazione Naturale.....	153
5.1.	Overcast sky.....	153
5.1.1.	Ottimizzazione delle lightshelf.....	153
5.1.2.	Configurazione definitiva.....	164
5.1.3.	Risultati per la luce diffusa.....	165
5.2.	Clear sky.....	168
6	Conclusioni.....	181
6.1.	Quantificazione del risparmio energetico.....	181
6.2.	Stima del payback time.....	190
6.3.	Conclusioni.....	193

Bibliografia

Sitografia

Normative di riferimento

Appendice A: Rendering con luce artificiale..... I

Appendice B: Rendering con luce naturale..... III

Appendice C: Prestazioni delle lightlouver in facciate con muri sottili.... V

Indice delle Figure

0.1	Corpo centrale e ala ovest dell'Aristide Gabelli di Pordenone.....	17
0.2	Confronto tra la facciata del progetto iniziale e di quello definitivo	19
0.3	Prospetto dell'edificio.....	20
0.4	Pianta dell'edificio.....	20
1.1	Spettro del visibile e risposta dell'occhio umano.....	25
1.2	Rappresentazione dell'intensità luminosa I	26
1.3	Rappresentazione dell'illuminamento.....	27
1.4	Rappresentazione della luminanza.....	27
1.5	Riflessione speculare (o diretta) e diffusa.....	28
1.6	Parametri geometrici per il calcolo dell'illuminamento.....	31
1.7	Schema delle tradizionali sorgenti luminose.....	32
1.8	Rappresentazione del solido fotometrico di una sorgente.....	33
1.9	Diverse rappresentazioni delle curve fotometriche.....	34
1.10	Angolo di apertura delle ottiche.....	35
1.11	Emissione luminosa degli apparecchi.....	35
1.12	Distribuzione del flusso totale.....	35
1.13	Interruttore crepuscolare on e off.....	36
1.14	Decadimento della lampada e compensazione.....	37
1.15	Variazione della temperatura del colore ideale nell'arco della giornata.....	38
1.16	Esempio di sistema domotico integrato.....	41
1.17	Grandezze utili al calcolo dell'indice di posizione di Guth.....	46
1.18	Metodi per il calcolo del LENI.....	48
1.19	Procedimento per il calcolo del BAC factor.....	51
1.20	Tipologie di illuminazione di emergenza.....	52
2.1	Grafico per la determinazione del fattore finestra ϵ	63
2.2	Grafico per la determinazione del fattore di riduzione Ψ	64
3.1	Ripartizione delle simulazioni tra i due software di progettazione.....	67
3.2	Radiosity totale.....	70
3.3	Locali analizzati al piano terra e al primo piano.....	73
3.4	Foto dell'aula.....	80

3.5	Rendering dell'aula.....	81
3.6	Planimetria dell'aula.....	82
3.7	Disposizione delle finestre dell'aula.....	82
3.8	Disposizione degli oggetti nell'aula.....	83
3.9	Piani di lavoro dell'aula con relative zone circostanti.....	83
3.10	Foto dell'apparecchio Atenalux.....	83
3.11	Disposizione lampade nell'aula e relative curve fotometriche.....	84
3.12	Foto dei corridoi.....	86
3.13	Rendering del corridoio.....	87
3.14	Planimetria del corridoio.....	87
3.15	Foto dell'apparecchio 3F Filippi e relative curve fotometriche.....	88
3.16	Foto dell'aula magna.....	89
3.17	Rendering dell'aula magna.....	90
3.18	Planimetria dell'aula magna.....	91
3.19	Disposizione degli oggetti nell'aula magna.....	91
3.20	Disposizione delle finestre dell'aula magna.....	92
3.21	Piani di lavoro dell'aula magna con relative zone circostanti.....	92
3.22	Disposizione degli apparecchi nell'aula magna.....	92
3.23	Foto dell'apparecchio Sames.....	93
3.24	Confronto tra curva fotometrica reale e ricostruita.....	93
3.25	Planimetria degli spazi esterni alla scuola.....	95
3.26	Visualizzazione 3D degli spazi esterni alla scuola.....	96
3.27	Dettaglio dell'imbotte ad arco del primo piano.....	96
3.28	Imbotte del piano terra inserita nella scena.....	97
3.29	Funzionamento dei sun-duct.....	99
3.30	Funzionamento delle pareti traslucide.....	99
3.31	Configurazione dei brise-soleil a seconda dell'orientazione delle finestre.....	100
3.32	Funzionamento delle lightshelf.....	104
3.33	Andamento del fattore medio di luce diurna in quattro tipiche classi.....	106
3.34	Inclinazione delle lightshelf nel primo case study.....	106
3.35	Configurazione della lightshelf e fattore di daylighting nel secondo case study.....	108
3.36	Finestre dell'aula e relativi sistemi di daylighting.....	109
3.37	Finestra dell'aula in dettaglio.....	109
4.1	Punti in cui si è misurato l'illuminamento.....	112
4.2	Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 1 m.....	115

4.3	Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 2 m.....	115
4.4	Lightshelf, configurazione interna + esterna.....	117
4.5	Variazione di D_m con lightshelf esterna.....	119
4.6	Variazione di D_m con lightshelf esterna + interna.....	119
4.7	Immagine dell'aula a colori sfalsati. Situazione attuale.....	128
4.8	Disposizioni degli apparecchi testate per ottimizzare l'illuminazione artificiale.....	135
4.9	Configurazione attuale: planimetria apparecchi.....	136
4.10	Configurazione attuale: immagine apparecchio.....	136
4.11	Configurazione attuale: curva fotometrica.....	137
4.12	Configurazione 1: planimetria apparecchi.....	139
4.13	Configurazione 1: immagine apparecchio.....	139
4.14	Configurazione 1: curva fotometrica.....	140
4.15	Configurazione 4: planimetria apparecchi.....	142
4.16	Configurazione 4: immagine apparecchio.....	142
4.17	Configurazione 4: curva fotometrica.....	143
4.18	Configurazione 17: planimetria apparecchi.....	145
4.19	Configurazione 17: immagine apparecchio.....	145
4.20	Configurazione 17: curva fotometrica.....	146
4.21	Configurazione 19: planimetria apparecchi.....	148
4.22	Configurazione 19: immagine apparecchio.....	148
4.23	Configurazione 19: curva fotometrica.....	149
4.24	Immagine dell'aula a colori sfalsati. Configurazione ottimale.....	152
5.1	Area di possibile collocazione della lightshelf esterna nel rispetto dei vincoli.....	155
5.2	Lightshelf esterna: possibili inclinazioni.....	156
5.3	Andamento del $D_{puntuale}$ in funzione dell'inclinazione delle lightshelf esterne.....	157
5.4	Lightshelf esterna: possibili altezze.....	158
5.5	Andamento del $D_{puntuale}$ in funzione dell'altezza delle lightshelf esterne.....	159
5.6	Lightshelf esterna: possibili lunghezze.....	160
5.7	Andamento del $D_{puntuale}$ in funzione della lunghezza delle lightshelf esterne.....	161
5.8	Componente interna generica.....	162
5.9	Configurazione definitiva della lightshelf esterna.....	164
5.10	Overcast sky: distribuzione lungo l'aula.....	166
5.11	Overcast sky: differenza rispetto al caso senza lightshelf.....	166

5.12	Isolinee con e senza lightshelf.....	167
5.13	Configurazione della lightshelf interna.....	170
5.14	Efficacia della lightshelf contro l'abbagliamento: i raggi in fondo all'aula rimangono sempre sopra gli 0,6 m.....	170
5.15	Zona considerata per la valutazione dell'aumento medio dell'illuminamento in fondo all'aula.....	171
5.16	Analisi in condizioni di clear sky: configurazione base.....	172
5.17	Analisi in condizioni di clear sky: configurazione con lightshelf.....	173
5.18	Analisi in condizioni di clear sky: configurazione solo interna.....	173
5.19	Analisi in condizioni di clear sky: configurazione lightlouver.....	174
5.20	Principio di funzionamento delle lightlouver.....	175
5.21	Analisi in condizioni di clear sky: configurazione con lightshelf e soffitto inclinato.....	175
5.22	Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: analisi per configurazione.....	177
5.23	Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: analisi per stagione.....	178
5.24	Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: differenza tra soluzione base e con lightshelf.....	180
5.25	Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: es. di grafico 3D della distribuzione di E nell'aula.....	180
6.1	Influenza dei sistemi di automazione sui consumi nei corridoi e nell'aula magna.....	186
6.2	Influenza degli apparecchi, dei sistemi di automazione e delle lightshelf sui consumi dell'aula.....	187
6.3	Ripartizione del risparmio nelle aule. Il risparmio complessivo ammonta al 73%.....	188
6.4	Ripartizione dei consumi per la configurazione base e avanzata....	190
6.5	Costo di investimento e payback time dei tre interventi discussi...	192
C.1	Lightlouver applicata a parete spessa e sottile.....	V
C.2	Prestazioni delle lightlouver in estate: valori assoluti e variazione rispetto al caso base.....	VI
C.3	Prestazioni delle lightlouver in inverno: valori assoluti e variazione rispetto al caso base.....	VII
C.4	Prestazioni delle lightlouver all'equinozio: valori assoluti e variazione rispetto al caso base.....	VIII

Indice delle Tabelle

1.1	Coefficienti di riflessione consigliati per alcune superfici.....	43
1.2	Legame tra illuminamento del compito e della zona circostante...	43
1.3	Prospetto completo per il calcolo dell'abbagliamento.....	47
1.4	Classificazione dei sistemi di automazione.....	50
2.1	Prescrizioni della normativa UNI EN 12464 per i locali analizzati....	55
2.2	Valori di resa dei colori tipici per alcune tipologie di lampade.....	56
2.3	Valori di default per F_D e F_O	58
2.4	Costanti di default relative alla presenza nei locali e alle energie parassite.....	59
2.5	Criteri per l'assegnazione della quality class.....	60
2.6	LENI limite per gli edifici scolastici.....	60
2.7	Fattore medio di luce diurna previsto dalla normativa.....	62
3.1	Materiali delle principali superfici dei locali.....	76
3.2	Confronto tra i coefficienti di riflessione di Dialux e quelli ottenuti sperimentalmente.....	77
3.3	Fattori della luce naturale.....	79
3.4	Caratteristiche delle finestre dell'aula.....	84
3.5	Coefficienti di riflessione degli oggetti dell'aula che influenzano i risultati.....	84
3.6	Altezze delle superfici del compito nell'aula.....	84
3.7	Apparecchi dell'aula.....	85
3.8	Apparecchi del corridoio.....	87
3.9	Coefficienti di riflessione degli oggetti dell'aula magna che influenzano i risultati.....	94
3.10	Caratteristiche delle finestre dell'aula magna.....	94
3.11	Altezze delle superfici del compito nell'aula magna.....	94
3.12	Apparecchi dell'aula magna.....	94
3.13	Sistemi consigliati per le scuole in funzione delle condizioni atmosferiche medie.....	102
4.1	Distribuzione dei valori di E secondo lo schema di figura 4.1.....	112
4.2	Statistiche dei risultati del confronto tra valori di illuminamento misurati e simulati.....	113

4.3	Confronto tra i dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 1m.....	114
4.4	Confronto tra i dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 2m.....	114
4.5	Variazione di D_m con lightshelf esterna.....	118
4.6	Variazione di D_m con lightshelf esterna + interna.....	118
4.7	Analisi di sensibilità dei singoli componenti della scena.....	123
4.8	Situazione attuale per le aule a livello di illuminazione artificiale...	126
4.9	Situazione attuale per le aule a livello di illuminazione naturale....	126
4.10	Situazione attuale per i corridoi a livello di illuminazione artificiale.....	126
4.11	Situazione attuale per i corridoi a livello di illuminazione naturale	126
4.12	Situazione attuale per l'aula magna a livello di illuminazione artificiale.....	127
4.13	Situazione attuale per l'aula magna a livello di illuminazione naturale.....	127
4.14	Situazione attuale in termini di abbagliamento e resa del colore per i tre locali.....	127
4.15	Configurazione attuale: tabella UGR.....	137
4.16	Configurazione attuale: piano di manutenzione.....	138
4.17	Configurazione attuale: risultati illuminotecnici.....	138
4.18	Configurazione 1: tabella UGR.....	140
4.19	Configurazione 1: piano di manutenzione.....	141
4.20	Configurazione 1: risultati illuminotecnici.....	141
4.21	Configurazione 4: tabella UGR.....	143
4.22	Configurazione 4: piano di manutenzione.....	144
4.23	Configurazione 4: risultati illuminotecnici.....	144
4.24	Configurazione 17: tabella UGR.....	146
4.25	Configurazione 17: piano di manutenzione.....	147
4.26	Configurazione 17: risultati illuminotecnici.....	147
4.27	Configurazione 19: tabella UGR.....	149
4.28	Configurazione 19: piano di manutenzione.....	150
4.29	Configurazione 19: risultati illuminotecnici.....	150
5.1	Vincoli sulla lightshelf esterna.....	154
5.2	Valori di illuminamento in fondo all'aula (6m dalla finestra) in funzione dell'inclinazione delle lightshelf esterne.....	156
5.3	Valori di illuminamento in fondo all'aula (6m dalla finestra) in funzione dell'altezza delle lightshelf esterne rispetto al pavimento.....	158

5.4	Valori di illuminamento in fondo all'aula (6m dalla finestre) in funzione della lunghezza delle lightshelf esterne.....	160
5.5	Effetto della parte interna in condizioni di luce diffusa.....	163
5.6	Caratteristiche delle componenti interna ed esterna derivate dall'analisi con overcast sky.....	164
5.7	Risultati per overcast sky: fattore medio e distribuzione.....	165
5.8	Risultati per overcast sky: fattori puntuali.....	165
5.9	Illuminamento medio in fondo all'aula con e senza lightshelf al variare del mese e dell'ora.....	171
5.10	Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: valori di illuminamento E [lux] lungo l'aula.....	176
6.1	F_0 senza automazione.....	182
6.2	F_0 con automazione.....	182
6.3	F_0 in assenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale	182
6.4	F_0 in presenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale	183
6.5	F_0 in presenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale e delle lightshelf.....	183
6.6	Determinazione del fattore di daylight penetration.....	184
6.7	Potenze parassite.....	185
6.8	Influenza dei sistemi di automazione sui consumi nei corridoi e nell'aula magna.....	186
6.9	Influenza degli apparecchi, dei sistemi di automazione e delle lightshelf sui consumi dell'aula.....	187
6.10	Caratteristiche dei progetti base e avanzato.....	188
6.11	Consumi totali dei tre locali nella configurazione base.....	189
6.12	Consumi totali dei tre locali nella configurazione avanzata.....	189
6.13	Investimento per le aule.....	191
6.14	Investimento per i corridoi.....	191

Capitolo 0

Introduzione



Figura 0.1 Corpo centrale e ala ovest dell'Aristide Gabelli di Pordenone

L'istituto scolastico Aristide Gabelli (figura 0.1) è un imponente edificio risalente ai primi anni del Novecento situato nel cuore di Pordenone. Grazie all'ottimo operato delle amministrazioni locali e della direzione didattica, il fabbricato, da sempre sede di una scuola elementare, è tuttora mantenuto in ottime condizioni estetiche e funzionali.

Come figlio e nipote di alunni che in passato l'hanno frequentata, ed essendone stato io stesso alunno, sono molto legato alle Gabelli, come vengono generalmente chiamate da noi del luogo. Aldilà del legame personale di affetto, mi dico spesso che la bellezza e l'imponenza dell'edificio sono una diretta conseguenza dell'importante ruolo che Scuola e Istruzione ricoprivano in un passato non ancora lontano e che una scuola del genere doveva essere motivo di prestigio e di orgoglio per l'intera comunità.

Una volta ultimate, infatti, le nostre Gabelli furono tanto apprezzate da vincere addirittura la medaglia d'oro alla Mostra Didattica Nazionale, tenutasi a Firenze nel marzo-aprile 1925, da parte della giuria della sezione Edilizia [1]. Ragguardevoli le spese sostenute per l'edificazione, soprattutto se si pensa che avvenne nel primo dopoguerra, ma notevole fu anche la tenacia degli amministratori per portare l'opera a compimento, con l'obiettivo, si legge in una Relazione della giunta pordenonese, *di procurare alla nostra popolazione infantile, nella più larga misura, i copiosi benefici dell'istruzione dai quali veramente ed essenzialmente derivano la civiltà, il progresso ed il miglioramento morale ed intellettuale dei popoli* [2].

0.1. La Storia [1]

Fin dai primi anni del Novecento il problema della carenza e dello sparpagliamento degli edifici scolastici a Pordenone e più in generale dello stato delle scuole cittadine e dei danni derivanti dall'addensamento degli alunni in aule insufficienti e disadatte, conseguente all'aumento continuo della popolazione scolastica, era stato evidenziato con forza da eminenti professori, uomini di cultura e in particolare dalla locale Società Magistrale. Nel 1912 l'Amministrazione in carica decise finalmente di porre rimedio a questo annoso problema e incaricò Augusto Mior, allora noto ingegnere pordenonese, di compilare il progetto della scuola urbana. L'ing. Mior, concorde sulla necessità di un intervento radicale, così si esprime nella *Relazione del Progetto del Fabbricato scolastico urbano: Il fabbricato progettato deve servire ad accogliere tutti gli alunni del Comune, d'ambo i sessi – i quali si trovano ora raccolti in parte in locali di ragione privata adatti a tutt'altro scopo, e in parte in locali infelici per aria, luce e comodità di accesso* [3].

Purtroppo con l'entrata in guerra dell'Italia nel maggio 1915 i progetti preparati furono forzatamente accantonati.

Tuttavia, al termine delle ostilità, nonostante le condizioni di estrema povertà particolarmente gravi nella nostra regione, la costruzione della scuola tornò nuovamente al centro dell'attenzione della nuova giunta socialista, a riprova dell'importanza che veniva attribuita al progetto. Inoltre il bisogno di un nuovo edificio scolastico si era fatto ancora più forte visto che, durante la guerra, le aule, già poche e malridotte, erano state *danneggiate, spogliate e ridotte ad un soqquadro ripugnante* con la scomparsa inoltre della *quasi totalità delle suppellettili scolastiche e del materiale didattico* [4].

Nella seduta del Consiglio Comunale del 28 dicembre 1921 furono approvati i progetti e si diede finalmente il via alla fase realizzativa, terminata, non senza

difficoltà, all'inizio del 1926 con circa mille giorni di ritardo, anche perché in corso d'opera al progetto iniziale furono apportate sostanziali modifiche, soprattutto per quel che riguarda la facciata, che si volle simile agli edifici veneti del XVI secolo come allora si andava facendo in altri importanti centri della regione (figura 0.2).

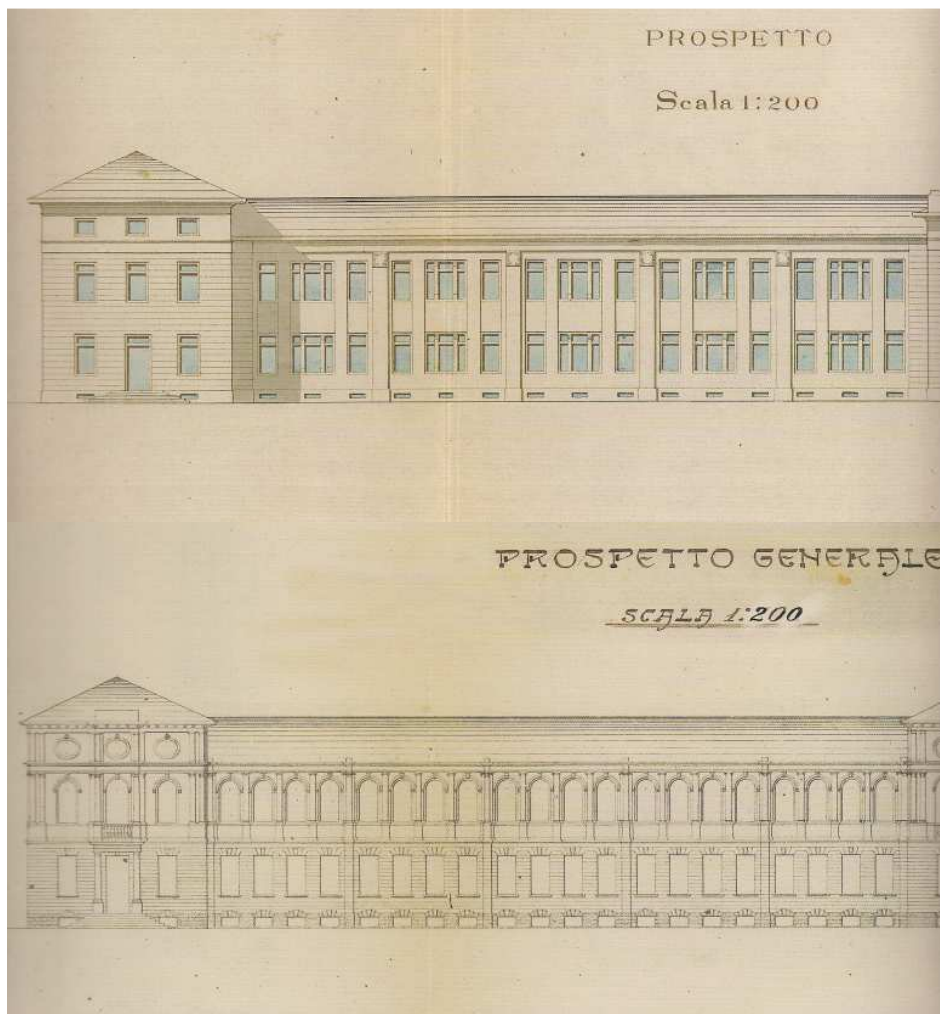


Figura 0.2 Confronto tra la facciata del progetto iniziale e di quello definitivo [1]

0.2. Il Progetto [1]

Diverse visuali del progetto definitivo sono riportate nelle figure 0.3 e 0.4.

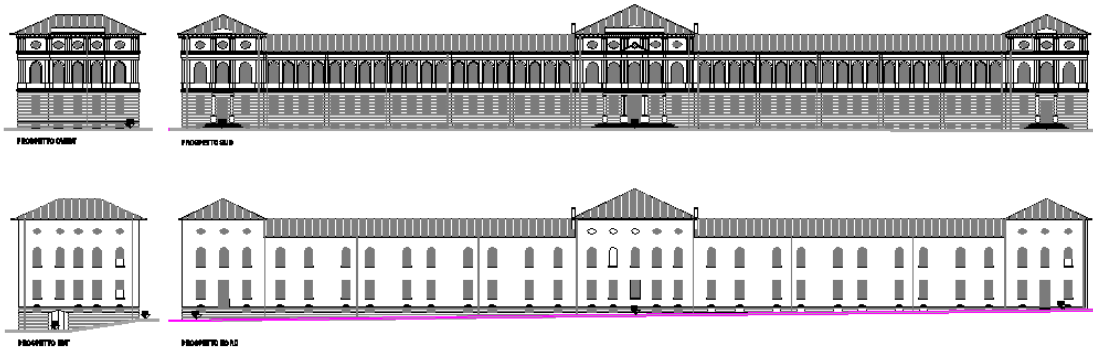


Figura 0.3 Prospetto dell'edificio

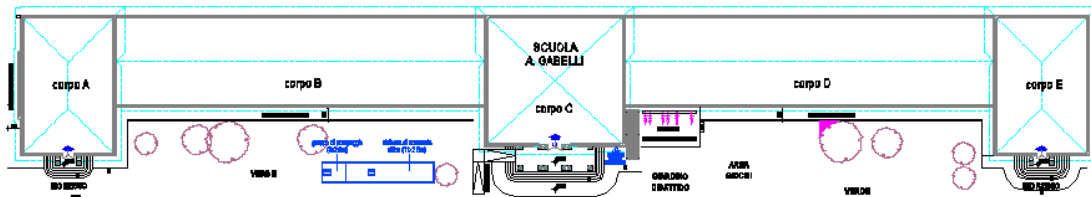


Figura 0.4 Pianta dell'edificio

Il fabbricato è composto da un unico asse che va da levante a ponente e tutte le aule hanno le finestre rivolte a mezzogiorno per sfruttare appieno la luce solare. Ogni ala ha 5 aule per piano, per un totale di 20 aule. Al piano superiore del corpo centrale è situata l'aula magna. Oltre all'entrata mediana, ce ne sono anche due laterali, originariamente riservate all'ingresso separato degli alunni maschi e femmine.

Le aule hanno le dimensioni di 7 m per 9 m in piano, con l'altezza, originariamente, di 4,5 m e le finestre hanno superficie pari a 1/6 del pavimento. Dal lato nord sono tutte fiancheggiate da un corridoio largo 3,5 m. A sud del fabbricato si trova un grande cortile di circa 5300 m² e, sul lato orientale, la palestra coperta.

Per quanto riguarda infine l'estetica il progettista si è studiato di raggiungere un buon effetto più con la distribuzione delle masse che con la ricchezza dell'ornamentazione (ottica parzialmente rivista con le successive modifiche), e ciò non solo per ovvie ragioni di economia, ma perché la grande estensione della fronte impone che il punto di vista si trovi a non meno di una cinquantina di metri, cioè a distanza tale che una decorazione minuziosa sarebbe di scarso effetto. A interrompere la continuità di linee orizzontali eccessivamente estese si sono progettati tre corpi avanzati [3].

La scuola fu inizialmente dedicata al Re Vittorio Emanuele III e solo dopo la II Guerra Mondiale, con la caduta della monarchia, è stata intitolata ad Aristide Gabelli, famoso pedagogo veneto.

0.3. Obiettivi

A determinare l'efficienza energetica complessiva di un edificio concorrono il riscaldamento, il condizionamento dell'aria, la ventilazione, la produzione di acqua calda e l'illuminazione. Per quanto riguarda quest'ultimo punto è noto che elevate prestazioni si raggiungono principalmente adottando corpi illuminanti a basso consumo e installando sistemi di automazione che attivino le luci solo in caso di bisogno. Altri accorgimenti utili per la riduzione dei consumi energetici sono l'impiego di componenti elettrici avanzati (alimentatori elettronici fissi, a stadi, dimmerabili, con o senza controllo 1-10 V, Dali etc.) e la manutenzione degli apparecchi, soprattutto per quanto riguarda la pulizia delle ottiche. L'efficienza energetica però non è tutto. Un buon progetto deve garantire infatti allo stesso tempo anche i giusti livelli di illuminamento a seconda della destinazione del locale ed elevati standard di sicurezza e comfort visivo. Bisogna in definitiva arrivare alla scelta del tipo, numero e posizione degli apparecchi di illuminazione e relative lampade effettuando valutazioni di ordine normativo, economico, energetico, ambientale ed estetico.

Accanto all'ottimizzazione della luce artificiale si è fatta largo in questi ultimi anni l'idea di incrementare anche l'apporto di luce naturale dall'esterno. Il concetto ovviamente non è nuovo ma solo recentemente si è investito con forza nel settore con proposte innovative (specchi, tubi riflettenti etc.), soprattutto a causa dell'aumento del costo dell'energia. L'importanza della luce naturale, comunque, non risiede solo nella riduzione dei consumi. Essa infatti porta anche notevoli benefici psicologici e fisiologici per chi risiede nei locali. Vista l'importanza e la funzione del fabbricato e, da un punto di vista più tecnico, visto l'alto potenziale di sfruttamento della luce solare, l'istituto

scolastico A. Gabelli mi è sembrato un soggetto ideale per uno studio di questo tipo. Considerando il fatto che l'occupazione dei locali è soprattutto diurna, uno sfruttamento efficace della luce solare ridurrebbe di molto la necessità di ricorrere all'illuminazione artificiale.

Si sono presi in considerazione tre locali rappresentativi di qualunque scuola: l'aula, il corridoio e l'aula magna, utilizzata nel nostro caso non solo di giorno per assemblee scolastiche ma anche la sera per svariate attività culturali.

Strumenti fondamentali di lavoro sono stati Relux e soprattutto Dialux, programmi di progettazione illuminotecnica disponibili gratuitamente. La progettazione si suddivide a grandi linee in due fasi: quella di creazione dei locali con l'assegnazione dei parametri utili all'analisi illuminotecnica, e la progettazione vera e propria in cui vengono gestiti i corpi illuminanti e gli altri sistemi di controllo della luce naturale. Si è partiti dalla situazione presente per poi proporre delle varianti migliorative dal punto di vista energetico e del comfort visivo. Le migliorie hanno riguardato sia l'illuminazione artificiale sia quella naturale.

Per valutare infine i risultati ottenuti si è introdotto il LENI, *Lighting Energy Numeric Indicator*, parametro che riassume globalmente le prestazioni di un edificio o di un singolo locale per quanto riguarda l'impianto illuminotecnico. Dimensionalmente il LENI risulta,

$$\frac{kWh}{m^2 anno} = \frac{kW}{m^2} \cdot \frac{h}{anno} = \frac{kWh}{anno m^2}$$

e può essere quindi visto come prodotto di potenza specifica e ore equivalenti oppure come rapporto tra i consumi annuali di corrente e la superficie in esame.

Presentando in breve la struttura della tesi, si parte con un capitolo introduttivo che illustra le nozioni base di illuminotecnica e le principali normative vigenti in materia utili per lo svolgimento del progetto (capitolo 1). Il capitolo 2 affronta in dettaglio le questioni riguardanti gli edifici scolastici applicando le normative precedentemente viste al caso specifico e aggiungendo altri importanti dettagli. La progettazione vera e propria comincia con il capitolo 3 in cui vengono illustrati i locali interni e la scena esterna riprodotti con l'ausilio di Dialux e, per modellare alcuni particolari più complessi, di due software cad, Autocad e Solid Edge. Sempre nel capitolo 3 vengono descritti i programmi di progettazione illuminotecnica, dei quali viene brevemente spiegato il funzionamento, e i sistemi di controllo della luce naturale, detti di daylighting, che ne permettono uno sfruttamento più

intensivo. Tra la miriade di dispositivi disponibili si è deciso di testare le lightshelf, vere e proprie “mensole” di materiale riflettente disposte esternamente e/o internamente alle finestre in grado di aumentare la quantità di luce entrante nel locale e di distribuirlo in maniera più uniforme, riflettendo i raggi solari prima verso il soffitto e quindi verso l’interno del locale e schermato contemporaneamente la zona più vicina alle finestre dalla luce diretta che causa abbagliamento. I capitoli 4 e 5 sono i capitoli numerici in cui si riportano i risultati ottenuti per la luce artificiale e naturale, rispettivamente. In entrambi i casi si parte dall’analisi della situazione attuale per poi proporre delle modifiche migliorative. Il capitolo 6, infine, oltre ai commenti conclusivi, riporta una valutazione del risparmio energetico annuale che si ottiene applicando i vari sistemi studiati e, stimando il costo di investimento, del periodo di ammortamento della spesa (payback time).

Capitolo 1

Fondamenti di Illuminotecnica

1.1. Luce e illuminazione

1.1.1. La luce e il fenomeno della visione [5]

La luce è la parte dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano. E' detta anche radiazione visibile ed è convenzionalmente compresa (anche se dipende dall'individuo) tra un valore di λ (lunghezza d'onda) pari a 380 nm, di colore violetto cupo, e 780 nm, corrispondente al rosso (figura 1.1). Al di fuori di questo intervallo, per tutte le altre onde elettromagnetiche (raggi-x, raggi- γ , onde radio, ecc.), l'occhio, l'organo del corpo umano che ha il compito di raccogliere gli stimoli luminosi provenienti dal mondo esterno e di tradurli in impulsi nervosi da trasmettere al cervello, funge da filtro eliminandone la percezione. In realtà, anche all'interno del visibile la risposta dell'occhio umano è variabile: vicino al centro, in corrispondenza di $\lambda = 555$ nm (colore verde-giallo), la sensibilità è massima mentre avvicinandosi alle estremità si ha una progressiva riduzione fino al ricongiungimento con i valori nulli al di fuori dell'intervallo (cfr. figura 1.1).

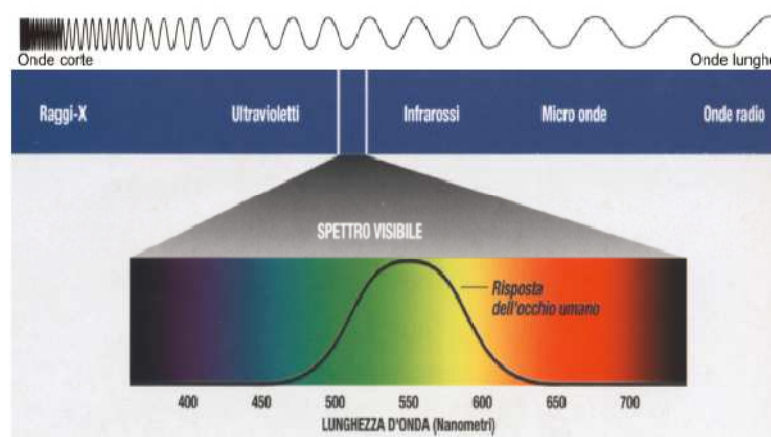


Figura 1.1 Spettro del visibile e risposta dell'occhio umano [6]

1.1.2. Le grandezze fotometriche

- **Flusso luminoso [7]:** Grandezza derivata dal flusso energetico Φ_e pesato secondo la sua azione sull'osservatore di riferimento fotometrico CIE. Si misura in lumen (lm) e si indica con Φ_v (se non genera confusione semplicemente Φ).
Per la visione fotopica:

$$d\Phi_v = K_m(d\Phi_e(\lambda)/d\lambda) \cdot V(\lambda)d\lambda$$

dove $V(\lambda)$ è il fattore spettrale di visibilità, λ la lunghezza d'onda e K_m una costante.

Il flusso luminoso corrisponde alla quantità di luce emessa da una sorgente nell'unità di tempo. La sua unità di misura, il lumen, è il flusso luminoso emesso nell'angolo solido unitario da una sorgente puntiforme, posta al centro di una sfera di raggio unitario, di intensità luminosa pari a 1 candela.

- **Intensità luminosa [7]** (di una sorgente, in una direzione data): Quoziente tra il flusso luminoso $d\Phi$ emesso dalla sorgente entro l'elemento di angolo solido $d\Omega$ contenente la direzione data e detto elemento di angolo solido. Si indica con I e l'unità di misura è la candela [$\text{cd} = \text{lm}/\text{sr}$] (figura 1.2).

$$I = d\Phi/d\Omega$$

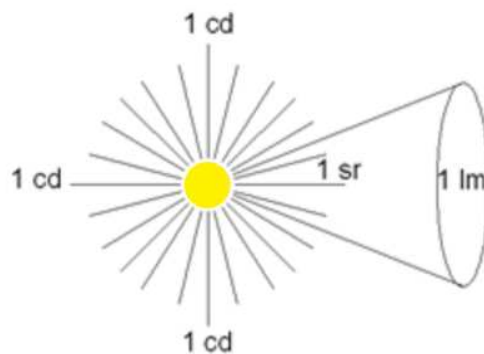


Figura 1.2 Rappresentazione dell'intensità luminosa I [5]

- **Illuminamento [7]** (in un punto di una superficie): Quoziente tra il flusso luminoso $d\Phi_v$, ricevuto da una superficie contenente il punto, e

l'area dA dell'elemento stesso. Si misura in lux [lm/m^2] e si indica con la lettera E (figura 1.3).

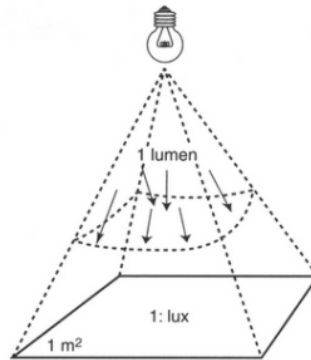


Figura 1.3 Rappresentazione dell'illuminamento E [S1]

- **Luminanza [7]** (in una direzione data di una superficie reale o fittizia): La luminanza, indicata con L , ha le dimensioni di cd/m^2 ed è data dal rapporto tra l'intensità luminosa I emessa, riflessa oppure trasmessa dalla superficie S nella direzione assegnata e l'area apparente della superficie stessa (l'area apparente è la proiezione della superficie S sul piano normale alla direzione dell'intensità I) (figura 1.4):

$$L = dI / (dS \cdot \cos \alpha)$$

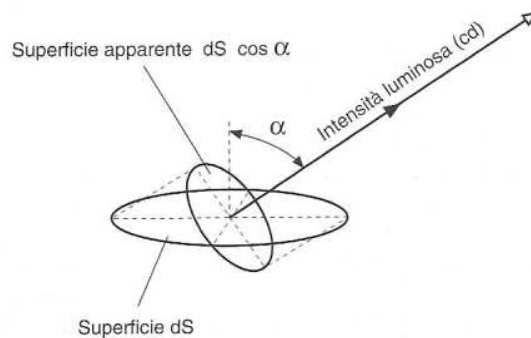


Figura 1.4 Rappresentazione della luminanza L [7]

La luminanza può essere intesa come la quantità di luce che effettivamente colpisce i nostri occhi e che genera il processo

fisiologico della visione. La luminanza diretta è legata alle sorgenti primarie.

Le relazioni che individuano le grandezze suddette sono relative a sorgenti luminose puntiformi ovvero di dimensioni piccole rispetto alla distanza, ad esempio il Sole rispetto alla Terra, una lampada in una stanza, ecc., e non a sorgenti estese come il cielo.

- **Fattore di riflessione [9]:** La luminanza di una superficie perfettamente diffondente o Lambertiana, illuminata da un raggio luminoso (riflessione diffusa) è costante indipendentemente dalla direzione d'osservazione (cfr. figura 1.5). Opposte a questo tipo di superficie sono le superfici perfettamente riflettenti (superfici speculari) che hanno come caratteristica principale quella di riflettere la luce incidente in una direzione simmetrica a quella del raggio incidente. Nella maggior parte dei casi pratici si ha a che fare in generale con superfici miste le cui proprietà fotometriche sono situate tra questi due estremi. Il fattore di riflessione, compreso tra 0 e 1, caratterizza la capacità di riflessione di una superficie (quoziente tra la quantità di luce riflessa e quella ricevuta). Teoricamente il suo valore è 0 per una superficie perfettamente nera e uguale a 1 per una superficie bianca. In realtà i valori estremi non vengono mai raggiunti: a titolo di esempio si consideri che il coefficiente di riflessione di una parete intonacata di bianco difficilmente arriva a 0,85, mentre il materiale con il più alto coefficiente di riflessione, e che per questo viene usato come riferimento, è il solfato di bario con 0,97-0,98 ad una certa λ [8].



Figura 1.5 Riflessione speculare (o diretta) e diffusa [9]

- **Fattore di trasmissione [9]:** Per i materiali che trasmettono la luce possono essere stabilite categorie simili. Si distingue tra materiali trasparenti, attraverso i quali la luce si propaga in modo regolare in analogia con una superficie speculare (esistono comunque processi di diffrazione e rifrazione che deviano la direzione di propagazione delle radiazioni) e materiali translucidi caratterizzati da una luminanza isotropa, indipendentemente dalla direzione di osservazione (analogia con una superficie diffondente). Il fattore di trasmissione caratterizza la capacità di un materiale di trasmettere la luce. Questo fattore è compreso tra 0 e 1 (quoziente tra la quantità di luce trasmessa e quella ricevuta). Si fa una distinzione tra il fattore di trasmissione regolare ed il fattore di trasmissione diffusa, in modo da differenziare i due tipi di propagazione della luce nei materiali (il fattore di trasmissione diffusa di un vetro perfettamente trasparente corrisponde a 0; il fattore di trasmissione regolare è uguale a 0.88).

1.1.3. Le leggi fondamentali [7]

Ogni punto di una sorgente di luce, primaria o secondaria, deve essere considerato sorgente di onde sferiche con centro in quel punto, con area del fronte d'onda che, nel corso della propagazione, aumenta proporzionalmente al quadrato della distanza dal punto sorgente. Dato che l'energia emessa è uniformemente distribuita sulla superficie sferica, si può enunciare:

l'energia che attraversa un elemento di superficie di area unitaria di un fronte d'onda sferico con centro in un punto luminoso varia inversamente al quadrato della sua distanza dal punto luminoso (legge del quadrato delle distanze).

Dato che la direzione di propagazione è sempre perpendicolare al fronte d'onda, un elemento di superficie comunque orientato riceve energia in ragione della proiezione di quell'elemento nella direzione di propagazione. Ne segue che:

l'energia che attraversa un elemento di superficie è proporzionale al coseno dell'angolo fra la normale all'elemento di superficie e la direzione di propagazione (legge del coseno).

Un'applicazione immediata delle leggi sopra enunciate permette di calcolare l'illuminamento E su un elemento di superficie di area dA (figura 1.6) dovuto a una sorgente luminosa puntiforme P di intensità luminosa I . Su dA incide un flusso luminoso $d\Phi$ pari a $I \cdot d\Omega$, in cui $d\Omega$ è l'angolo solido con cui si vede dA da P . È facile verificare che $d\Omega = dA \cdot \cos\theta / r^2$, in cui r è la distanza tra P e dA , θ è l'angolo fra la direzione di propagazione e la normale a dA . Ne segue:

$$E = I \cdot \cos\theta / r^2$$

Se un elemento di superficie di area dA , considerato puntiforme, emette radiazioni luminose in tutte le direzioni con intensità luminosa pari a:

$$dI(\theta) = dI_0 \cdot \cos\theta$$

in cui I_0 è l'intensità luminosa emessa perpendicolarmente a dA . La luminanza L dell'elemento di area dA è indipendente dalla direzione di osservazione e vale:

$$L = dI_0/dA$$

Ciò significa che:

l'intensità luminosa di un elemento di superficie la cui luminanza è la stessa in tutte le direzioni dell'emisfero al di sopra della superficie vale $I(\theta) = I_0 \cdot \cos\theta$, in cui $I(\theta)$ e I_0 sono le intensità luminose dell'elemento di superficie in una direzione inclinata rispettivamente dell'angolo ϑ rispetto alla normale alla superficie e nella direzione di questa normale (legge di Lambert).

La radiazione uscente da dA può essere prodotta per emissione da una sorgente di luce primaria, ma anche per trasmissione o diffusione da parte di una sostanza illuminata. In questo secondo caso, se E è l'illuminamento su dA provocato da un fascio di luce proveniente da una qualsiasi direzione, e se l'intensità luminosa emessa da quella sostanza si comporta come detto sopra, la luminanza L dell'elemento dA risulta pari a:

$$L = \rho \cdot E / \pi$$

in cui ρ è il fattore di riflessione di quella superficie. Un dispositivo che ubbidisce alla legge di Lambert viene chiamato *diffusore uniforme* (o anche comunemente "lambertiano"); per *diffusore perfetto* si intende inoltre un diffusore uniforme che diffonde totalmente il flusso luminoso che riceve, senza assorbirne ($\rho=1$). Molte sostanze di comune impiego sono simili a diffusori uniformi (le vernici opache, gli schermi per proiezione ecc.). Si noti che una sostanza non può essere caratterizzata dal fattore di riflessione se non ubbidisce alla legge di Lambert (ad esempio un manto stradale non è un diffusore uniforme).

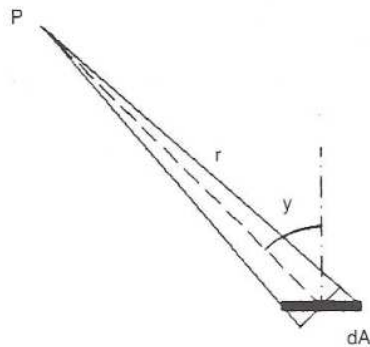


Figura 1.6 Parametri geometrici per il calcolo dell'illuminamento [7]

1.1.4. Le sorgenti luminose

Lo sviluppo di nuove tecnologie ha consentito di realizzare una gamma notevole di lampade, destinate alle più differenti applicazioni. Tuttavia le sorgenti luminose elettriche possono classificarsi in sole tre grandi categorie:

- *a irradiazione per effetto termico*: lampade a incandescenza;
- *a scarica nei gas e nei vapori*: lampade fluorescenti, a vapori di mercurio, di sodio, ecc.;
- *a emissione di fotoni*: LED.

A differenza dei LED che, visto il forte sviluppo in atto, non possono ancora essere classificati con rigore, le lampade tradizionali a incandescenza e a scarica sono tecnologie consolidate e schematizzabili (figura 1.7):

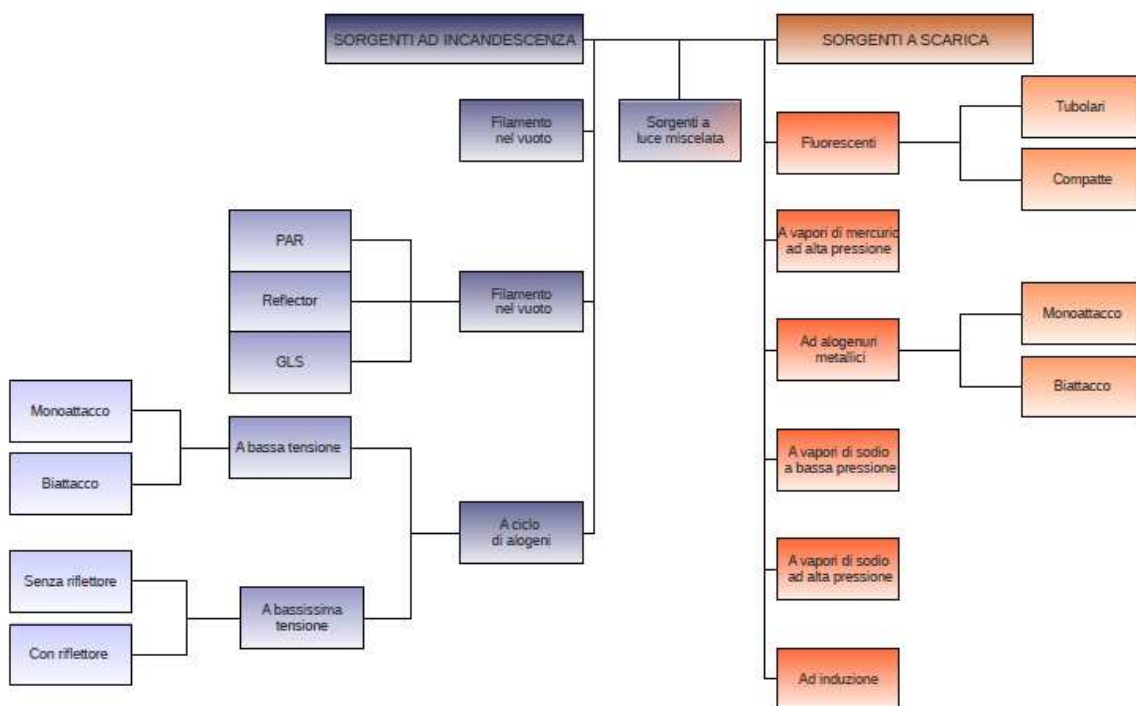


Figura 1.7 Schema delle tradizionali sorgenti luminose¹

1.1.5. Gli apparecchi di illuminazione [10]

Gli apparecchi di illuminazione hanno il compito di distribuire in modo opportuno il flusso emesso dalle lampade e devono rispondere a particolari requisiti illuminotecnici, elettrici e meccanici. I prodotti di illuminazione vengono suddivisi in apparecchi per esterni e apparecchi per interni.

La curva fotometrica rappresenta graficamente la direzione e l'intensità della luce emessa dalla sorgente luminosa. A qualsiasi oggetto che emette luce può essere associata una curva fotometrica, sia esso una semplice lampadina, un apparecchio illuminante o uno schermo che riflette luce.

Rappresentando l'intensità luminosa I , misurata in una determinata direzione, mediante un segmento di lunghezza proporzionale ad essa ed uscente dalla sorgente o dall'apparecchio, si ottiene una superficie chiusa che è il luogo degli estremi degli infiniti segmenti. Il volume racchiuso da questa superficie prende il nome di *solido fotometrico* (figura 1.8).

¹ Riproduzione fedele dello schema in [7]

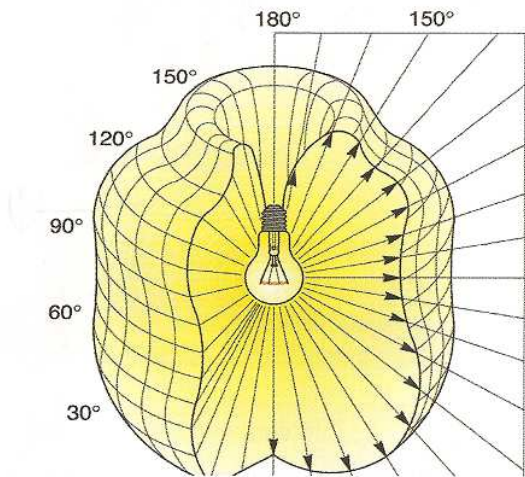


Figura 1.8 Rappresentazione del solido fotometrico di una sorgente [10]

Intersecando il solido con dei piani, di solito in direzione longitudinale e trasversale rispetto alla lampada, si ottengono le *curve fotometriche*, rappresentabili in forma cartesiana o polare (figura 1.9).

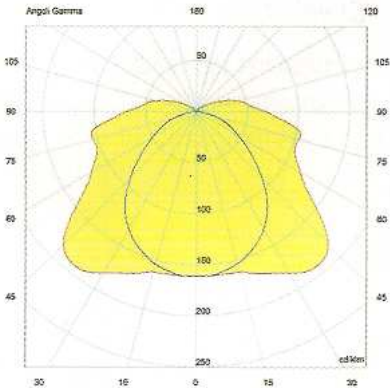


Diagramma polare

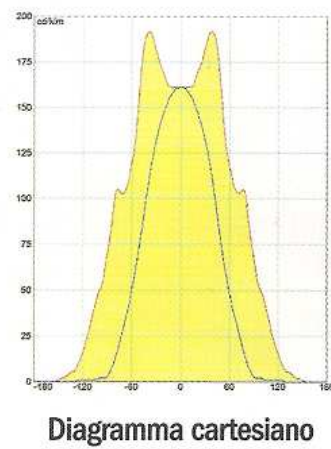


Figura 1.9 Diverse rappresentazioni delle curve fotometriche [10]

Altre possibili rappresentazioni sono il diagramma isocandela e le tabelle delle intensità luminose.

Le principali caratteristiche fotometriche di un apparecchio d'illuminazione sono:

- *intensità luminosa massima* (I_{\max}) emessa dal proiettore;
- *apertura del fascio luminoso*: stretto medio o largo (figura 1.10);
- *emissione luminosa*: simmetrica, asimmetrica o circolare (o rotosimmetrica) (figura 1.11);
- *distribuzione percentuale del flusso*: diretta, semi-diretta, diffusa, diretta indiretta, semi-indiretta, indiretta (figura 1.12);
- *rendimento ottico*: rapporto tra il flusso uscente dall'apparecchio ed il flusso emesso dalla sorgente nuda.

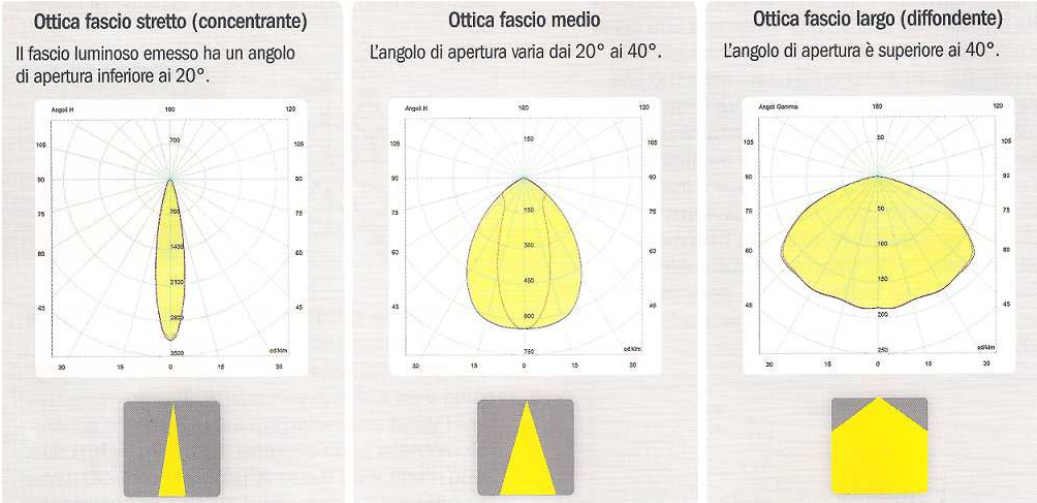


Figura 1.10 Angolo di apertura delle ottiche [10]

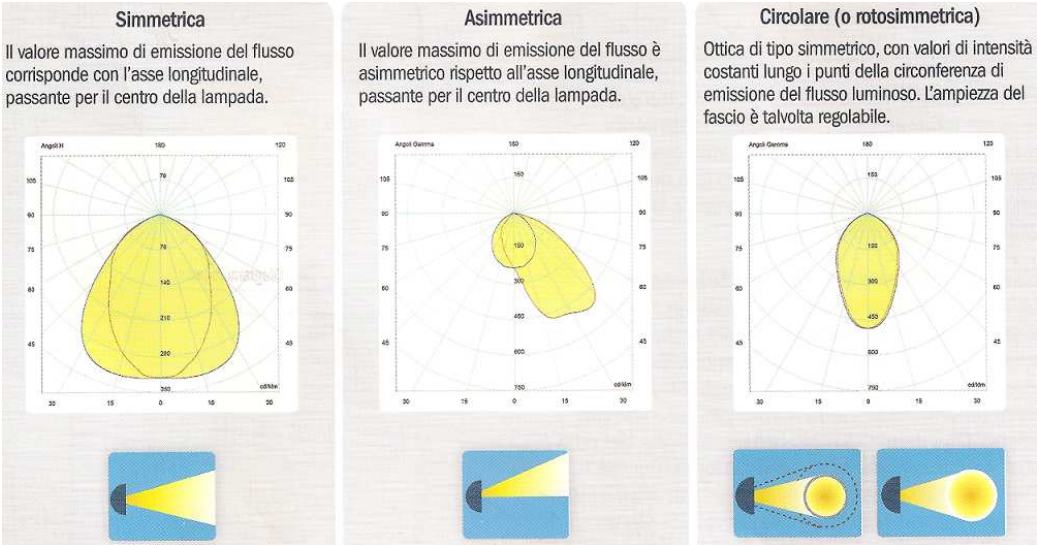


Figura 1.11 Emissione luminosa degli apparecchi [10]



Figura 1.12 Distribuzione del flusso totale [10]

1.2. I sistemi di controllo della luce

I sistemi di controllo della luce possono essere di comando o di regolazione. I primi gestiscono le accensioni e gli spegnimenti, i secondi permettono di variare il flusso luminoso in base alle esigenze. I dispositivi di comando e di regolazione si suddividono a loro volta in manuali e automatici, oppure in locali e centralizzati.

1.2.1. Funzioni svolte dai sistemi di controllo

L'interruttore è stato fino a pochi anni fa l'unico dispositivo per controllare l'illuminazione. Oggi esistono sistemi più sofisticati che permettono miglioramenti dal punto di vista del risparmio energetico, del comfort e della flessibilità di utilizzo dei dispositivi. Le principali funzioni svolte dai sistemi di controllo sono:

1. *Pianificazione delle accensioni e degli spegnimenti*: effettuati da un orologio temporizzatore o a calendario;
2. *Sensori di presenza*: dispositivi che accendono e spengono le luci quando viene individuata la presenza di una persona all'interno dell'ambiente. I sistemi più utilizzati si basano su ultrasuoni o raggi infrarossi, talvolta combinati per una individuazione più affidabile;
3. *Adattamento alla luce diurna*: riduzione dei livelli di illuminamento artificiale in presenza di luce solare. La regolazione avviene tramite fotosensori che in base alla luce in ingresso comandano attuatori on/off o dimmer. I più diffusi sono gli interruttori crepuscolari a fotoresistenza. La figura 1.13 mostra il funzionamento di un interruttore crepuscolare di tipo bimetallico. La fotoresistenza è costituita da un materiale (in genere solfuro di cadmio) con la caratteristica di avere una resistenza elettrica inversamente proporzionale al flusso luminoso che lo colpisce;

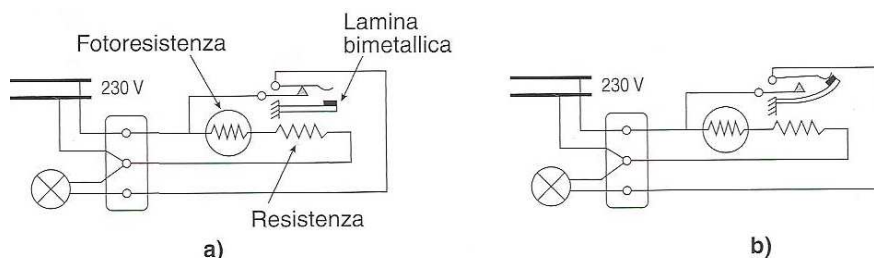


Figura 1.13 Interruttore crepuscolare on a) e off b) [7]

Nel caso a), situazione notturna, la fotoresistenza, che non è colpita dalla luce, assume un valore di resistenza elevato che impedisce il passaggio di una corrente sufficiente a riscaldare la resistenza R della lamina bimetallica; nel caso b), invece, situazione diurna, la fotoresistenza, che è colpita dalla luce, lascia passare una corrente tale da riscaldare e quindi deformare la lamina escludendo il contatto da cui passa l'alimentazione delle lampade;

4. *Scenari di luce*: permettono di impostare la luminosità dell'ambiente a seconda dell'attività svolta. E' il caso, ad esempio, delle sale riunioni, nelle quali può essere necessario, durante le conferenze, abbassare le luci per assistere a videoproiezioni. La regolazione può avvenire per mezzo di semplici interruttori o di dimmer. Altre situazioni, come gli spettacoli teatrali o i concerti, possono richiedere la creazione di scenari di luci colorate.
5. *Limitazioni dei carichi*: sistema che monitorizza in modo continuo il consumo di energia dovuto all'illuminazione e interviene con spegnimento completo o parziale di alcuni apparecchi in caso di necessità.
6. *Costanza dei flussi luminosi*: tutte le sorgenti luminose, durante la loro vita utile, riducono la quantità di luce emessa (lumen). Per compensare questa perdita un dispositivo (fotocellula) misura in modo continuo il livello di luminosità e regola il flusso degli apparecchi per mantenere i valori di progetto. Inizialmente la sorgente funziona ad un livello inferiore al massimo per poi aumentare progressivamente la potenza raggiungendo il 100% a fine vita (figura 1.14).

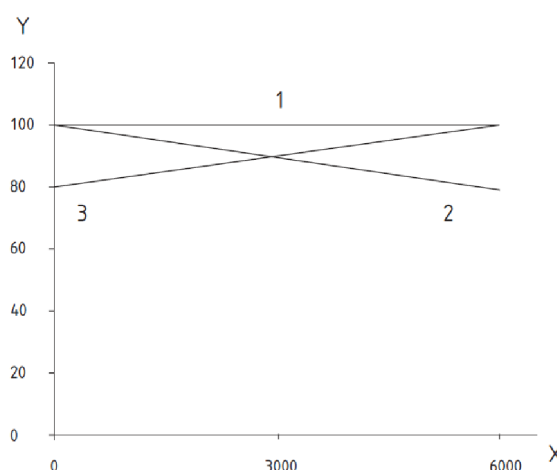


Figura 1.14 Decadimento della lampada e compensazione (UNI EN 15193)

La X in ascissa rappresenta il tempo in ore, la Y in ordinata i valori relativi delle varie grandezze, in percentuale. La retta contrassegnata con il numero 2 è il fattore di manutenzione e decresce nel tempo. Per compensare il decadimento aumenta progressivamente la potenza, linea 3, in modo da mantenere costante l'intensità luminosa, linea 1.

7. *Preheat e top-set*: la vita delle lampade si accorcia sensibilmente se la potenza, e quindi la temperatura della lampada, viene aumentata troppo repentinamente o se è mantenuta a lungo al valore massimo. A scopo conservativo si possono impostare dei livelli minimi e massimi di funzionamento, in modo da non fare raffreddare eccessivamente la lampada nel primo caso, e di non sforzarla troppo nel secondo. Il livello minimo è solitamente tarato tra il 5 e il 10 %, valore in corrispondenza del quale la lampada sembra praticamente spenta.
8. *Regolazione della temperatura del colore (Dynamic lighting)*: recenti studi hanno dimostrato che fisiologicamente l'uomo predilige, nelle varie ore della giornata, oltre a certo livelli di illuminamento, anche temperature della luce diverse (figura 1.15).

Inserendo negli apparecchi lampade a fluorescenza a due diverse temperature si possono ricreare gli effetti desiderati. Invertendo semplicemente l'accensione delle lampade il passaggio da una temperatura all'altra è repentino, dimmerandole si ottiene invece una variazione più graduale e quindi meno fastidiosa per la vista;



Figura 1.15 Variazione della temperatura del colore ideale nell'arco della giornata [S2]

9. *Accensione e spegnimento gradual*i: variazioni troppo rapide dell'intensità della luce causano abbagliamento molesto e sono da evitare. Invece dei tradizionali sistemi di accensione on/off è quindi consigliabile l'utilizzo di sistemi di automazione che permettano l'accensione e lo spegnimento graduale delle luci nel giro di qualche

secondo. Questo provvedimento permette inoltre di preservare i corpi illuminanti e di allungarne la vita.

Il controllo delle luci avviene pertanto per motivi di carattere pratico, estetico e di risparmio energetico, nonché, gli ultimi due casi citati ne sono un esempio, per motivi fisiologici.

1.2.2. Modalità di regolazione [7]

Il componente fondamentale di regolazione è il dimmer. I primi dimmer, antecedenti all'avvento dell'elettronica, si basavano sul principio di variare l'ampiezza della tensione di alimentazione (autotrasformatori a rapporto variabile) oppure l'intensità della corrente della lampada (reattori variabili, amplificatori magnetici ecc.). I moderni regolatori elettronici operano invece in base al principio di ridurre a frazioni di periodo il tempo di circolazione della corrente (si parla di regolazione di fase per AC e di PWM per DC). In questo modo il funzionamento delle luci è più efficiente perché non viene dispersa potenza. Considerando entrambe le generazioni di dimmer, le tecniche di regolazione più diffuse sono quattro:

- inserire un resistore (variabile) o un avvolgimento a induttanza variabile in serie alla lampada. E' il metodo più semplice ma anche quello più inefficiente perché una parte non trascurabile della potenza viene dissipata in calore. Dimmer di questa tipo, quando utilizzati per lampade ad elevata potenza, sono quindi di grandi dimensioni e necessitano di un sistema di raffreddamento ad aria;
- collegare la lampada ad un trasformatore a tensione variabile;
- tagliare la forma d'onda alternata della corrente d'alimentazione per mezzo di un circuito elettronico. Questo dispositivo si chiama regolatore di fase o chopper e rientra nella categoria dei dimmer moderni. Poiché il suo funzionamento si basa sullo switching e non sulla variazione del potenziale, la potenza dissipata è quasi nulla e il dimmeraggio risulta praticamente istantaneo e più semplice da effettuare in remoto. Per la corrente continua il sistema è concettualmente lo stesso, solo che l'onda, invece di essere sinusoidale, è quadra;
- aumentare la frequenza di alimentazione così da aumentare l'impedenza

dell'induttore.

Quelle appena descritte sono le possibili uscite dei dimmer verso le luci. In ingresso invece si possono avere vari tipi di segnali, analogici o digitali, per il controllo remoto dei dispositivi. In questo caso l'impianto luci può far parte di un impianto domotico centrale più complesso, gestito ad esempio da PC, che può comprendere anche molti altri sistemi come il condizionamento dell'aria, gli accessi, le tapparelle, la video sorveglianza, etc. (figura 1.16).

Alcuni sistemi di controllo utilizzati per le luci sono comuni ad altre applicazioni, altri sono specifici di questo settore. I più diffusi sono:

- *regolazione analogica 1-10 V*: è uno dei primi e più semplici sistemi di controllo delle luci. Consiste in una corrente continua che varia il voltaggio tra 1 e 10 V (o 0-10 V). Il driver regola l'output in modo che le lampade controllate funzionino al 100% quando l'ingresso è 10 V e siano spente per voltaggio nullo. Per valori intermedi il dimmer può essere programmato in modo da presentare in output curve lineari rispetto al voltaggio in ingresso, alla potenza in uscita e al livello della luce, effettiva o percepita, oppure curve non lineari con andamenti differenti a seconda delle applicazioni;
- *sistemi bus*: ne esistono di molti tipi essendo spesso implementati all'interno delle singole aziende. Una versione molto diffusa, soprattutto a livello industriale, è il Modbus, ormai risalente a molti anni fa ma ancora ampiamente utilizzato per la semplicità e la robustezza del segnale. Come gli altri sistemi bus, anche il Modbus è di tipo seriale e la trasmissione del segnale si basa su una differenza di potenziale tra due cavi;
- *DMX (Digital Multiplex)*: è un protocollo digitale utilizzato nel campo dei led. Il vantaggio principale dei protocolli digitali è la possibilità di gestire molti canali con un solo collegamento mentre in analogico è necessario un collegamento per ogni driver, con notevoli problemi di cablaggio nel caso di impianti complessi. L'elevata velocità del segnale permette inoltre di creare scenari di luce molto complessi, utilizzati ad esempio nel campo dello spettacolo;
- *DALI (Digitable Addressable Lighting Interface)*: Il DALI è un protocollo digitale come il DMX, ma a differenza del primo è generalmente utilizzato per gestire lampade a fluorescenza e permette regolazioni di

on/off e di dimmeraggio. Anche il DALI è in grado di controllare simultaneamente più sorgenti assegnando ad ognuna di esse, come evidente dall'acronimo, un indirizzo indipendente;

- sistemi wireless (es. Z-wave).

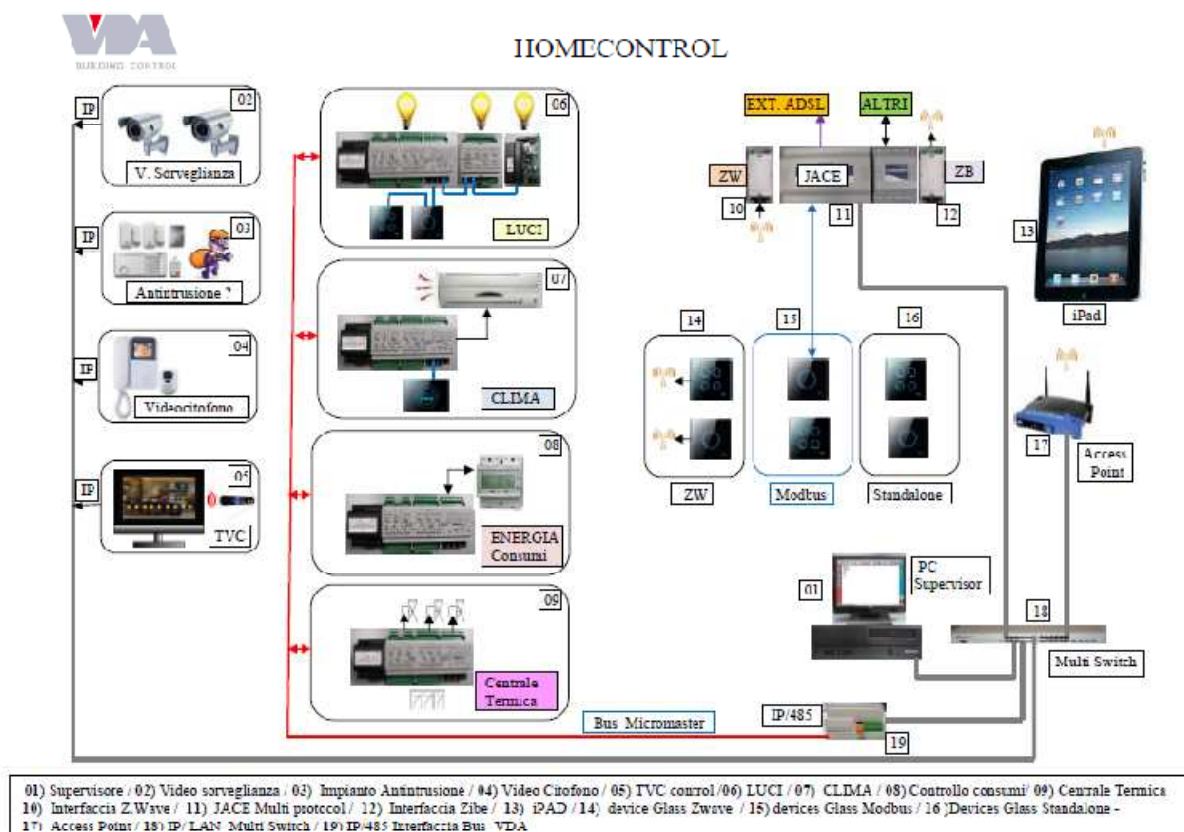


Figura 1.16 Esempio di sistema domotico integrato

© Copyright: VDA Elettronica

Per essere in grado di leggere e di convertire il segnale digitale in un opportuno comando per le luci, i moderni driver sono dotati di microprocessore. L'utilizzo di segnali digitali ha il vantaggio non solo di permettere controlli più sofisticati ma anche di verificare più facilmente eventuali guasti nell'impianto di illuminazione attraverso feedback digitali prodotti direttamente dalle lampade. I sistemi digitali, inoltre, essendo programmabili e interfacciabili con PC, facilitano enormemente la creazione e la gestione degli scenari.

1.3. Riferimenti normativi

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 in Italia.

Le norme nazionali, quando il prefisso UNI è seguito dalla sigla EN, sono il recepimento italiano di norme internazionali.

Le norme UNI alle quali si fa riferimento per lo svolgimento della tesi e delle quali si riporta il sommario originale più un eventuale paragrafo di approfondimento sui contenuti, sono:

1. **Norma:** UNI EN 12665

Anno: 2004

Titolo: Luce e illuminazione. Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici

Sommario: La norma definisce i termini fondamentali per l'uso in tutte le applicazioni illuminotecniche; termini specialistici con applicazioni limitate sono forniti nelle singole norme.

2. **Norma:** UNI EN 12464-1

Anno: 2004

Titolo: Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni.

Sommario: La norma specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro in interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva. Sono considerati tutti i compiti visivi abituali, inclusi quelli che comportano l'utilizzo di attrezzature munite di videotermini.

Contenuti:

I principali parametri che caratterizzano l'ambiente luminoso sono:

- *distribuzione delle luminanze:* influenza il livello di adattamento degli occhi che a sua volta influenza la visibilità del compito. Per ottenere un corretto bilanciamento sono da evitare luminanze eccessive che causano abbagliamento, contrasti di luminanza troppo elevati che provocano affaticamento e, allo stesso tempo, luminanze e contrasti troppo bassi che rendono l'ambiente di lavoro poco stimolante.
Oltre alla luminanza diretta prodotta dalle lampade si deve tenere in

considerazione la porzione indiretta dovuta alla luce riflessa dalle superfici del locale. Una superficie riflette la luce in modo diverso a seconda del coefficiente di riflessione che la contraddistingue. Il coefficiente di riflessione è funzione del colore e del materiale della superficie e i valori consigliati per le principali superfici del locale sono (tabella 1.1):

Superficie	da	a
soffitto	0,6	0,9
pareti	0,3	0,8
piani di lavoro	0,2	0,6
pavimento	0,1	0,5

Tabella 1.1 Coefficienti di riflessione consigliati per alcune superfici

- *illuminamento*: l'illuminamento e la sua ripartizione sulla zona del compito e sulla zona circostante influenzano notevolmente la percezione del compito visivo e la sua esecuzione. Stabilito il valore di illuminamento opportuno per una determinata zona di compito, il livello di illuminamento nella zona circostante può essere inferiore ma deve comunque rispettare dei vincoli (tabella 1.2):

illuminamento del compito [lux]	illuminamento delle zone immediatamente circostanti [lux]
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	E_{compito}

Tabella 1.2 Legame tra illuminamento del compito e della zona circostante

Oltre al rispetto del valore di illuminamento medio, è importante, per evitare l'abbagliamento molesto, che i singoli valori di illuminamento distribuiti sulla superficie in esame siano sufficientemente uniformi. L'uniformità, definita come E_{min}/E_m , deve essere $\geq 0,7$ nella zona del compito e almeno $\geq 0,5$ nella zona circostante.

- *abbagliamento*: può essere molesto, se causa affaticamento, o debilitante se impedisce il corretto svolgimento del compito, ed è causato da valori puntuali o gradienti di luminanza non idonei. L'abbagliamento molesto prodotto dai corpi illuminanti è identificato dall'UGR (Unified Glare Rating), parametro valutabile, come previsto dalla CIE 117, attraverso tabelle fornite

dai costruttori degli apparecchi.

- *direzione della luce;*
- *resa dei colori e colore apparente della luce:* l'apparenza del colore di una lampada si riferisce alla cromaticità della luce emessa. Si misura solitamente in K, si distingue in calda, intermedia e fredda, e la sua scelta dipende da fattori pratici, estetici e psicologici. La resa del colore è invece 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. Il parametro di riferimento è in questo caso l'indice generale di resa del colore R_a : il valore massimo è 100 e decresce al diminuire della qualità della resa del colore.
- *sfarfallamento ed effetti stroboscopici;*
- *luce diurna:* il più delle volte l'illuminazione è mista, con il contributo integrato di luce naturale e artificiale. Un buon progetto illuminotecnico garantisce elevate prestazioni, comfort visivo e sicurezza, ottimizzando la sinergia tra i due sistemi di illuminazione.

La normativa UNI EN 12464-1 riporta, per una lunga lista di attività, i valori consigliati di illuminamento sulla superficie del compito, UGR massimo e R_a minimo, più alcune note aggiuntive per specifiche situazioni. L'illuminamento è inteso come valore medio mantenuto e si riferisce cioè all'istante immediatamente precedente all'intervento manutentivo quando l'illuminamento, in seguito all'usura delle lampade e alla scarsa pulizia delle plafoniere, è minimo. Si garantisce così il rispetto della normativa in ogni momento.

3. **Norma:** UNI 11165

Titolo: Luce e illuminazione. Illuminazione di interni. Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR.

Anno: 2005

Sommario: La norma specifica i criteri per il calcolo dell'indice di abbagliamento UGR (Unified Glare Rating – Indice unificato di abbagliamento) per interni considerando il solo contributo dell'illuminazione artificiale.

Contenuti:

Luminanze troppo elevate degli apparecchi possono causare, direttamente o indirettamente, abbagliamento molesto (discomfort glare) che, anche se non pregiudica la vista degli oggetti, arreca disturbo e, nel tempo, causa affaticamento della vista.

Per non avere abbagliamento diretto l'UGR non deve mai superare il valore massimo fissato dalla norma UNI EN 12464-1. I valori possibili sono compresi tra 10 (se inferiori si assume l'indicazione < 10) e 30, in corrispondenza del quale si ha massima probabilità di disagio. L'applicazione dell'UGR è limitata a sorgenti di luce che determinano un angolo solido compreso tra 0,1 sr e 0,0003 sr.

L'UGR può essere valutato in due modi: analiticamente o, come prescritto dalla CIE 117, per via tabellare, con il prospetto completo o quello ridotto. Sebbene il programma di progettazione illuminotecnica DIALUX fornisca automaticamente i valori di UGR per qualsiasi osservatore, è utile considerare anche gli altri due procedimenti al fine di conoscere i parametri che influenzano l'UGR e per capire come usare i prospetti forniti dai produttori degli apparecchi.

- Metodo analitico

La formula per calcolare l'UGR è la seguente:

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right)$$

dove L_b è la luminanza di sfondo, L la luminanza dell'apparecchio, ω l'angolo solido e p l'indice di posizione di Guth calcolabile con una espressione funzione di σ e τ oppure da tabelle a partire da T, H e R . Le incognite citate sono gli angoli e le distanze riportati in figura 1.17.

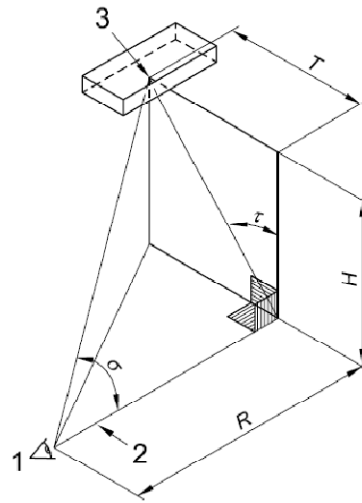


Figura 1.17 Grandezze utili al calcolo dell'indice di posizione di Guth

- Metodo tabellare

Il prospetto completo (tabella 1.3), rispetto a quello ridotto, ha il vantaggio di richiedere un numero di correzioni inferiore. Le uniche correzioni da apportare sono quelle relative alle interdistanze S degli apparecchi, alle potenze e al flusso nominale C_ϕ . Il valore da correggere si ottiene incrociando la colonna dei coefficienti di riflessione delle superfici con quella relativa alle dimensioni del locale, fornite in funzione di H , che è l'altezza utile che va dall'occhio dell'osservatore, posto ad un'altezza di 1,2 m da terra, al centro dell'apparecchio considerato.

Valutazione di abbagliamento secondo UGR											
ρ Soffitto		70	70	50	50	30	70	70	50	50	30
ρ Pareti		50	30	50	30	30	50	30	50	30	30
ρ Pavimento		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Dimensioni del locale X Y		Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade					Linea di mira parallela all'asse delle lampade				
2H	2H	16.7	17.7	16.9	17.9	18.1	18.3	19.3	18.5	19.5	19.7
	3H	16.5	17.4	16.8	17.6	17.9	18.1	19.0	18.4	19.2	19.5
	4H	16.4	17.3	16.8	17.5	17.8	18.0	18.9	18.4	19.1	19.4
	6H	16.4	17.1	16.7	17.4	17.7	18.0	18.7	18.3	19.0	19.3
	8H	16.3	17.1	16.7	17.4	17.7	17.9	18.7	18.3	19.0	19.3
4H	12H	16.3	17.0	16.6	17.3	17.6	17.9	18.6	18.3	18.9	19.2
	2H	16.7	17.5	17.0	17.8	18.1	18.2	19.0	18.5	19.2	19.5
	3H	16.6	17.3	16.9	17.6	17.9	18.0	18.7	18.4	19.0	19.3
	4H	16.5	17.1	16.9	17.4	17.8	17.9	18.5	18.3	18.9	19.2
	6H	16.4	16.9	16.8	17.3	17.7	17.9	18.4	18.3	18.7	19.1
8H	8H	16.4	16.8	16.8	17.2	17.6	17.8	18.3	18.2	18.7	19.1
	12H	16.3	16.8	16.8	17.2	17.6	17.8	18.2	18.2	18.6	19.0
	4H	16.4	16.8	16.8	17.2	17.6	17.8	18.3	18.2	18.7	19.1
	6H	16.3	16.7	16.8	17.1	17.5	17.7	18.1	18.2	18.5	19.0
	8H	16.3	16.6	16.7	17.0	17.5	17.7	18.0	18.2	18.5	18.9
12H	12H	16.2	16.5	16.7	17.0	17.5	17.6	17.9	18.1	18.4	18.9
	4H	16.3	16.8	16.8	17.2	17.6	17.8	18.2	18.2	18.6	19.0
	6H	16.3	16.6	16.7	17.0	17.5	17.7	18.0	18.2	18.5	18.9
	8H	16.2	16.5	16.7	17.0	17.5	17.6	17.9	18.1	18.4	18.9
	8H	16.2	16.5	16.7	17.0	17.5	17.6	17.9	18.1	18.4	18.9
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S											
S = 1.0H		+1.4 / -3.3					+1.0 / -1.1				
S = 1.5H		+2.8 / -15.0					+2.2 / -11.9				
S = 2.0H		+4.4 / -35.8					+3.8 / -30.2				
Tabella standard		BK00					BK00				
Addendo di correzione		-3.4					-1.8				
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 5200lm Flusso luminoso sferico											

Tabella 1.3 Prospetto completo per il calcolo dell'abbagliamento

4. Norma: UNI EN 15193

Titolo: Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione

Anno: 2008

Sommario: La norma specifica la metodologia di calcolo del consumo energetico degli impianti di illuminazione in interni di edifici e definisce un indicatore numerico dei requisiti energetici per l'illuminazione da utilizzare per la certificazione energetica. Essa può essere usata sia per gli edifici esistenti sia per gli edifici nuovi o in ristrutturazione.

La norma fornisce anche i riferimenti su cui basare i valori limite di energia previsti per l'illuminazione. Inoltre fornisce una metodologia per il calcolo dell'energia istantanea consumata per l'illuminazione per la stima dell'efficienza energetica globale dell'edificio.

Sono escluse le potenze parassite non incluse negli apparecchi.

Contenuti:

In questa normativa viene introdotto il LENI (*Lighting Energy Numeric Indicator*), un parametro utile per confrontare direttamente i consumi energetici per l'illuminazione di edifici con funzioni simili ma diverse dimensioni e configurazioni.

E' definito:

$$LENI = \frac{W}{A} \left[\frac{kWh}{m^2 anno} \right]$$

dove W è l'energia totale annua consumata per l'illuminazione e A è la superficie *utile* totale.

W è dato dalla somma dell'energia annua utilizzata (W_L) e dell'energia annua parassita (W_P) dovuta all'impianto di emergenza e al sistema di controllo.

Questi due termini possono essere valutati in tre modi (schematizzati in figura 1.18), due teorici e uno, l'ultimo, empirico:

- quick method basato su dati standard
- comprehensive method basato su valutazioni più accurate
- misurazione effettiva dei consumi

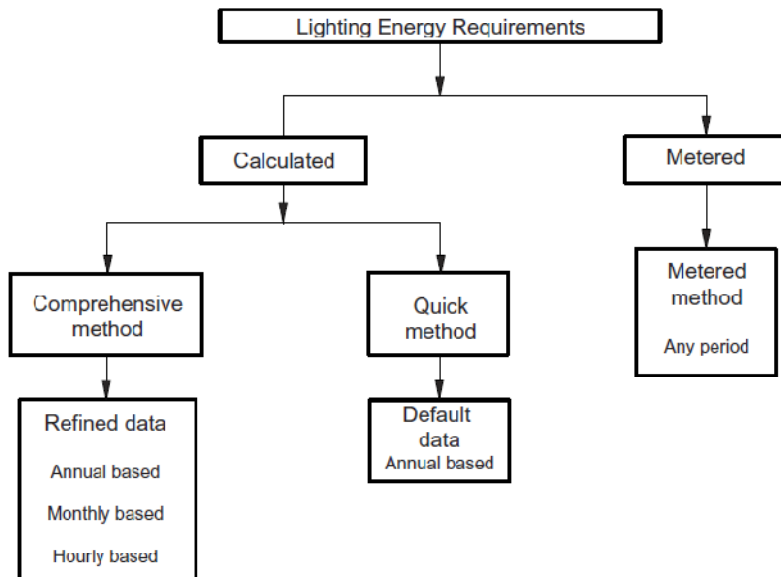


Figura 1.18 Metodi per il calcolo del LENI

Per una descrizione più accurata della procedura usata per il calcolo del LENI si rimanda al capitolo 5 delle conclusioni.

5. **Norma:** UNI EN 15232

Titolo: Prestazione energetica degli edifici. Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici.

Anno: 2007

Sommario:

La norma 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.

Contenuti:

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*), utile ad esempio per la rilevazione dei guasti, hanno un grosso impatto sulle prestazioni energetiche dell'edificio stesso.

A seconda del livello tecnologico dei componenti, i sistemi sono riconducibili a quattro classi:

- 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.

Questa classificazione vale anche per gli impianti di riscaldamento, di ventilazione e di condizionamento (*HVAC, Heating, Ventilation and Air Conditioning*) oltre a valere ovviamente per il sistema di illuminazione (tabella 1.4). Gli edifici sono divisi in residenziali e non residenziali. Per rientrare in una

classe superiore tutti i sistemi installati devono corrispondere a caselle ombreggiate. Salendo di classe le caselle ombreggiate, e quindi i sistemi corrispondenti, diminuiscono e diventano di conseguenza più stringenti i requisiti per appartenere a tale classe.

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
LIGHTING CONTROL									
Occupancy control									
0	Manual on/off switch								
1	Manual on/off switch + additional sweeping extinction signal								
2	Automatic detection Auto On / Dimmed								
3	Automatic detection Auto On / Auto Off								
4	Automatic detection Manual On / Dimmed								
5	Automatic detection Manual On / Auto Off								
Daylight control									
0	Manual								
1	Automatic								

Tabella 1.4 Classificazione dei sistemi di automazione

Se si dispone ad esempio del sistema 3 “Automatic detection Auto On/ Auto Off” il sistema è classificabile come A. Se però il Daylight control è manuale si ricade nella classe di prestazione energetica B. Pertanto, per essere di classe energetica A dal punto di vista dell’illuminazione, devono essere automatici entrambi i sistemi di controllo.

Sono due i metodi per valutare numericamente l’impatto dell’automazione sui consumi energetici: il detailed method e il BAC Factor method (figura 1.19). Quest’ultimo, semplificato rispetto al primo, consiste nel valutare i consumi energetici per l’illuminazione (ma anche per gli altri impianti) attraverso un coefficiente moltiplicativo rispetto a un caso standard appartenente alla classe C:

$$W_{L,BAC} = W_L \cdot \frac{f_{BAC,el}}{f_{BAC,el,ref}}$$

dove,

$W_{L,BAC}$ è l’energia elettrica per l’illuminazione riferita a una classe di efficienza
 W_L è l’energia elettrica per l’illuminazione

$f_{BAC,el}$ è il BAC efficiency factor
 $f_{BAC,el,ref}$ è il BAC efficiency factor di riferimento

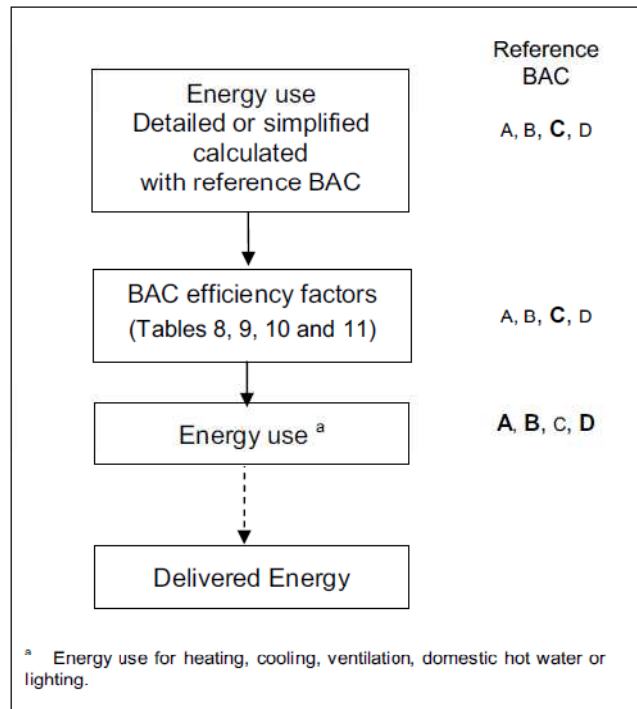


Figura 1.19 Procedimento per il calcolo del BAC factor

Ovviamente il BAC factor sarà < 1 per le classi A e B e > 1 per la classe D. Vale infatti la seguente relazione:

$$D > C = 1 > B > A$$

La norma prescrive dei coefficienti standard ma per valutazioni più precise si deve fare riferimento alla norma UNI EN 15193.

6. **Norma:** UNI EN 1838

Titolo: Applicazione dell'illuminotecnica. Illuminazione di emergenza

Anno: 2000

Sommario: La norma definisce i requisiti illuminotecnici dei sistemi di illuminazione di emergenza, installati in edifici o locali in cui tali sistemi sono richiesti.

Essa si applica principalmente ai luoghi destinati al pubblico o ai lavoratori.

Contenuti:

L'illuminazione di emergenza è prevista per essere utilizzata in caso di blackout ed è quindi alimentata da una sorgente di energia indipendente.

Il termine illuminazione di emergenza ha un significato generico, di cui esistono numerose applicazioni specifiche (figura 1.20).

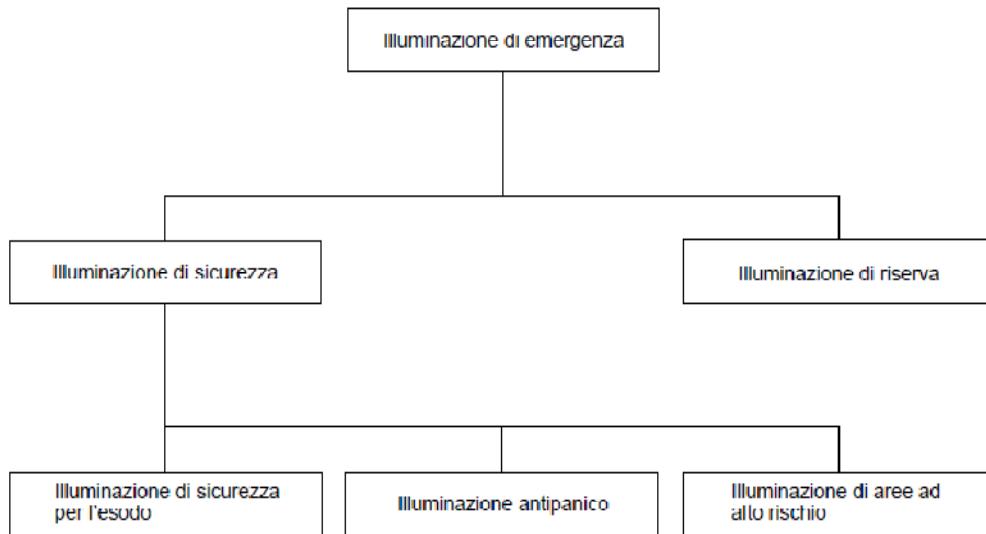


Figura 1.20 Tipologie di illuminazione di emergenza

L'obiettivo dell'illuminazione di sicurezza è 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, illuminate secondo altri criteri. 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 UNI EN 12464.

Corpi illuminanti e segnaletica luminosa a scopo di emergenza devono rispettare requisiti riguardanti:

- collocazione
- illuminamento

- rapporto tra illuminamento max e min
- intensità luminosa (abbagliamento debilitante)
- R_a
- autonomia
- tempo di intervento

Per tutte i dettagli si rimanda alla trattazione del sistema di emergenza per il caso studio.

7. **Norma:** UNI EN 15251

Titolo: 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.

Anno: 2008

Contenuti: Nella sezione dedicata all'illuminazione la normativa si limita a rimandare alla UNI EN 12464-1 che tratta nello specifico l'argomento. Per il resto viene sottolineata l'importanza di adottare criteri di comfort e salubrità alla base della progettazione dei vari impianti.

Esistono poi normative e altri regolamenti specifici per gli edifici scolastici. Se ne parla, insieme all'applicazione delle normative suddette al caso in esame, nel capitolo 2, dedicato interamente all'argomento.

Capitolo 2

L'illuminazione degli Edifici Scolastici

2.1. Applicazione delle normative

La normativa UNI EN 12464-1, relativa all'illuminazione dei posti di lavoro, indica, per i tre locali in esame, i seguenti limiti di illuminamento medio mantenuto (\bar{E}_m), abbagliamento (UGR_L) e resa del colore (R_a) (tabella 2.1):

	\bar{E}_m [lux]	UGR_L	R_a
Aule scolastiche	300	19	80
Aula magna	200	22	80
Corridoi	100	25	80

Tabella 2.1 Prescrizioni della normativa UNI EN 12464 per i locali analizzati

L'illuminamento medio mantenuto si riferisce alle superfici del compito, le quali variano, in termini di altezza, a seconda delle situazioni: per l'aula magna, non essendoci piani di lavoro univoci nella zona centrale, si lascia il valore standard previsto dalla normativa, pari a 0,85 m; per l'aula si fa la distinzione tra la zona della cattedra, in cui la superficie di calcolo è posta a 0,8 m d'altezza, e la zona occupata dagli alunni nella quale, essendo i banchi più bassi della cattedra, la superficie del compito è fissata a 0,6 m da terra. Per i corridoi, infine, l'altezza indicata dalla normativa è 0,2 m.

L'UGR varia a seconda del punto e della direzione di osservazione ed è quindi opportuno calcolarne più di un valore in modo da dimostrare con buona probabilità che l'UGR massimo consentito, in corrispondenza del quale si può avere abbagliamento molesto, non è mai superato.

La resa del colore è invece costante e dipende esclusivamente dalla lampada utilizzata (tabella 2.2): le sorgenti ad incandescenza, ad esempio, hanno R_a pari o comunque molto vicino a 100 e garantiscono una percezione dei colori ottimale, le lampade a fluorescenza sono caratterizzate da R_a intermedi (generalmente intorno all'80), mentre altre sorgenti, come le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione, hanno una scarsa resa del colore (R_a inferiore a 50 per quelle citate) e non sono quindi adatte all'illuminazione degli edifici

scolastici e di tutti quei luoghi in cui la corretta percezione dei colori è essenziale. Questo genere di lampade, che ha altri pregi, come le elevate prestazioni in termini di durata, flusso luminoso ed efficienza, si usa invece per l'illuminazione di esterni, zone di passaggio, palestre, ecc.

Lampada	R _a
a incandescenza	90-100
alogeni	90-100
fluorescenti tubolari	50-94
fluorescenti compatte	80-90
ai vapori di sodio ad alta pressione	20-39
ai vapori di sodio a bassa pressione	0-10
ai vapori di mercurio	40-69
a ioduri metallici	65-95
LED	75-90

Tabella 2.2 Valori di resa dei colori tipici per alcune tipologie di lampade [10]

La normativa consiglia inoltre di adottare, per le aule didattiche, sistemi di illuminazione regolabili.

La UNI EN 15193 illustra, invece, come già specificato nel precedente capitolo, la procedura di calcolo del LENI al fine di ottenere una valutazione dei consumi energetici legati all'illuminazione. La formula contiene al suo interno alcune costanti e, nel caso non si disponga di dati più accurati, si può fare riferimento ai valori standard forniti dalla normativa stessa. Per due di queste costanti (F_o e F_D) vengono offerte due possibilità: utilizzare direttamente dei valori di default (quick method) oppure valutare le costanti con formule più complesse che si adattano meglio ai diversi casi, risultando quindi più accurate (comprehensive method). Anche in questo caso si possono usare comunque le costanti proposte dalla normativa.

Il LENI è definito come la somma dell'energia annua impiegata per l'illuminazione (W_L) e dell'energia annua parassita dovuta ai sistemi di regolazione e di emergenza (W_p) diviso l'area utile. Analizzando i due termini a numeratore più in dettaglio risulta:

$$W_L [kWh] = \sum \frac{\{(P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_o \cdot F_D) + (t_N \cdot F_o)]\}}{1000} \quad (2.1)$$

$$W_p [kWh] = \sum \frac{\{(P_{pc} \cdot [t_y - (t_D + t_N)]\} + (P_{em} \cdot t_{em})\}}{1000} \quad (2.2)$$

dove con P si indicano le potenze, con t i termini temporali e con F i dependency factors, termini compresi tra 0 e 1 che aumentano o riducono l'energia consumata a seconda dei casi (ad esempio, passando da sistemi di regolazione delle luci manuali a sistemi automatici, F_o , e quindi i consumi, diminuiscono). Per impianti privi di automazione i dependency factor valgono quindi 1.

I vari termini, raggruppati come in precedenza, sono definiti nel modo seguente:

- P_n : potenza totale delle luci installate nel locale o nella zona;

$$P_n = \sum_i P_i [W] \quad (2.3)$$

- P_{pc} : potenza parassita totale relativa ai sistemi di controllo quando le luci non sono in funzione;

$$P_{pc} = \sum_i P_{ci} [W] \quad (2.4)$$

- P_{em} : potenza parassita totale corrispondente alla fase di carica delle luci di emergenza;

$$P_{em} = \sum_i P_{ei} [W] \quad (2.5)$$

- t_y (*standard year time*): vale 8760 h e corrisponde al numero di ore in un anno;
- t_D (*daylight time usage*): ore all'anno di utilizzo dei locali durante il giorno;
- t_N (*non-daylight time usage*): ore all'anno di utilizzo dei locali durante le ore di buio;

$$t_o = t_D + t_N \quad [h] \quad (2.6)$$

dove con t_o rappresenta l'*annual operating time*;

- t_{em} (*emergency lighting charge time*): durata della carica annualmente;

- F_D (*daylight dependency factor*): fattore che lega l'utilizzo dell'illuminazione artificiale alla disponibilità di luce naturale nel locale o nella zona;
- F_o (*occupancy dependency factor*): fattore che lega l'utilizzo dell'illuminazione artificiale al tempo di utilizzo del locale o della zona;
- F_c (*constant illuminance factor*): fattore che tiene conto dell'eventuale presenza del constant illuminance control system per la regolazione della luminanza in modo che resti costante nel tempo.

Per una prima stima della riduzione dei consumi ottenibile adottando sistemi di automazione delle luci, è possibile riferirsi ai dependency factor di default, relativi agli edifici scolastici, presenti nella normativa UNI EN 15193 (appendici E, F e G) (tabella 2.3):

dependency factor	manuale	automatico
F_D	1	0,8*
F_o	1	0,9**

* Photo cell dimming – with daylight sensing (illuminamento regolato in funzione della luce naturale)

** $\geq 60\%$ del carico connesso

Tabella 2.3 Valori di default per F_D e F_o

Per quanto riguarda invece F_c i due valori possibili sono 1 e 0,9 a seconda della presenza o meno del cte (constant illuminance control system) e questa distinzione vale per tutti i locali.

In pratica i sistemi di automazione contemplati dalla normativa sono tre e si ottiene un risparmio del 10% adottando singolarmente sensori di presenza e controllo delle luminanze e del 20% installando sistemi di accensione che intervengono in funzione dell'apporto di luce naturale dall'esterno. In prima approssimazione si può quindi affermare che, a partire da un sistema interamente manuale, è possibile ridurre i consumi elettrici legati all'illuminazione degli edifici scolastici, senza considerare la potenza necessaria al funzionamento di questi dispositivi, fino al 19% di notte e fino al 35,2% di giorno (facendo il prodotto dei vari fattori).

Gli altri valori necessari al calcolo del LENI, sempre di default, sono (tabella 2.4):

costanti	
t_D [h]	1800
t_N [h]	200
t_o [h]	1800+200=2000
P_{em} [kWh/m ² anno]	1
P_{pc} [kWh/m ² anno]	5

Tabella 2.4 Costanti di default relative alla presenza nei locali e alle energie parassite

Ovviamente valori più precisi possono essere ricavati distinguendo ad esempio tra aule didattiche e aula magna, sicuramente meno utilizzata, o tenendo conto che quest'ultima è anche sede di conferenze serali per adulti (si rimanda al capitolo conclusivo).

A questo punto, conoscendo il tipo e il numero di lampade installate e quindi la potenza totale, è possibile calcolare il LENI. Il valore così ottenuto va confrontato con i valori limite previsti dalla normativa. La UNI EN 15193 non prevede un limite univoco: esistono infatti, per ogni attività, dodici valori distinti, in funzione dei sistemi di automazione e della quality class.

Una prima distinzione riguarda il cte. Se presente, a parità delle altre condizioni, il LENI massimo consentito diminuisce perché migliorano le prestazioni. Un'altra distinzione è tra controlli manuali e automatici e tiene conto degli altri due sistemi di automazione. Come nel caso precedente i sistemi automatici fanno risparmiare energia e abbassano di conseguenza il valore limite del LENI. Problematico è il caso in cui sia presente solo uno dei due sistemi in quanto la normativa non contempla questa situazione (se ci si basa sui valori di default). L'ultima variabile è la quality class: ne esistono tre, indicate con un numero crescente di stelle (da una a tre) all'aumentare della qualità dell'illuminazione. Le tre classi devono rispettare un numero sempre crescente di requisiti (tabella 2.5):

	Lighting design criteria class		
	*	**	***
Maintained illuminance on horizontal visual tasks ($E_{m, horizontal}$)	☑	☑	☑
Appropriate control of discomfort glare (UGR)	☑	☑	☑
Avoidance of flicker and stroboscopic effects	✓	✓	✓
Appropriate control of veiling reflections and reflected glare		✓	✓
Improved colour rendering		☑	☑
Avoidance of harsh shadows or too diffuse light in order to provide good modelling		✓	✓
Proper luminance distribution in the room ($E_{vertical}$)		✓	✓
Special attention of visual communication in lighting faces ($E_{cylindrical}$)			✓
Special attention to health issues (Note)			✓
☑: has to comply with required values from Tables 5.3 in EN 12464-1:2002. ✓: has to conform to verbally described requirements from EN 12464-1. NOTE Health issues: may even require much higher illuminances and therefore higher W/m^2 . The maximum power density load (PW) connected to the lighting design class is given in the benchmark Table F.1.			

Tabella 2.5 Criteri per l'assegnazione della quality class

A livello indicativo si riportano i dodici valori limite del LENI riportati sulla normativa UNI EN 15193 e relativi agli edifici scolastici (tabella 2.6):

Quality class	No cte illuminance		Cte illuminance	
	Limiting value [kWh/(m ² anno)]		Limiting value [kWh/(m ² anno)]	
	manual	auto	manual	auto
*	34,9	27,0	31,9	24,8
**	44,9	34,4	40,9	31,4
***	54,9	41,8	49,9	38,1

Tabella 2.6 LENI limite per gli edifici scolastici

Per comprendere più a fondo la tabella 2.5 si rimanda al capitolo 6 (dedicato alle conclusioni e alla discussione dei risultati ottenuti) in cui i valori della tabella verranno confrontati con quelli calcolati per i locali oggetto dello studio. Già ad una prima analisi della tabella, tuttavia, è possibile riscontrare una apparente anomalia: all'aumentare della quality class e quindi delle prestazioni dell'impianto illuminotecnico, il LENI massimo aumenta, e di conseguenza anche la densità di potenza [W/m^2] che è consentito raggiungere. Ci si potrebbe invece aspettare che all'aumentare del livello tecnologico i consumi diminuiscano. In realtà la distinzione ha perfettamente senso perché qualità e consumi sono concetti contrapposti, il che significa che il soddisfacimento di requisiti qualitativi più stringenti richiede un consumo di energia più elevato. In alcuni casi, ad esempio, è necessario per motivi medici dotare il locale di livelli di illuminamento maggiori, a discapito dei consumi. Questa situazione non deve però penalizzare eccessivamente il progetto e la normativa si dimostra correttamente meno esigente in termini di consumi. Viene quindi lasciata al progettista la facoltà di scegliere, per motivi pratici od estetici, se adottare sistemi che massimizzano la qualità visiva o il risparmio energetico (nel rispetto di requisiti minimi) o se puntare invece su una soluzione intermedia.

2.2. Normative specifiche

La normativa di riferimento per gli edifici scolastici è la UNI EN 10840 del maggio 2007. Il sommario recita: *La norma specifica i criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale delle aule e di altri locali scolastici, in modo da garantire le condizioni generali per il benessere e la sicurezza degli studenti e degli altri utenti della scuola. Per quanto concerne i livelli di illuminamento e le prescrizioni generali sull'illuminazione artificiale, si rimanda alla UNI EN 12464-1.*

La normativa è divisa in due parti: la prima è dedicata all'illuminazione artificiale e la seconda a quella naturale. La sezione di interesse è la seconda, visto che sull'illuminazione artificiale la normativa si limita essenzialmente a ripetere quanto già riportato sulla più generica UNI EN 12464. Un'informazione utile, comunque presente anche nell'altra norma, riguarda la lavagna, per la quale sono indicati i seguenti valori:

- \bar{E}_m : 500
- UGR_L : 19
- R_a : 80

A corredo viene inoltre ricordato di evitare le riflessioni speculari. Occorre cioè predisporre le misure necessarie affinché nessuna parte della finestra o dei lucernari appaia riflessa sul piano della lavagna per tutte le posizioni dei destinatari del locale.

La seconda parte affronta, invece, un argomento finora mai trattato: quello della luce naturale. I due concetti nuovi che vengono introdotti sono il fattore medio di luce diurna e l'abbagliamento dovuto alla luce naturale.

Il fattore medio di luce diurna (η_m) è definito come il rapporto espresso in per cento tra l'illuminamento medio dell'ambiente, E_m , e l'illuminamento esterno prodotto dalla volta celeste, E_0 ed è un indicatore dell'accessibilità della luce nel locale. Ai fini di garantire un'adeguata distribuzione dell'illuminazione naturale devono essere garantiti, per i due locali in esame, i seguenti valori del fattore medio di luce diurna (tabella 2.7):

Tipo di interno, compito o attività	η_m
Aule scolastiche	≥ 3
Aula magna	≥ 2
Corridoio	≥ 1

Tabella 2.7 Fattore medio di luce diurna previsto dalla normativa

Oltre ai valori medi hanno importanza anche gli estremi perché deve essere garantita un'adeguata uniformità, rispettando il rapporto

$$\frac{\eta_{min}}{\eta_{max}} \geq 0,16$$

Mentre per il valore medio si prende in considerazione tutta la superficie del locale ($h=0,85m$), per il rapporto ci si riferisce ai piani di lavoro.

Per il calcolo del fattore medio, si può utilizzare la seguente formula riferita ad un modello semplificato dell'ambiente¹ (implementata in Dialux):

$$\eta_m = \frac{A_{f \cdot t}}{A_{tot}(1-r_m)} \cdot \varepsilon \cdot \Psi \quad (2.7)$$

dove:

- $\varepsilon = \frac{E_{0v}}{E_0}$ e E_{0v} è l'illuminamento esterno sulla superficie vetrata verticale;

¹ La formula equivale a quella contenuta nella Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici, n° 3151 del 22 maggio 1967.

ε è il fattore finestra, rappresentativo della posizione di volta celeste vista dal baricentro della finestra:

- $\varepsilon = 1$ per finestra orizzontale (lucernario) senza ostruzioni;
 - $\varepsilon = 0,5$ per finestra verticale senza ostruzione
 - $\varepsilon < 0,5$ per finestra verticale con ostruzione (vedere figura 2.2);
- A_f è l'area della superficie della finestra, escluso il telaio;
 - A_{tot} è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente;
 - r_m è il fattore medio di riflessione luminosa delle superfici che delimitano l'ambiente;
 - t è il fattore di trasmissione luminosa del vetro;
 - Ψ è il fattore di riduzione del fattore finestra (vedere figura 2.3).

Le figure 2.1 e 2.2 considerano casi di ostruzioni comuni.

Determinazione del fattore finestra ε

Legenda

h Altezza della finestra dal piano stradale

H Altezza del fabbricato contrapposto

L_a Larghezza della strada

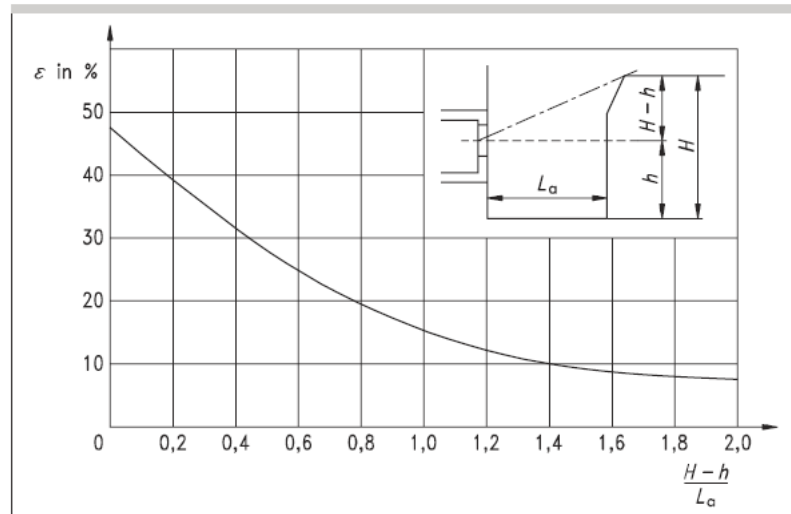


Figura 2.1 Grafico per la determinazione del fattore finestra ε

Determinazione del fattore di riduzione ψ

Legenda

L_f Larghezza della finestra

h_f Altezza della finestra

p Distanza tra finestra ed il bordo esterno della parete

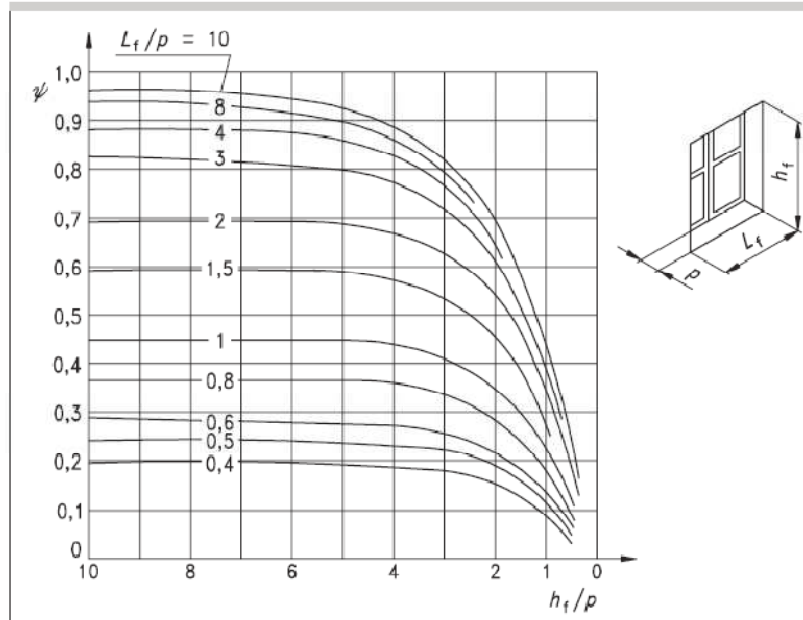


Figura 2.2 Grafico per la determinazione del fattore di riduzione Ψ

Oltre all'abbagliamento dovuto agli apparecchi di illuminazione bisogna considerare quello causato dalla luce naturale che filtra attraverso le superfici vetrate. Questo tipo di abbagliamento si verifica soprattutto in situazioni, come quella in esame, in cui le superfici vetrate sono molto grandi rispetto al pavimento. In questi casi diventa ancora più importante prevedere sistemi regolabili per il controllo della luce naturale quali tende, veneziane e schermi. Il corrispettivo dell'UGR per la luce naturale è il 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, primaria e secondaria, vista attraverso la finestra (cielo, ostruzioni, terreno).

Alcuni parametri che definiscono G_i sono difficilmente calcolabili e la formula non è quindi di facile utilizzo. Recenti studi sperimentali dimostrano che l'abbagliamento dovuto ad una singola finestra dipende essenzialmente dalla luminanza della sorgente, evidenziando come l'abbagliamento possa essere

considerato praticamente costante per tutti gli ambienti interni con finestre di dimensioni maggiori del 2% della superficie del pavimento e quindi esclusivamente variabile in funzione della luminanza della sorgente e del fattore medio di riflessione dell'ambiente interno.

In questo caso, quindi, il controllo dell'abbagliamento naturale dipende essenzialmente dalle condizioni di luminanza della porzione di cielo inquadrata della superficie vetrata. A voler essere precisi però, anche la dimensione e la posizione della superficie vetrata, il contrasto di luminanza tra le superfici interne dell'ambiente determinato dai relativi fattori di riflessione luminosa, l'eventuale presenza di schermi interni o esterni, ecc., influenzano l'insorgere di fenomeni di abbagliamento. Particolare importanza assume il fattore di riflessione del soffitto e delle superfici immediatamente adiacenti la superficie vetrata.

Per le aule il valore limite del DGI è 21.

2.3. L'importanza della luce naturale nelle scuole

La luce naturale ha sempre effetti benefici sull'estetica dei locali e sul benessere degli occupanti ma, per le scuole materne ed elementari in particolar modo, la sua importanza è ancora maggiore.

Oltre al risparmio di energia elettrica per l'illuminazione e alla valorizzazione commerciale dell'immobile, la luce naturale ha infatti due effetti importanti sulle persone [11]:

- effetto caffeina (a breve termine) nel senso che fa aumentare attenzione e prestazioni intellettive e incide positivamente sull'umore;
- effetto vitamina (a lungo termine) legato agli effetti benefici sui ritmi circadiani e sul benessere psicofisico.

Considerando l'importanza che concentrazione e benessere psicofisico hanno nel periodo della crescita, è evidente il ruolo fondamentale della luce naturale nelle scuole.

Una cattiva gestione in questo senso potrebbe avere conseguenze negative sulla formazione dei bambini ed è per questo che uno studio approfondito sull'argomento è indispensabile, al di là dei risvolti economici ed estetici.

2.4. Le peculiarità dell'illuminazione scolastica

Nelle scuole, gran parte dei locali (l'aula magna, i corridoi...) sono, dal punto di vista della progettazione illuminotecnica, ambienti piuttosto comuni. Fanno eccezione le aule perché caratterizzate, per quanto riguarda l'illuminazione naturale, da alcune peculiarità.

A questo proposito l'istituto A. Gabelli rappresenta un caso tipico di architettura scolastica. Innanzitutto le aule hanno una forma molto semplice a pianta rettangolare e lunghezza e profondità sono piuttosto contenute in relazione al numero di alunni della classe. Inoltre, essendo tutte le aule disposte in fila parallelamente ai corridoi, le aperture verso l'esterno sono presenti su un'unica parete. Ne derivano una distribuzione non uniforme della luce che decresce rapidamente a mano a mano che ci si allontana dalle finestre e un livello di illuminamento insufficiente nelle zone più in profondità con il rischio di sprecare energia illuminando tutta l'aula quando lo richiederebbe solo una parte. Per ovviare a quest'ultimo problema si possono prevedere, come in questo caso, aperture molto generose. Così facendo aumenta la penetrazione di luce naturale ma non si risolve il problema della distribuzione e anzi, quando le aperture sono eccessivamente grandi, se ne possono aggiungere altri legati all'abbagliamento, alla dispersione termica in inverno e al surriscaldamento estivo.

Per ovviare a tutti questi inconvenienti servirebbero sistemi con una triplice funzione: aumento della luce entrante nel locale, aumento dell'uniformità della distribuzione e ombreggiamento delle zone adiacenti le finestre. Dispositivi di questo tipo esistono e verranno trattati nel prossimo capitolo.

Capitolo 3

Strumentazione e Modelli

3.1. I programmi di progettazione illuminotecnica

Per lo svolgimento dei calcoli illuminotecnici si sono scelti due dei principali programmi di progettazione illuminotecnica disponibili gratuitamente: Dialux e Relux.

Non essendo interessati ad una analisi comparativa, i due software non sono stati impiegati nelle stesse simulazioni ma ad ognuno sono stati attribuiti ruoli differenti. Come si evince dalla figura 3.1 il programma più sfruttato è stato Dialux mentre Relux è entrato in gioco solo in un'occasione. In particolare, di Relux ci si è serviti di una specifica applicazione, chiamata Radiance, in grado di effettuare calcoli illuminotecnici precisi anche in presenza di radiazione diretta e di superfici speculari, situazione che invece Dialux, come si vedrà, non riesce a simulare correttamente.

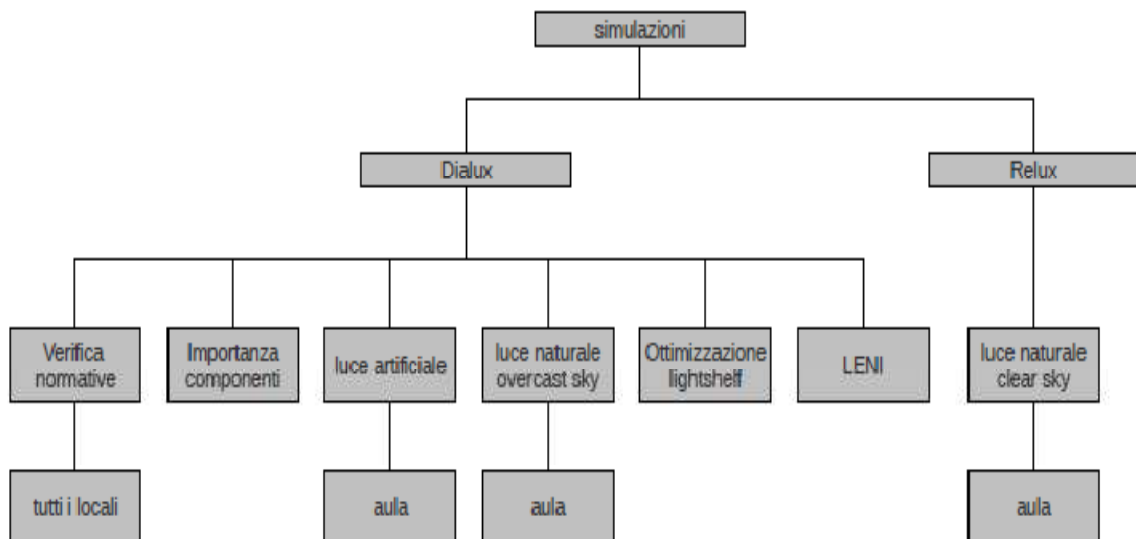


Figura 3.1 Ripartizione delle simulazioni tra i due software di progettazione

I due software hanno metodi di calcolo diversi: Dialux utilizza un programma (RadiCal) basato sul metodo della Radiosity, Radiance adotta invece il metodo del RayTracing. L'analisi del percorso compiuto dalla luce nei due casi è opposto: mentre il RayTracing segue i raggi dall'occhio alla sorgente, la Radiosity simula la propagazione diffusiva della luce a partire dalle sorgenti.

3.1.1. Il metodo del RayTracing [12,S3]

Radiance è basato su un algoritmo di backward raytracing, in base al quale i raggi luminosi sono tracciati nella direzione opposta rispetto a quella che seguono solitamente: a partire dall'occhio dell'osservatore (il punto di vista) i raggi vengono tracciati sino alle sorgenti luminose rimbalzando tra le superfici presenti nell'ambiente e tenendo conto dei fenomeni di riflessione, trasmissione e rifrazione (non si tiene conto dei fenomeni di polarizzazione della luce). In maniera del tutto innovativa, Radiance opera anche il calcolo delle interreflessioni tramite raytracing stocastico. La descrizione geometrica dell'ambiente è basata sui limiti esterni degli oggetti, per cui i volumi inclusi all'interno delle superfici sono sempre vuoti e le superfici hanno un orientamento definito dal vettore normale alle superfici stesse.

Il sistema di riferimento tridimensionale corrisponde al sistema di coordinate cartesiane, in cui l'asse x punta verso est, l'asse y punta verso nord ed infine l'asse z punta verso lo zenith. Le coordinate possono essere immesse a partire da qualsiasi unità di misura, che però deve essere mantenuta con coerenza all'interno di tutti i file che descrivono l'ambiente. Ogni singolo raggio tracciato trasporta una certa quantità di radianza (in inglese radiance, da cui deriva il nome del software) espressa in W/m^2sr .

Tale valore di radianza è scomposto in tre canali (viene operata la semplificazione di campionamento tricromatico) secondo i tre colori primari: rosso (r), verde (g), blu (b). La radianza totale è quindi calcolata come somma ponderata delle radianze R_r , R_g e R_b trasportate dai tre canali, secondo la seguente espressione:

$$R = 0.265 \cdot R_r + 0.670 \cdot R_g + 0.065 \cdot R_b \text{ [W/m}^2\text{sr]} \quad (3.1)$$

in cui $0.265 + 0.670 + 0.065 = 1$.

La radianza è quindi successivamente trasformata in luminanza tramite la relazione:

$$L = 179 R = 47.4 \cdot R_r + 119.9 \cdot R_g + 11.7 \cdot R_b \text{ [cd/m}^2\text{]} \quad (3.2)$$

Questo metodo di campionamento del colore, come preannunciato, fa riferimento al modello percettivo tricromatico e non tiene conto pienamente di tutte le proprietà spettrali: la precisione colorimetrica di Radiance non è quindi altissima ma poiché i colori dei materiali sono spesso disponibili nella forma di valori colorimetrici, ad esempio secondo il sistema tristimolare CIE XYZ, e poiché nelle applicazioni architettoniche sono adoperati spesso colori non molto saturi, l'errore colorimetrico è generalmente trascurabile.

3.1.2. Il metodo della Radiosity [S4,7]

Questo approccio è basato sulle teorie della trasmissione del calore e sul principio della conservazione dell'energia. L'assunto fondamentale è che tutta la luce che viene proiettata su una superficie e non è assorbita da questa, viene di nuovo trasmessa o riflessa dalla superficie stessa. Nel procedimento di Radiosity viene impostata un'equazione che tiene conto di questo bilancio per ogni cella che compone la griglia di calcolo. Complessivamente si ottiene un sistema formato da equazioni il cui risultato rappresenta l'illuminamento di ogni singola cella.

Il vantaggio di questo metodo è che, a differenza del RayTracing, ultimato il calcolo la visualizzazione è indipendente dalla posizione dell'osservatore. Quando viene terminato il ciclo di calcolo di ciascuna scena, l'utente può cambiare il suo punto di osservazione ruotando a piacimento la scena in 3D o spostandosi al suo interno con la possibilità di controllare gli effetti della luce da ogni angolo. Lo svantaggio è che, per il momento, può essere tenuta in considerazione soltanto la riflessione diffusa teorica. Un fascio di luce in entrata non viene cioè riflesso secondo il suo esatto angolo di incidenza e in base al materiale, ma soltanto in maniera uniforme.

La procedura di suddivisione delle superfici del locale (dominio di calcolo) in un certo numero di celle in modo da creare una mesh o maglia è molto delicata. Infittendo la mesh i calcoli diventano più accurati ma aumenta, in modo circa esponenziale con il numero di celle, il tempo di elaborazione. Risulta quindi necessario ridurre il passo della griglia solo dove serve, nelle zone caratterizzate ad esempio da elevati gradienti di illuminamento. Dialux riconosce automaticamente queste aree ed è in grado di generare una mesh opportuna garantendo un buon compromesso tra precisione e costo computazionale (Meshing Adaptive o Maglia Autoadattante).

L'assunto di riflessione perfettamente diffusa (superficie lambertiana) permette di descrivere la luce emessa da una superficie con un singolo valore di intensità luminosa non direzionale per ogni lunghezza d'onda.

L'intensità di luce su un'area di superficie dipende dalla luce che essa stessa emette più quella riflessa. A sua volta la luce riflessa dipende dalla luce emessa dalle altre superfici nell'ambiente che raggiunge la superficie in esame e a sua volta viene riflessa. Questa frazione dipende dalle relazioni geometriche tra le superfici, la riflettanza dell'elemento differenziale e il fattore di configurazione, o di forma, che rappresenta la frazione di luce emessa da una superficie che raggiunge l'altra, espressa con un valore compreso tra 0 e 1 ed è il termine dal più alto costo computazionale.

Questa relazione può essere espressa dall'equazione:

$$B_{dA_i} dA_i = M_{dA_i} dA_i + \rho_{dA_i} \int_j B_{dA_j} F_{dA_j-dA_i} dA_j \quad (3.3)$$

dove:

- B_{dA_i} è la radiosity dell'elemento differenziale i-esimo;
- dA_i è l'elemento differenziale i-esimo;
- M_{dA_i} è l'emittanza dell'elemento differenziale i-esimo, definita come la frazione di energia irradiata da quel materiale rispetto all'energia irradiata da un corpo nero che si trova alla stessa temperatura;
- ρ_{dA_i} è la riflettanza dell'elemento differenziale i-esimo;
- $F_{dA_j-dA_i}$ è il fattore di forma da j ad i. Frazione di energia da j ad i.

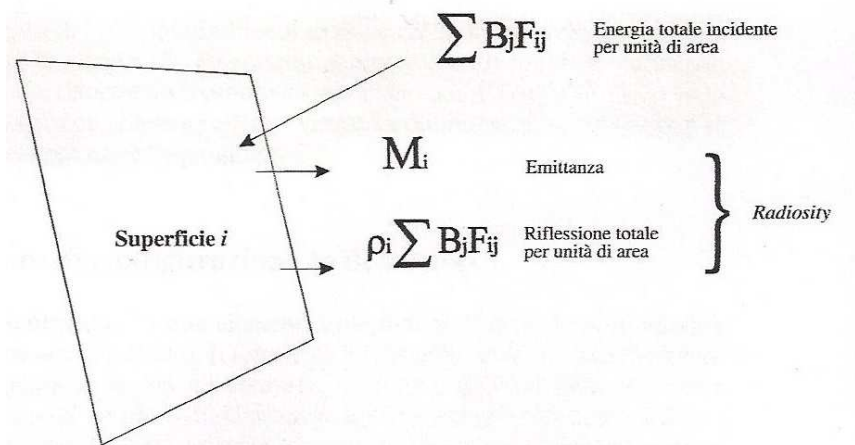


Figura 3.2 Radiosity totale

L'equazione non è risolvibile analiticamente ma solo per via numerica. Una soluzione non più esatta ma approssimata è ottenibile con l'analisi agli elementi finiti attraverso la discretizzazione delle superfici dell'ambiente (figura 3.2). L'equazione diventa

$$B_{A_i} A_i = M_{A_i} A_i + \rho_{A_i} \sum_j B_{A_j} F_{A_j-A_i} A_j \quad (3.4)$$

Si è fatta l'assunzione che la B_{A_i} non vari sull'elemento finito.

Tra fattori di configurazione esiste una relazione di reciprocità. Il fattore di configurazione dall'area i all'area j e quello dall'area j alla i sono correlati dalla semplice equazione

$$F_{A_j-A_i} A_j = F_{A_i-A_j} A_i \quad (3.5)$$

Perciò la sommatoria precedente diventa:

$$B_{A_i} = M_{A_i} + \rho_{A_i} \sum_j B_{A_j} F_{A_i-A_j} \quad (3.6)$$

La Radiosity di ogni elemento dipende da quella degli altri. Questo permette di evidenziare una relazione matriciale tra B e M con N equazioni lineari indipendenti se l'ambiente è diviso in N elementi. Quindi:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\rho F_{1,2} & \cdot & -\rho F_{1,N-1} & -\rho F_{1,N} \\ -\rho F_{2,1} & & \cdot & -\rho F_{2,N-1} & -\rho F_{2,N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\rho F_{N-1,1} & -\rho F_{N-1,2} & \cdot & & -\rho F_{N-1,N} \\ -\rho F_{N,1} & -\rho F_{N,2} & & -\rho F_{N,N-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{N-1} \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ M_{N-1} \\ M_N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Questo sistema di equazioni lineari può essere risolto con la maggior parte degli algoritmi per sistemi lineari; le proprietà caratteristiche delle matrici permettono peraltro di ricorrere ad una soluzione più efficiente.

In particolare, la somma dei fattori di configurazione da un particolare elemento a tutti gli altri è per definizione uguale all'unità e la riflettanza minore

di 1. La somma dei termini extradiagonali è cioè inferiore al valore in diagonale. In questo caso la matrice si dice a diagonale dominante e questo significa che risolvendo il problema con il *metodo di Gauss-Seidel* si ha la garanzia che la soluzione converga.

Uno studio più approfondito sull'architettura di Dialux esula dagli obiettivi di questa tesi.

3.2. Modellazione dei locali

Il calcolo illuminotecnico richiede due tipi di dati: fotometrici e ambientali. I primi si riferiscono alla caratterizzazione fotometrica completa degli apparecchi, vale a dire della distribuzione nello spazio della luce emessa, in coordinate sferiche; i dati ambientali descrivono la geometria e le proprietà fisiche delle superfici, determinando la natura dell'interazione tra queste e la luce.

In Dialux la gestione dei corpi illuminanti è molto semplice in quanto generalmente sono le stesse case produttrici a fornire i plugin con le informazioni sui loro apparecchi. I file sono nel formato Eulumdat (LDT), che include le informazioni relative alla curva fotometrica e l'aspetto fisico della lampada a livello grafico.

A richiedere più tempo, considerato l'elevato numero di parametri da definire e l'attenzione con la quale vanno scelti per avere una riproduzione precisa degli ambienti, è la modellazione dei locali (per non parlare degli oggetti da creare appositamente con programmi CAD).

Prima di procedere alla descrizione dei modelli creati in Dialux, si ricorda che i modelli Relux sono del tutto analoghi dal punto di vista dei coefficienti e differiscono solo per alcuni dettagli procedurali.

I locali analizzati all'interno della scuola sono cinque: due aule campione, due dei quattro corridoi che si sviluppano paralleli alle classi e l'aula magna (segnati in verde nella figura 3.3).

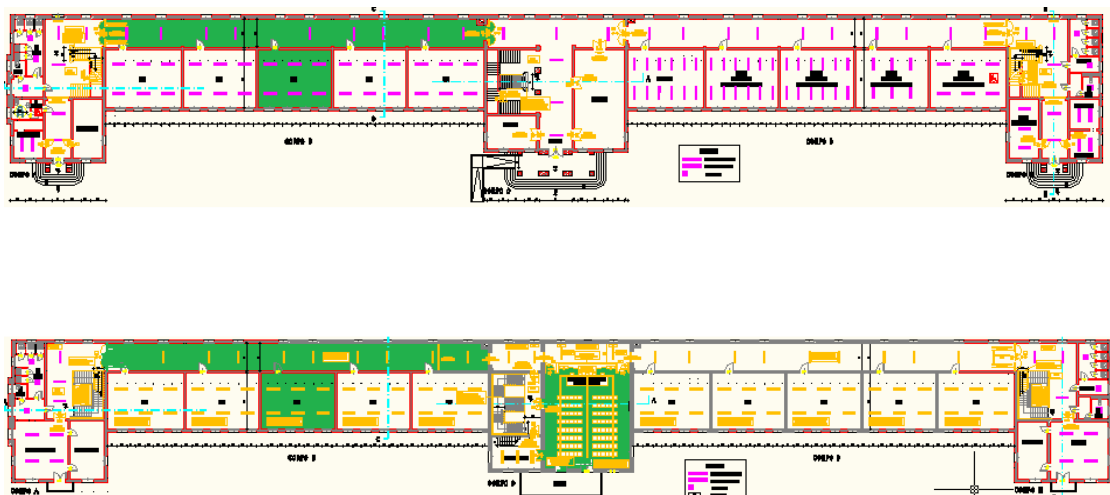


Figura 3.3 a) Locali analizzati al piano terra
b) Locali analizzati al primo piano

Nel complesso le tre tipologie di locali analizzate costituiscono circa il 70% della superficie totale dei due piani e si può quindi affermare che il seguente studio copre buona parte dell'edificio (soffitta e scantinati a parte).

Le due aule e i due corridoi sono strutturalmente uguali (ad eccezione delle finestre che hanno superficie uguale ma forma leggermente diversa). L'unica differenza sostanziale risiede nella diversa altezza dal suolo che altera l'apporto di luce naturale. Per quanto riguarda invece l'illuminazione artificiale non c'è alcuna discrepanza e l'analisi effettuata sarà unica.

L'arredamento dei locali non è stato riprodotto nei minimi particolari, non solo per non perdere in generalità ma anche perché piccole superfici, soprattutto se poste ai margini del locale, non influenzano sensibilmente i risultati nelle zone del compito.

Particolare attenzione merita la definizione dei coefficienti di riflessione. E' importante ricordare che Dialux considera le superfici perfettamente diffondenti. Per questo il materiale, e la sua scabrosità, non incidono sulla riflessione di una superficie, funzione soltanto del colore. Al di là di tutto ci si aspetterebbero comunque, variando il colore delle superfici ma a parità di coefficiente di riflessione, risultati invariati. In realtà però, in Dialux, i risultati dipendono contemporaneamente da entrambi i termini: variare il coefficiente comporta sostanzialmente una variazione della tonalità del colore (all'aumentare del coefficiente il colore si schiarisce tendendo al bianco, viceversa tende al nero) ma può avvenire che a parità di coefficiente un colore risulti più chiaro di un altro. Si è ad esempio notato che, sempre a parità di riflettanza, pareti colorate di rosso portano a valori di illuminamento sulla superficie del compito superiori rispetto a pareti colorate di blu. Anche visivamente si osserva in questo caso che la tonalità di rosso è più chiara della tonalità di blu. Il coefficiente di riflessione viene probabilmente cambiato implicitamente da Dialux.

Altro parametro fondamentale, che influenza notevolmente i risultati al pari del coefficiente di riflessione ρ , è la trasmissione dei vetri τ . Vista l'importanza di questi due parametri si è deciso di valutarli sperimentalmente con l'ausilio del luxmetro. Si presentano qui sotto risultati e procedimenti seguiti.

- **Calcolo sperimentale del coefficiente di riflessione**

Si vuole calcolare sperimentalmente il coefficiente di riflessione delle principali superfici dei tre locali in esame. Si confrontano poi i risultati ottenuti con i coefficienti forniti da Dialux. Le superfici in questione sono le pareti e i pavimenti.

Si sono fatte le seguenti ipotesi:

- il coefficiente del soffitto non è stato calcolato per ovvi motivi logistici, ma si presume che il valore fornito da Dialux almeno per l'aula sia preciso perché la tipologia di soffitto è molto comune ed è presente nella libreria degli oggetti. Per le altre superfici, invece, si sono dovute ricreare ex novo le caratteristiche, con un aumento inevitabile dell'incertezza;
- altre superfici, troppo piccole, non vengono prese in considerazione perché la procedura proposta in questo caso non è valida. Come si vedrà, infatti, il calcolo dell'illuminamento indiretto prende in considerazione un'area piuttosto ampia che è quella "vista" dal sensore del luxmetro ad una certa distanza dalla parete. Essendo piccole, comunque, il loro apporto si può considerare ragionevolmente trascurabile;
- i coefficienti di riflessione forniti da Dialux sono funzione dei colori scelti per le superfici;
- per tutte le altre superfici si ritiene valido il valore fornito da Dialux e, se possibile, si cerca una conferma bibliografica;
- i valori ricavati sperimentalmente sono soggetti ad una incertezza stimata intorno al 10%, e per questo vengono arrotondati al multiplo di cinque più vicino (es. 23→25).

Procedimento:

- 1- si cerca una porzione di superficie (se possibile non un angolo buio) che sia il più possibile libera da disegni, appendiabiti, etc. nel raggio di due metri;
- 2- si appoggia il luxmetro sulla parete con il sensore rivolto verso l'ambiente, si lascia stabilizzare il segnale e si registra il valore letto corrispondente all'illuminamento incidente E_{inc} (lux);
- 3- si gira il sensore e si appoggia di nuovo contro la superficie ma con sensore verso la superficie, poi lo si allontana lentamente fino a quando non si trova un valore stabile di lux sul display. Quello che si osserverà sarà una crescita dei lux fino a 10, 15 cm dalla superficie (più ci si allontana più si riduce l'influenza dell'ombra propria dello strumento e della mano dell'operatore), poi tra i 15 e 25 cm ci si aspetta che il valore si stabilizzi in quanto in quel momento il sensore sta ricevendo la componente riflessa solo dalla superficie considerata. Oltre questo

tornerà a variare in quanto intorno ai 40 cm più o meno il campo di vista del sensore può vedere una superficie di circa 4x4 m, perciò se si sta misurando una parete si riceveranno altri contributi provenienti dal pavimento e dal soffitto;

Quindi una volta osservato l'intervallo di distanza entro il quale il sensore sta ricevendo energia solo dalla superficie che si sta valutando si segna il corrispondente valore riflesso E_{rif} (lux);

- 4- facendo il rapporto tra i due (riflessa/incidente) si valuta il coefficiente di riflessione della superficie analizzata:

$$\rho = \frac{E_{rif}}{E_{inc}} \quad (3.8)$$

Prima di illustrare i risultati (tabella 3.2) si riportano in tabella (tabella 3.1) i materiali delle varie superfici:

locale	superficie	materiale
aula	pareti	parte inferiore: smalto parte superiore: intonaco
	pavimento	cotto
	soffitto	pannelli di cartongesso bianco
corridoio	pareti	parte inferiore: smalto parte superiore: intonaco
	pavimento	cotto
	soffitto	intonaco bianco
aula magna	pareti	parte inferiore: legno chiaro parte superiore: intonaco
	pavimento	linoleum
	soffitto	pannelli di cartongesso bianco

Tabella 3.1 Materiali delle principali superfici dei locali

superficie	aula		corridoio		aula magna	
	$\rho_{\text{sper}} [\%]$	$\rho_{\text{dial}} [\%]$	$\rho_{\text{sper}} [\%]$	$\rho_{\text{dial}} [\%]$	$\rho_{\text{sper}} [\%]$	$\rho_{\text{dial}} [\%]$
pareti	65	75	65	75	50	61
pavimento	20	33	20	33	25	35
soffitto	-	70	-	70	-	70

Tabella 3.2 Confronto tra i coefficienti di riflessione di Dialux e quelli ottenuti sperimentalmente

I valori forniti da Dialux si sono rivelati sempre superiori a quelli misurati sperimentalmente.

Per le simulazioni si è fatta la scelta di applicare alle superfici i coefficienti di riflessione sperimentali che, anche se non eccezionalmente precisi (come già detto si stima l'errore intorno al 10%), sono comunque più affidabili di quelli di Dialux che dipendono esclusivamente dai colori delle superfici. Anche se questi sono fedeli alla realtà (trovando ad esempio la corretta corrispondenza con i colori RAL) sono infatti intrinsecamente imprecisi perché non tengono conto della scabrosità, e quindi dell'assorbimento effettivo, e del tipo di riflessione.

- **Caratteristiche dei vetri**

Nella definizione delle proprietà delle finestre Dialux richiede in ingresso i seguenti parametri:

- trasmissione del solo vetro pulito τ_0
- fattore di riduzione per inquinamento interno α_i
- fattore di riduzione per inquinamento esterno α_e
- fattore di riduzione dovuto agli infissi σ
- coefficiente di riflessione ρ

I primi quattro parametri si definiscono fattori della luce naturale o fattori di daylighting e tengono conto della trasmissione della luce naturale. Il coefficiente di trasmissione effettivo quantifica la percentuale di luce entrante nel locale rispetto a quella incidente sui vetri ed è dato dal prodotto dei fattori della luce naturale:

$$\tau = \tau_0 \cdot \alpha_i \cdot \alpha_e \cdot \sigma \quad (3.9)$$

La restante parte dell'energia incidente è riflessa o assorbita dal vetro. Il coefficiente di riflessione ρ quantifica la frazione di energia riflessa e vale sia in direzione entrante sia uscente della luce. L'assorbimento, una volta noti τ e ρ , può essere calcolato per differenza sfruttando il bilancio d'energia che semplificato porta all'espressione

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (3.10)$$

Per le finestre principali dell'aula si è utilizzato un procedimento di calcolo dei fattori della luce naturale (escluso σ) sperimentale e i risultati sono validi anche per corridoio e aula magna dove le finestre sono del tutto analoghe (a parte le finestre superiori dell'aula magna per le quali si è ipotizzato un valore di sporco leggermente superiore):

1. Si posiziona il luxmetro internamente ed esternamente nello stesso punto della finestra con il sensore rivolto verso l'esterno e si misurano gli illuminamenti;
2. Si ripete la procedura un paio di volte in modo da avere a disposizione qualche misurazione. Si limita così l'influenza dello sporco locale e della variabilità climatica;
3. Si calcola per ogni punto τ valutando la riduzione percentuale dell'illuminamento interno rispetto al valore esterno corrispondente.
4. Si effettua la media dei coefficienti di trasmissione ottenuti;
5. A questo punto ci si può fermare oppure si possono stimare, per completezza, i due fattori legati all'inquinamento: facendo l'ipotesi che siano uguali si prende come riferimento il valore di default di τ_0 fornito da Dialux per quello specifico modello di vetro e si sfrutta la seguente uguaglianza:

$$[\tau_0 \cdot x^2]_{Dialux} = \tau_{sperimentale} \quad (3.11)$$

σ è dato dal rapporto tra superficie vetrata e superficie totale della finestra e la valutazione si è basata su considerazioni puramente geometriche.

Per l'analisi delle finestre interne si è utilizzato lo stesso metodo.

Per la valutazione di ρ si è fatto riferimento ai valori di default previsti da Dialux.

Si riportano in tabella 3.3 i risultati ottenuti per i fattori della luce naturale:

finestre	τ_0	α_i	α_e	τ	σ
esterne	0,81	0,97	0,97	0,76	0,68
interne	0,5	0,84	0,84	0,35	1

Tabella 3.3 Fattori della luce naturale

3.2.1. Le aule



Figura 3.4 Foto dell'aula

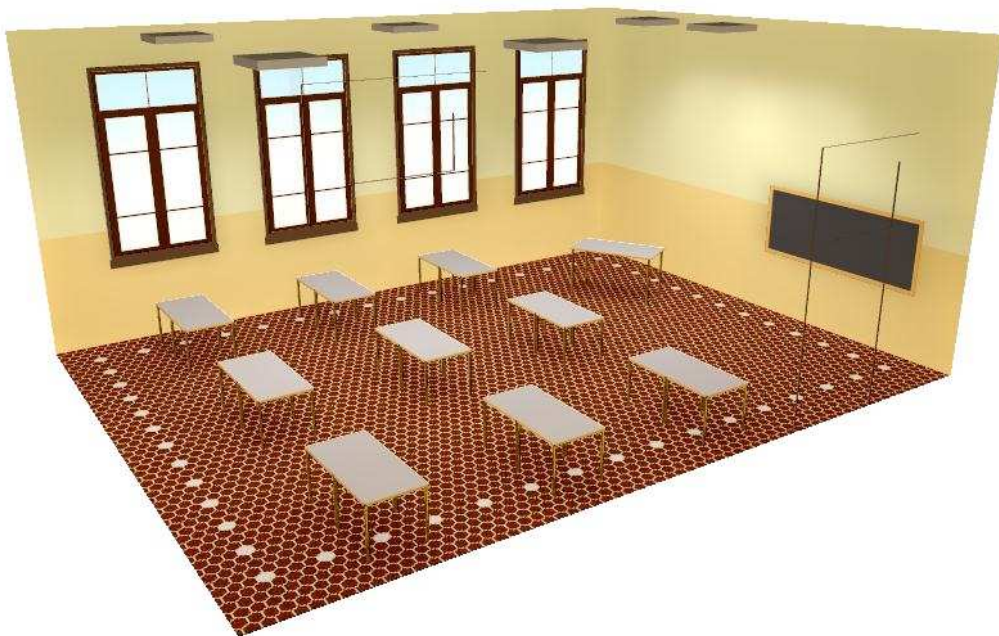
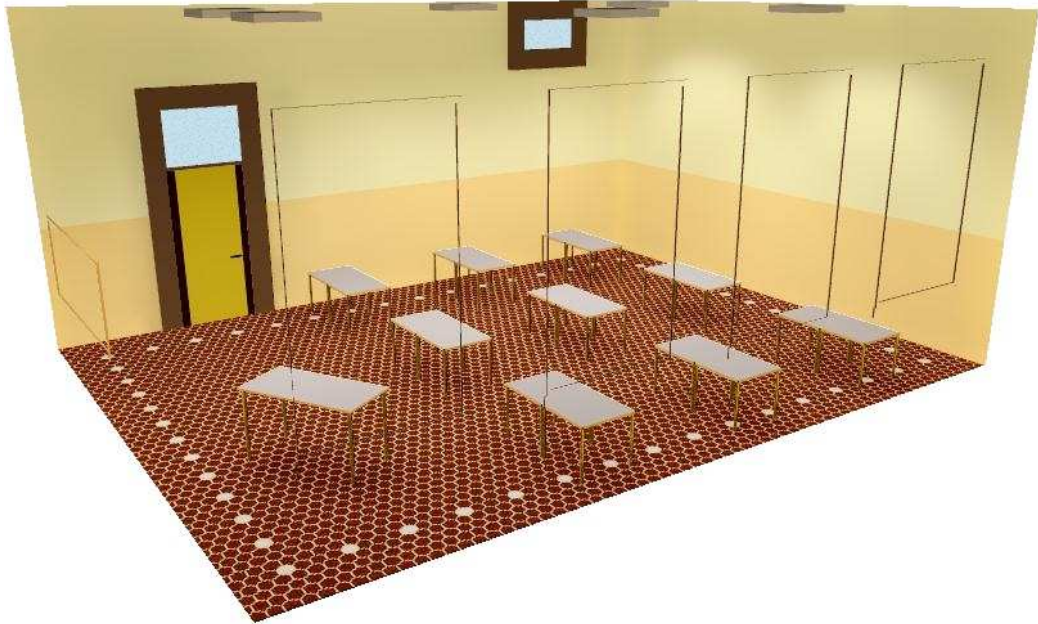


Figura 3.5 Rendering dell'aula

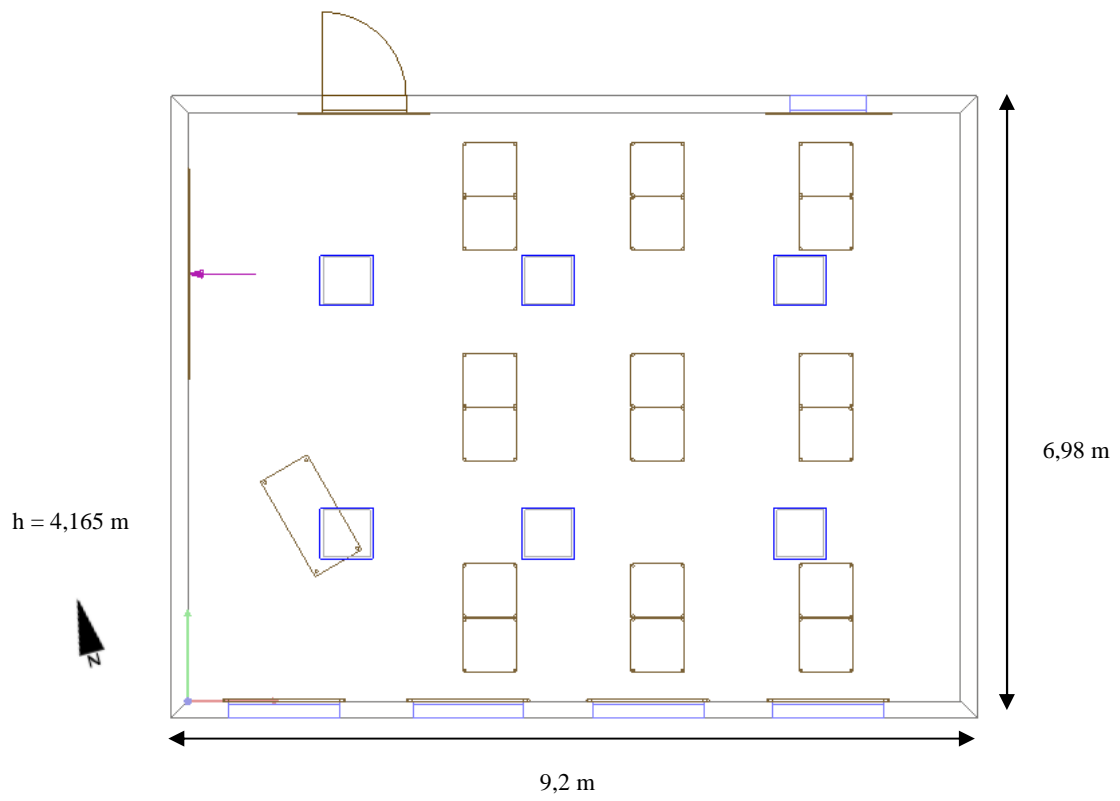


Figura 3.6 Planimetria dell'aula

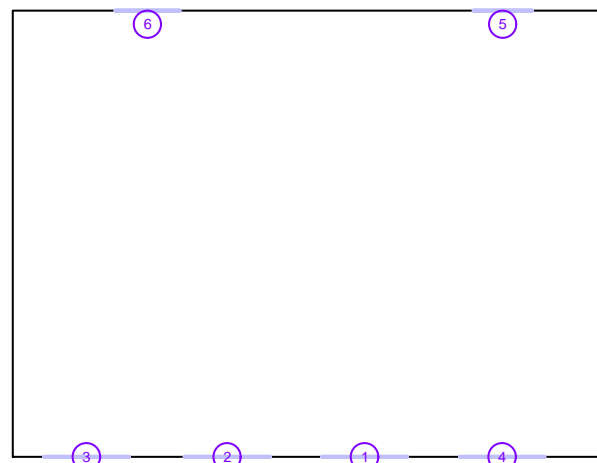


Figura 3.7 Disposizione delle finestre dell'aula

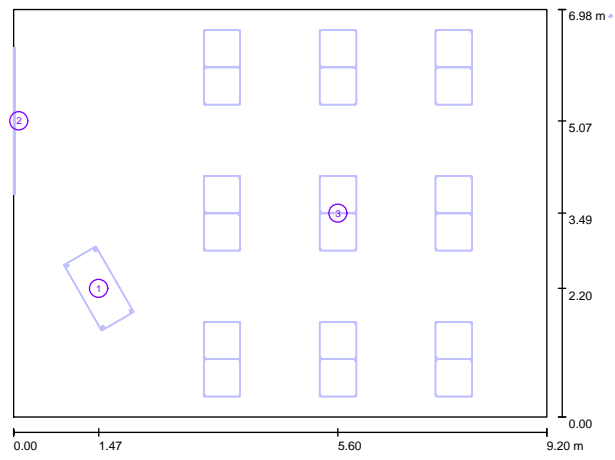


Figura 3.8 Disposizione degli oggetti nell'aula

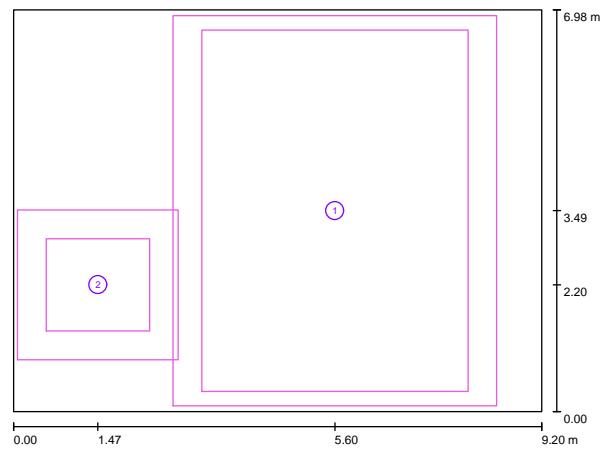


Figura 3.9 Piani di lavoro dell'aula con relative zone circostanti



Figura 3.10 Foto dell'apparecchio Atenalux [S5]

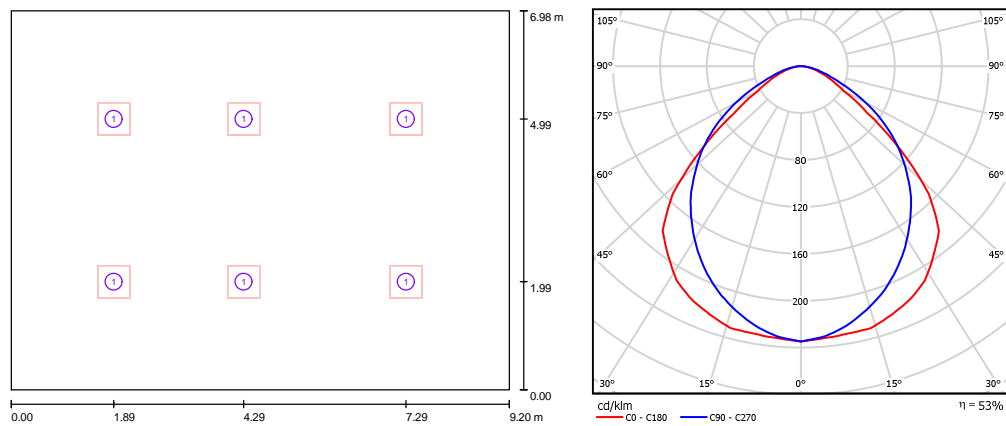


Figura 3.11 Disposizione lampade nell'aula e relative curve fotometriche

finestre	h [m]	l [m]	c. rif.	trasparenza [%]	riduzione per inquinamento esterno	riduzione per inquinamento interno	riduzione per infissi	trasmissione totale [%]
1	2,4	1,32	0,1	0,81*	0,97	0,97	0,68	0,52
2	2,4	1,32	0,1	0,81*	0,97	0,97	0,68	0,52
3	2,4	1,32	0,1	0,81*	0,97	0,97	0,68	0,52
4	2,4	1,32	0,1	0,81*	0,97	0,97	0,68	0,52
5	0,44	0,91	0,1	0,50**	0,84	0,84	1	0,35
6	0,735	1	0,1	0,50**	0,84	0,84	1	0,35

Tabella 3.4 Caratteristiche delle finestre dell'aula

* vetri doppi (0,9*0,9)

** vetro smerigliato

oggetti	coefficiente di riflessione (superficie di riferimento) [%]
(1) cattedra	70
(2) lavagna	16
(3) banchi	70

Tabella 3.5 Coefficienti di riflessione degli oggetti dell'aula che influenzano i risultati

postazione di lavoro	h [m]
1	0,6
2	0,8

Tabella 3.6 Altezza delle superfici del compito nell'aula

marca	n° apparecchi	n° lampade per apparecchio	P lampada [W]	P totale [W]	flusso luminoso [lm]	T del colore [K]	Ra
Atena Lux	6	4	18	72	5400	4000	80

Tabella 3.7 Apparecchi dell'aula

3.2.2. I corridoi



Figura 3.12 Foto dei corridoi

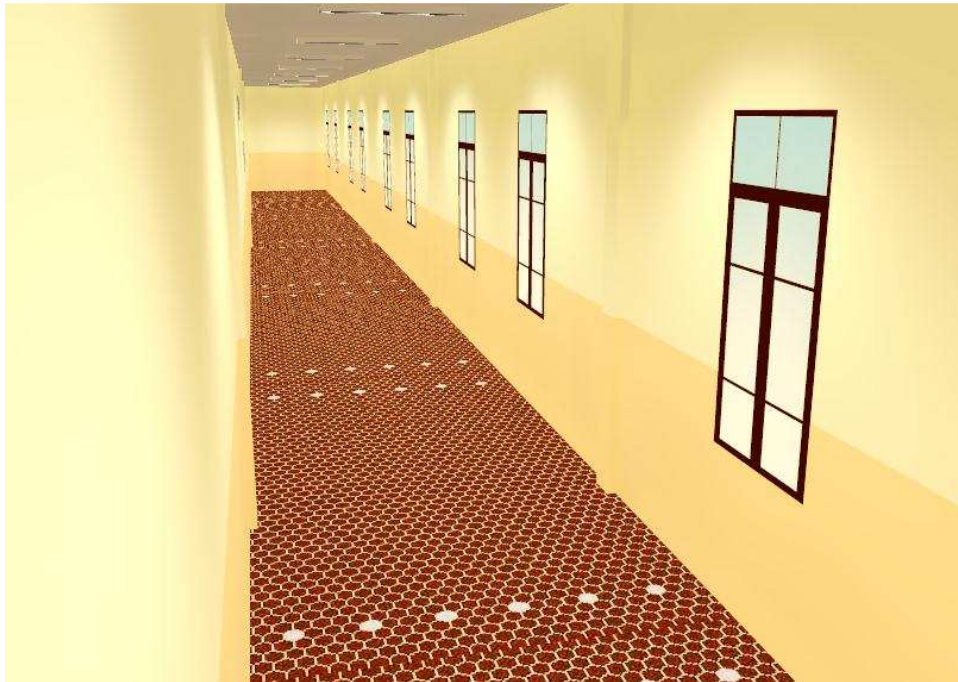


Figura 3.13 Rendering del corridoio

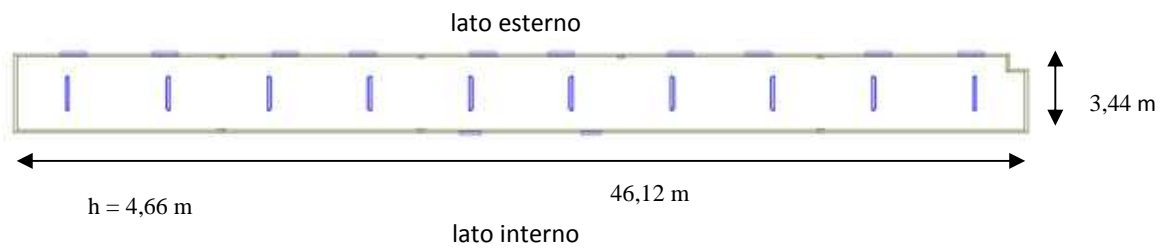


Figura 3.14 Planimetria del corridoio

marca	n° apparecchi	n° lampade	potenza lampada [W]	flusso luminoso [lm]	temperatura del colore [K]	Ra
3F Filippi	10	1	58	5200	4000	80

Tabella 3.8 Apparecchi del corridoio

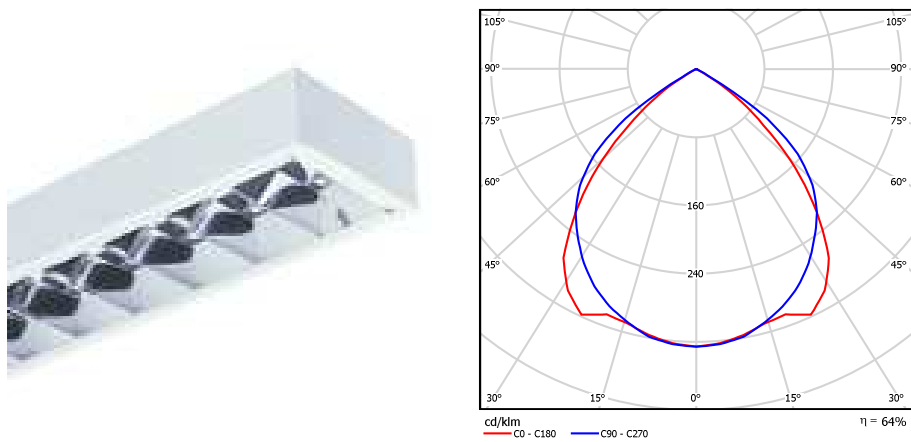


Figura 3.15 Foto dell'apparecchio 3F Filippi [S6] e relative curve fotometriche

Le finestre poste sul lato esterno del corridoio hanno le stesse caratteristiche di quelle dell'aula rivolte a sud. Le due finestre sul lato interno sono in comune con l'aula. Le superfici principali, pavimento, pareti e per ipotesi anche il soffitto, hanno gli stessi coefficienti di riflessione del caso precedente. Oggetti e postazioni di lavoro non sono presenti. Come riferimento per il calcolo dell'illuminamento artificiale e naturale medi si considera una superficie che si estende per tutta la lunghezza del corridoio, larga 1,5 m e posta, come prescritto dalla normativa UNI 10840, a 0,2 m da terra.

Per quanto riguarda infine i corpi illuminanti non è stato possibile trovare il plugin corrispondente perché il prodotto è uscito di produzione ma si è utilizzato un modello più recente che sostanzialmente ha le stesse caratteristiche di quello vecchio.

3.2.3. L'aula magna

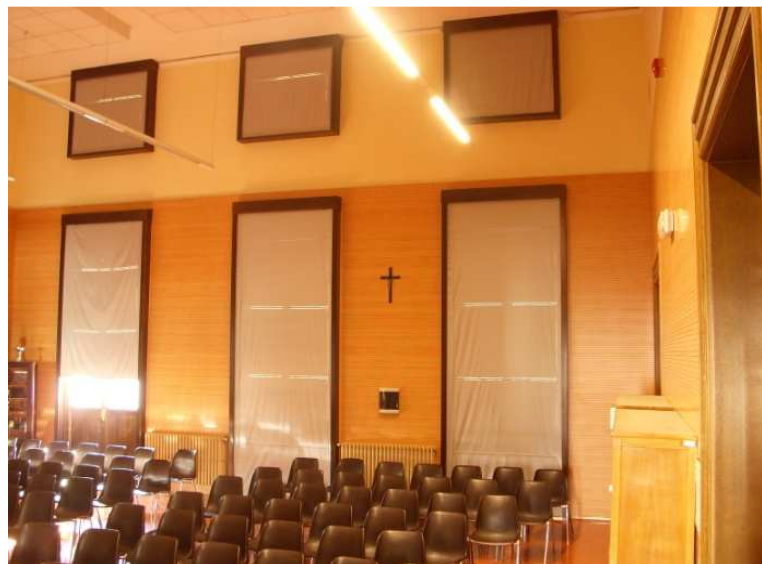


Figura 3.16 Foto dell'aula magna



Figura 3.17 Rendering dell'aula magna

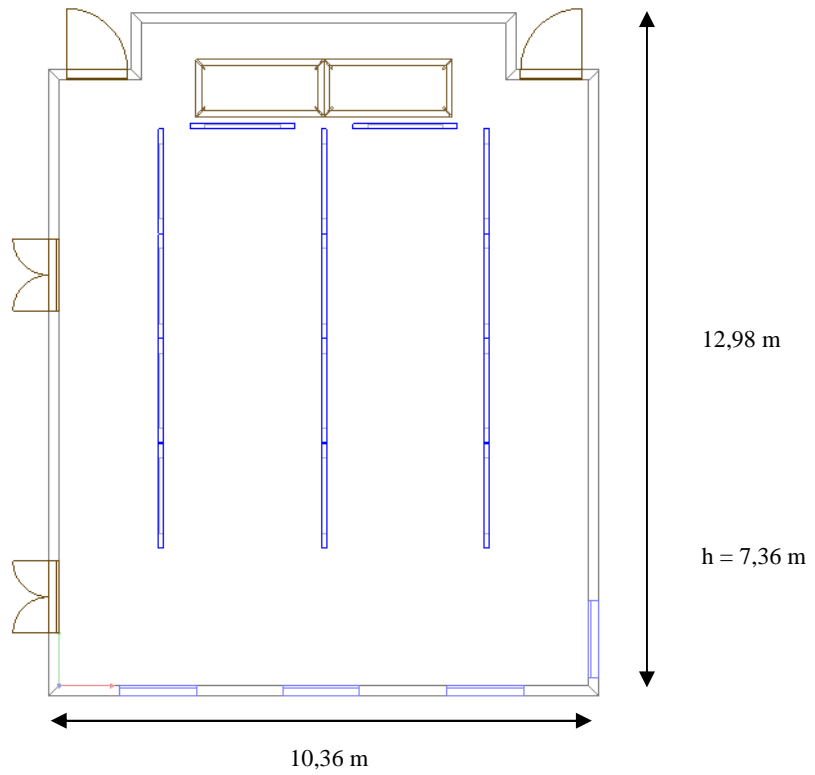


Figura 3.18 Planimetria dell'aula magna

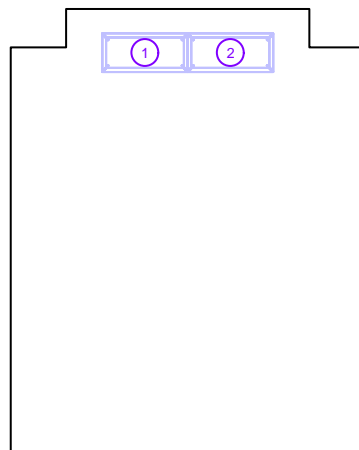


Figura 3.19 Disposizione degli oggetti nell'aula magna

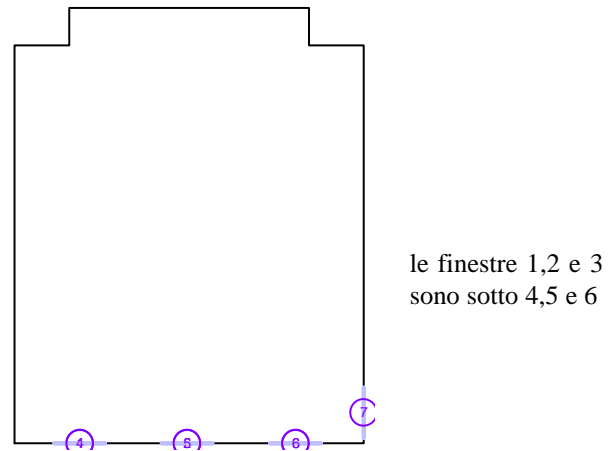


Figura 3.20 Disposizione delle finestre dell'aula magna

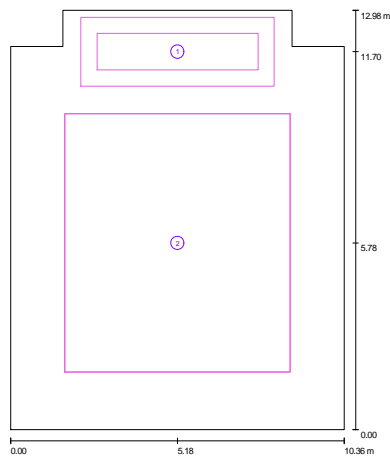


Figura 3.21 Piani di lavoro dell'aula magna con relative zone circostanti

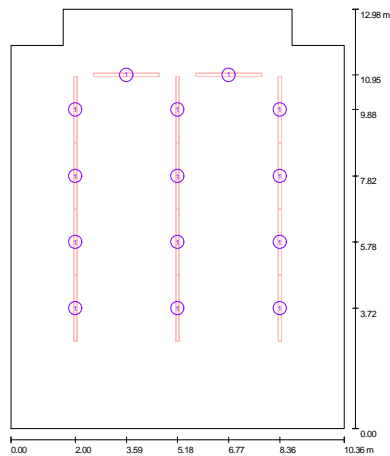


Figura 3.22 Disposizione degli apparecchi nell'aula magna



Figura 3.23 Foto dell'apparecchio Sames [S7]

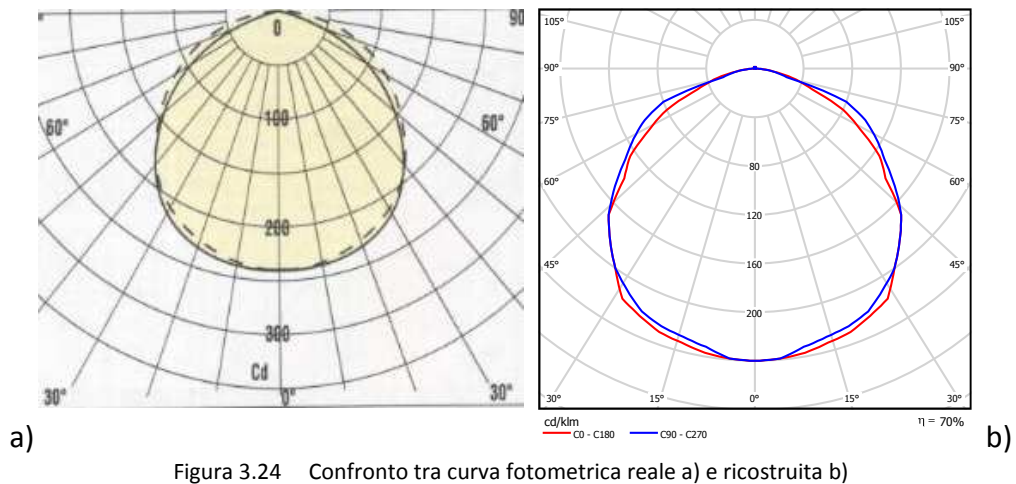


Figura 3.24 Confronto tra curva fotometrica reale a) e ricostruita b)

Nel caso dell'aula magna non solo gli apparecchi sono fuori catalogo ma non si è neanche trovata un'alternativa recente compatibile, visto che l'azienda SAMES produttrice degli apparecchi ha chiuso da tempo (assorbita dalla MARTINI). Si è quindi resa necessaria la creazione ad hoc degli apparecchi, possibile con il programma LDTeditor che permette di creare e modificare i file Eulumdat definendo le caratteristiche fisiche e prestazionali dei corpi illuminanti. I risultati ottenuti sono piuttosto approssimativi in quanto si avevano a disposizione le curve fotometriche in formato grafico e non numerico. Si veda infatti l'irregolarità delle curve ricavate (figura 3.24).

oggetti	coefficiente di riflessione (superficie di riferimento) [%]
tavoli	52

Tabella 3.9 Coefficienti di riflessione degli oggetti dell'aula magna che influenzano i risultati

finestre	h [m]	l [m]	c. rif.	trasparenza	riduzione per inquinamento esterno	riduzione per inquinamento interno	riduzione per infissi	trasmissione totale [%]
1	3,96	1,5	0,1	0,81	0,97	0,97	0,47	35,8
2	3,96	1,5	0,1	0,81	0,97	0,97	0,47	35,8
3	3,96	1,5	0,1	0,81	0,97	0,97	0,47	35,8
4	1,8	1,5	0,1	0,81	0,85	0,85	0,85	49,7
5	1,8	1,5	0,1	0,81	0,85	0,85	0,85	49,7
6	1,8	1,5	0,1	0,81	0,85	0,85	0,85	49,7
7	2,71	1,5	0,1	0,81	0,97	0,97	0,68	51,8

Tabella 3.10 Caratteristiche delle finestre dell'aula magna

postazione di lavoro	h [m]
1	0,75
2	0,85

Tabella 3.11 Altezza delle superfici del compito nell'aula magna

marca	n° apparecchi	n° lampade	potenza lampada [W]	flusso luminoso [lm]	temperatura del colore [K]	Ra
SAMES	14	1	58	5200	4000	80

Tabella 3.12 Apparecchi dell'aula magna

3.2.4. Le scene esterne

Per uno studio esaustivo sulla luce naturale non è sufficiente analizzare i locali interni dell'edificio: oltre alle condizioni del cielo bisogna infatti tenere conto degli spazi esterni e degli eventuali ostacoli ostruenti la luce. Superfici libere di fronte alle finestre, ad esempio, aumentano per riflessione la quantità di luce entrante, ostacoli come edifici e alberi la riducono.

Si sono pertanto ricreati gli scenari esterni alla scuola, che consistono in un cortile alberato nella zona antistante le aule, in una strada con altri edifici sul retro (figure 3.25 e 3.26 per aula e corridoio) e, solo per l'aula che è il locale di maggiore interesse, in un'imbotte dettagliata applicata alla facciata differente per i due piani (figura 3.27). Si sono riportati solo i locali analizzati, trascurando la restante parte dell'edificio, considerata influente ai fini dei risultati.

Aula e corridoio vanno rappresentati insieme perché i risultati relativi ai due locali sono interconnessi. Dialux però non consente di utilizzare a tal fine i locali creati per i calcoli ma obbliga a costruire caso per caso il locale adiacente come un oggetto ostruente, assimilandolo ad esempio ad un parallelepipedo cavo con le opportune aperture delle finestre.

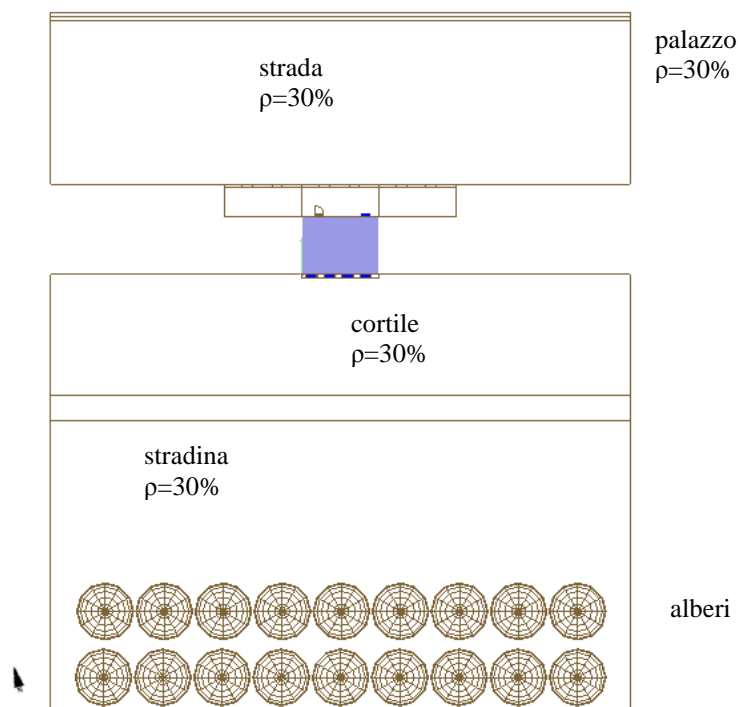


Figura 3.25 Planimetria degli spazi esterni alla scuola

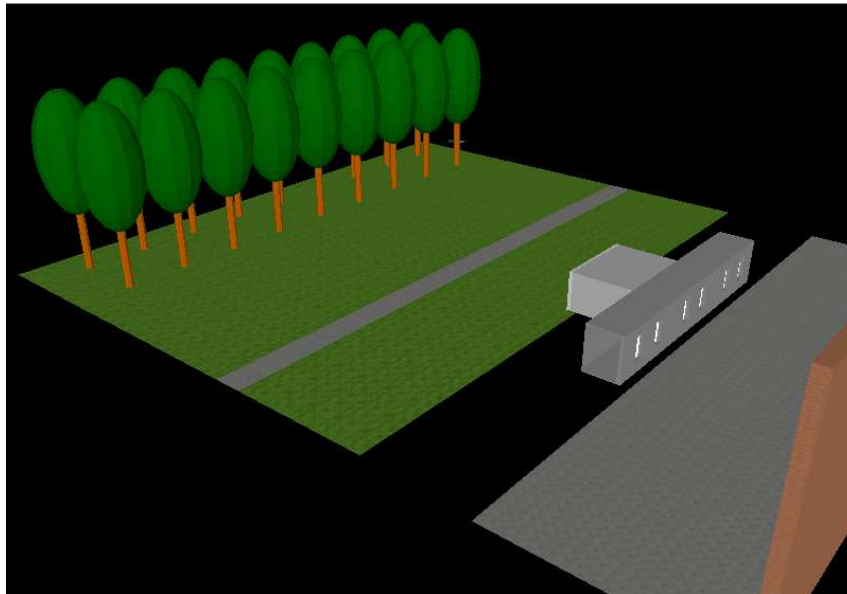


Figura 3.26 Visualizzazione 3D degli spazi esterni alla scuola

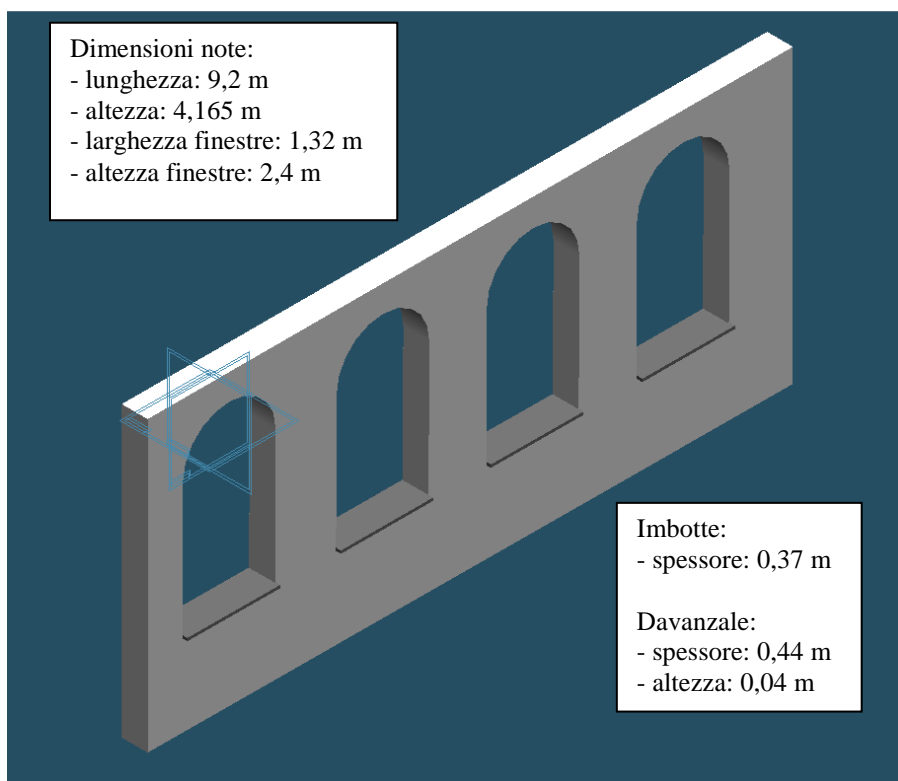


Figura 3.27 Dettaglio dell'imbotte ad arco del primo piano

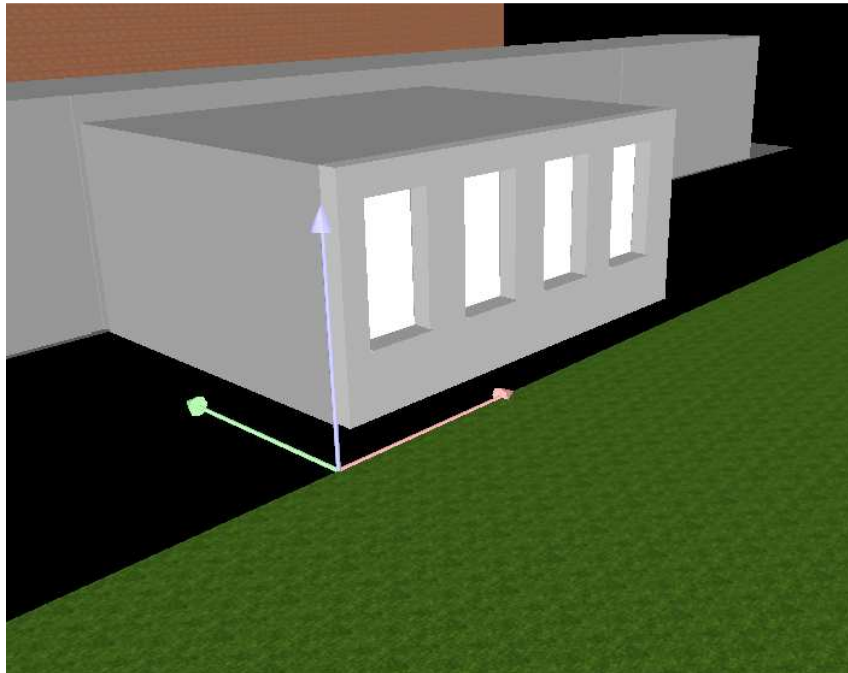


Figura 3.28 Imbotte del piano terra inserita nella scena

3.3. I sistemi di daylighting [13]

Nella categoria dei sistemi di daylighting e di sunlighting rientrano tutti quei componenti strutturali utilizzati per portare e regolare la luce naturale all'interno dei locali. I primi si basano sulla luce diffusa prodotta dalla volta celeste, i secondi sfruttano direttamente i raggi solari. D'ora in poi con il termine daylighting si indicheranno, per praticità, entrambe le tipologie di prodotti.

L'esempio più banale è rappresentato dalle finestre, sistemi molto semplici ma non necessariamente efficaci: se da una parte grandi aperture consentono una maggiore illuminazione, dall'altra si possono avere problemi termici e di abbagliamento.

Una prima distinzione 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.

In abbinamento ai pass-through components vengono spesso impiegati i *control elements*, sistemi che nella loro forma più semplice consistono in tende o veneziane e sono utili alla regolazione della quantità di luce entrante.

I possibili sistemi di daylighting disponibili sono innumerevoli. Per scegliere la soluzione più opportuna occorre valutare i seguenti fattori:

- dimensioni dell'edificio
- rapporto tra superficie e perimetro della pavimentazione
- esigenze in termini di quantità di luce e uniformità di distribuzione
- requisiti di manutenzione e sicurezza
- condizioni del cielo predominanti

Relativamente alle scuole bisogna considerare innanzitutto la limitata compattezza che generalmente contraddistingue questo tipo di edifici e, di conseguenza, la teorica facilità con la quale si riesce a far pervenire la luce naturale in tutte le zone interne del fabbricato. I locali più problematici da questo punto di vista sono le classi, a causa della non uniformità di distribuzione della luce, soprattutto se l'aula si sviluppa più in profondità che in lunghezza.

Per regolare l'apporto di luce dall'esterno in questo tipo di fabbricati i sistemi più adatti, divisi per categorie, sono:

- **conduction components:** i più diffusi sono i corridoi, gli atri e i cortili. Di recente applicazione sono i light-duct e i sun-duct (figura 3.29), condotti che convogliano rispettivamente la luce diffusa e quella diretta del sole all'interno dei locali. Possono soddisfare il fabbisogno solo parzialmente, andando ad integrare le finestre quando non sufficienti, o completamente nel caso in cui le stanze non presentino aperture verso l'esterno (es. bagni).

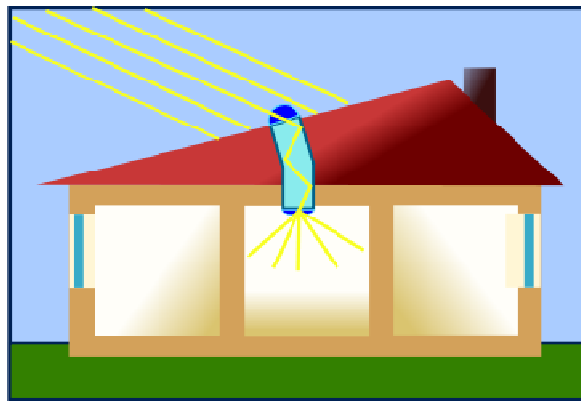


Figura 3.29 Funzionamento dei sun-duct [S8]

- **pass-through components:** in alternativa alle finestre si possono trovare, anche se raramente, pareti traslucide in grado di trasformare i raggi del sole in luce diffusa risolvendo il problema dell'abbagliamento (figura 3.30). Molto frequenti, visto che generalmente le scuole si sviluppano più in larghezza che in altezza, le aperture sui soffitti, come i lucernari che, rispetto alle finestre, garantiscono una migliore distribuzione della luce.

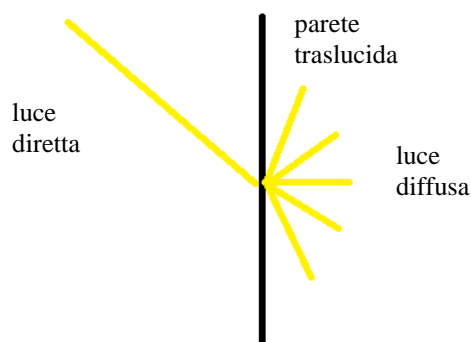


Figura 3.30 Funzionamento delle pareti traslucide

- **control elements:** nelle scuole questi elementi 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. Esempi di questo tipo sono le persiane e i brise-soleil, strutture fisse esterne che creano un opportuno ombreggiamento davanti alle finestre (figura 3.31).

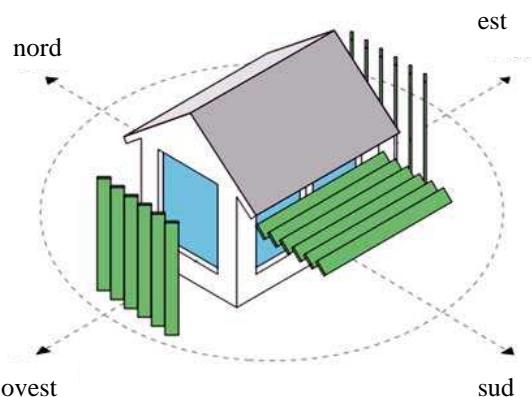


Figura 3.31 Configurazione dei brise-soleil a seconda dell'orientazione delle finestre [S9]

Se invece, oltre alla protezione, si è interessati anche a migliorare la distribuzione della luce all'interno delle classi sono particolarmente indicati, per gli edifici scolastici, gli schermi rigidi. A seconda della disposizione si distinguono:

- a) **Overhang:** è parte integrante dell'edificio e consiste in una protrusione orizzontale al di sopra delle finestre;
- b) **Baffle:** a differenza dell'overhang è separato dall'edificio ed è disposto in posizione tendenzialmente verticale;
- c) **Lightshelf:** è un elemento piano o curvo in genere collocato orizzontalmente al di sopra del livello degli occhi e divide la finestra in due parti.

Si riassumono in tab. 3.13 i principali sistemi di daylighting utilizzati in edilizia, compresi quelli proposti, indicando per ciascuno se sono adatti (tre stelle) o non adatti (nessuna stella) all'impiego negli edifici scolastici, distinguendo inoltre la loro efficacia a seconda delle condizioni ambientali predominanti.

	Sunny	Cloudy
Conduction components		
Intermediate light space		
Gallery	*	*
Porch	*	*
Greenhouse	*	*
Interior light space		
Courtyard	***	*
Atrium		***
Light-duct	*	***
Sun-duct	***	*
Pass-through components		
Lateral		
Window	***	***
Balcony		
Translucent wall	*	*
Curtain Wall		
Zenithal		
Clerestory	***	***
Monitor roof	*	*
North-light roof	*	*
Translucent ceiling		*
Skylight	*	*
Dome		*
Lantern	*	*
Global		
Membrane		*
Control elements		
Separator surfaces		
Conventional division	*	*
Optical division		***
Prismatic division	***	***
Active division	*	
Flexible screens		

continua

Awning	*	
Curtain		*
Rigid screen		
Overhang	***	
Lightshelf	***	***
Sill	*	*
Fin	*	
Baffle	*	*
Solar filters		
Blind	***	*
Louver	*	
Jalousie	*	
Solar obstructions		
Shutter	*	*

segue

Tabella 3.13 Sistemi consigliati per le scuole in funzione delle condizioni atmosferiche medie¹

Dalla tabella 3.13 si evince che, tra gli ultimi tre elementi di controllo descritti, l'unico consigliabile per le scuole ed efficace sia in condizioni di cielo nuvoloso che di cielo sereno è il sistema lightshelf. Il sistema overhang non porta infatti nessun beneficio in caso di cielo coperto mentre il sistema baffle prevede opere murarie complesse ed è quindi poco usato.

Sebbene meno invasive, le lightshelf non sono però applicabili in ogni situazione: il problema dell'integrazione architettonica dal punto di vista dell'impatto visivo e delle modifiche da apportare alla facciata è, soprattutto nel caso di edifici storici, tutt'altro che trascurabile. Lasciando ad altri il compito di esprimere i giudizi di natura estetica, a parere di chi scrive l'obiettivo fondamentale che ci si deve porre progettando il sistema (in particolare l'installazione) è quello di minimizzare gli interventi permanenti sulla facciata, e possibilmente di eliminarli, così da rendere l'intervento perfettamente reversibile.

Tutti questi ragionamenti sono comunque subordinati ai vincoli artistici e paesaggistici contenuti nel piano regolatore che pongono limiti agli interventi sugli edifici di interesse storico.

¹ Riproduzione della tabella in [13]

Soffermandosi per il momento sull'analisi puramente prestazionale delle lightshelf, sembra che questo componente sia l'ideale per il caso in esame e se ne vogliono verificare, con l'ausilio di Dialux e Relux, le potenzialità.

3.4. Il sistema lightshelf [13]

Come già anticipato questo elemento può essere piano o curvo ed è posto in prossimità delle finestre sopra il livello degli occhi (figura 3.32). Per la struttura portante c'è un'ampia scelta di materiali; le superfici possono essere riflettenti (generalmente alluminio o specchi), diffondenti, o una opportuna via di mezzo. La soluzione migliore è di solito l'ultima: se infatti da una parte, ricorrendo a superfici diffondenti, metà del contributo di luce va perso (in realtà una parte di quella proveniente dalla superficie interna viene riflessa dal vetro di nuovo all'interno (circa il 10%)), dall'altra le superfici perfettamente riflettenti hanno lo svantaggio di proiettare sul soffitto le immagini delle eventuali impurità che le ricoprono.

Il sistema può essere scomposto in una parte interna ed una esterna, non presenti necessariamente entrambe. Con il suo inserimento la finestra viene suddivisa in due zone che svolgono funzioni diverse: la parte inferiore è detta view window e permette di mantenere un contatto visivo con il mondo esterno, molto importante per la psicologia degli occupanti; la parte superiore, invece, è la fonte primaria di luce e prende il nome di clarestory window o light window, termine che rende ancor meglio l'idea del ruolo svolto da questa porzione di finestra.

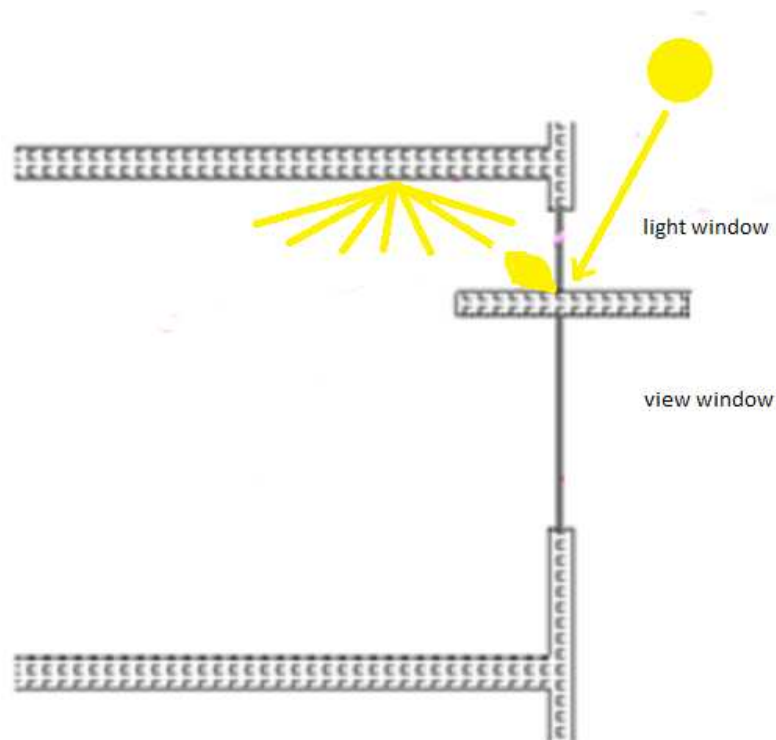


Figura 3.32 Funzionamento delle lightshelf

L'effetto positivo delle lightshelf sulla distribuzione della luce naturale è duplice visto che entrambe le superfici possono contribuire alla riflessione: la parete superiore sfrutta i raggi solari diretti e la luce diffusa della volta celeste facendo in modo che la luce sia ridiretta in profondità verso il soffitto e poi ancora verso il basso (è opportuno che il soffitto, abbia un coefficiente di riflessione elevato), quella inferiore si comporta come un overhang riflettendo la luce proveniente dal suolo ed è quindi da sfruttare soprattutto in presenza di terreni altamente riflettenti come l'acqua. Solitamente il soffitto è di materiale diffusivo per non causare abbagliamento.

Riassumendo, le lightshelf sono sistemi molto interessanti perché svolgono contemporaneamente tre funzioni:

- *ombreggiamento delle zone adiacenti alle finestre.* L'idea, in alcuni casi, è quella di schermare dal sole evitando surriscaldamento e abbagliamento (anche in direzione della lavagna) in estate, e di lasciare invece penetrare luce e calore in inverno, inclinando opportunamente la lastra e sfruttando la diversa altezza del sole nelle due stagioni. Anche

i filtri solari svolgono questa funzione ma causano una forte riduzione della luce entrante non compensata in altro modo.

- *controllo della luce diffusa* (aspetto di daylighting). Il problema principale delle aule scolastiche è rappresentato dalla disuniformità nella distribuzione della luce, che causa sprechi energetici e riduzione del comfort visivo. In teoria le lightshelf, aumentando l'illuminamento in fondo ai locali grazie alla riflessione della luce sul soffitto e riducendolo vicino alle finestre, limitano questo gap.
- *riflessione della radiazione diretta verso l'interno* (aspetto di sunlighting). Il sole ha un potenziale di illuminazione molto superiore al cielo, anche se quest'ultimo è sgombro da nubi. Convogliando la radiazione diretta all'interno del locale è quindi possibile, in teoria, aumentare notevolmente il livello di illuminamento medio riducendo il bisogno di illuminazione artificiale e, in ultima analisi, i consumi.

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.

3.4.1. Case study

Un'idea dei risultati potenzialmente ottenibili si può avere considerando l'esperienza maturata con questo tipo di soluzione in due edifici europei: un istituto scolastico francese e un complesso di uffici in Svizzera [14].

1. Il collège La Vanoise di Modane in Francia

L'edificio è composto da 33 classi organizzate intorno a tre atrii che fungono da light box: la luce naturale filtra attraverso il soffitto dell'atrio per poi alimentare le classi con quella che viene detta illuminazione secondaria. Senza questa fonte di luce, si legge, il fattore di daylighting al livello del pavimento sarebbe più basso di mezzo punto percentuale (figura 3.33).

Anche le classi dell'Aristide Gabelli sono dotate di finestre interne ma il potenziale di illuminazione secondaria, utile non solo per aumentare i livelli di illuminamento ma anche per migliorare l'uniformità, non è in questo caso opportunamente sfruttato, visto l'impiego di vetri smerigliati a basso coefficiente di trasmissione.

Riguardo ai risultati ottenuti applicando le lightshelf alle classi, le informazioni riportate acquistano ancora maggior rilievo considerando che le finestre sono orientate a sud come nel caso dell'istituto friulano.

Le lightshelf, in questo caso di acciaio inox per motivi di costi e di manutenzione ma a discapito del coefficiente di riflessione (non supera il 50%), sono opportunamente inclinate in modo da riflettere i raggi verso l'esterno in estate e verso l'interno in inverno (figura 3.34).

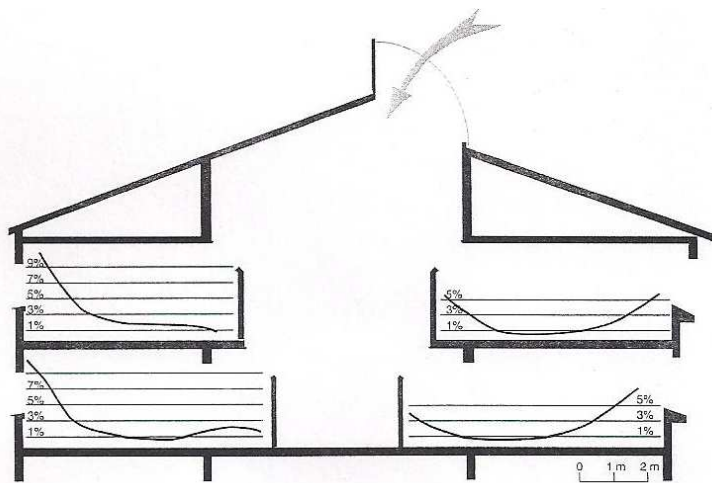


Figura 3.33 Andamento della fattore medio di luce diurna in quattro tipiche classi [14]

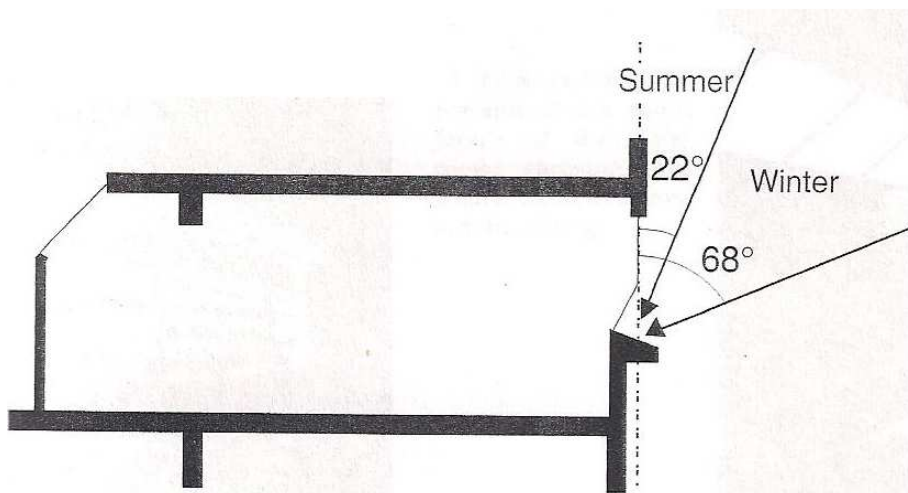


Figura 3.34 Inclinazione delle lightshelf nel primo case study [14]

Ebbene, lo studio svolto sul collegio francese ha dimostrato una riduzione dell'illuminazione artificiale nell'intero fabbricato intorno al 40%, senza per questo segnalare un aumento significativo dei costi per il riscaldamento, dovuto alla riduzione del calore fornito dalle lampade.

2. EOS Building, Lausanne

In questo fabbricato la maggior parte degli uffici è disposta in direzione sud-ovest ed è illuminata attraverso finestre continue: si possono distinguere due bande di finestre sovrapposte e tra loro sono collocate lightshelf esterne, anch'esse continue.

L'altezza del soffitto è di 2,58 m, la profondità di 5,70 m.

Le lightshelf sono ad una altezza di 2 m, sono larghe 0,8 m e sono leggermente inclinate verso il basso, non tanto per motivi illuminotecnici quanto per permettere il deflusso dell'acqua piovana. Il materiale di cui sono fatte è alluminio anodizzato che garantisce buone caratteristiche di riflessione e durata (figura 3.35).

A livello prestazionale si distingue il comportamento con luce diffusa (daylighting) da quello con luce diretta (sunlighting): per quanto riguarda il secondo aspetto una significativa frazione dei raggi solari è intercettata dalle lightshelf e ridiretta verso il soffitto degli uffici causando contemporaneamente un abbassamento dei livelli di luce nei primi due metri. L'effetto di ombreggiamento si spinge fino a qualche metro dalle finestre ma è localizzato e sistemi di shading sono comunque richiesti.

Quanto alla luce diffusa, invece, le lightshelf consentono di avere una maggiore uniformità di illuminazione, soprattutto per l'abbassamento dei livelli di luce vicino alle finestre.

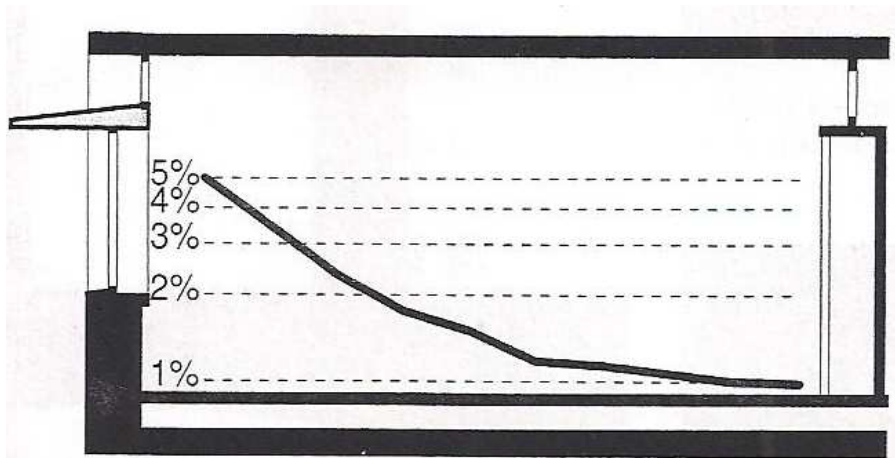


Figura 3.35 Configurazione della lightshelf e fattore di daylighting nel secondo case study [14]

3.5. L'attuale sistema di daylighting

Se riportano due foto (figure 3.36 e 3.37), una raffigurante tutte e quattro le finestre dell'aula con il relativo sistema di daylighting attualmente installato e una raffigurante una sola finestra in dettaglio. Il sistema è rappresentato da tende a veneziana. Nella prima foto le lamelle delle varie veneziane sono regolate a diversi angoli di inclinazione per mostrare alcune possibili configurazioni.

Oltre alla regolazione dell'angolo di incidenza è possibile escludere completamente le veneziane impacchettandole verso l'alto.



Figura 3.36 Finestre dell'aula e relativi sistemi di daylighting



Figura 3.37 Finestra dell'aula in dettaglio

Il problema fondamentale di questo sistema è avvertito soprattutto in estate ed è dovuto alla sua collocazione interna al locale. Se infatti dal punto di vista illuminotecnico è grossomodo indifferente se il sistema è posto all'interno o all'esterno, lo stesso discorso non vale per il calore contenuto nella radiazione solare (infrarossi). Se il sistema di schermatura è all'esterno il calore non penetra nella stanza perché bloccato insieme alla luce prima di raggiungere le finestre; se posto all'interno, il calore entra e rimane imprigionato dai vetri all'interno della stanza, rendendo inutile la successiva schermatura. Si ha di conseguenza un notevole aumento dell'energia necessaria al condizionamento o, in assenza di sistemi di condizionamento come in questo caso, il surriscaldamento dell'ambiente.

L'altra questione riguardante il sistema attualmente installato più che un problema è una limitazione: le veneziane hanno la funzione quasi esclusiva di schermo contro la radiazione diretta e tutti i sistemi di questo genere hanno la conseguenza negativa di abbassare considerevolmente i valori di illuminamento rendendo necessario il ricorso all'illuminazione artificiale.

Per porre rimedio a queste problematiche si vuole quindi trovare una soluzione che abbia le seguenti caratteristiche:

- il sistema dovrebbe essere esterno e necessariamente di basso impatto visivo per non interferire con la facciata storica dell'edificio; in alternativa si dovrebbero impiegare vetri particolari in grado di schermare le radiazioni infrarosse facendo invece filtrare gran parte della luce visibile.
- oltre all'ombreggiamento il sistema deve permettere alla luce di filtrare e possibilmente di penetrare in profondità per illuminare le zone più buie dell'aula, senza causare abbagliamento.

In realtà le lamelle delle veneziane riflettono effettivamente parte della luce verso l'interno ma il basso coefficiente di riflessione del materiale rende questa funzione secondaria rispetto a quella di ombreggiamento.

Capitolo 4

Risultati Ottenuti: Illuminazione Artificiale

4.1. Validazione di Dialux

Prima di procedere con le simulazioni di progetto si esegue una serie di test sul software maggiormente utilizzato per valutarne l'attendibilità dei risultati.

La validazione con luce artificiale si basa su misurazioni dirette eseguite in loco, quella degli scenari di luce naturale, invece, avviene riproducendo il più fedelmente possibile una serie di prove sperimentali trovate in letteratura e imperniate proprio sull'effetto delle lightshelf [13]. La scelta di non eseguire misurazioni in condizioni di luce naturale dipende principalmente dalle difficoltà causate dalle condizioni climatiche esterne, estremamente variabili e difficili da riprodurre con esattezza.

- **Luce artificiale**

Il locale preso in considerazione per il test è l'aula. Le misure di illuminamento sono state eseguite in punti equispaziati in entrambe le direzioni di 1 m, per un totale di 30 punti (figura 4.1), all'altezza dei banchi (0,6 m). La superficie complessivamente coperta è di 20 m².

Si riportano i risultati su una tabella che riproduce la distribuzione dei punti di misurazione (tabella 4.2). Ogni casella corrisponde ad un punto: la prima riga mostra i valori di illuminamento simulati, la seconda quelli misurati e la terza la loro differenza.

L'errore medio rispetto al valore medio simulato è di 21,9 lux, pari al 12,2 %. L'errore più grande supera il 30 % ma in prossimità di quel punto due lampade non erano funzionanti al momento delle misurazioni e l'illuminamento risulta giocoforza ancora più basso. La deviazione standard è abbastanza contenuta, circa 18 lux, e una importante causa di discrepanza tra i due valori si può perciò imputare allo strumento di misura. Altre fonti di errore sono sicuramente i festoni appesi a mezza altezza lungo la classe che riducono localmente l'illuminamento e soprattutto gli oggetti ai lati del locale e i cartelloni appesi alle pareti che riducono la riflessione. Se infatti nella zona centrale dell'aula i

risultati sono stati molto buoni, è lungo le pareti che si sono registrati gli errori più apprezzabili.

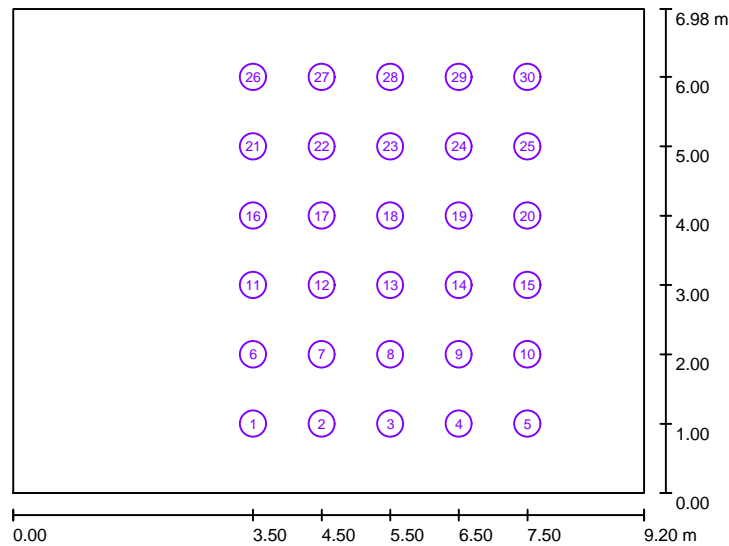


Figura 4.1 Punti in cui si è misurato l'illuminamento

168	169	160	152	139	
112	133	138	131	104	
56	36	22	21	35	
200	199	187	178	164	
141	171	175	165	124	
59	28	12	13	40	lux
216	216	203	192	176	
171	195	195	185	139	
45	21	8	7	37	
215	215	201	191	174	
180	200	205	193	141	
35	15	-4	-2	33	
197	195	183	174	160	
167	197	198	168	126	
30	-2	-15	6	34	
161	161	151	144	131	
142	149	140	125	104	
19	12	11	19	27	

Tabella 4.1 Distribuzione dei valori di E secondo lo schema di figura 4.1.

La prima riga riporta il valore simulato, la seconda quello misurato e la terza la loro differenza

	media	max	min
E_{sim} [lux]	179	216	131
E_{mis} [lux]	157	205	104

	media	max +	max -
err [lux]	21,9	59	-15
err [%]	12,2	32,9	-8,4

Tabella 4.2 Statistiche dei risultati del confronto tra valori di illuminamento misurati e simulati

Un altro contributo al peggioramento dei risultati vicino alle pareti, infine, potrebbe essere rappresentato dalla composizione mista delle pareti, coperte nella parte inferiore da smalto e in quella superiore da intonaco. I due materiali hanno coefficienti di riflessione abbastanza diversi ($\rho_{smalto} < \rho_{intonaco}$) e mentre Dialux non tiene conto di questa differenza (il coefficiente di riflessione rappresenta una media, pesata sul rapporto delle superfici) in realtà nella parte inferiore, dove vengono effettuate le misurazioni, si potrebbero registrare valori di illuminamento inferiori.

- **Luce naturale**

Le prove sperimentali che si vogliono riprodurre numericamente coinvolgono due locali identici per dimensioni e caratteristiche delle superfici: 9 m di lunghezza per 9 m di larghezza per 3 m d'altezza, per quanto riguarda le misure, mentre i coefficienti di riflessione delle superfici sono 0,6, 0,7 e 0,25 rispettivamente per pareti, soffitto e pavimento. I due locali si differenziano per le aperture: una è larga 9 m e alta 2 m a partire dal soffitto, l'altra occupa sempre uno dei lati per tutta la sua lunghezza ma è alta solo 1 m. Entrambi i locali, infine, sono posti su piani rialzati di fondo nero e sono privi di ostacoli nelle vicinanze così da rendere trascurabile l'influenza del suolo.

I dati delle prove sperimentali che si hanno a disposizione e che si vogliono verificare sono i fattori di luce diurna puntuali all'interno delle stanze modello a diverse distanze dall'apertura, ottenuti in condizioni di cielo artificiale.

La prima condizione che si riproduce è quella che vede i due locali privi di finestratura e di qualsiasi altro sistema di daylighting. Le aperture sono cioè semplici, prive di vetri. I risultati sono riportati nelle tabelle 4.3 e 4.4 e rappresentati nelle figure 4.2 e 4.3.

l [m]	D_{m_sp} [%]	D_{m_sim} [%]	ΔD [%]
1,5	8,8	10,67	1,87
2	-	8,41	-
2,5	-	6,38	-
3	4,4	5,02	0,62
3,5	-	3,96	-
4	-	3,13	-
4,5	2,6	2,66	0,06
5	-	2,25	-
5,5	-	1,91	-
6	1,9	1,64	-0,26
6,5	-	1,42	-
7	-	1,25	-
7,5	1,7	1,21	-0,49

Tabella 4.3 Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 1 m¹

l [m]	D_{m_sp} [%]	D_{m_sim} [%]	ΔD [%]
1,5	16,5	18,56	2,06
2		13,34	
2,5		9,74	
3	6,6	7,52	0,92
3,5		5,87	
4		4,71	
4,5	3,2	3,9	0,7
5		3,31	
5,5		2,82	
6	2,2	2,47	0,27
6,5		2,18	
7		1,97	
7,5	2,05	1,87	-0,18

Tabella 4.4 Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 2 m¹

¹ D_m è il fattore medio di luce diurna, talvolta indicato anche con η_m
 la percentuale invece si indicherà con %

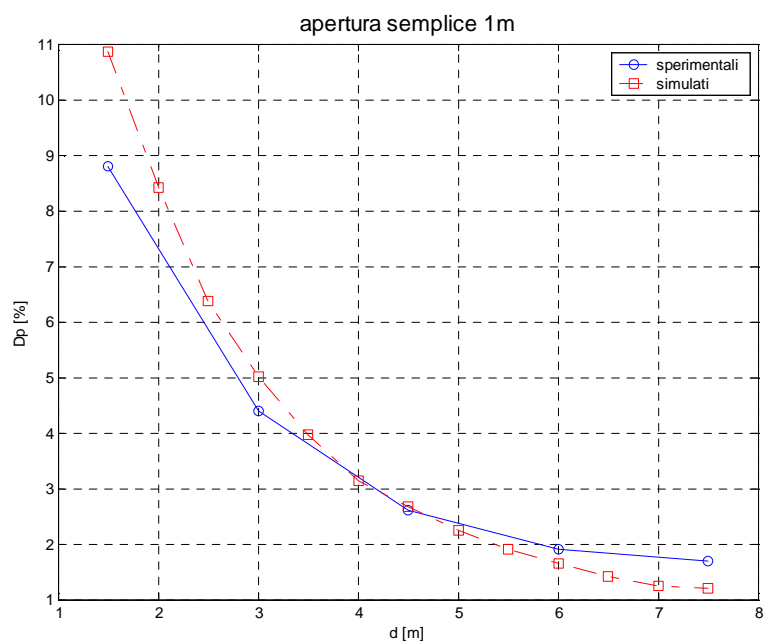


Figura 4.2 Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 1 m

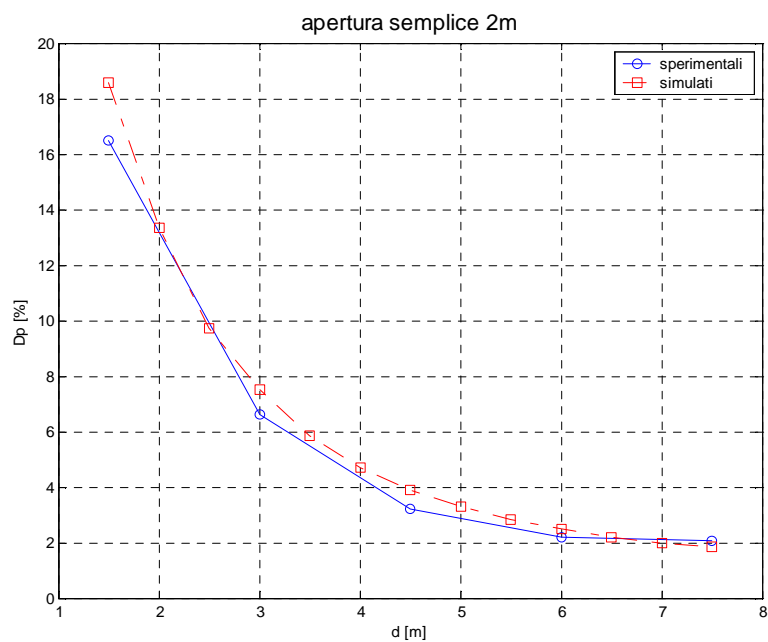


Figura 4.3 Confronto tra dati sperimentali e simulati nel caso di apertura semplice di 2 m

Si rimanda al capitolo successivo per i commenti sui risultati fisici. Quello che interessa in questo momento è la corrispondenza tra i due approcci, sperimentale e numerico, che già dalle figure appare decisamente buona. Scendendo più in dettaglio con l'analisi delle tabelle si osserva che in entrambi i casi l'andamento delle due curve è simile: l'errore più grande in termini assoluti (l'errore percentuale non si considera perché i valori in fondo sono bassi e le percentuali risultano alte anche se l'errore assoluto non lo è) è commesso vicino alle finestre, a 1,5 m, con il valore simulato maggiore di quello sperimentale; poi, invece, le due curve si avvicinano e a 7,5 m è viceversa il dato sperimentale a superare quello simulato.

La situazione fin qui descritta può essere considerata semplice visto che non è presente alcun componente di daylighting e il fatto che i risultati ottenuti con Dialux mostrino una buona corrispondenza era largamente prevedibile. L'esito invece è più incerto qualora vengano introdotti in Dialux oggetti di maggiore complessità come le lightshelf, complessità legata non tanto alla struttura quanto all'influenza esercitata sulla luce entrante. Il programma offre la possibilità di creare facilmente le lightshelf assimilandole a costruzioni ostruenti ma si vuole verificare se Dialux è effettivamente in grado di analizzare con precisione tutte le funzioni svolte dal componente.

Le prove sperimentali da cui si è attinto si sono svolte su molteplici configurazioni di lightshelf. Se ne sono scelte due, entrambe riferite al locale con apertura di 2 m: la prima prevede una lightshelf lungo tutta l'apertura, larga 1 m e inclinata di 30°; per quanto riguarda la seconda, alla parte esterna, inclinata questa volta di 15°, si aggiunge una parte interna piana, sempre di 1 m, piana. Entrambe le lightshelf sono collocate a 2 m da terra, a metà quindi dell'apertura. La figura 4.4 mostra le due componenti, interna ed esterna, della seconda configurazione presentata.

Come prima si presentano i risultati in forma tabellare (4.5 e 4.6) e grafica (4.5 e 4.6). Non si riportano i valori assoluti ma la differenza rispetto al caso senza lightshelf, cioè ΔD_p [%].

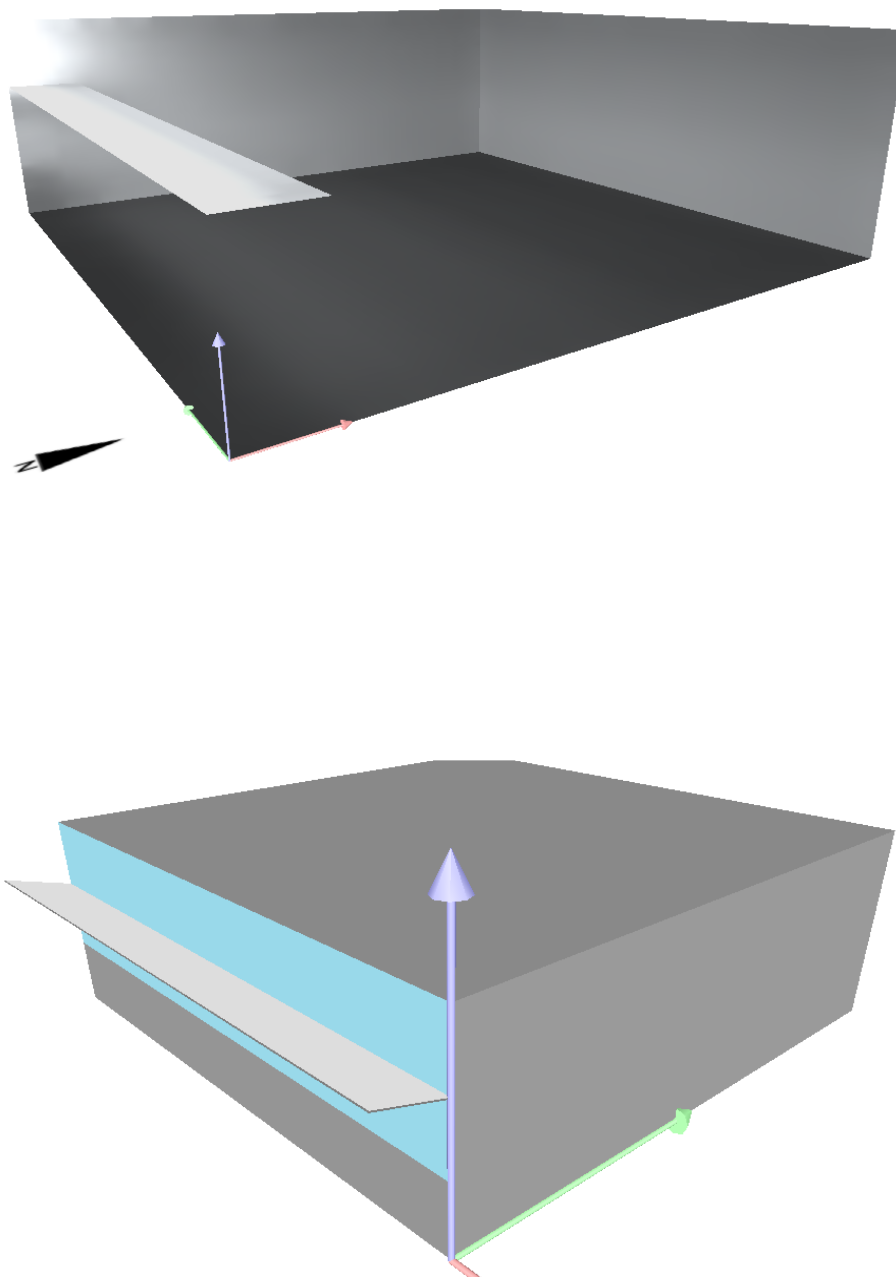


Figura 4.4 Lightshelf, configurazione interna a) + esterna b)

l [m]	ΔD_{p_sp} [%]	ΔD_{p_sim} [%]	ΔD_p [%]
1,5	0,6	0,87	0,27
2	-	1,53	-
2,5	-	1,08	-
3	1,7	0,82	-0,88
3,5	-	0,59	-
4	-	0,47	-
4,5	1,05	0,38	-0,67
5	-	0,36	-
5,5	-	0,37	-
6	0,6	0,33	-0,27
6,5	-	0,29	-
7	-	0,26	-
7,5	0,55	0,24	-0,31

Tabella 4.5 Variazione di D_p con lightshelf esterna

l [m]	ΔD_{p_sp} [%]	ΔD_{p_sim} [%]	ΔD_p [%]
1,5	-8	-10,44	-2,44
2		-5,96	
2,5		-2,6	
3	-0,6	-0,68	-0,08
3,5		-0,17	
4		-0,01	
4,5	0,15	0	-0,15
5		0,07	
5,5		0,13	
6	0,35	0,13	-0,22
6,5		0,1	
7		0,09	
7,5	0,3	0,06	-0,24

Tabella 4.6 Variazione di D_p con lightshelf esterna+interna

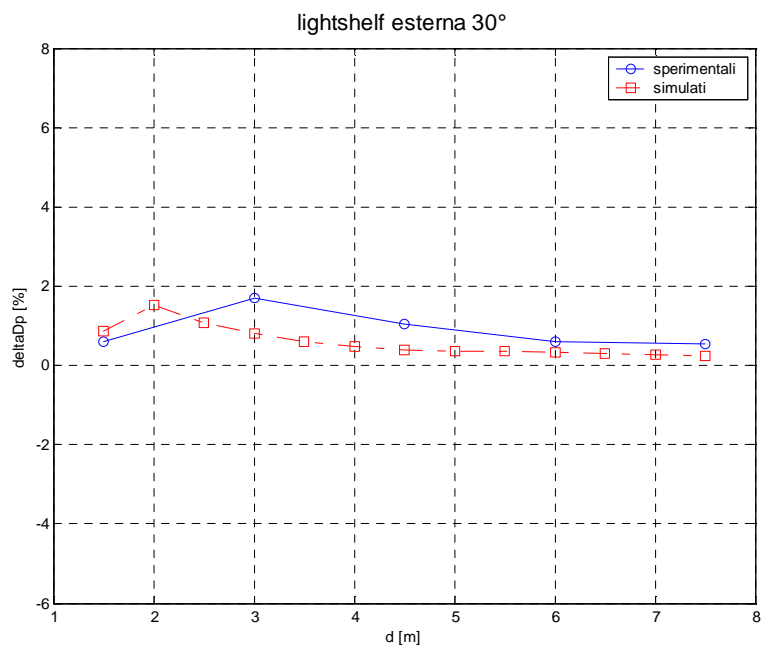


Figura 4.5 Variazione di D_p con lightshef esterna

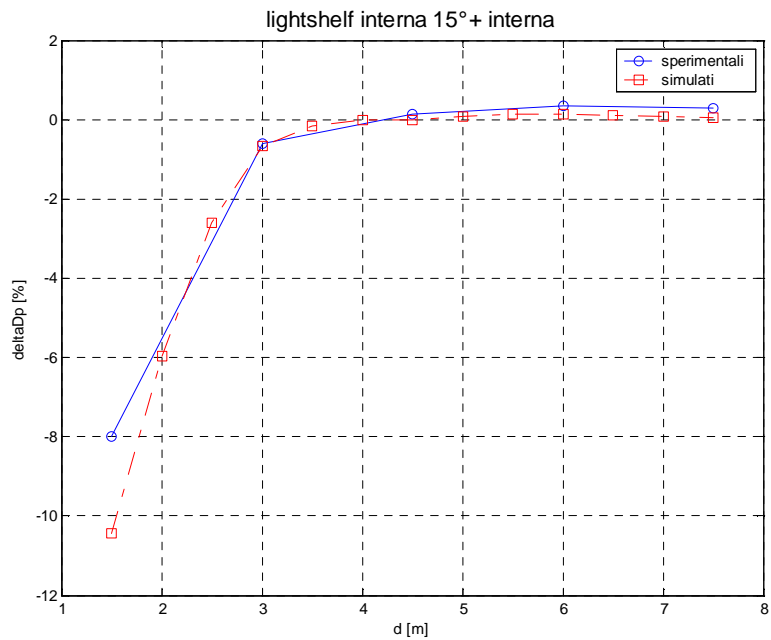


Figura 4.6 Variazione di D_p con lightshef esterna+interna

L'errore più grande (sempre in assoluto perché per i valori vicino allo zero la percentuale non è rappresentativa) è di 2,44 ed occorre ancora una volta nel punto analizzato più vicino alla finestra (1,5 m). E' però un caso isolato: gli altri errori sono infatti tutti sotto l'1, sempre in valore assoluto. Nel complesso i risultati si possono quindi considerare soddisfacenti anche perché bisogna tener conto di alcune cause di imprecisione:

- a) non è noto il coefficiente di riflessione delle lightshelf, ipotizzato pari al 90%;
- b) in Dialux esiste solo la riflessione diffusa, mentre le reali superfici sono almeno in parte speculari;
- c) non si conosce lo spessore delle lightshelf, ipotizzato uguale a 2 cm;
- d) non è nota l'altezza alla quale è stato valutato il fattore di luce diurna, per ipotesi fissata a 0,85 m;
- e) non è nota nemmeno la linea lungo la quale sono state effettuate le misurazioni, ipotizzata in mezzo al locale;
- f) i punti sono stati ricavati graficamente e sono quindi suscettibili di una certa incertezza.

4.2. Valutazione dell'importanza dei singoli componenti

Prima di effettuare le simulazioni progettuali si vuole valutare l'effetto dei seguenti componenti sui risultati illuminotecnici:

- imbotte
- scena esterna: alberi, cortile, edificio e strada sul retro.
- presenza corridoio
- arredamento

A cominciare da una soluzione di partenza priva di tutti i componenti elencati, si svolgono sei simulazioni, ciascuna caratterizzata dall'aggiunta di uno dei componenti alla volta. L'obiettivo è quello di stabilire una gerarchia di importanza a seconda del peso dei vari componenti sui risultati illuminotecnici. Solo i più importanti verranno successivamente considerati nella configurazione definitiva sulla quale verranno effettuate le varie simulazioni. Le superfici ininfluenti ai fini illuminotecnici, infatti, allungherebbero inutilmente i tempi di calcolo. Si riassumono i risultati in forma di tabella.

Si fanno le seguenti ipotesi:

- L'importanza dei seguenti componenti viene data per scontata e non se ne effettua l'analisi:
 - o porte e finestre
 - o pavimenti, pareti e soffitto
- La valutazione viene fatta usando come locale test l'aula del piano terra;
- Il corridoio è rappresentato da un ostacolo ostruente a forma di parallelepipedo cavo lungo tre volte l'aula (27,6 m) senza pareti laterali e con le opportune aperture dotate di finestre (vale per tutte le successive simulazioni).
- Assenza di scena esterna significa che tutte le superfici esterne sono considerate nere e quindi completamente assorbenti (coefficiente di riflessione pari a 0);
- Assenza del corridoio significa che le finestrelle interne dell'aula danno direttamente sul retro dell'edificio;
- L'arredamento considerato è composto da banchi, cattedra, lavagna e infissi di porte e finestre.
- L'importanza di ciascun componente viene stabilita in funzione dell'influenza sul fattore medio di luce diurna. Si perviene ad una

suddivisione in tre categorie e a seconda dell'importanza viene indicato l'eventuale utilizzo nella configurazione definitiva:

- variazione inferiore al 5% (influenza bassa): il componente non influisce sui risultati illuminotecnici e non viene preso in considerazione nella configurazione definitiva
 - variazione compresa tra il 5% e il 15% (influenza media): il componente influisce sui risultati illuminotecnici e la sua presenza nella configurazione definitiva è necessaria
 - variazione superiore al 15% (influenza alta): il componente influisce sui risultati illuminotecnici, la sua presenza nella configurazione definitiva è necessaria e la sua modellazione deve essere svolta con molta precisione
- si trascura il fatto che gli effetti dei vari componenti in realtà non si sommano in modo lineare: due componenti aggiunti insieme portano cioè a risultati diversi da quelli ottenuti sommando algebricamente i singoli effetti. L'ipotesi fatta è in definitiva che i vari componenti siano tra loro indipendenti.

Per la tabella viene usato il seguente sistema di identificazione:

0. Configurazione base
1. configurazione base + imbotte
2. configurazione base + alberi
3. configurazione base + prato
4. configurazione base + edificio e strada sul retro
5. configurazione base + corridoio
6. configurazione base + arredamento

Per ogni configurazione si indicano:

- fattore medio di luce diurna
- variazione percentuale rispetto alla soluzione base (valore in modulo)
- importanza (*bassa, media o alta identificata dalle lettere B, M e A rispettivamente*)
- inserimento nella configurazione definitiva (*si/no*)

configurazione	Dm [%]	Δ Dm [%]	importanza	inserimento
0	3,81	-	-	-
1	2,78	-27,0	A	sì
2	3,38	-11,3	M	sì
3	4,32	13,4	M	sì
4	3,77	-1,0	B	no
5	3,72	-2,4	B	no
6	3,7	-2,9	B	no

Tabella 4.7 Analisi di sensibilità dei singoli componenti della scena

Il componente di gran lunga più importante risulta essere l'imbotte, con un peso di quasi il 30% sui risultati. La progettazione del componente deve essere molto accurata ed è per questo che si è calcolato sperimentalmente il coefficiente di riflessione della superficie (pari al 50% circa) e si è fatta la distinzione tra l'imbotte rettangolare del piano terra e quella ad arco del primo piano.

Seguono per importanza i componenti del cortile antistante le aule, ossia prato e alberi. Entrambi pesano per poco più del 10% e, come ci si aspettava, gli alberi riducono l'illuminamento mentre il prato lo aumenta facendo in modo che nel complesso i due effetti si compensino. Anche per questo la loro progettazione non necessita di essere particolarmente accurata.

Risultano invece poco influenti, e non faranno parte del modello di calcolo, l'arredamento, il corridoio e la scena sul retro. Per gli ultimi due componenti questa situazione è chiaramente dovuta alle limitate dimensioni e al basso grado di trasmissione delle finestre interne dell'aula.

Generalizzando i risultati si possono distinguere due configurazioni: una completa di tutti i componenti analizzati (categorie A, M e B), utile a fini illustrativi, e una semplificata dotata solo dei componenti indispensabili per ottenere risultati precisi nel più breve tempo possibile (componenti A e M).

L'aula modello riporterà quindi imbotte, prato e alberi, mentre non terrà conto del corridoio, della scena posteriore e dell'arredamento. Per gli altri due locali, invece, visto il limitato numero di simulazioni che li riguarda, non verrà effettuata la seguente distinzione.

In questo caso la differenza tra le due versioni in termini di costo computazionale, e quindi di tempo richiesto per le simulazioni, non è molto significativo (ordine di qualche minuto) ma questa procedura può risultare senz'altro utile nel caso di progetti di maggiore complessità.

4.3. Situazione attuale

Le tabelle seguenti, dalla 4.8 alla 4.14, presentano la situazione attuale dei tre locali dal punto di vista dell'illuminazione artificiale e naturale e confrontano i risultati ottenuti attraverso le simulazioni con Dialux con i valori previsti dalle normative. Si evidenziano in rosso le situazioni che non soddisfano i requisiti e in verde i riscontri positivi.

Aula magna e corridoi soddisfano tutti i requisiti normativi.

Le aule, invece, mostrano carenze sia dal punto di vista del daylighting sia a livello di illuminazione artificiale. In quest'ultimo caso la principale problematica riguarda i valori medi di illuminamento, che risultano troppo bassi su entrambi i piani di lavoro. Molto indicativa, a tal proposito, l'immagine dell'aula a colori sfalsati (figura 4.7): l'arancione, che rappresenta i 300 lux, si vede solo sui banchi centrali, mentre il colore dominante è il verde che corrisponde a 200 lux.

Per quanto riguarda il fattore medio di luce diurna va sottolineata la forte riduzione dovuta agli alberi del cortile. Eliminandoli dal modello si crea una situazione simile a quella invernale e almeno l'aula del piano terra rientra nei valori normativi (3,17%). Il primo piano, salendo solo al 2,61%, rimane invece ancora fuori norma. Più degli alberi è però l'imbotte molto sporgente a penalizzare i risultati. Si veda a tal proposito l'analisi di importanza precedentemente proposta.

Si rende quindi necessario un doppio intervento: sull'impianto di illuminazione artificiale attraverso l'introduzione di nuovi apparecchi e sull'illuminazione naturale che deve essere potenziata e resa più uniforme.

Discorso a parte va fatto per la lavagna: in questo caso l'illuminamento medio non solo non è sufficiente ma è anzi lontanissimo dai valori previsti, e appare quindi doverosa l'introduzione di apparecchi dedicati.

Per quanto riguarda abbagliamento e resa del colore non ci sono state sorprese: i vari UGR valutati da diversi punti di osservazione si sono sempre dimostrati inferiori al limite (in tabella si è riportato il valore massimo riscontrato), mentre la resa del colore è uguale in ogni locale visto che gli apparecchi installati montano tutti lampade fluorescenti tubolari dello stesso tipo.

a) Le aule

superficie	h [m]	Em [lux]		Emin/Em	
banchi: piano di lavoro	0,6	192	300	0,598	0,7
banchi: area circostante	0,6	166	200	0,605	0,5
cattedra: piano di lavoro	0,8	186	300	0,747	0,7
cattedra: area circostante	0,8	177	200	0,634	0,5
lavagna	-	123	500	-	-

Tabella 4.8 Situazione attuale per le aule a livello di illuminazione artificiale

	h [m]	η_m [%]		η_{min}/η_{max}	
aula piano terra	0,85	2,82	3	-	-
banchi	0,6	-	-	0,155	0,16
cattedra	0,8	-	-	0,479	0,16
aula primo piano	0,85	2,42	3	-	-
banchi	0,6	-	-	0,154	0,16
cattedra	0,8	-	-	0,468	0,16

Tabella 4.9 Situazione attuale per le aule a livello di illuminazione naturale

b) I corridoi

superficie	h [m]	Em [lux]		Emin/Em	
zona di passaggio	0,2	120	100	0,76	0,7

Tabella 4.10 Situazione attuale per i corridoi a livello di illuminazione artificiale

	h [m]	η_m [%]		η_{min}/η_{max}	
corridoio piano terra	0,2	2,18	1	-	-
zona di passaggio	0,2	-	-	0,263	0,16
corridoio primo piano	0,2	2,44	1	-	-
zona di passaggio	0,2	-	-	0,277	0,16

Tabella 4.11 Situazione attuale per i corridoi a livello di illuminazione naturale

c) L'aula magna

superficie	h [m]	Em [lux]	Emin/Em
tavolo: piano di lavoro	0,75	277	0,808
tavolo: area circostante	0,75	266	0,705
area pubblico	0,85	321	0,525

Tabella 4.12 Situazione attuale per l'aula magna a livello di illuminazione artificiale

	h [m]	η_m [%]	η_{min}/η_{max}
aula magna	0,85	2,57	-
tavolo	0,75	-	0,824
area pubblico	0,85	-	0,16

Tabella 4.13 Situazione attuale per l'aula magna a livello di illuminazione naturale

d) Abbagliamento e resa del colore

* valori massimi riscontrati

locale	UGR _L	Ra
aula	14*	80
corridoio	15*	80
aula magna	21*	80

Tabella 4.14 Situazione attuale in termini di abbagliamento e resa del colore per i tre locali

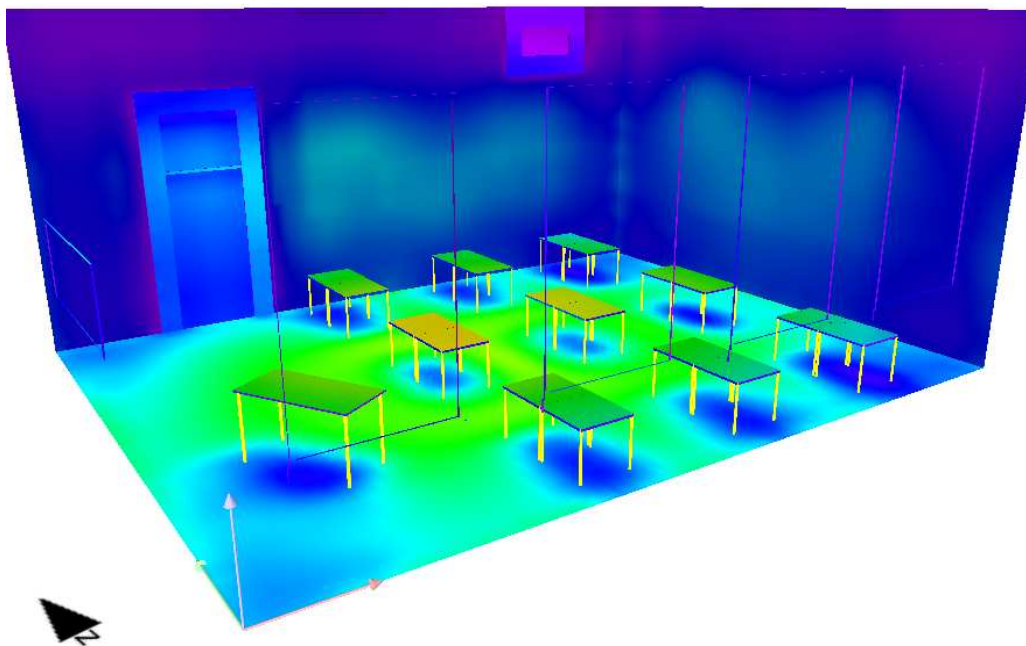


Figura 4.7 Immagine dell'aula a colori sfalsati. Situazione attuale

A parziale giustificazione dei risultati registrati per l'aula si può dire che la luce artificiale, dato l'utilizzo prettamente diurno dei locali, non deve quasi mai sopperire da sola all'illuminazione ma viene generalmente integrata da una certa quantità di luce naturale in grado in teoria di assicurare i 300 lux richiesti su banchi e cattedra. Il condizionale è d'obbligo visto che adottando questo sistema non si ha la certezza che ciò avvenga. I livelli di illuminamento diventano inoltre molto variabili in funzione delle condizioni atmosferiche. L'ideale in questo caso sarebbe disporre di sistemi di automazione delle luci basati su dimmer che agiscono in funzione della luce naturale in modo da avere sempre 300 lux sui piani di lavoro, senza ulteriori sprechi. Si ovvierebbe così anche al problema della distribuzione visto che, anche disponendo di un numero di apparecchi sufficiente a fornire la quantità di luce richiesta, senza un'opportuna regolazione, ad un certo numero di lux pressoché costanti su tutto il locale forniti dai corpi illuminanti, si aggiungerebbe la quantità, al contrario non uniforme, di luce proveniente dall'esterno e i due effetti, sommati, porterebbero comunque ad una distribuzione non adeguata. Attualmente le aule sono dotate semplicemente di un doppio interruttore manuale per comandare separatamente due gruppi di lampade in file parallele alle finestre: se da una parte è parzialmente risolto il problema della distribuzione, dall'altra i livelli di illuminamento non sono però costanti.

Se la luce naturale non è ben distribuita, una soluzione è quella appena citata di dimmerare le lampade, un'altra è rappresentata dalle lightshelf.

Un'ultima considerazione sui piani di lavoro: per i banchi, invece di una superficie per ogni posto a sedere, si è definita un'unica superficie che ingloba tutta la zona occupata dagli alunni. Se ai fini dell'illuminamento medio dovuto all'illuminazione artificiale questa scelta non ha conseguenze sui risultati, la situazione cambia occupandosi della distribuzione, perché, soprattutto nel caso della luce naturale, una superficie più grande presenta sicuramente valori meno omogenei (sono infatti fuori norma entrambe le uniformità riferite ai banchi). Quasi sicuramente, definendo una superficie per ogni banco, il valore di uniformità della luce naturale sarebbe rientrato nella norma (come per la cattedra) ma si è deciso di adottare l'altro approccio più stringente per far risaltare il problema della distribuzione all'interno di questo tipo di locali e perché si ipotizza che la vista di alunni e maestri spazi su una superficie maggiore.

Per l'aula si prendono in considerazione entrambi i sistemi di controllo della luce: dimmeraggio per quella artificiale e lightshelf più un opportuno sistema di ombreggiamento per quella naturale.

4.4. Potenziamiento dell'illuminazione artificiale nelle aule

Allo stato attuale l'aula non è dotata di un sistema di illuminazione artificiale adeguato. Ci si pone l'obiettivo di ridurre i consumi per l'illuminazione artificiale attraverso l'uso di apparecchi più efficienti, garantendo nel contempo il rispetto delle normative. I consumi vengono valutati in base al LENI. Si considera inoltre il prezzo degli apparecchi, scelti dal catalogo Philips [S10], in modo da poter stimare il payback time.

Le variabili su cui si gioca sono: altezza del soffitto, altezza degli apparecchi, modello e tipo di apparecchio (a incasso o a sospensione), ottiche, numero e disposizione degli apparecchi, potenza delle lampade, versione diretta o diretta/indiretta.

Si fanno inoltre le seguenti ipotesi:

- locale pulito e manutenzione ogni anno (input richiesto da Dialux)
- coefficiente di riflessione delle superfici fornito da Dialux (\neq da sperimentale)
- apparecchi a sospensione tutti alla stessa altezza
- utilizzo di lampade fluorescenti tubolari
- nessun sistema di automazione delle luci
- accensione contemporanea di tutte le luci
- utilizzo diurno 1800 h/anno; utilizzo notturno 200 h/anno
- il costo di investimento considera solo gli apparecchi e non il montaggio
- costo dell'energia stimato in 0,14 €/kWh
- il prezzo degli apparecchi è quello di listino (per grandi quantità vengono di solito applicati sconti consistenti)

Viene effettuata innanzitutto un'analisi approssimata con configurazioni di vario genere e successivamente un affinamento delle configurazioni che si avvicinano di più agli obiettivi prestabiliti. Sono considerate promettenti le configurazioni che su entrambe le aree di lavoro abbiano almeno E_m pari a 270 lux e E_{min}/E_m pari a 0,62. Nel paragrafo successivo sono riassunti tutti i casi testati ma solo per le soluzioni che rispettano le normative e per quella attuale viene compilata una scheda di valutazione più dettagliata.

- **Configurazioni analizzate:**

Si riporta qui di seguito una breve descrizione delle configurazioni studiate, organizzate per categorie in funzione delle variazioni attuate rispetto ad una situazione precedente:

- **Gruppo 1: Numero di apparecchi e disposizione**
 1. **Configurazione di riferimento**
Configurazione di partenza: attuale
Modifiche: incremento degli apparecchi di due unità, da 6 a 8, e disposizione (1)

- **Gruppo 2: Altezza del soffitto**
 2. Configurazione di partenza: attuale
Modifiche: abbassamento del soffitto da 4,165 m a 3,65, corrispondente a 0,515 m

- **Gruppo 3: Apparecchi a incasso: modello e disposizione apparecchi**
 3. Configurazione di partenza: attuale
Modifiche: apparecchio Philips Impala TBS160, ottica C6-1000
 4. Configurazione di partenza: 3
Modifiche: disposizione (2)
 5. Configurazione di partenza: 4
Modifiche: ottica C6
 6. Configurazione di partenza: 4
Modifiche: ottica M6
 7. Configurazione di partenza: 4
Modifiche: ottica M2
 8. Configurazione di partenza: 4
Modifiche: ottica C3

- **Gruppo 4: Apparecchi a sospensione: Potenza, numero e disposizione apparecchi**
 9. Situazione di partenza: Apparecchio Philips Efix TCS260 C6 1x54 W, altezza di montaggio 2,8 m, disposizione (3)
 10. Configurazione di partenza: 9

Modifiche: potenza apparecchio 1x80 W

11. Configurazione di partenza: 9
Modifiche: Riduzione del numero di apparecchi di una unità, da 6 a 5, e disposizione (4)
12. Configurazione di partenza: 11
Modifiche: potenza apparecchio 1x80W
13. Configurazione di partenza: 9
Modifiche: disposizione (5)
14. Configurazione di partenza: 9
Modifiche: potenza 1x35 W, 7 apparecchi invece di 6 e disposizione (6)
15. Configurazione di partenza: 14
Modifiche: apparecchio sopra la cattedra di potenza 1x49 W
16. Configurazione di partenza: 14
Modifiche: disposizione (7)

- **Gruppo 5: Altezza degli apparecchi a sospensione**

17. Configurazione di partenza: 16
Modifiche: apparecchi a 2,65 m invece di 2,8 m
18. Configurazione di partenza: 11
Modifiche: apparecchi a 2,6 m invece di 2,8 m

- **Gruppo 6: Ottiche**

19. Configurazione di partenza: 17
Modifiche: ottica D6
20. Configurazione di partenza: 17
Modifiche: ottica M6
21. Configurazione di partenza: 17

Modifiche: ottica M2

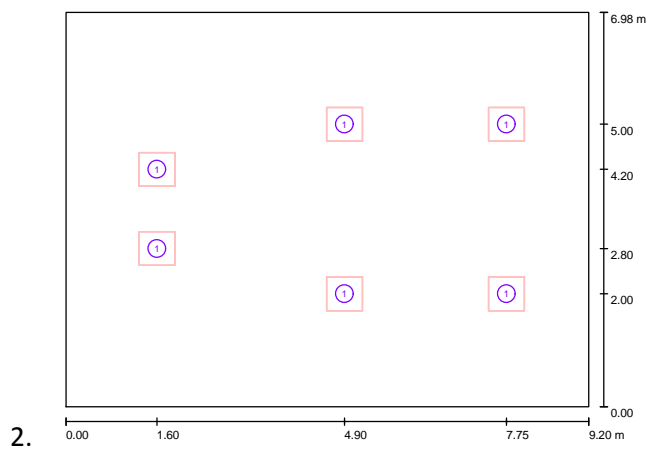
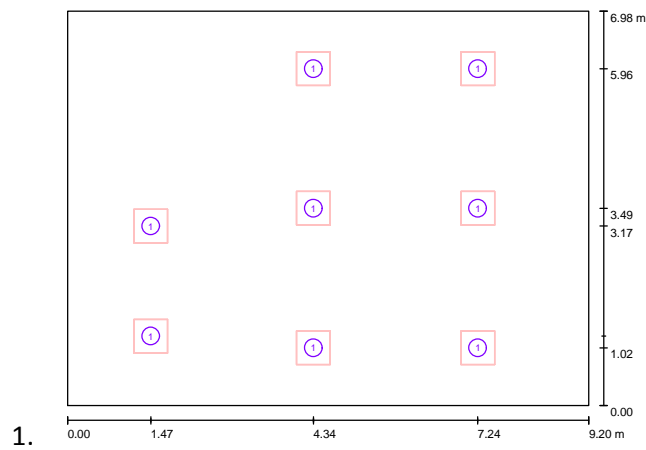
- **Gruppo 7: Flusso luminoso diretto/indiretto**

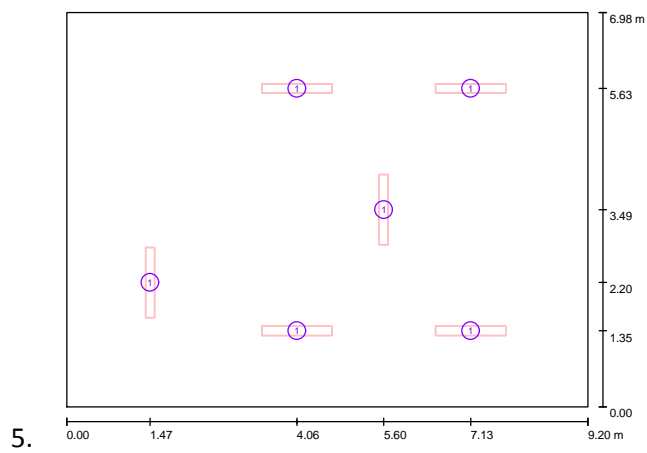
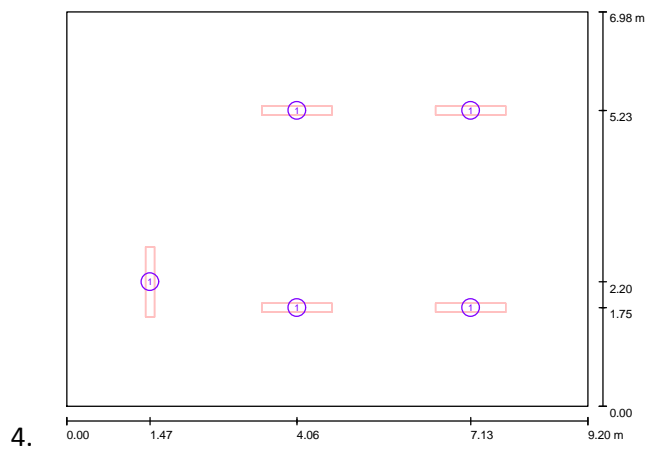
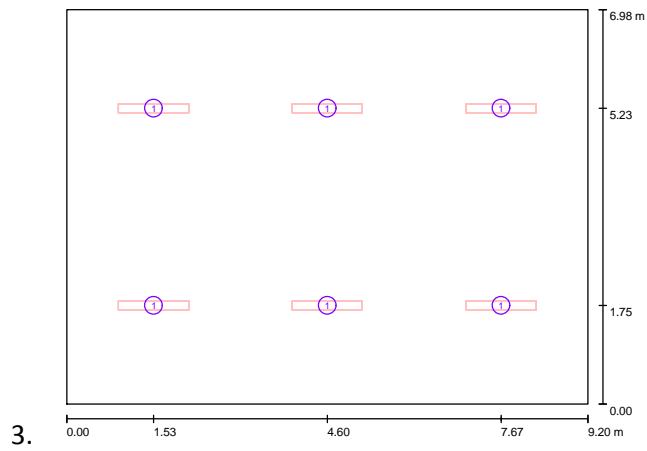
22. Configurazione di partenza: 17

Modifiche: versione D/I

Sono un buon punto di partenza le configurazioni: 3, 9, 11, 14, 16

Soddisfano le normative le configurazioni: 1, 4, 17, 19





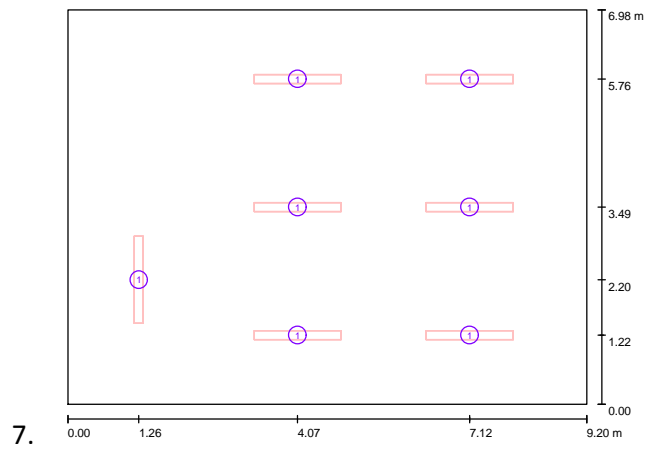
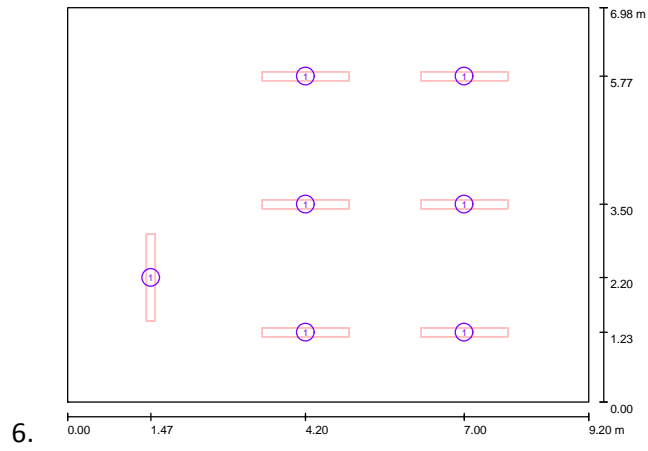


Figura 4.8 Disposizioni degli apparecchi testate per ottimizzare l'illuminazione artificiale

- **Risultati ottenuti**

- **Configurazione attuale**

planimetria apparecchi:

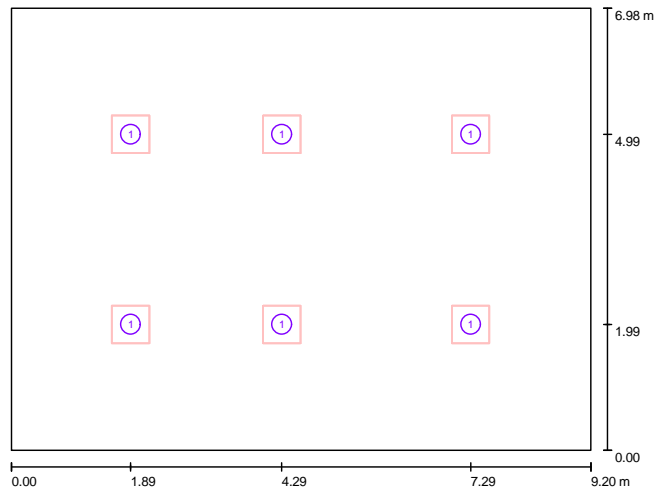


Figura 4.9 Configurazione attuale: planimetria apparecchi

altezza del soffitto:	4,165 m
tipologia di apparecchi:	ad incasso nel soffitto
marca apparecchi:	Atena Lux
modello apparecchio:	144418A01W-00S AT/V 595 B CNR
tipo e numero di lampade:	4 x L 18 W G13
flusso luminoso:	5400 lm

immagine apparecchio:



Figura 4.10 Configurazione attuale: immagine apparecchio

curva fotometrica:

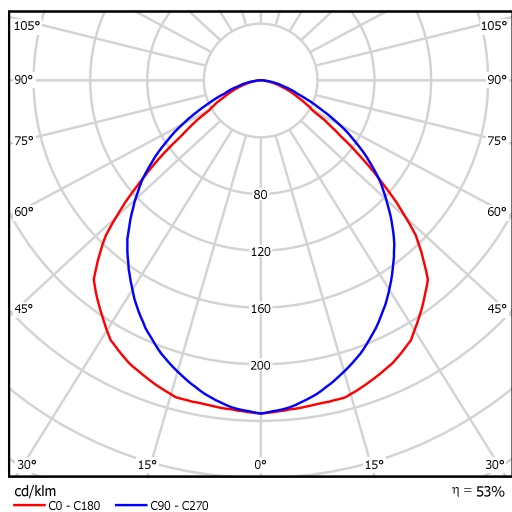


Figura 4.11 Configurazione attuale: curva fotometrica

tabella UGR:

Valutazione di abbagliamento secondo UGR												
ρ Soffitto	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30		
ρ Pareti	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30		
ρ Pavimento	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20		
Dimensioni del locale	X	Y	Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade					Linea di mira parallela all'asse delle lampade				
2H	2H		14.9	16.0	15.1	16.2	16.5	15.3	16.5	15.6	16.7	16.9
	3H		15.3	16.3	15.6	16.6	16.8	16.0	17.0	16.3	17.3	17.6
	4H		15.4	16.4	15.8	16.7	17.0	16.2	17.2	16.6	17.5	17.8
	6H		15.5	16.4	15.9	16.7	17.0	16.4	17.3	16.7	17.6	17.9
	8H		15.6	16.4	15.9	16.7	17.0	16.4	17.3	16.8	17.6	17.9
4H	12H		15.6	16.4	15.9	16.7	17.0	16.5	17.3	16.8	17.6	17.9
	2H		15.2	16.2	15.5	16.4	16.7	15.6	16.5	15.9	16.8	17.1
	3H		15.8	16.6	16.1	16.9	17.2	16.4	17.2	16.8	17.5	17.9
	4H		16.0	16.7	16.4	17.1	17.4	16.7	17.5	17.1	17.8	18.2
	6H		16.2	16.8	16.6	17.2	17.6	17.0	17.6	17.4	18.0	18.4
8H	8H		16.2	16.8	16.7	17.2	17.6	17.1	17.6	17.5	18.0	18.4
	12H		16.3	16.8	16.7	17.2	17.6	17.1	17.6	17.6	18.1	18.5
	4H		16.1	16.7	16.6	17.1	17.5	16.8	17.4	17.2	17.8	18.2
	6H		16.4	16.8	16.8	17.3	17.7	17.1	17.6	17.6	18.0	18.5
	8H		16.5	16.9	16.9	17.3	17.8	17.3	17.7	17.7	18.1	18.6
12H	12H		16.5	16.9	17.0	17.3	17.8	17.4	17.7	17.9	18.2	18.7
	4H		16.1	16.6	16.6	17.0	17.5	16.8	17.3	17.2	17.7	18.1
	6H		16.4	16.8	16.9	17.3	17.7	17.1	17.5	17.6	18.0	18.5
	8H		16.5	16.9	17.0	17.3	17.8	17.3	17.6	17.8	18.1	18.6
	8H		16.5	16.9	17.0	17.3	17.8	17.3	17.6	17.8	18.1	18.6
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S												
S = 1.0H	+0.5 / -0.7					+0.3 / -0.4						
S = 1.5H	+1.0 / -1.7					+0.5 / -0.9						
S = 2.0H	+2.1 / -2.5					+1.3 / -1.7						
Tabella standard	BK02					BK03						
Addendo di correzione	-3.8					-2.7						
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 5400lm Flusso luminoso sferico												

I valori UGR vengono calcolati secondo CIE Publ. 117 Spacing-to-Height-Ratio = 0.2
 Tabella 4.15 Configurazione attuale: tabella UGR

piano di manutenzione:

Effetto delle superfici del locale dovuto a riflessione:	piccolo ($k \leq 1.6$)
Tipo di illuminazione:	Diretto
Intervallo di manutenzione lampade:	Ogni anno
Tipo lampada:	chiuso IP2X (sec. CIE)
Durata in servizio all'anno (1000 ore):	2.58
Intervallo sostituzione sorgenti luminose:	Ogni anno
Tipo sorgente luminosa:	Lampada fluorescente al trifosforo (sec. CIE)
Sostituzione immediata di sorgenti luminose guaste:	Sì
Fattore di manutenzione superfici del locale:	0.97
Fattore di manutenzione lampade:	0.88
Fattore di manutenzione flusso sorgenti luminose:	0.93
Fattore di sopravvivenza sorgenti luminose:	1.00
Fattore di manutenzione:	0.79

Tabella 4.16 Configurazione attuale: piano di manutenzione

numero di apparecchi: 6
 potenza totale installata: 432 W
 risultati illuminotecnici:

	E_m [lux]	E_{min}/E_m
area di lavoro 1	216	0,648
zona circostante 1	191	0,684
area di lavoro 2	210	0,789
zona circostante 2	201	0,704

Tabella 4.17 Configurazione attuale: risultati illuminotecnici

UGR massimo: 14
 R_a : 80
 potenza specifica in W/m^2 : 6,73
 potenza specifica in $W/m^2/100lux$: 3,38
 prezzo per apparecchio: 57,95 €
 prezzo totale: -
 LENI [kWh/m^2 anno]: -
 consumi annui [kWh /anno]: -
 payback time: -

➤ **Configurazione 1**

planimetria apparecchi:

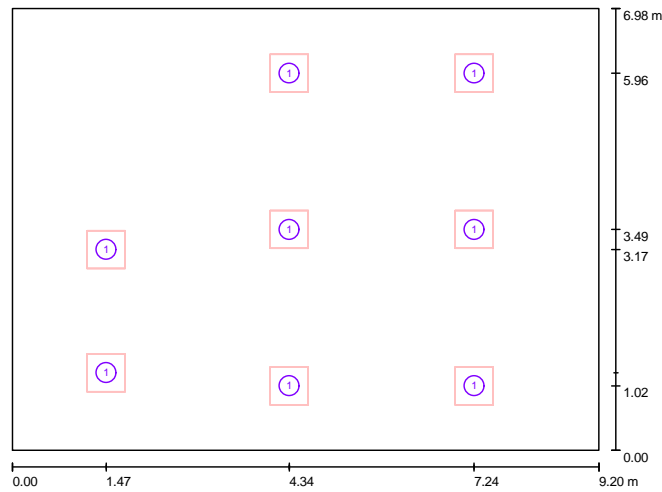


Figura 4.12 Configurazione 1: planimetria apparecchi

altezza del soffitto:	4,165 m
tipologia di apparecchi:	ad incasso nel soffitto
marca apparecchi:	Atena Lux
modello apparecchio:	14441801W-00S AT/V 595 B CNR
tipo e numero di lampade:	4 x L 18 W G13
flusso luminoso:	5400 lm

immagine apparecchio:



Figura 4.13 Configurazione 1: immagine apparecchio

curva fotometrica:

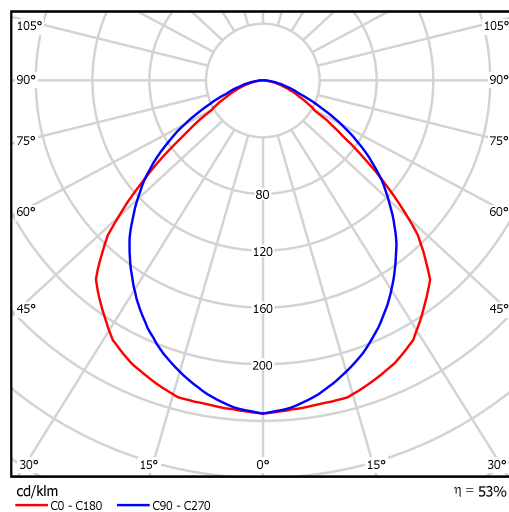


Figura 4.14 Configurazione 1: curva fotometrica

tabella UGR:

Valutazione di abbagliamento secondo UGR											
ρ Soffitto	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30	
ρ Pareti	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30	
ρ Pavimento	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Dimensioni del locale X Y		Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade				Linea di mira parallela all'asse delle lampade					
2H	2H	14.9	16.0	15.1	16.2	16.5	15.3	16.5	15.6	16.7	16.9
	3H	15.3	16.3	15.6	16.6	16.8	16.0	17.0	16.3	17.3	17.6
	4H	15.4	16.4	15.8	16.7	17.0	16.2	17.2	16.6	17.5	17.8
	6H	15.5	16.4	15.9	16.7	17.0	16.4	17.3	16.7	17.6	17.9
	8H	15.6	16.4	15.9	16.7	17.0	16.4	17.3	16.8	17.6	17.9
4H	12H	15.6	16.4	15.9	16.7	17.0	16.5	17.3	16.8	17.6	17.9
	2H	15.2	16.2	15.5	16.4	16.7	15.6	16.5	15.9	16.8	17.1
	3H	15.8	16.6	16.1	16.9	17.2	16.4	17.2	16.8	17.5	17.9
	4H	16.0	16.7	16.4	17.1	17.4	16.7	17.5	17.1	17.8	18.2
	6H	16.2	16.8	16.6	17.2	17.6	17.0	17.6	17.4	18.0	18.4
8H	8H	16.2	16.8	16.7	17.2	17.6	17.1	17.6	17.5	18.0	18.4
	12H	16.3	16.8	16.7	17.2	17.6	17.1	17.6	17.6	18.1	18.5
	4H	16.1	16.7	16.6	17.1	17.5	16.8	17.4	17.2	17.8	18.2
	6H	16.4	16.8	16.8	17.3	17.7	17.1	17.6	17.6	18.0	18.5
	8H	16.5	16.9	16.9	17.3	17.8	17.3	17.7	17.7	18.1	18.6
12H	12H	16.5	16.9	17.0	17.3	17.8	17.4	17.7	17.9	18.2	18.7
	4H	16.1	16.6	16.6	17.0	17.5	16.8	17.3	17.2	17.7	18.1
	6H	16.4	16.8	16.9	17.3	17.7	17.1	17.5	17.6	18.0	18.5
8H	16.5	16.9	17.0	17.3	17.8	17.3	17.6	17.8	18.1	18.6	
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S											
S = 1.0H	+0.5 / -0.7				+0.3 / -0.4						
S = 1.5H	+1.0 / -1.7				+0.5 / -0.9						
S = 2.0H	+2.1 / -2.5				+1.3 / -1.7						
Tabella standard	BK02				BK03						
Addendo di correzione	-3.8				-2.7						
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 5400lm Flusso luminoso sferico											

I valori UGR vengono calcolati secondo CIE Publ. 117 Spacing-to-Height-Ratio = 0.25
 Tabella 4.18 Configurazione 1: tabella UGR

piano di manutenzione:

Effetto delle superfici del locale dovuto a riflessione:	piccolo ($k \leq 1.6$)
Tipo di illuminazione:	Diretto
Intervallo di manutenzione lampade:	Ogni anno
Tipo lampada:	chiuso IP2X (sec. CIE)
Durata in servizio all'anno (1000 ore):	2.58
Intervallo sostituzione sorgenti luminose:	Ogni anno
Tipo sorgente luminosa:	Lampada fluorescente al trifosforo (sec. CIE)
Sostituzione immediata di sorgenti luminose guaste:	Sì
Fattore di manutenzione superfici del locale:	0.97
Fattore di manutenzione lampade:	0.88
Fattore di manutenzione flusso sorgenti luminose:	0.93
Fattore di sopravvivenza sorgenti luminose:	1.00
Fattore di manutenzione:	0.79

Tabella 4.19 Configurazione 1: piano di manutenzione

numero di apparecchi: 8
 potenza totale installata: 576 W
 risultati illuminotecnici:

	E_m [lux]	E_{min}/E_m
area di lavoro 1	304	0,73
zona circostante 1	261	0,691
area di lavoro 2	308	0,897
zona circostante 2	290	0,826

Tabella 4.20 Configurazione 1: risultati illuminotecnici

UGR massimo: 13
 R_a : 80
 potenza specifica in W/m^2 : 8,97
 potenza specifica in $W/m^2/100lux$: 3,35
 prezzo per apparecchio: 57,95 €
 prezzo totale: 115,90€ (per due apparecchi)
 LENI [kWh/m^2 anno]: 13,24
 consumi annui [$kWh/anno$]: 850,13
 payback time: -

➤ **Configurazione 4**

planimetria apparecchi:

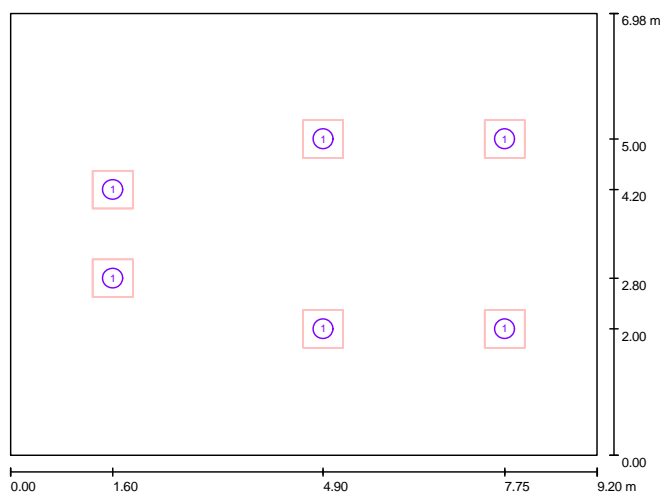


Figura 4.15 Configurazione 4: planimetria apparecchi

altezza del soffitto:	4,165 m
tipologia di apparecchi:	ad incasso nel soffitto
marca apparecchi:	Philips
modello apparecchio:	TBS160 C6-1000
tipo e numero di lampade:	4 x TL-D 18 W G13
flusso luminoso:	5400 lm

immagine apparecchio:



Figura 4.16 Configurazione 4: immagine apparecchio

curva fotometrica:

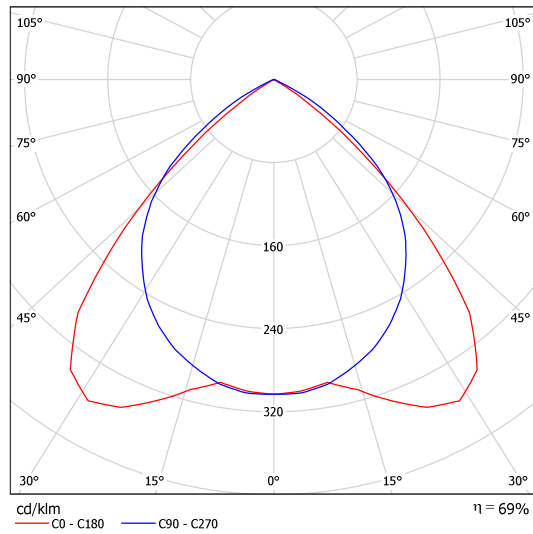


Figura 4.17 Configurazione 4: curva fotometrica

tabella UGR:

Valutazione di abbagliamento secondo UGR											
ρ Soffitto		70	70	50	50	30	70	70	50	50	30
ρ Pareti		50	30	50	30	30	50	30	50	30	30
ρ Pavimento		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Dimensioni del locale X Y		Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade					Linea di mira parallela all'asse delle lampade				
2H	2H	15.6	16.6	15.8	16.8	17.0	16.5	17.6	16.8	17.8	18.0
	3H	15.4	16.3	15.7	16.6	16.8	16.4	17.3	16.7	17.6	17.8
	4H	15.3	16.2	15.7	16.4	16.7	16.3	17.2	16.7	17.5	17.7
	6H	15.3	16.0	15.6	16.3	16.6	16.3	17.0	16.6	17.3	17.6
	8H	15.2	16.0	15.6	16.3	16.6	16.2	17.0	16.6	17.3	17.6
	12H	15.2	15.9	15.5	16.2	16.5	16.2	16.9	16.6	17.2	17.5
4H	2H	15.6	16.4	15.9	16.7	17.0	16.5	17.3	16.8	17.6	17.8
	3H	15.5	16.2	15.8	16.5	16.8	16.3	17.0	16.7	17.3	17.7
	4H	15.4	16.0	15.8	16.3	16.7	16.3	16.9	16.7	17.2	17.6
	6H	15.3	15.8	15.7	16.2	16.6	16.2	16.7	16.6	17.1	17.5
	8H	15.3	15.7	15.7	16.1	16.5	16.2	16.6	16.6	17.0	17.4
	12H	15.2	15.7	15.7	16.1	16.5	16.1	16.5	16.6	16.9	17.4
8H	4H	15.3	15.7	15.7	16.1	16.5	16.2	16.6	16.6	17.0	17.4
	6H	15.2	15.6	15.6	16.0	16.4	16.1	16.5	16.5	16.9	17.3
	8H	15.1	15.5	15.6	15.9	16.4	16.0	16.4	16.5	16.8	17.3
	12H	15.1	15.4	15.6	15.9	16.4	16.0	16.3	16.5	16.7	17.2
12H	4H	15.2	15.7	15.7	16.1	16.5	16.1	16.5	16.6	16.9	17.4
	6H	15.1	15.5	15.6	15.9	16.4	16.0	16.4	16.5	16.8	17.3
	8H	15.1	15.4	15.6	15.9	16.4	16.0	16.3	16.5	16.7	17.2
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S											
S = 1.0H		+1.9 / -5.0					+1.0 / -1.7				
S = 1.5H		+3.4 / -19.5					+2.3 / -6.5				
S = 2.0H		+5.2 / -27.7					+3.5 / -17.6				
Tabella standard		BK00					BK00				
Addendo di correzione		-4.2					-3.3				
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 5400lm Flusso luminoso sferico											

I valori UGR vengono calcolati secondo CIE Publ. 117 Spacing-to-Height-Ratio = 0.25

Tabella 4.21 Configurazione 4: tabella UGR

piano di manutenzione:

Effetto delle superfici del locale dovuto a riflessione:	piccolo ($k \leq 1.6$)
Tipo di illuminazione:	Diretto
Intervallo di manutenzione lampade:	Ogni anno
Tipo lampada:	chiuso IP2X (sec. CIE)
Durata in servizio all'anno (1000 ore):	2.58
Intervallo sostituzione sorgenti luminose:	Ogni anno
Tipo sorgente luminosa:	Lampada fluorescente al trifosforo (sec. CIE)
Sostituzione immediata di sorgenti luminose guaste:	Sì
Fattore di manutenzione superfici del locale:	0.97
Fattore di manutenzione lampade:	0.88
Fattore di manutenzione flusso sorgenti luminose:	0.93
Fattore di sopravvivenza sorgenti luminose:	1.00
Fattore di manutenzione:	0.79

Tabella 4.22 Configurazione 4: piano di manutenzione

numero di apparecchi: 6
 potenza totale effettiva: 417 W
 risultati illuminotecnici:

	E_m [lux]	E_{min}/E_m
area di lavoro 1	302	0,705
zona circostante 1	266	0,757
area di lavoro 2	301	0,785
zona circostante 2	281	0,667

Tabella 4.23 Configurazione 4: risultati illuminotecnici

UGR massimo: 15
 R_a : 80
 potenza specifica in W/m^2 : 6,49
 potenza specifica in $W/m^2/100lux$: 2,34
 prezzo per apparecchio: 94 €
 prezzo totale: 564 €
 LENI [kWh/m^2 anno]: 9,58
 consumi annui [$kWh/anno$]: 615,46
 payback time: 17 anni

➤ **Configurazione 17**

planimetria apparecchi:

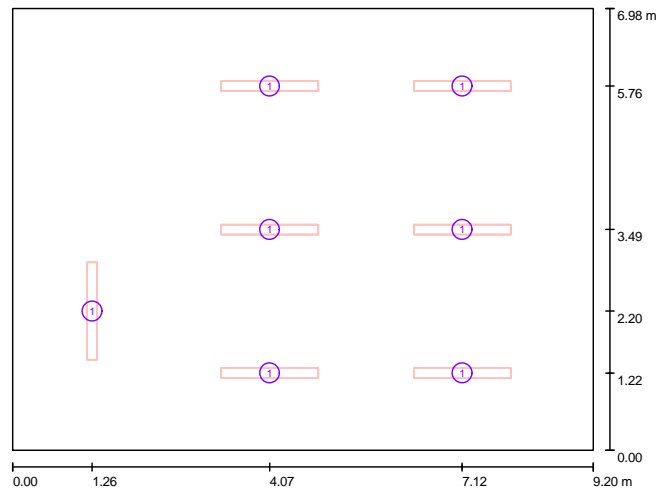


Figura 4.18 Configurazione 17: planimetria apparecchi

altezza del soffitto:	4,165 m
tipologia di apparecchi:	a sospensione a 2,65 m
marca apparecchi:	Philips
modello apparecchio:	Efix TCS260 C6
tipo e numero di lampade:	1 x TL5-35 W G5
flusso luminoso:	3300 lm

immagine apparecchio:



Figura 4.19 Configurazione 17: immagine apparecchio

curva fotometrica:

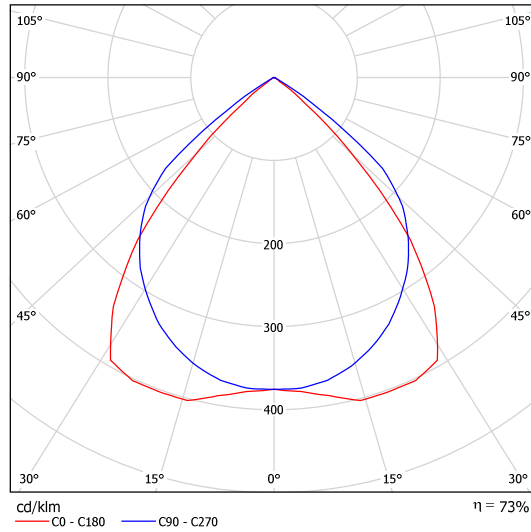


Figura 4.20 Configurazione 17: curva fotometrica

tabella UGR:

Valutazione di abbagliamento secondo UGR											
ρ Soffitto	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30	
ρ Pareti	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30	
ρ Pavimento	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Dimensioni del locale X Y	Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade					Linea di mira parallela all'asse delle lampade					
2H	2H	15.6	16.5	15.9	16.8	17.0	17.5	18.4	17.7	18.6	18.8
	3H	15.5	16.3	15.8	16.5	16.8	17.3	18.1	17.6	18.4	18.6
	4H	15.4	16.2	15.7	16.4	16.7	17.2	18.0	17.6	18.3	18.5
	6H	15.3	16.0	15.7	16.3	16.6	17.2	17.9	17.5	18.2	18.4
	8H	15.3	16.0	15.6	16.3	16.6	17.1	17.8	17.5	18.1	18.4
4H	12H	15.3	15.9	15.6	16.2	16.5	17.1	17.7	17.5	18.0	18.4
	2H	15.5	16.3	15.8	16.5	16.8	17.3	18.0	17.6	18.3	18.6
	3H	15.4	16.0	15.7	16.3	16.6	17.1	17.8	17.5	18.1	18.4
	4H	15.3	15.9	15.7	16.2	16.5	17.1	17.6	17.4	17.9	18.3
	6H	15.2	15.7	15.6	16.1	16.5	17.0	17.4	17.4	17.8	18.2
8H	8H	15.2	15.6	15.6	16.0	16.4	16.9	17.4	17.4	17.7	18.2
	12H	15.2	15.5	15.6	15.9	16.4	16.9	17.3	17.3	17.7	18.1
	4H	15.2	15.6	15.6	16.0	16.4	16.9	17.4	17.4	17.7	18.2
	6H	15.1	15.5	15.6	15.9	16.3	16.9	17.2	17.3	17.6	18.1
	8H	15.1	15.4	15.5	15.8	16.3	16.8	17.1	17.3	17.5	18.0
12H	12H	15.0	15.3	15.5	15.7	16.2	16.8	17.0	17.2	17.5	18.0
	4H	15.2	15.5	15.6	15.9	16.4	16.9	17.3	17.3	17.7	18.1
	6H	15.1	15.4	15.5	15.8	16.3	16.8	17.1	17.3	17.5	18.0
8H	15.0	15.3	15.5	15.7	16.2	16.8	17.0	17.2	17.5	18.0	
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S											
S = 1.0H	+2.4 / -10.6					+1.7 / -3.4					
S = 1.5H	+3.8 / -19.2					+3.0 / -19.5					
S = 2.0H	+5.7 / -22.6					+4.9 / -23.1					
Tabella standard	BK00					BK00					
Addendo di correzione	-4.0					-2.3					
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 3300lm Flusso luminoso sferico											

I valori UGR vengono calcolati secondo CIE Publ. 117 Spacing-to-Height-Ratio = 0.25

Tabella 4.24 Configurazione 17: tabella UGR

piano di manutenzione:

Effetto delle superfici del locale dovuto a riflessione:	piccolo ($k \leq 1.6$)
Tipo di illuminazione:	Diretto
Intervallo di manutenzione lampade:	Ogni anno
Tipo lampada:	chiuso IP2X (sec. CIE)
Durata in servizio all'anno (1000 ore):	2.58
Intervallo sostituzione sorgenti luminose:	Ogni anno
Tipo sorgente luminosa:	Lampada fluorescente al trifosforo (sec. CIE)
Sostituzione immediata di sorgenti luminose guaste:	Sì
Fattore di manutenzione superfici del locale:	0.97
Fattore di manutenzione lampade:	0.88
Fattore di manutenzione flusso sorgenti luminose:	0.93
Fattore di sopravvivenza sorgenti luminose:	1.00
Fattore di manutenzione:	0.79

Tabella 4.25 Configurazione 17: piano di manutenzione

numero di apparecchi: 7
 potenza totale effettiva: 273 W
 risultati illuminotecnici:

	E_m [lux]	E_{min}/E_m
area di lavoro 1	303	0,703
zona circostante 1	235	0,626
area di lavoro 2	306	0,804
zona circostante 2	234	0,595

Tabella 4.26 Configurazione 17: risultati illuminotecnici

UGR massimo: 18
 R_a : 80
 potenza specifica in W/m^2 : 4,25
 potenza specifica in $W/m^2/100lux$: 1,78
 prezzo per apparecchio: 155 €
 prezzo totale: 1085 €
 LENI [kWh/m^2 anno]: 6,27
 consumi annui [kWh /anno]: 402,93
 payback time: 17 anni

➤ **Configurazione 19**

planimetria apparecchi:

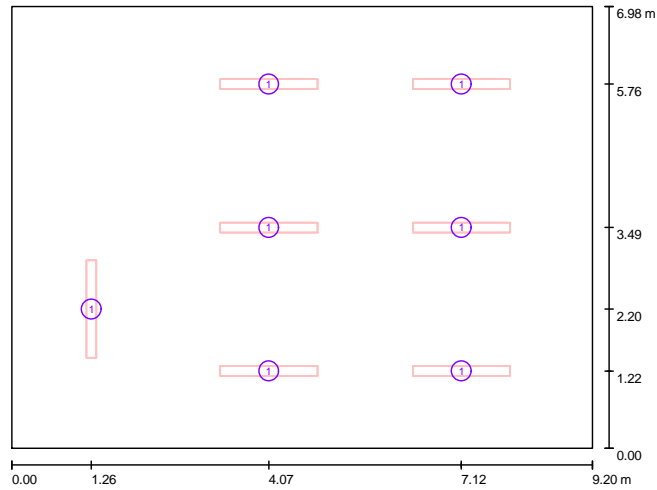


Figura 4.21 Configurazione 19: planimetria apparecchi

altezza del soffitto:	4,165 m
tipologia di apparecchi:	a sospensione a 2,65 m
marca apparecchi:	Philips
modello apparecchio:	Efix TCS260 D6
tipo e numero di lampade:	1 x TL5-35 W G5
flusso luminoso:	3300 lm

immagine apparecchio:



Figura 4.22 Configurazione 19: immagine apparecchio

curva fotometrica:

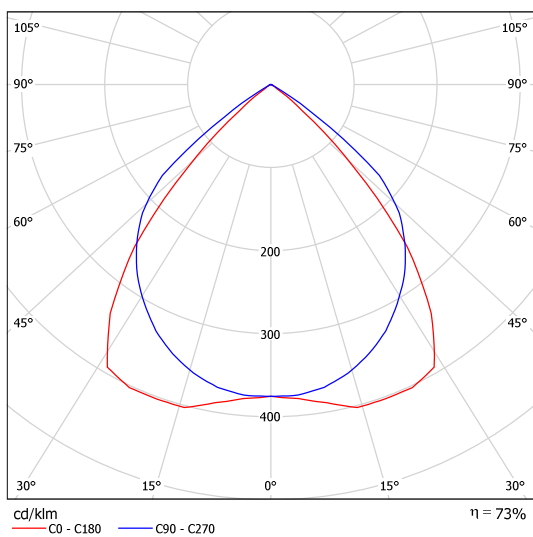


Figura 4.23 Configurazione 19: curva fotometrica

tabella UGR:

Valutazione di abbagliamento secondo UGR											
ρ Soffitto	70	70	50	50	30	70	70	50	50	30	30
ρ Pareti	50	30	50	30	30	50	30	50	30	30	30
ρ Pavimento	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Dimensioni del locale		Linea di mira perpendicolare all'asse delle lampade					Linea di mira parallela all'asse delle lampade				
X	Y										
2H	2H	15.6	16.5	15.9	16.8	17.0	17.5	18.4	17.7	18.6	18.8
	3H	15.5	16.3	15.8	16.5	16.8	17.3	18.1	17.6	18.4	18.6
	4H	15.4	16.2	15.7	16.4	16.7	17.2	18.0	17.6	18.3	18.5
	6H	15.3	16.0	15.7	16.3	16.6	17.2	17.9	17.5	18.2	18.4
	8H	15.3	16.0	15.6	16.3	16.6	17.1	17.8	17.5	18.1	18.4
4H	12H	15.3	15.9	15.6	16.2	16.5	17.1	17.7	17.5	18.0	18.4
	2H	15.5	16.3	15.8	16.5	16.8	17.3	18.0	17.6	18.3	18.6
	3H	15.4	16.0	15.7	16.3	16.6	17.1	17.8	17.5	18.1	18.4
	4H	15.3	15.9	15.7	16.2	16.5	17.1	17.6	17.4	17.9	18.3
	6H	15.2	15.7	15.6	16.1	16.5	17.0	17.4	17.4	17.8	18.2
8H	8H	15.2	15.6	15.6	16.0	16.4	16.9	17.4	17.4	17.7	18.2
	12H	15.2	15.5	15.6	15.9	16.4	16.9	17.3	17.3	17.7	18.1
	4H	15.2	15.6	15.6	16.0	16.4	16.9	17.4	17.4	17.7	18.2
	6H	15.1	15.5	15.6	15.9	16.3	16.9	17.2	17.3	17.6	18.1
	8H	15.1	15.4	15.5	15.8	16.3	16.8	17.1	17.3	17.5	18.0
12H	12H	15.0	15.3	15.5	15.7	16.2	16.8	17.0	17.2	17.5	18.0
	4H	15.2	15.5	15.6	15.9	16.4	16.9	17.3	17.3	17.7	18.1
	6H	15.1	15.4	15.5	15.8	16.3	16.8	17.1	17.3	17.5	18.0
8H	15.0	15.3	15.5	15.7	16.2	16.8	17.0	17.2	17.5	18.0	
Variazione della posizione dell'osservatore per le distanze delle lampade S											
S = 1.0H	+2.4 / -10.6					+1.7 / -3.4					
S = 1.5H	+3.8 / -19.2					+3.0 / -19.5					
S = 2.0H	+5.7 / -22.6					+4.9 / -23.1					
Tabella standard	BK00					BK00					
Addendo di correzione	-4.0					-2.3					
Indici di abbagliamento corretti riferiti a 3300lm Flusso luminoso sferico											

I valori UGR vengono calcolati secondo CIE Publ. 117 Spacing-to-Height-Ratio = 0.25

Tabella 4.27 Configurazione 19: tabella UGR

piano di manutenzione:

Effetto delle superfici del locale dovuto a riflessione:	medio ($1.6 < k \leq 3.75$)
Tipo di illuminazione:	Diretto
Intervallo di manutenzione lampade:	Ogni anno
Tipo lampada:	chiuso IP2X (sec. CIE)
Durata in servizio all'anno (1000 ore):	2.58
Intervallo sostituzione sorgenti luminose:	Ogni anno
Tipo sorgente luminosa:	Lampada fluorescente al trifosforo (sec. CIE)
Sostituzione immediata di sorgenti luminose guaste:	Sì
Fattore di manutenzione superfici del locale:	0.98
Fattore di manutenzione lampade:	0.88
Fattore di manutenzione flusso sorgenti luminose:	0.93
Fattore di sopravvivenza sorgenti luminose:	1.00
Fattore di manutenzione:	0.80

Tabella 4.28 Configurazione 19: piano di manutenzione

numero di apparecchi: 7
 potenza totale effettiva: 273 W
 risultati illuminotecnici:

	E_m [lux]	E_{min}/E_m
area di lavoro 1	307	0,703
zona circostante 1	238	0,626
area di lavoro 2	309	0,804
zona circostante 2	237	0,595

Tabella 4.29 Configurazione 19: risultati illuminotecnici

UGR massimo: 18
 R_a : 80
 potenza specifica in W/m^2 : 4,25
 potenza specifica in $W/m^2/100lux$: 1,76
 prezzo per apparecchio: 151 €
 prezzo totale: 1057 €
 LENI [kWh/m^2 anno]: 6,27
 consumi annui [kWh /anno]: 402,93
 payback time: 17 anni

La situazione attuale non soddisfa i requisiti normativi. Abbassando il soffitto, e quindi gli apparecchi, da 4,165 m a 3,65 m (2), non si ottiene un miglioramento significativo. Abbassare ulteriormente il soffitto implicherebbe l'ostruzione parziale delle finestre esterne. Inoltre, portando il soffitto a 3,65 m si copre già buona parte della finestra interna in fondo all'aula, potenzialmente importante per l'apporto di luce secondaria. Pare quindi sensato lasciare il soffitto alla quota di 4,165 m che è l'altezza minima che non causa l'ostruzione di nessuna apertura.

La soluzione più economica per adeguare il sistema di illuminazione artificiale alle normative consiste nell'aumentare il numero di apparecchi, ricorrendo comunque allo stesso modello dell'Atena Lux (1). L'analisi effettuata conclude che sono necessari 8 apparecchi: l'esborso quindi è piccolo perché vanno acquistati solo due apparecchi per aula. In questo modo però la potenza installata aumenta del 33%.

Una soluzione più vantaggiosa dal punto di vista dei consumi prevede la sostituzione degli attuali apparecchi con un modello della Philips più performante: con l'attuale disposizione (3) le normative non sono comunque soddisfatte. E' necessario un ricollocamento degli apparecchi (4) e un conseguente intervento sul soffitto. Il soffitto è infatti formato da pannelli che devono essere disposti correttamente per alloggiare gli apparecchi ad incasso. Questa configurazione non porta ad un risparmio rispetto alla configurazione attuale che comunque non può essere presa come riferimento visto che non rispetta le normative.

La modifica del soffitto è evitabile qualora si ricorra ad apparecchi a sospensione. Si sono testati apparecchi a lampada singola con potenze di 35 (39 effettivi), 54 e 80 W. Un primo risparmio si può ottenere considerando che, secondo le normative, le zone da illuminare sono principalmente le superfici del compito e si può quindi eliminare l'apparecchio vicino alla lavagna che non compete direttamente né ai banchi né alla cattedra (11). A parità circa di potenza (5x54 e 7x39) è preferibile la soluzione con più apparecchi in quanto garantisce una migliore distribuzione dell'illuminamento. La soluzione con apparecchi da 80 W (12) è stata immediatamente scartata per gli alti consumi.

La soluzione che minimizza i consumi è quella che prevede 7 apparecchi da 35 W (configurazioni 17 e 19 a seconda dell'ottica) e consente di ottenere un risparmio rispetto alla (1) del 53%. Tuttavia, rispetto alla (4), il prodotto è singolarmente più caro e in quantità maggiore. Ne deriva in entrambi i casi un payback time di 17 anni, il che significa che nell'ultimo caso il maggior risparmio è compensato totalmente dal maggior investimento che si deve affrontare. I benefici di questa soluzione rispetto alla (4) si vedono quindi solo

dopo questo periodo di appianamento del debito ed equivalgono, in termini di risparmio energetico, al 35%.

Per quanto riguarda infine la soluzione diretta/indiretta (22) si è registrata, come ci si attendeva, una distribuzione molto regolare, grazie alla riflessione diffusiva del soffitto, ma l'illuminamento medio risulta inferiore alla corrispondente versione solo diretta che, soddisfacendo anche i requisiti legati alla distribuzione, rende inutile il ricorso a questa soluzione.

Si confronti infine la visualizzazione a colori sfalsati delle configurazione 17 (figura 4.24) con figura 4.7 riferita alla situazione attuale.

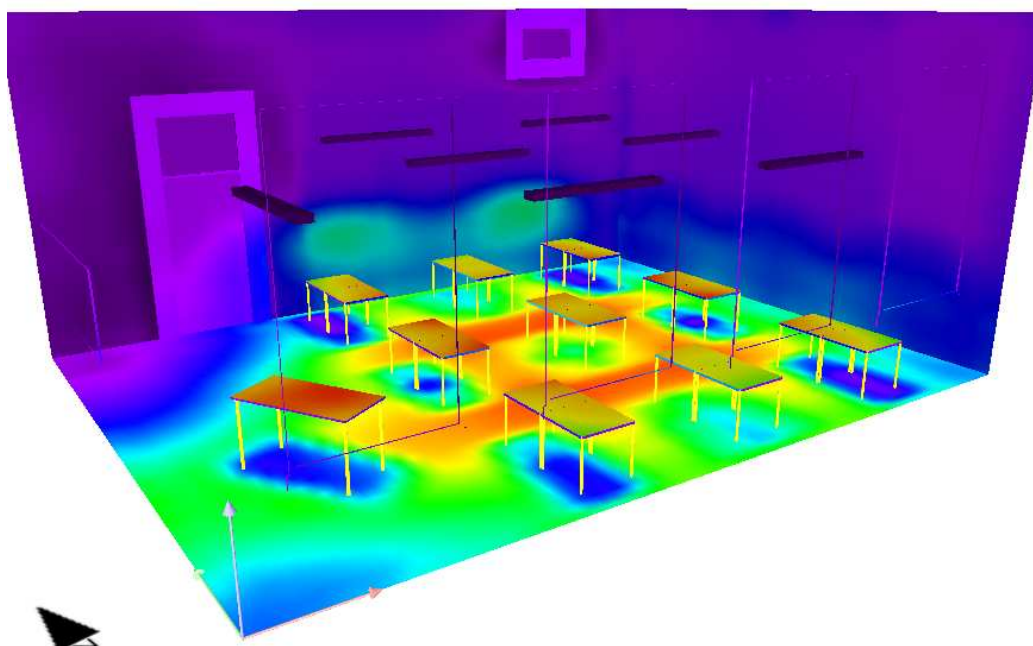


Figura 4.24 Immagine dell'aula a colori sfalsati. Configurazione ottimale

Si nota immediatamente che il colore predominante sui banchi è passato dal verde (200 lux) all'arancione (300 lux) con al centro picchi di rosso ad indicare il raggiungimento dei 350 lux. Oltre ai livelli di illuminamento anche la distribuzione è migliorata: rispetto a prima infatti i piani di lavoro sono di tonalità più simile, senza troppe differenze tra zone centrali e laterali.

Per quanto riguarda infine i consumi si osservi la zona al di sopra degli apparecchi di colore viola (50 lux): l'abbassamento delle sorgenti ha infatti permesso di risparmiare molta energia evitando di illuminare inutilmente tutta questa zona.

Si rimanda all'appendice A per la visione di alcuni rendering della soluzione ottimale per l'illuminazione artificiale.

Capitolo 5

Risultati Ottenuti: Illuminazione Naturale

Dal punto di vista della luce naturale, corridoi e aula magna soddisfano i requisiti imposti dalla UNI EN 10840. Per le aule, invece, si sono registrate carenze sia a livello di illuminamento medio sia di distribuzione.

Per questo, ma anche perché l'aula è in assoluto il locale più utilizzato della scuola, si vuole studiare, espressamente per questo locale, una soluzione che permetta di aumentare illuminamento e uniformità. Il sistema sul quale si è deciso di puntare è la lightshelf.

Gli effetti di questa soluzione che si vogliono valutare sono:

- incidenza sulla distribuzione della luce naturale, fattore indispensabile per avere soddisfacenti livelli di comfort visivo;
- incidenza sull'illuminamento in fondo all'aula, dove c'è più carenza di luce;
- efficacia di ombreggiamento, funzione necessaria per evitare l'abbagliamento degli occupanti.

Questi tre aspetti progettuali verranno valutati separatamente. Si analizzerà dapprima solo la componente diffusa della luce, per poi aggiungere quella diretta. Si parlerà di overcast sky nel primo caso e di clear sky nel secondo.

5.1. Overcast sky

5.1.1. Ottimizzazione delle lightshelf

Per quest'analisi il programma di riferimento è Dialux. Si lavora sul modello semplificato dell'aula emerso dallo studio sull'influenza dei componenti. Rimane ovviamente valida la distinzione tra piano terra e primo piano.

Una volta trovata la soluzione migliore, la si applicherà al caso completo.

Per una serie di motivi si è deciso di svolgere l'analisi di ottimizzazione riferendosi soltanto alla luce diffusa:

- a) la radiazione diretta non è sempre presente. Nelle giornate nuvolose si può contare solo sulla componente diffusa.
- b) alla presenza della sola luce diffusa, pesa meno la limitazione di Dialux di considerare le superfici solo diffondenti (lo dimostrano i test di validazione eseguiti).
- c) per motivi di costi e di manutenzione, per le scuole si consiglia di ricorrere a sistemi fissi [13] difficili da ottimizzare per il sunlighting. In questo caso infatti sono necessari continui aggiustamenti di inclinazione perché al variare dell'altezza del sole cambia l'inclinazione ideale.
- d) di fronte ad alcune aule, a distanza ravvicinata, è presente vegetazione che spesso impedisce ai raggi solari di filtrare, lasciando come unica fonte di luce quella diffusa corrispondente alla porzione di cielo più alta.

Per trovare la configurazione ottimale si fanno variare i seguenti parametri:

- a) inclinazione (i)
- b) altezza (h)
- c) lunghezza (l)
- d) configurazione (solo esterna o interna+esterna)

La progettazione non può essere del tutto libera ma deve sottostare a vincoli di vario genere che impongono precisi limiti sulla posizione e sulle dimensioni delle lightshelf. I vincoli sono ipotizzati come segue (tabella 5.1):

vincolo	limite	
estetico/architettonico	$i \max$	40°
	$l \max$	$0,75 \text{ m}$
ostruzione causata dall'imbotte	$h \max$	$3,3 \text{ m}$
rispetto della view window	$h \min$	$2,6 \text{ m}$
strutturale	$l \max$	1 m
controllo abbagliamento	$h \min$	$2,8 \text{ m}$

Tabella 5.1 Vincoli sulla lightshelf esterna

In evidenza i valori vincolanti, scelti i quali è possibile restringere notevolmente l'area in cui la lightshelf verrà collocata (figura 5.1). Per ipotesi la geometria della lightshelf è piana.

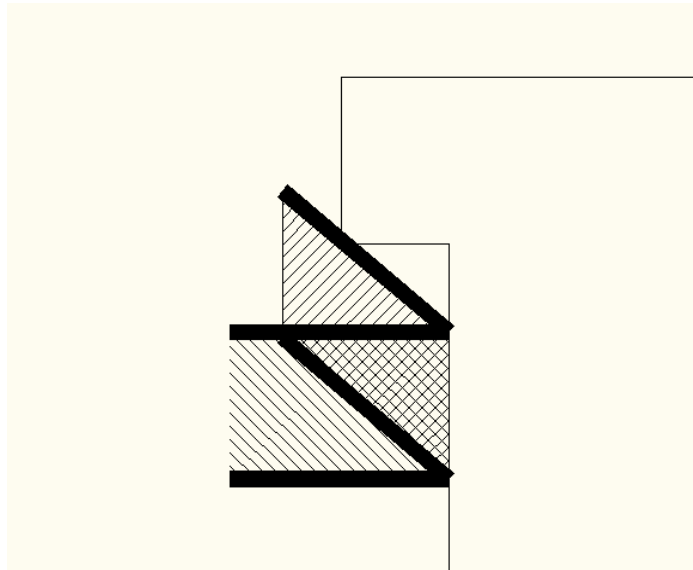


Figura 5.1 Area di possibile collocazione della lightshelf esterna nel rispetto dei vincoli

Come nelle precedenti simulazioni si valuteranno i fattori medi di luce diurna. Questi dati non sono però sufficienti visto che non forniscono nessuna informazione sulla distribuzione della luce all'interno del locale. Si valuta quindi anche il rapporto D_{min}/D_{max} , in quanto il fattore medio di luce diurna tiene conto semplicemente della quantità di luce disponibile mentre il rapporto indica se la luce è distribuita uniformemente. Singolarmente le due informazioni non bastano: un elevato η_m potrebbe essere accompagnato da scarsa uniformità e viceversa. Elevati rapporti di uniformità si possono ad esempio ottenere abbassando l'illuminamento vicino alla finestra ma questa soluzione, ottenibile con semplici sistemi di ombreggiamento, è svantaggiosa visto che aumenta porta all'aumento della luce artificiale necessaria. Le lightshelf, invece, puntano a migliorare l'uniformità aumentando i valori di illuminamento in fondo al locale e tenendo quindi alti i livelli medi (se possibile ancora più alti della situazione di base), spostando l'eccesso di luce dalla zona vicino alle finestre verso l'interno.

La soluzione ottimale deve massimizzare l'interazione tra questi due aspetti. Un parametro che tiene conto di entrambi adatto a questo scopo è il fattore puntuale di luce diurna in fondo all'aula. Si è scelto come riferimento un punto distante 6 m dalle finestre posto sulla linea al centro del piano di lavoro dei banchi, all'altezza di 0,6 m. Si parte da una configurazione solo esterna che prevede quattro lightshelf poste di fronte alle finestre, larghe quanto le aperture (1,32 m).

a) Inclinazione

- $h = 3,1$ m (rispetto al pavimento dell'aula)
- $l = 0,5$ m

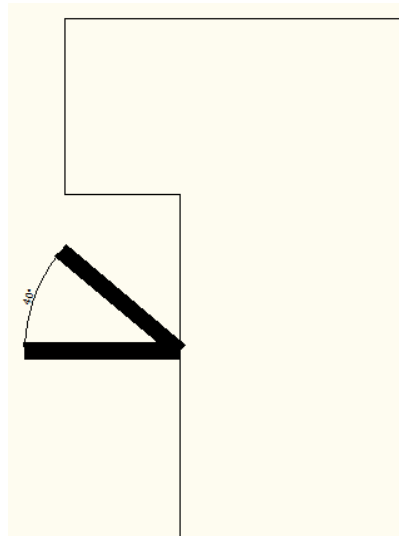


Figura 5.2 Lightshelf esterna: possibili inclinazioni

i [°]	D_m [%]	D_{min}/D_{max}	D_p [%]
0	2,38	0,175	1,06
10	2,43	0,172	1,07
15	2,47	0,173	1,08
20	2,51	0,17	1,1
25	2,55	0,167	1,1
30	2,58	0,162	1,09
40	2,6	0,151	1,05

Tabella 5.2 Valori di illuminamento in fondo all'aula (6 m dalle finestre) in funzione dell'inclinazione delle lightshelf esterne

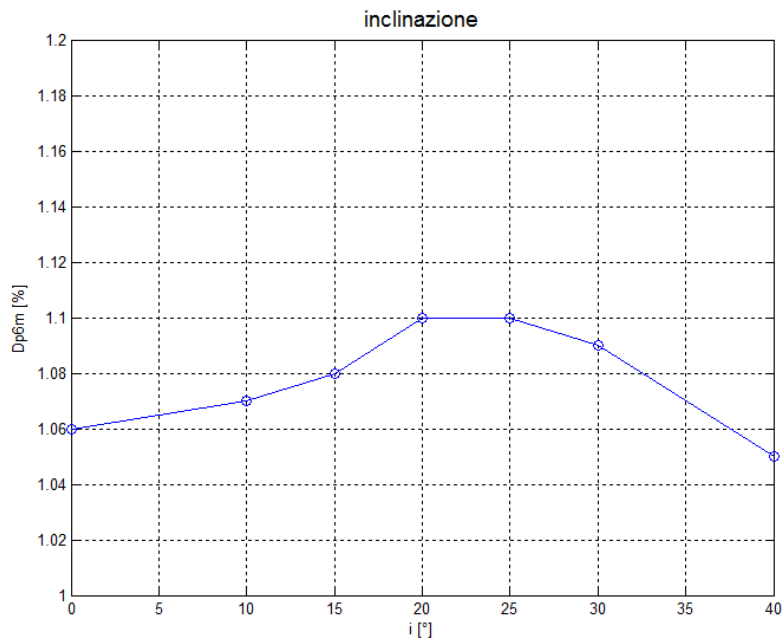


Figura 5.3 Andamento del $D_{puntuale}$ in funzione dell'inclinazione delle lightshelf esterne

Aumentare l'inclinazione (dall'orizzontale in senso orario) ha effetti benefici sulla quantità di luce entrante (D_m aumenta) ma negativi sulla distribuzione. Il miglior compromesso, in corrispondenza del quale si ha D_p massimo, si ha per una inclinazione di 20° e di 25° . Tra i due valori si sceglie 20° per il minor impatto visivo. Non se ne riportano i risultati ma dopo i 60° il calo è più repentino: oltre a peggiorare la distribuzione si riduce infatti anche il fattore medio di luce diurna e la lightshelf, in questo caso, svolge solo una funzione deleteria di ostruzione.

b) Altezza

- $l = 0,5 \text{ m}$
- $i = 20^\circ$

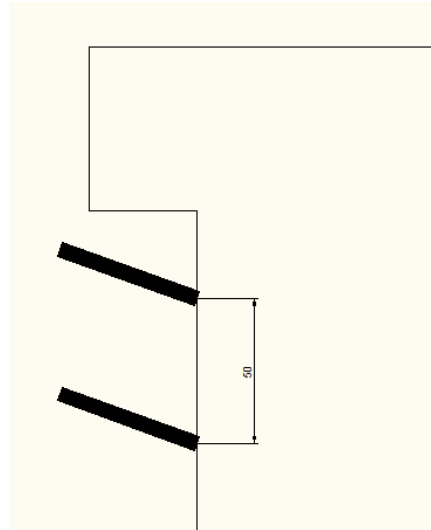


Figura 5.4 Lightshelf esterna: possibili altezze

h [m]	Dm [%]	Dmin/Dmax	Dp [%]
3,3	2,57	0,162	1,1
3,2	2,54	0,163	1,1
3,1	2,51	0,17	1,1
3	2,47	0,175	1,09
2,9	2,46	0,183	1,12
2,8	2,43	0,19	1,13

Tabella 5.3 Valori di illuminamento in fondo all'aula (6 m dalle finestre) in funzione dell'altezza delle lightshelf esterne rispetto al pavimento

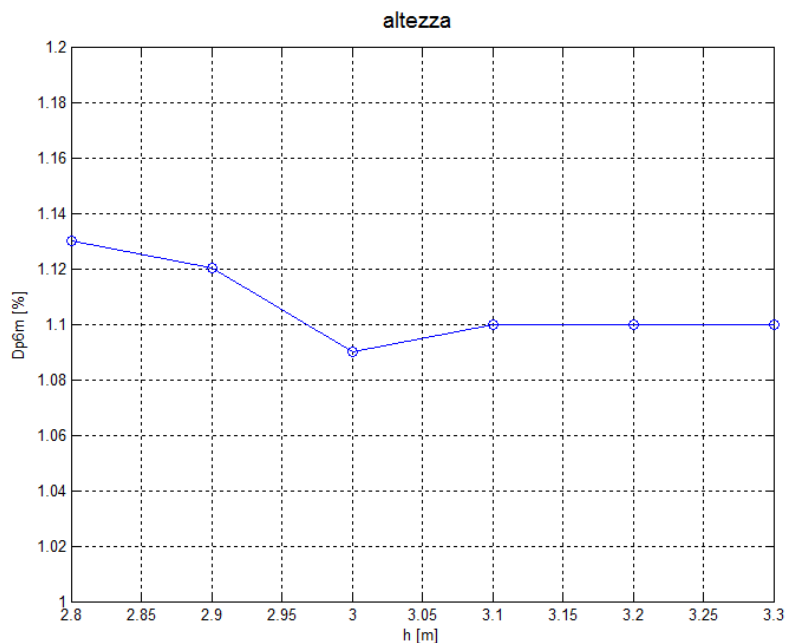


Figura 5.5 Andamento del D_{p6m} in funzione dell'altezza delle lightshelf esterne

Al diminuire dell'altezza di posizionamento della lightshelf, intesa rispetto al pavimento dell'aula, il fattore medio decresce in modo monotono mentre, allo stesso modo, l'uniformità di distribuzione cresce. Da 3,3 m a 3,1 m i due effetti si annullano l'un l'altro senza che aumenti l'illuminamento in fondo alla classe. La distribuzione migliora semplicemente per la diminuzione del fattore medio, il che significa che la lightshelf funge soltanto da sistema di ombreggiamento. A partire dai 3 m, dopo una leggera flessione, il fattore puntuale di luce diurna comincia ad aumentare, a testimonianza che l'effetto positivo sulla distribuzione è diventato predominante rispetto a quello negativo sul fattore medio. Ciò avviene in parte per l'effetto di redirezione della luce ma probabilmente una porzione di cielo maggiore. Sarebbe quindi conveniente collocare la lightshelf ad altezze ancora inferiori. Tuttavia, come è già stato detto, non è opportuno scendere troppo non solo perché così si restringerebbe eccessivamente la view window ma soprattutto perché aumenterebbero i problemi di abbagliamento, visto che la parte superiore della finestra, sfruttata per riflettere la luce sul soffitto, non viene schermata.

c) Lunghezza

- $h = 2,8 \text{ m}$
- $i = 20^\circ$

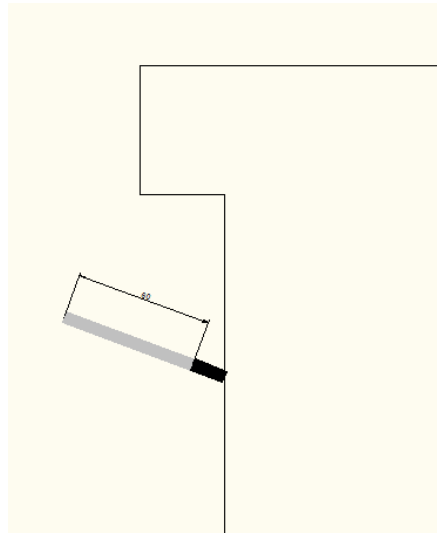


Figura 5.6 Lightshelf esterna: possibili lunghezze

l [m]	D_m [%]	D_{min}/D_{max}	D_p [%]
0,15	2,71	0,155	1,1
0,3	2,59	0,163	1,09
0,45	2,5	0,172	1,09
0,6	2,41	0,196	1,13
0,75	2,38	0,217	1,15

Tabella 5.4 Valori di illuminamento in fondo all'aula (6 m dalle finestre) in funzione della lunghezza delle lightshelf esterne

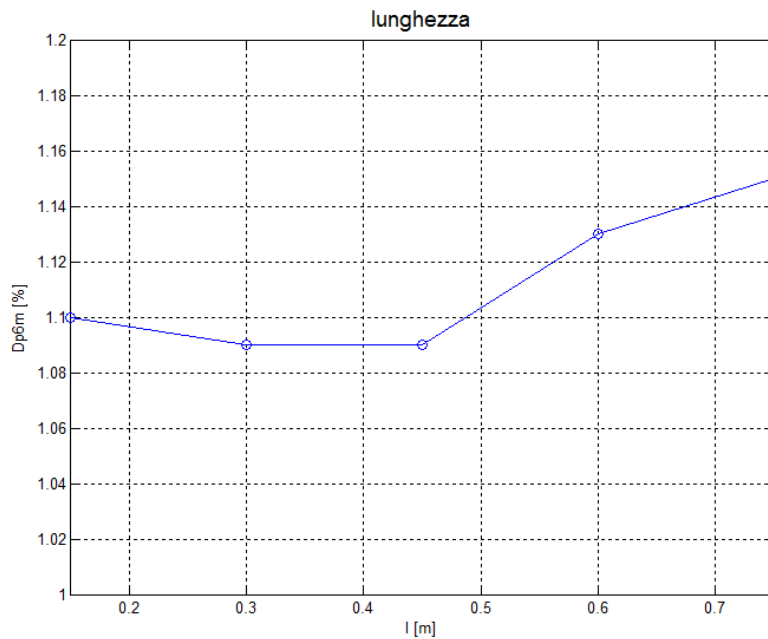


Figura 5.7 Andamento del $D_{puntuale}$ in funzione della lunghezza delle lightshelf esterne

Anche in questo caso il valore ottimale non è imposto da considerazioni fisiche ma da questioni estetiche e strutturali: teoricamente, più lunghe sono le lightshelf meglio è, ma arbitrariamente si pone come lunghezza massima 0,75 m. Fissato il valore massimo è comunque opportuno sottolineare l'esistenza di una lunghezza minima utile, pari a circa 0,45 m, sotto la quale la presenza dell'imbotte interferisce eccessivamente con il sistema. Addirittura, a 0,3 m e a 0,45 m i risultati sono peggiori che a 0,15 m: in quest'ultimo caso la lightshelf almeno è piccola e non abbassa troppo i livelli di illuminamento.

d) Parte interna

Un'alternativa alla configurazione solo esterna è la cosiddetta configurazione combinata che prevede una parte interna in aggiunta alla prima. A differenza della parte esterna, che deve essere per forza spezzata in quattro parti per poter alloggiare all'interno dell'imbotte, la parte interna può essere continua (figura 4.13). Il vantaggio di questa soluzione consiste nell'avere maggiore superficie riflettente e, allo stesso tempo, maggiore protezione contro l'abbagliamento. Si confronta la configurazione priva di lightshelf con una che prevede solo la parte interna, avente, a puro titolo dimostrativo, le seguenti caratteristiche:

- altezza: 2,8 m
- lunghezza: 1 m
- spessore: 0,05 m
- configurazione continua
- inclinazione: 0°

L'aula di riferimento è sempre quella al piano terra.

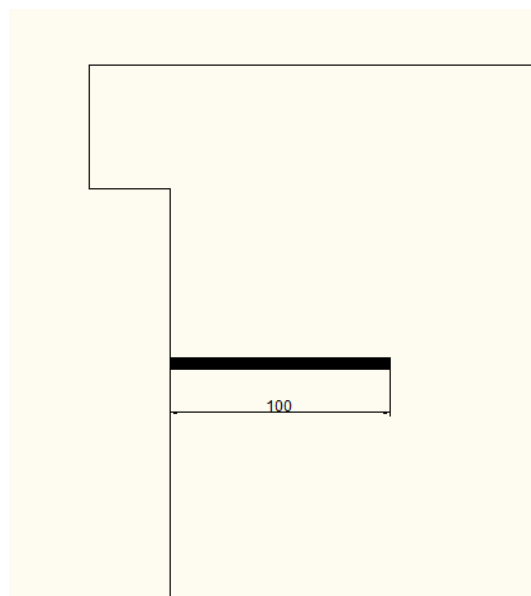


Figura 5.8 Componente interna generica

interna	Dp_6	Dp_1	Dm	Dmin/Dmax
no	1,16	6,54	2,82	0,155
sì	0,98	6,31	2,49	0,146

Tabella 5.5 Effetto della parte interna in condizioni di luce diffusa

La modifica è decisamente svantaggiosa: non solo scende l'illuminamento vicino alla finestra (D_{p_1}), ma anche quello in fondo al locale (D_{p_6}). Di conseguenza il fattore medio cala senza nemmeno portare benefici alla distribuzione.

In definitiva si può affermare che in condizioni di overcast sky l'aggiunta della parte interna è negativa. Tuttavia, come si vedrà più avanti, nel caso di luce diretta questo elemento risulta necessario sia come schermo antiabbagliamento sia come superficie riflettente, e si deve pertanto considerare.

Per distinguere le due situazioni si può immaginare un sistema composto da una parte esterna fissa e da una parte interna parzialmente mobile attivabile all'occorrenza.

Per l'ottimizzazione di questo componente è necessario considerare la luce diretta e si rimanda pertanto al paragrafo corrispondente.

5.1.2. Configurazione definitiva

Per quanto è emerso dall'analisi precedente la configurazione ottimale ha le seguenti caratteristiche, valide anche per il primo piano (tabella 5.6):

	esterna	interna
inclinazione [°]	20	?
lunghezza [m]	0,75	?
larghezza [m]	1,32 (x4)	9,2
altezza [m]	2,8	2,8
spessore [cm]	5	5
ρ superficie sup [%]	90	90

Tabella 5.6 Caratteristiche delle componenti interna ed esterna derivate dall'analisi con overcast sky

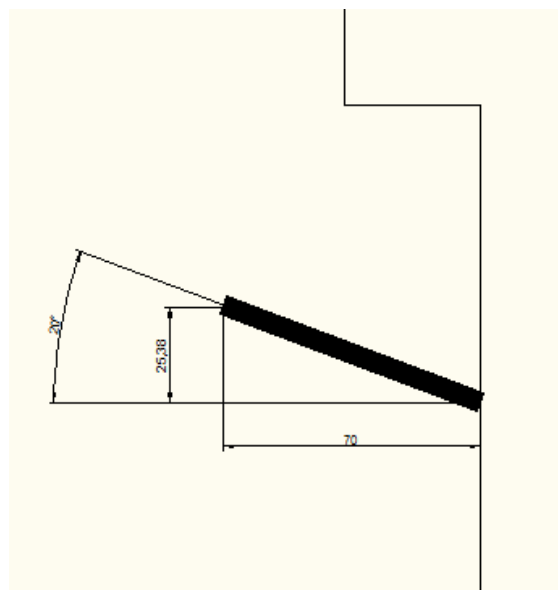


Figura 5.9 Configurazione definitiva della lightshelf esterna

Analizzando infine la configurazione prescelta in termini di impatto visivo, due parametri da indicare doverosamente sono la sporgenza rispetto al davanzale e l'altezza della lightshelf vista frontalmente, entrambe di 26 cm.

5.1.3. Risultati per la luce diffusa

Definita la lightshelf che massimizza il fattore puntuale di luce diurna in fondo all'aula, la si applica al caso reale (modello completo) (tabelle 5.7 e 5.8):

piano	lightshelf	Dm [%]	ΔDm [%]	Dmin/Dmax	$\Delta(Dmin/Dmax)$ [%]
0	no	2,69	-	0,157	-
0	sì	2,21	-17,84	0,23	46,50
1	no	2,13	-	0,144	-
1	sì	1,77	-16,90	0,194	34,72

Tabella 5.7 Risultati per overcast sky: fattore medio e distribuzione

piano	lightshelf	Dp_1 [%]	ΔDp_1 [%]	Dp_6 [%]	ΔDp_6 [%]
0	no	6,42	-	1,11	-
0	sì	4,67	-27,26	1,12	0,90
1	no	5,33	-	0,83	-
1	sì	4,25	-20,26	0,83	0,00

Tabella 5.8 Risultati per overcast sky: fattori puntuali

I risultati, di andamento simile per entrambe le aule, non sono del tutto soddisfacenti: ci si aspettava infatti il calo dell'illuminamento medio dovuto all'effetto ostruente della lightshelf (>15%) ma anche un aumento dell'illuminamento in fondo all'aula che invece non c'è stato.

Il fatto che l'illuminamento in fondo all'aula non diminuisca, in parte per la porzione di cielo libera nella parte alta delle finestre ma probabilmente anche per la riflessione della luce verso l'interno, permette quantomeno di far crescere notevolmente l'uniformità (oltre il 45% nel caso dell'aula al piano terra): intaccando solo l'illuminamento vicino alle finestre, infatti, la curva di distribuzione si appiattisce molto (figure 5.10 e 5.11, riferite al piano terra).

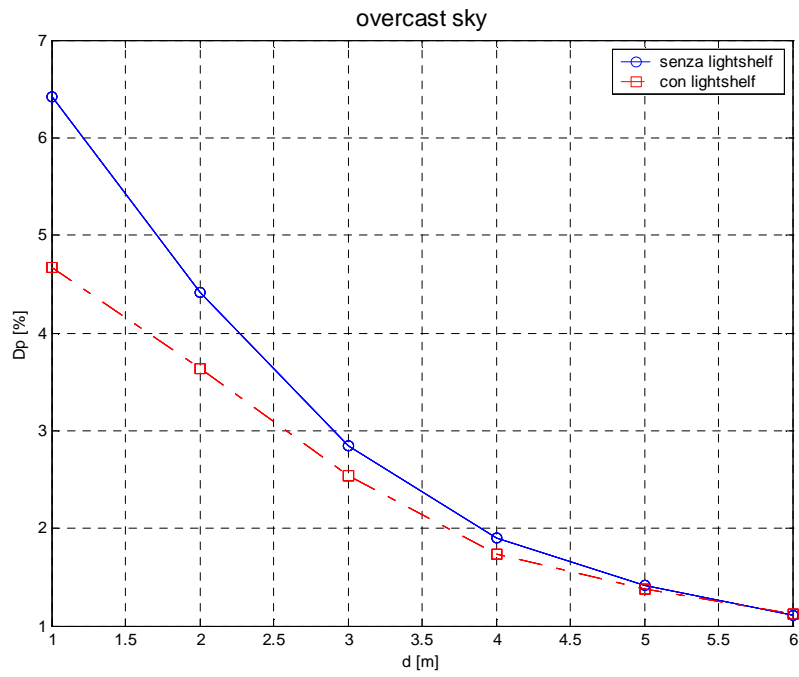


Figura 5.10 Overcast sky: distribuzione lungo l'aula

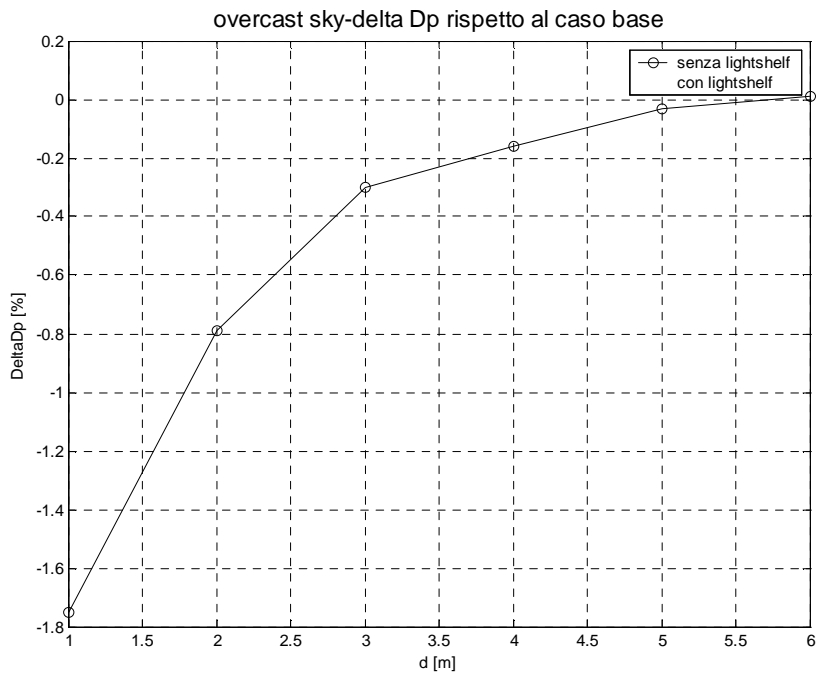


Figura 5.11 Overcast sky: differenza rispetto al caso senza lightshelf

Dall'ultima immagine appare chiaro l'effetto localizzato della lightshelf esterna, che lascia libera la parte superiore della finestra, dando la possibilità alla luce di penetrare in profondità. Un sistema tradizionale di ombreggiamento, tipo quello attuale, avrebbe infatti abbassato i livelli in modo molto più omogeneo. Interessante anche il confronto tra le isolinee del fattore di luce diurna (figura 5.12, riferita al piano terra):

Si osservi come nel caso con lightshelf b) rispetto ad a):

- la zona bianca ($D_p > 4\%$) praticamente scompare
- le isolinee sono più distanziate a riprova della maggiore uniformità

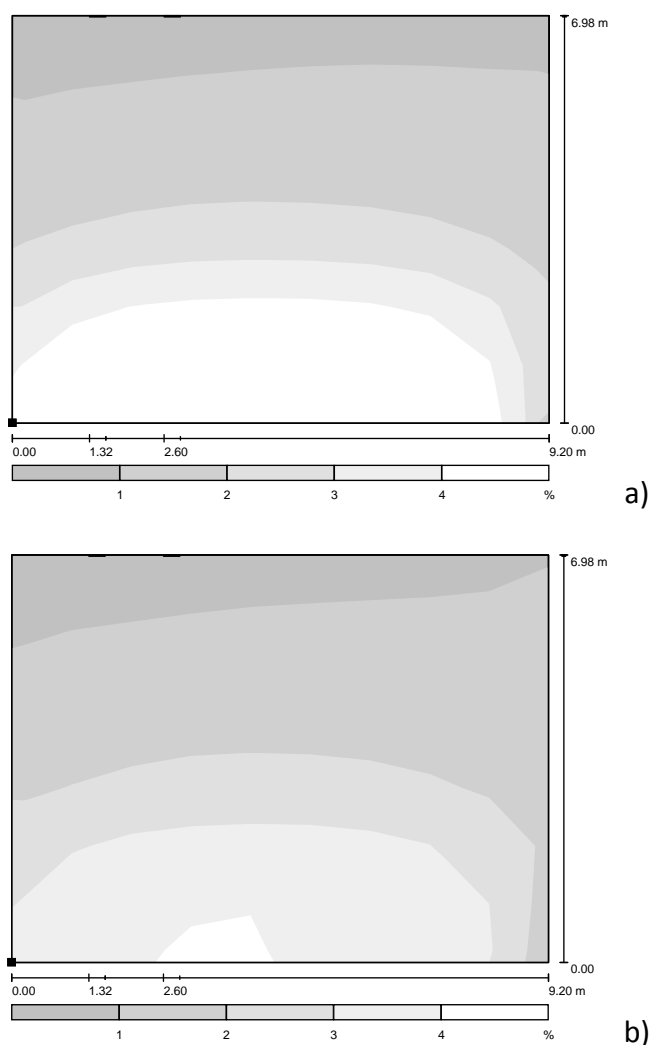


Figura 5.12 Isolinee con b) e senza a) lightshelf

5.2. Clear sky

In presenza di radiazione diretta diventa fondamentale tenere conto della specularità della superficie superiore delle lightshelf e dell'effettiva direzione di riflessione dei raggi. Dialux, considerando le superfici perfettamente diffondenti, non è adatto a questo scopo e si ricorre pertanto a Relux, che al suo interno implementa, oltre ad un metodo simile a quello di Dialux basato sulla Radiosity, anche uno di tipo Ray-tracing collegato a Radiance.

Diventa quindi necessario arricchire la descrizione delle superfici con la specularità dei materiali: per le lightshelf si stabilisce che la specularità σ sia pari al 90% mentre per tutte le altre superfici si continua a fare l'ipotesi di perfetta diffusività ($\sigma=0$, valore di default).

Radiance esegue i calcoli seguendo la direzione dei raggi luminosi: un altro parametro da definire è perciò il numero di interreflessioni che si vogliono considerare. Ovviamente all'aumentare delle interreflessioni le simulazioni diventano sempre più precise ma anche più dispendiose. Un buon compromesso appare quello di considerarne 4 (16 per le lightlouver che hanno una geometria più complessa).

Altro aspetto molto importante in condizioni di clear sky è l'orario scelto per le simulazioni: per confrontare correttamente le simulazioni eseguite in mesi diversi ma alla stessa ora bisogna infatti considerare non solo l'ora legale ma anche altri piccoli scostamenti temporali dovuti alla durata precisa dell'anno. Si deve cioè considerare l'effettiva ora solare, che in Relux viene indicata come OLR (Ora Locale Reale) e non l'ora legale.

In presenza di radiazione diretta è necessario prevedere un sistema di shading per evitare l'abbagliamento degli occupanti. Generalmente questa funzione è svolta da tende o, come accade nei locali in esame, da veneziane. Aggiungendo le lightshelf la situazione dal punto di vista dell'ombreggiamento cambia: il sistema non deve più coprire l'intera superficie della finestra, ma solo la parte delimitata superiormente dalla lightshelf. Sopra, invece, l'apertura rimane libera per permettere alla radiazione diretta di penetrare nel locale. Da qui la necessità della lightshelf interna.

Rispetto alle simulazioni con la sola luce naturale, quindi, si apportano le seguenti modifiche al modello:

- aggiunta della parte interna della lightshelf. Lunghezza e inclinazione sono da determinare in modo tale da non avere abbagliamento e tenendo conto contemporaneamente delle dimensioni e dell'influenza sui risultati illuminotecnici;

- le veneziane non vengono rappresentate in modo realistico ma si tiene conto della loro presenza ponendo a 0 la trasmissione del vetro per l'80% della finestratura, lasciando solo 0,48 m (20%) di superficie con lo stesso coefficiente di trasmissione (0,52);
- per la simulazione delle lightshelf si dividono le finestre in due parti, superiore e inferiore. La parte superiore è caratterizzata da un fattore legato agli infissi maggiore (si passa da 0,52 a 0,65), la parte inferiore si comporta come una normale finestra oscurata, con la porzione di finestra libera uguale al caso precedente;

L'analisi prestazionale si articola in tre parti, una per ogni aspetto saliente su cui influisce la lightshelf:

- a. analisi sull'abbagliamento
- b. analisi sull'illuminamento in fondo al locale
- c. analisi sulla distribuzione

a. Abbagliamento

Prima di procedere con le simulazioni vere e proprie restano da definire la lunghezza e l'inclinazione della lightshelf interna. La soluzione si ricava geometricamente imponendo che i raggi che filtrano attraverso la light window non scendano mai sotto gli 0,6 m causando l'abbagliamento degli alunni. Di solito le lightshelf sono tali da schermare solo le zone vicino alle finestre. In questo caso invece sono progettate in modo da proteggere dalla radiazione diretta tutta l'aula.

Soddisfano ad esempio questo requisito le seguenti configurazioni:

- lunghezza 1 m e inclinazione 10°
- lunghezza 1,25 m e inclinazione 5°
- lunghezza 1,5 m e inclinazione 0°

Tra le tre si sceglie quella intermedia (figura 5.13): la prima è infatti troppo penalizzante dal punto di vista illuminotecnico (l'elevata inclinazione contrasta l'effetto della lightshelf esterna), la terza configurazione è considerata eccessivamente ingombrante. La figura 5.14 dimostra infine l'efficacia della lightshelf interna contro l'abbagliamento, visto che i raggi non scendono sotto quota 0,6 m.

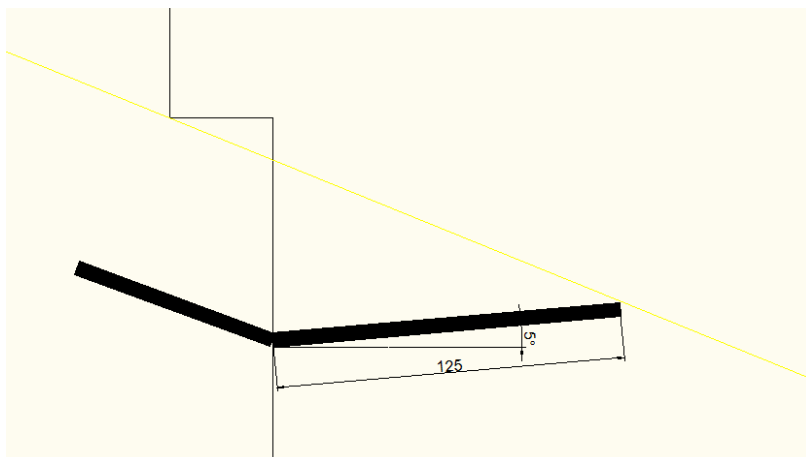


Figura 5.13 Configurazione della lightshelf interna

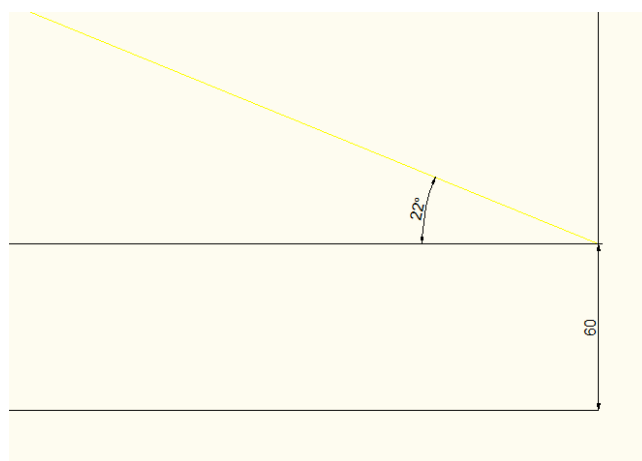


Figura 5.14 Efficacia della lightshelf contro l'abbagliamento: i raggi in fondo all'aula rimangono sempre sopra gli 0,6 m

b. Illuminamento medio in fondo al locale

Una volta stabilita la configurazione definitiva, come prima cosa si è interessati a calcolare l'aumento dell'illuminamento medio in fondo al locale in condizioni di cielo sereno. A tal fine si confrontano i risultati che si ottengono con e senza lightshelf per l'aula del piano terra. Il riferimento è un piano che copre in ampiezza tutto il locale e profondo 2 m, posto in fondo ad una altezza di 0,6 m da terra (altezza banchi) (figura 5.15). Volendo ottenere una stima media su base annuale dell'aumento, si eseguono simulazioni a diverse ore del giorno e in diversi mesi.

Le scene analizzate sono le seguenti:

- tutti i mesi dispari (gennaio, marzo...) al giorno 15
- per ogni giorno viene effettuata una simulazione al mattino (ore 10) e una al pomeriggio (ore 14)

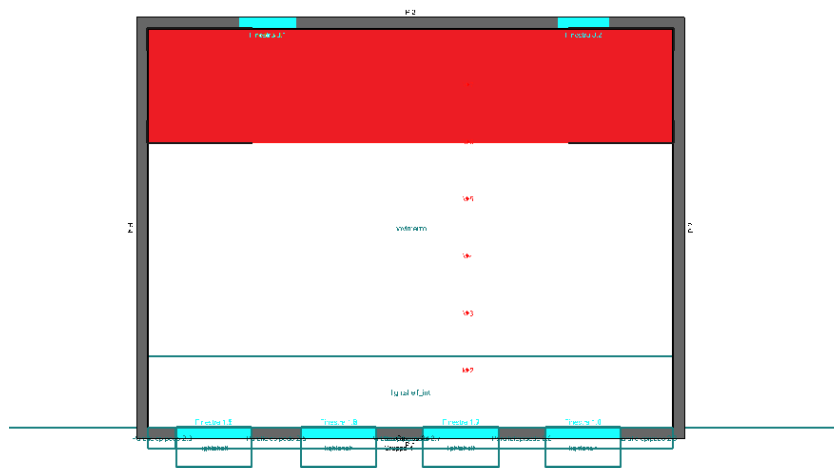


Figura 5.15 Zona considerata per la valutazione dell'aumento medio dell'illuminamento in fondo all'aula

Di seguito i risultati ottenuti (tabella 5.9):

	E [lux]	gennaio	marzo	maggio	luglio	settembre	novembre
senza lightshelf	mattina	27	24	25	25	25	26
	pomeriggio	23	36	31	30	33	37
con lightshelf	mattina	63	61	60	58	63	55
	pomeriggio	102	81	75	74	80	114

Tabella 5.9 Illuminamento medio in fondo all'aula con e senza lightshelf al variare del mese e dell'ora

L'aumento medio su base annua in fondo all'aula è di circa 45 lux, pari al 159% in più rispetto alla media attuale. L'aumento più consistente si ha al pomeriggio con, mediamente, 56 lux (+176,8%) in più contro i 34,7 (+136,8%) del mattino. Sarebbe stato interessante commentare anche l'innalzamento medio su tutto il locale ma la presenza di picchi localizzati di illuminamento dovuti a radiazione diretta non opportunamente filtrata ha portato a risultati medi non attendibili.

c. Distribuzione

Appurati i vantaggi in termini di illuminamento medio, resta da verificare l'efficacia delle lightshelf sulla distribuzione.

I casi analizzati sono i due solstizi e un equinozio, in rappresentanza delle varie stagioni:

- 21 giugno, ore 12:00 (estate)
- 22 dicembre, ore 12:00 (inverno)
- 23 settembre, ore 12:00 (autunno/primavera)

Come già fatto in precedenza, per valutare la distribuzione vengono analizzati i valori puntuali di illuminamento a diverse distanze dalla finestra a 0,6 m da terra, in corrispondenza del centro della zona dei banchi.

Alle due configurazioni classiche, con e senza lightshelf, se ne aggiungono altre tre. Complessivamente le configurazioni analizzate sono le seguenti:

- **base:** senza lightshelf, con il solo sistema di ombreggiamento appena descritto (figura 5.16);

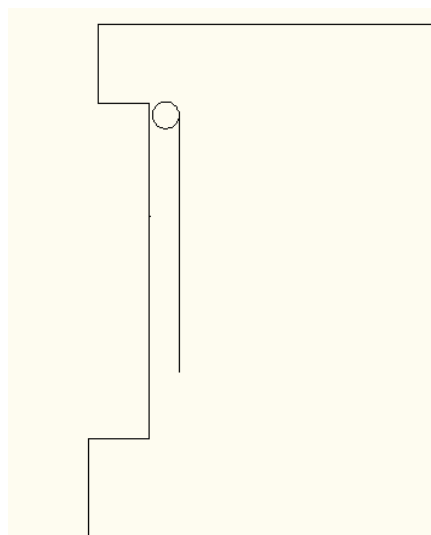


Figura 5.16 Analisi in condizioni di clear sky: configurazione base

- **lightshef**: è la lightshef risultata ottimale, composta da parte esterna e parte interna (figura 5.17);

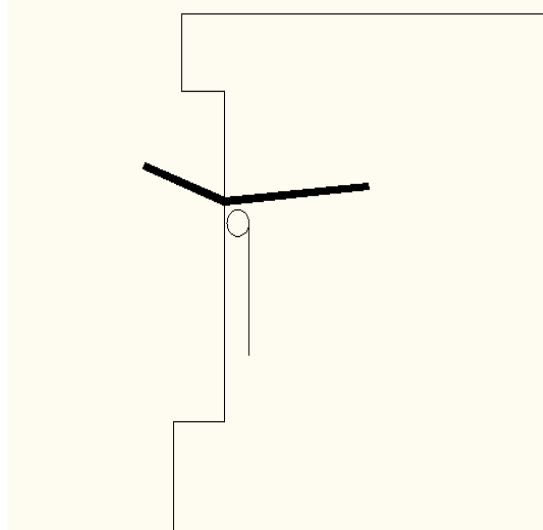


Figura 5.17 Analisi in condizioni di clear sky: configurazione con lightshef

- **solo interna**: soluzione meno impattante della precedente dal punto di vista architettonico. Senza parte esterna ci si aspetta però un calo considerevole delle prestazioni (figura 5.18);

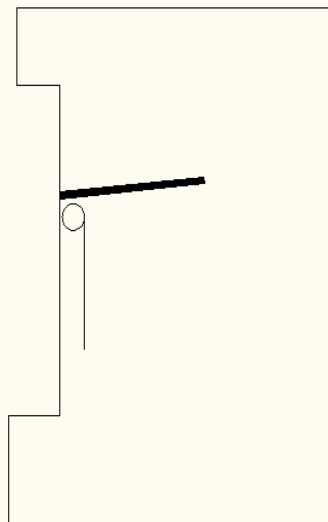


Figura 5.18 Analisi in condizioni di clear sky: configurazione solo interna

- **lightlouver:** si tratta di un sistema di daylighting alternativo che sfrutta lo stesso principio delle lightshelf ma invece di essere composta da un'unica superficie riflettente, si sviluppa su più piani sovrapposti di dimensioni inferiori [S11] (figura 5.19);

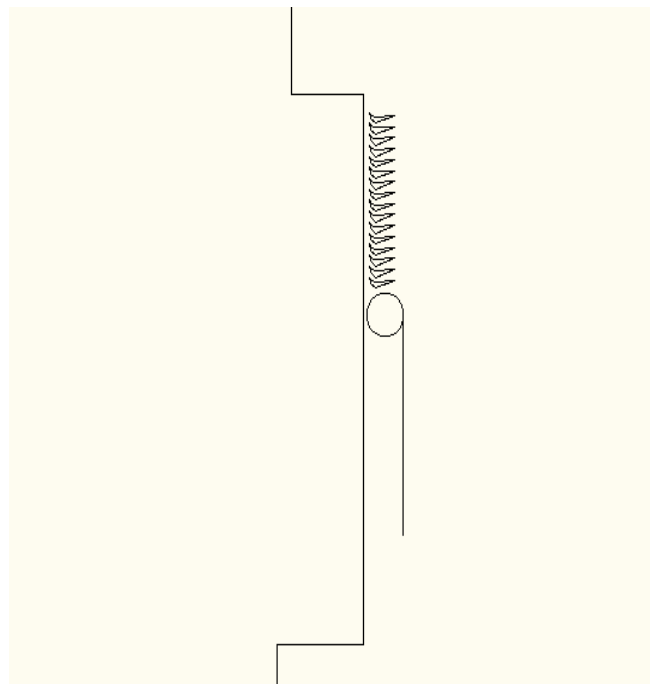


Figura 5.19 Analisi in condizioni di clear sky: configurazione lightlouver

La forma particolare di questo dispositivo fa in modo che i raggi vengano reindirizzati verso il fondo del locale senza causare abbagliamento: tracciando infatti un'ideale linea orizzontale tra due lamelle consecutive si nota che dove finisce una comincia l'altra e neanche con raggi praticamente orizzontali possono insorgere problemi di abbagliamento (figura 5.20).

A differenza delle tradizionali veneziane, quindi, non solo il coefficiente di riflessione è superiore, ma il dispositivo, che è fisso, funziona in ogni condizione di cielo senza necessità di continue correzioni.

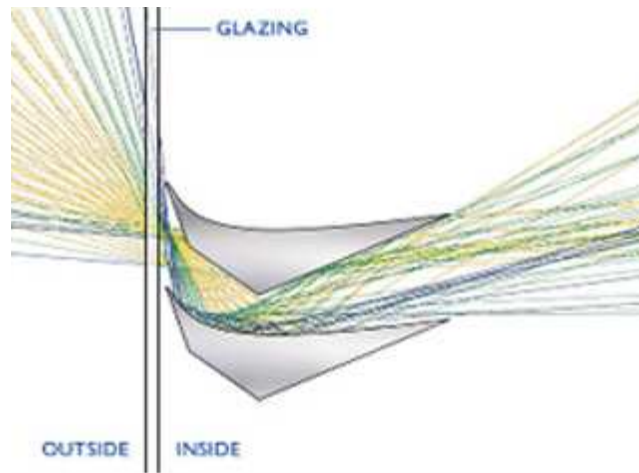


Figura 5.20 Principio di funzionamento delle lightlouver

- **soffitto inclinato:** inclinando opportunamente il soffitto si dovrebbe in teoria raggiungere un livello di illuminamento maggiore in fondo al locale grazie alla riflessione dei raggi più direzionale. Si sfrutta questo principio con la lightshelf ottimizzata, inclinando il soffitto di 5° e lasciando inalterati gli altri parametri (figura 5.21).

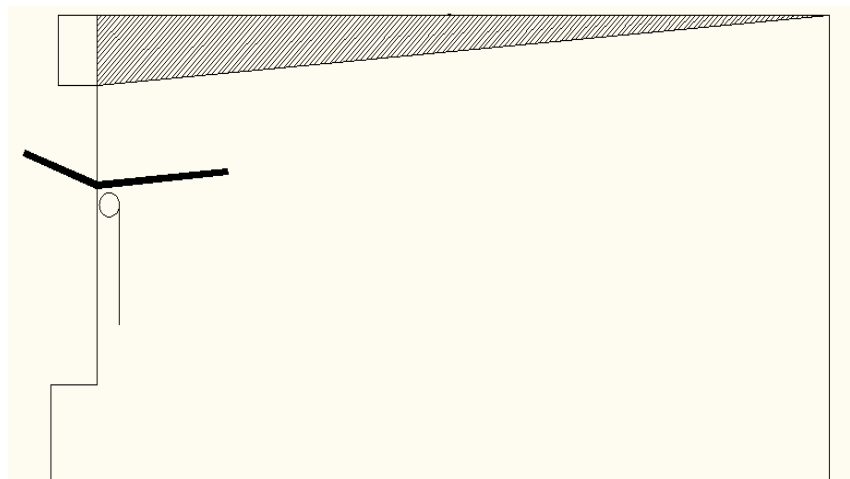


Figura 5.21 Analisi in condizioni di clear sky: configurazione con lightshelf e soffitto inclinato

		d [m]	1	2	3	4	5	6
base	solstizio d'estate		187	95	60	49	45	43
	solstizio d'inverno		177	115	50	38	39	41
	equinozio d'autunno		303	130	69	54	50	48
lightshelf	solstizio d'estate		244	169	136	116	106	95
	solstizio d'inverno		215	169	108	90	88	84
	equinozio d'autunno		352	191	137	114	105	96
solo interna	solstizio d'estate		219	136	101	86	80	72
	solstizio d'inverno		207	158	98	82	80	78
	equinozio d'autunno		339	173	116	95	86	79
lightlouver	solstizio d'estate		191	107	70	59	55	52
	solstizio d'inverno		199	139	75	61	63	63
	equinozio d'autunno		315	157	93	76	71	68
soffitto inclinato	solstizio d'estate		229	149	115	101	94	86
	solstizio d'inverno		216	166	106	89	87	84
	equinozio d'autunno		346	186	129	110	103	95

Tabella 5.10 Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: valori di illuminamento E [lux] lungo l'aula

A partire da questi risultati si esegue un'analisi incrociata, nel senso che si studiano sia le prestazioni delle singole configurazioni al variare delle stagioni sia tutte le configurazioni in un unico grafico per ogni stagione (fig. 5.22 e 5.23). Osservando il primo gruppo di grafici si nota, a livello stagionale, un andamento simile per tutte le configurazioni: l'illuminamento maggiore si ha all'equinozio, anche se in fondo al locale i valori si livellano molto e l'aumento è circoscritto alla zona vicino alla finestra. Di conseguenza la distribuzione ai due solstizi è più uniforme.

In alcuni casi (base, solo interna e soffitto inclinato) in estate si hanno valori leggermente superiori a quelli invernali (tranne che a 2 m). Lightshelf e lightlouver hanno invece andamenti tra loro opposti: nel primo caso i valori estivi sono sempre maggiori, al limite uguali, a quelli invernali, tant'è che a 4 e 5 m superano anche i valori all'equinozio. Nel secondo caso invece i valori estivi sono ovunque i più bassi. Da segnalare inoltre, per la lightlouver, la leggera crescita dell'illuminamento invernale negli ultimi metri, evento che non viene registrato per nessun'altra configurazione.

Passando al confronto diretto, il sistema più performante risulta in tutte le stagioni la lightshelf. Il vantaggio è più marcato in estate: l'incremento percentuale dell'illuminamento medio dei 6 punti considerati supera l'80%, corrispondente a 65 lux. Nelle altre stagioni l'aumento registrato rispetto alla situazione base è del 64% in inverno (+49lux) e del 52% all'equinozio (+57lux).

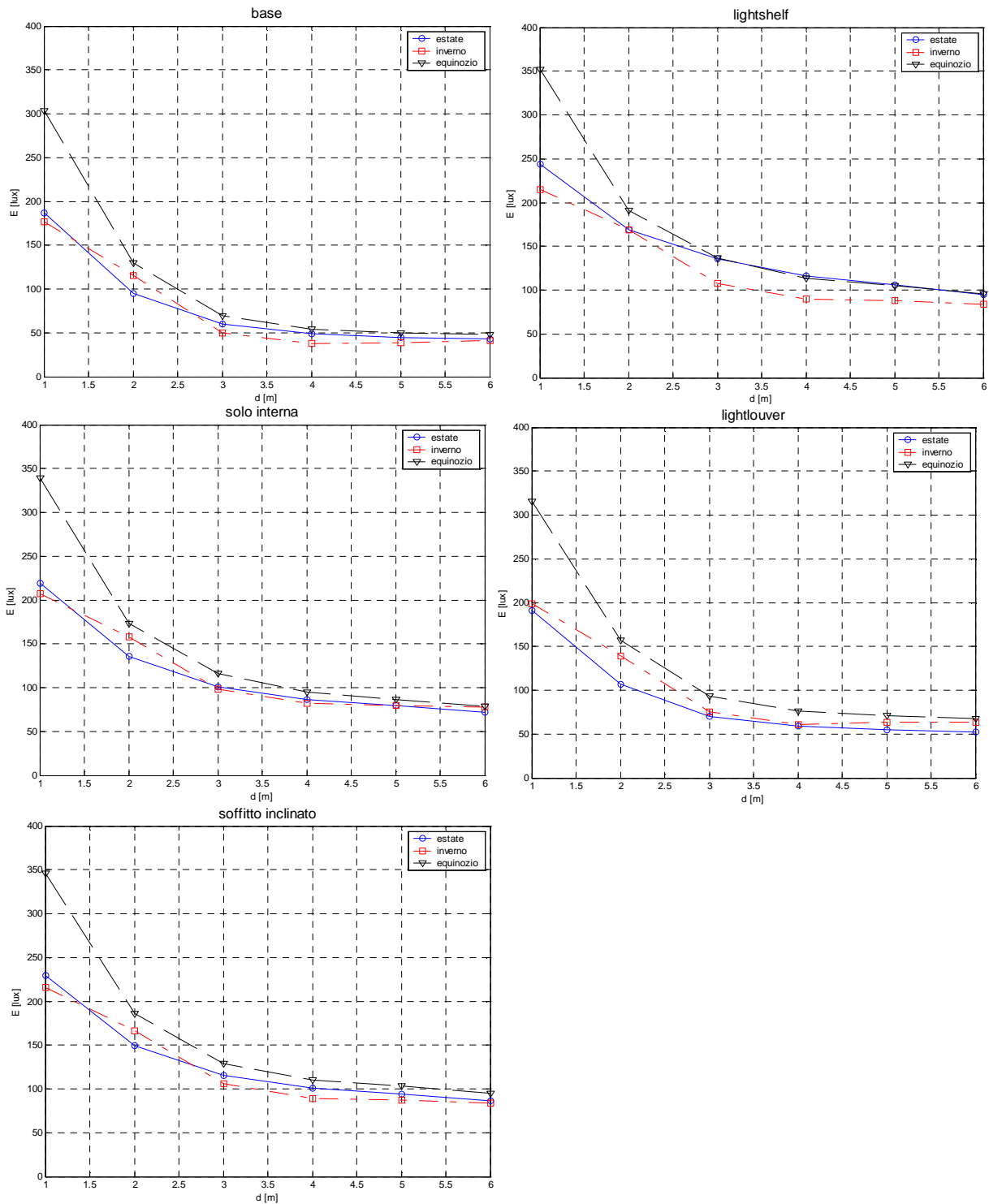


Figure 5.22 Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: analisi per configurazione

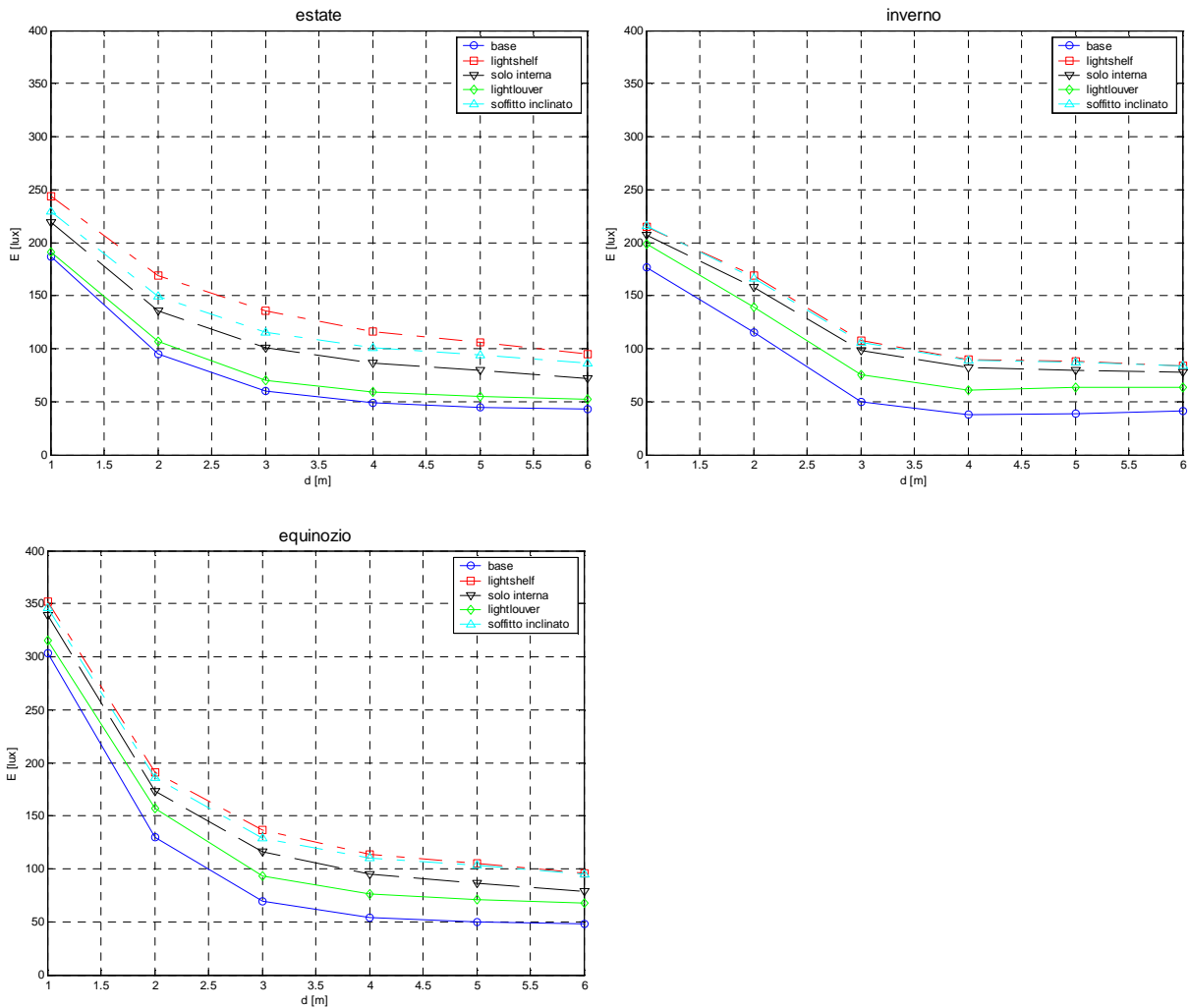


Figure 5.23 Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: analisi per stagione

Al secondo posto si posiziona la soluzione con soffitto inclinato: considerando però che questa modifica è applicata al caso precedente, si conclude che l'intervento non porta i miglioramenti sperati. In particolare, questa modifica è ininfluente in inverno e nelle stagioni intermedie e addirittura negativa in estate.

Al terzo posto si pone la configurazione solo interna che, come ci si aspettava, è meno performante di quella completa. Il calo dell'illuminamento medio¹ è del

¹ come in precedenza ci si riferisce alla media dei punti considerati. Non si può quindi parlare di vera e propria media stagionale, che richiede simulazioni in più fasi della giornata e in diversi giorni, e nemmeno di media valida per tutto il locale, visto che i punti analizzati sono soltanto 6.

6% circa in inverno, del 12% all'equinozio e sale fino al 20% in estate. Questa soluzione può comunque essere presa in considerazione qualora l'altra sia giudicata troppo impattante esteticamente.

Al di sotto delle attese i risultati conseguiti con le lightlouver, che non si discostano molto dalla situazione base. In termini assoluti, infatti, gli aumenti medi sono molto modesti: poco superiore ai 20 lux in inverno (+30%) e nelle stagioni intermedie (+20%), e addirittura sotto i 10 lux in estate (+11%). Due probabilmente le cause principali: una legata alla struttura dell'edificio ed una, più facilmente risolvibile, ha a che fare con la modellazione della lightlouver. Nel primo caso ci si riferisce all'imbotte molto pronunciata che impedisce spesso alla luce di raggiungere il dispositivo, impedendone il corretto funzionamento (la stagione più penalizzata risulta infatti l'estate, quando il sole è più alto). Per quanto riguarda invece la modellazione, mancando informazioni più dettagliate, non si è potuta ricreare con precisione la geometria piuttosto complessa della lightlouver, aspetto che però è fondamentale per il gioco di riflessione della luce (cfr. figura 5.20).

In tutti i casi, comunque, si può notare che la forma della curva di distribuzione rimane pressoché uguale e si verifica una semplice traslazione più o meno marcata verso l'alto, su valori di illuminamento maggiori.

Anche se la forma della curva rimane la stessa per tutte le configurazioni, l'uniformità aumenta, soprattutto con le lightshelf, grazie all'aumento dei valori minimi e massimi e quindi del loro rapporto. L'aumento in questo caso si aggira per le lightshelf intorno al 70% in tutte le stagioni. Una ragione dell'aumento di uniformità è quindi la maggior quantità totale di luce entrante nel locale.

Rimanendo in tema di lightshelf, per valutare se oltre all'aumento dell'illuminamento medio concorre alla maggiore uniformità anche la redistribuzione della luce verso l'interno, è utile tracciare il diagramma che riporta, nelle varie stagioni, lo scostamento rispetto al caso base (figura 5.24).

In tutti e tre i casi l'aumento massimo avviene a 3 m dalle finestre mentre in fondo all'aula, dove c'è bisogno di luce, l'aumento è più modesto. La lightshelf riesce quindi a reindirizzare parte della luce verso l'interno, ma non abbastanza in profondità. Ai fini dell'uniformità, pesando solo i valori estremi, si può dire che in inverno, visto che l'aumento a 6 m è leggermente superiore a quello a 1 m, si ha un leggero aumento dell'uniformità dovuto alla redistribuzione, all'equinozio il processo è praticamente assente e in estate il bilancio è addirittura negativo, ossia la luce convogliata in fondo è meno di quella che si aggiunge vicino alle finestre.

Un grafico 3D della distribuzione permette infine di evidenziare i quattro picchi di illuminamento in corrispondenza delle finestre (figura 5.25).

Si rimanda all'appendice B per la visione di alcuni rendering della soluzione ottimale per l'illuminazione naturale.

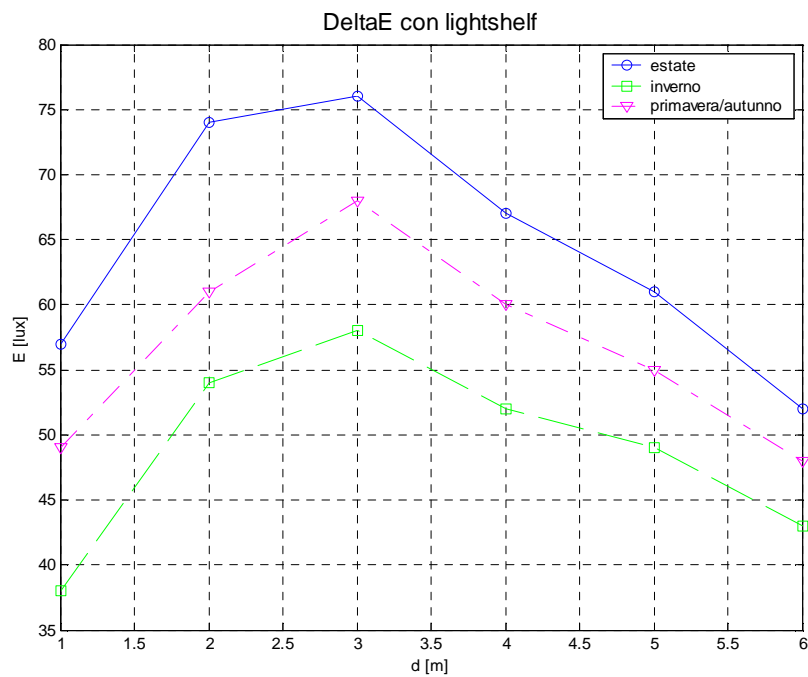


Figura 5.24 Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: differenza tra soluzioni base e con lightshelf

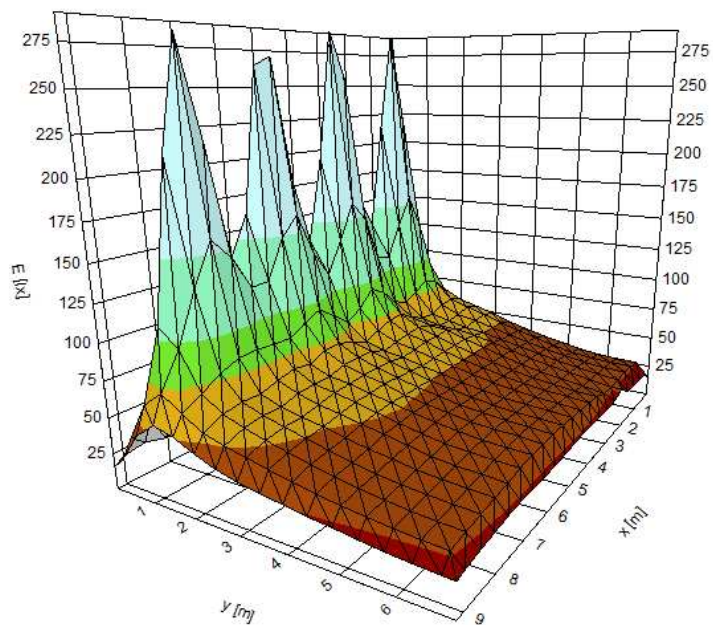


Figura 5.25 Risultati ottenuti in condizioni di clear sky: es. di grafico 3D della distribuzione di E nell'aula

Capitolo 6

Conclusioni

6.1. Quantificazione del risparmio energetico

Nei capitoli precedenti illuminazione artificiale e naturale sono state analizzate separatamente. Si vuole adesso mettere insieme i risultati ottenuti per quantificare, attraverso il calcolo del LENI, il risparmio energetico complessivo. Dialux permette di valutare il LENI in modo estremamente facile sfruttando il fatto che molti dei parametri da definire, come quelli geometrici, sono collegati ai locali precedentemente creati e sono quindi calcolati in automatico. Per tutti gli altri si fa riferimento alla normativa UNI EN 15193.

Di seguito la procedura utilizzata per il calcolo dei due dependency factor, F_O e F_D , e delle potenze parassite relative ai sistemi di automazione:

- **Occupancy dependency factor F_O**

Per il calcolo di F_O la UNI EN 15193 propone, in alternativa alle costanti di default, una soluzione più accurata del tipo:

$$F_O = F_{OC} + 0,2 - F_A \quad \text{per } 0,2 \leq F_A \leq 0,9 \quad (6.1)$$

$$F_O = 1 - \left[(1 - F_{OC}) \times \frac{F_A}{0,2} \right] \quad \text{per } 0,0 \leq F_A < 0,2 \quad (6.2)$$

dove F_{OC} tiene conto del sistema di automazione e F_A (fattore di assenza) della presenza delle persone. Entrambi sono forniti dalla normativa per una serie di casistiche. Nel nostro caso risulta (tabelle 6.1 e 6.2):

	automazione	F _{Oc}	F _A	F _O
aula	manual on/off	1	0,25	0,95
corridoio	manual on/off	1	0 ¹	1
aula magna	manual on/off	1	0,4	0,8

Tabella 6.1 F_O senza automazione

	automazione	F _{Oc}	F _A	F _O
aula	manual on/auto off	0,8	0,25	0,75
corridoio	auto on/auto off	0,9	0,6	0,5
aula magna	manual on/auto off	0,8	0,4	0,6

Tabella 6.2 F_O con automazione

- **Daylight dependency factor F_D**

Anche in questo caso si può ricorrere ad una formula:

$$F_D = 1 - F_{DS} \cdot F_{DC} \quad (6.3)$$

dove F_{DS} è il daylight supply factor ed è un indicatore della quantità di luce disponibile, e F_{DC} è il termine che lega luce naturale e artificiale e tiene conto dell'automazione.

Per il calcolo di entrambi è necessario conoscere il fattore di daylight penetration, che può essere nullo, debole, medio o forte ed è funzione del fattore medio di luce diurna. Dialux fornisce automaticamente questo parametro che, per tutti e tre i locali analizzati, risulta medio. A partire da questa considerazione è facile valutare gli altri due termini (con semplici formule e tabelle) e quindi F_D (tabelle 6.3, 6.4 e 6.5):

	F _{DS}	F _{DC}	F _D
aula	0,83	0,3	0,75
corridoio	0,83	0,3	0,75
aula magna	0,83	0,3	0,75

Tabella 6.3 F_D in assenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale

¹ si pone F_A=0, come se il corridoio fosse sempre frequentato, per indicare che durante l'orario delle lezioni le luci funzionano ininterrottamente.

	F_{DS}	F_{DC}	F_D
aula	0,83	0,77	0,36
corridoio	0,83	0,77	0,36
aula magna	0,83	0,77	0,36

Tabella 6.4 F_D in presenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale

	F_{DS}	F_{DC}	F_D
aula	0,94	0,77	0,28
corridoio	-	-	-
aula magna	-	-	-

Tabella 6.5 F_D in presenza di sistemi di automazione in funzione della luce naturale e delle lightshelf

L'automazione consiste in un sensore (la normativa non specifica se crepuscolare o continuo) che rileva la quantità di luce naturale presente nel locale e, se insufficiente, attiva in blocco o a gruppi l'illuminazione artificiale. Questa scelta è effettuata da Dialux, e non dal progettista, in base alle dimensioni del locale. Per locali piccoli come l'aula le luci sono accese tutte insieme.

Il daylight supply factor, invece, tiene conto della luce naturale disponibile: nei primi due casi (tabelle 6.3 e 6.4) è uguale; nel terzo (tabella 6.5) aumenta per effetto delle lightshelf. Il valore conseguente all'introduzione delle lightshelf non è fornito da Dialux in quanto i possibili valori indicati dalla normativa sono solo quattro, uno per ogni fattore di daylight penetration.

Questa è una notevole limitazione poiché piccole variazioni del fattore medio di luce diurna come quella causata dalle lightshelf rientrano nello stesso gruppo e non vengono quindi rilevate. Dialux inoltre fornisce risultati identici con o senza le lightshelf anche perché valuta il fattore di daylight penetration non a partire dall'effettivo fattore medio di luce diurna, bensì da un parametro simile, il *daylight factor for carcass façade opening*, che non considera però finestratura e altri sistemi di ombreggiamento, comprese quindi le lightshelf. Non calcolando tutti quei parametri che riducono la trasmissione della luce, il *daylight factor for carcass façade opening* risulta ovviamente superiore al corrispondente fattore medio di luce diurna (tabella 6.6).

Classification		<i>Daylight penetration</i> (access of the zone to daylight)
D_c	D	
$D_c \geq 6\%$	$D \geq 3\%$	Strong
$6\% > D_c \geq 4\%$	$3\% > D \geq 2\%$	Medium
$4\% > D_c \geq 2\%$	$2\% > D \geq 1\%$	Weak
$D_c < 2\%$	$D < 1\%$	None

Tabella 6.6 Determinazione del fattore di daylight penetration

Un'altra limitazione imposta da Dialux riguarda la gestione delle lampade che, nel caso delle aule, non possono essere comandate separatamente, il che è molto sconveniente in situazioni come questa in cui la distribuzione della luce è così disomogenea. Tornando al discorso del fattore di daylight penetration bisogna infine sottolineare un altro difetto: le categorie, oltre a essere poche, dipendono esclusivamente dal fattore medio di luce diurna e non considerano che anche la distribuzione può influire sui consumi. Le lightshelf ne sono un esempio lampante: in alcuni il fattore medio diminuisce per effetto dell'ombreggiamento localizzato ma, invece di aumentare come prevede questa procedura, i consumi diminuiscono in virtù di una distribuzione più efficiente della luce. Le ultime due problematiche sono collegate: non potendo regolare singolarmente, o almeno a gruppi, i vari apparecchi, si verifica effettivamente un aumento dei consumi al diminuire del fattore medio.

- **Determinazione di F_{DS} conseguente all'introduzione delle lightshelf**

F_{DS} in questo caso è valutato a posteriori, nel senso che è il valore tale per cui si ottiene il risparmio energetico stabilito dalle seguenti considerazioni sul capitolo 5:

- dalla figura 5.24 emerge un aumento medio annuale nell'aula di 57 lux;
- la tabella 5.9, relativa solo alla zona in fondo all'aula ma basata su più misurazioni, indica un aumento medio annuale di 45 lux, in accordo con la precedente figura;

Si può quindi affermare che l'aumento medio annuale di illuminamento su tutta la superficie dell'aula si aggira con buona approssimazione intorno ai 50 lux. Considerando la potenza degli apparecchi (273 W) e l'illuminamento

massimo che sono in grado di generare (300 lux), si conclude che la riduzione dei consumi è circa del 17%.

Tale valore si riferisce però esclusivamente alle giornate serene in cui è presente la radiazione diretta. Nelle giornate nuvolose le lightshelf non portano alcun beneficio (si ipotizza che l'apporto di luce artificiale necessario non cambi). Sapendo che le giornate soleggiate a Pordenone corrispondono al 66% [S12] del totale si perviene ad un risparmio annuale dato dalle lightshelf pari all'11,2% circa. Imponendo questo valore ne deriva un F_{DS} di 0,94.

- **Potenza parassita**

Per quanto riguarda i consumi specifici dei sistemi di automazione, la normativa parla di 5 kWh/(m²anno), indipendentemente dal tipo di edificio. Se valido per edifici che funzionano tutto l'anno, come gli ospedali, questo valore appare di conseguenza eccessivo per una scuola, che rimane chiusa per alcuni mesi all'anno e durante la notte. Ipotizzando l'azionamento di un interruttore generale ogniqualvolta la scuola viene chiusa, si considera adeguata una potenza parassita di 2 kWh/(m²anno) (in accordo con quanto riportato in [15]) da modificare opportunamente in una potenza (tabella 6.7):

	$E_{\text{parassita}}$ [kWh/m ² anno]	area [m ²]	P_{par} [W]	P_{lamp} [W]	P_{par} [%]
aula	2	64,22	14,66	273	5,37
corridoio	2	157,89	36,05	670	5,38
aula magna	2	130,84	29,87	812	3,68

Tabella 6.7 Potenze parassite

La potenza parassita corrisponde mediamente al 5% della potenza installata, valore tutt'altro che trascurabile.

- **Calcolo del LENI**

Per le due tipologie di locali per le quali ci si è limitati ad una analisi della situazione attuale, corridoi e aula magna, si confrontano gli scenari con o senza sistemi di automazione (tabella 6.8 e figura 6.1).

	aula magna		corridoio	
	manuale	auto	manuale	auto
P lampade [W]	812	812	670	670
P parassita [W]	0	30	0	36
t _D [h]	360	360	1800	1800
t _N [h]	250	250	250	250
F _C	1	0,9	1	0,9
F _O	0,8	0,6	1	0,5
F _D	0,75	0,36	0,75	0,36
LENI kWh/(a·m ²)	2,84	3,58	6,8	3,26
Δ LENI [%]	-	26,1	-	-52,1

Tabella 6.8 Influenza dei sistemi di automazione sui consumi nei corridoi e nell'aula magna

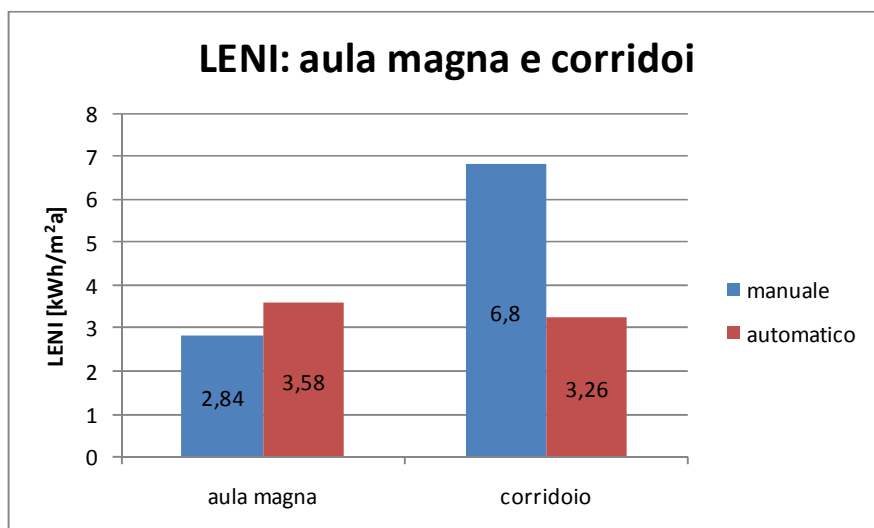


Figura 6.1 Influenza dei sistemi di automazione sui consumi nei corridoi e nell'aula magna

Spicca innanzitutto, e non solo per il colore rosso che lo contraddistingue, l'aumento del LENI, e quindi dei consumi, passando da un sistema manuale di gestione della luce ad uno automatico nel caso dell'aula magna (+26,1%). La conclusione è chiara: non sempre adottare sistemi di automazione conviene. Bisogna infatti considerare l'energia assorbita per il funzionamento dei sistemi di automazione, ammortizzata solo se il locale è utilizzato con continuità. Nel caso dei corridoi infatti, impiegati per 2050 ore all'anno contro le 610 dell'aula magna, i sistemi di automazione tornano ad essere vantaggiosi (-52,1%).

Per l'aula invece gli scenari analizzati sono quattro: 1) situazione attuale integrata con apparecchi supplementari dello stesso tipo per rispettare le normative (configurazione1 nel cap. 4), 2) sostituzione degli attuali apparecchi ad incasso con modelli più efficienti a sospensione (configurazione 17), 3) aggiunta alla configurazione precedente dei sistemi di automazione e 4) aggiunta a quest'ultima delle lightshelf (tabella 6.9 e figura 6.2). Per semplicità si parlerà di progetto di livello 0, 1, 2 e 3 a seconda del livello prestazionale.

aula	0	1	2	3
P lampade [W]	576	273	273	432
P parassita [W]	0	0	15	15
t _D [h]	1800	1800	1800	1800
t _N [h]	200	200	200	200
F _C	1	1	0,9	0,9
F _O	0,75	0,75	0,55	0,55
F _D	0,75	0,75	0,36	0,27
LENI kWh/(a·m ²)	10,45	4,95	3,38	3
Δ LENI [%]	-	-52,6	-31,7	-11,2

Tabella 6.9 Influenza degli apparecchi, dei sistemi di automazione e delle lightshelf sui consumi dell'aula

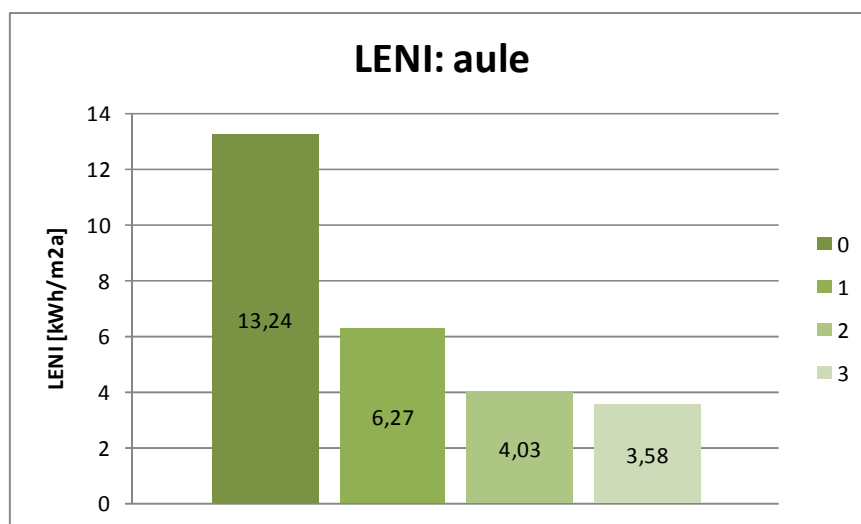


Figura 6.2 Influenza degli apparecchi (1), dei sistemi di automazione (2) e delle lightshelf (3) sui consumi dell'aula

Complessivamente, il risparmio in bolletta che si ottiene installando gli apparecchi a sospensione della Philips, i sistemi di automazione e le lightshelf ammonta ad oltre il 70% (-73%). Il risparmio è ripartito come in figura 6.3:

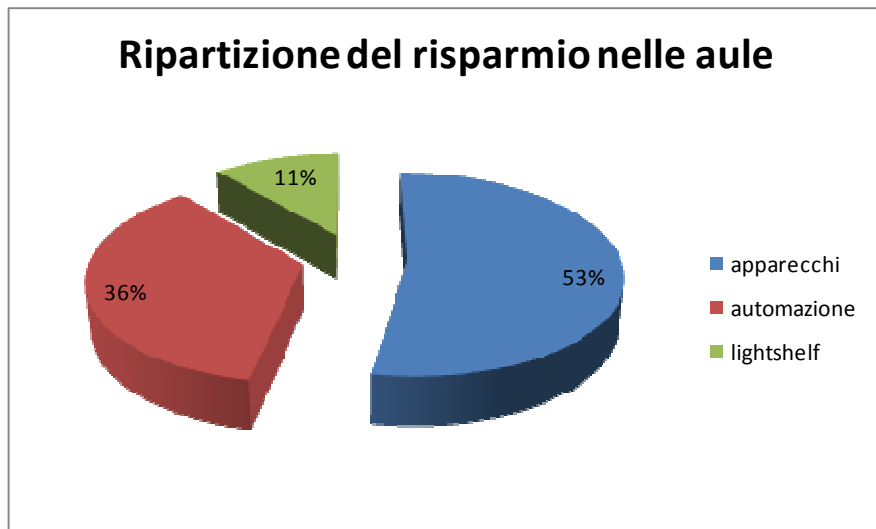


Figura 6.3 Ripartizione del risparmio nelle aule. Il risparmio complessivo ammonta al 73%

Più della metà del risparmio è ottenuto cambiando posizione e tipologia degli apparecchi, 1/3 circa introducendo i sistemi di automazione descritti e per l'11% grazie ad un maggior sfruttamento della luce naturale.

Considerando insieme tutti e tre i locali (ovviamente nell'aula magna il sistema rimane manuale) e il loro numero all'interno della scuola, il risparmio totale scende solo di poco, attestandosi intorno al 65%, visto che sono le aule a coprire la fetta più grossa di consumi (tabelle 6.11 e 6.12 e figura 6.4). In ogni caso i LENI risultano molto inferiori ai limiti consentiti (cfr. tabella 2.5, quality class 1).

Nelle tabelle successive si fa la distinzione tra progetto base e avanzato, così definiti (tabella 6.10):

locale	progetto base	progetto avanzato
aula magna	manuale	manuale
corridoio	manuale	auto
aula	apparecchi Atena Lux	apparecchi Philips lightshelf

Tabella 6.10 Caratteristiche dei progetti base e avanzato

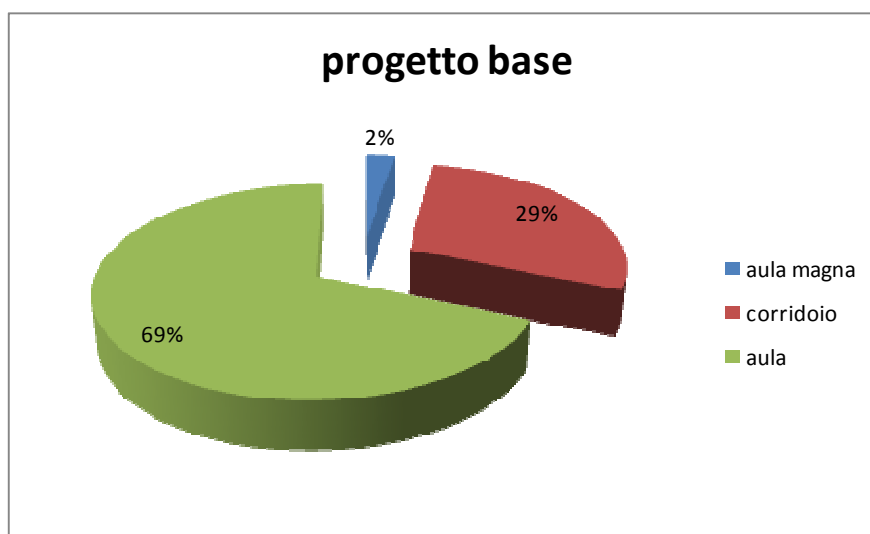
Il progetto base corrisponde alla situazione attuale, ad eccezione del numero di apparecchi delle aule che sono 8 invece di 6, per rispettare le normative.

base	LENI [kWh/m ² a]	area [m ²]	locali	area tot [m ²]	consumi [kWh/a]
aula magna	2,84	130,84	1	130,84	372
corridoio	6,8	157,89	4	631,56	4295
aula (didattiche)	13,24	64,22	12	770,64	10203
tot					14869

Tabella 6.11 Consumi totali dei tre locali nella configurazione base

avanzato	LENI [kWh/m ² a]	area [m ²]	locali	area tot [m ²]	consumi [kWh/a]
aula magna	2,84	130,84	1	130,84	372
corridoio	3,26	157,89	4	631,56	2059
aula (didattiche)	3,58	64,22	12	770,64	2759
tot					5189
risparmio					diff
					9680

Tabella 6.12 Consumi totali dei tre locali nella configurazione avanzata



a)

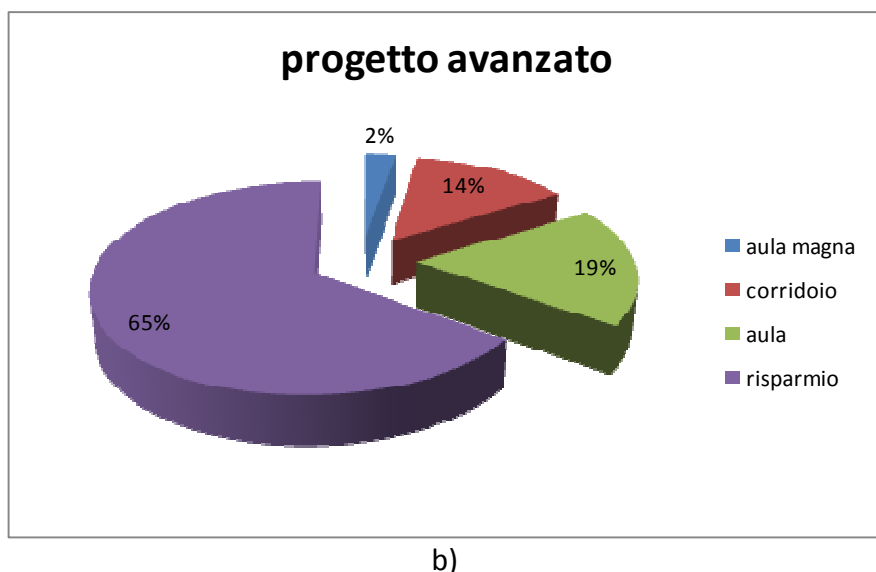


Figura 6.4 Ripartizione dei consumi per la configurazione a) base e b) avanzata

6.2. Stima del payback time

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 delle lightshelf e dei sistemi di automazione in modo da valutare approssimativamente il payback time, che corrisponde al numero di anni necessari ad ammortizzare l'investimento. Per l'automazione due sono i sensori da installare: di presenza e di illuminamento. Mentre 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, nelle classi 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 la potenza alle necessità. Ovviamente solo le aule sono fornite di lightshelf. L'aula magna, come è stato precedentemente dimostrato, consuma meno con il sistema manuale e si lascia quindi inalterata. I costi di investimento per i vari prodotti sono riportati nelle tabelle 6.13 e 6.14:

	presenza 1 ²	presenza 2 ³	illuminamento ⁴	lightshef [16]
costo unitario [€]	70	115	26	73
unità per aula	-	1	1	4
totale unità	-	12	12	48
costo totale [€]	-	1380	312	3504

Tabella 6.13 Investimento per le aule

	presenza 1	presenza 2	illuminamento	lightshef
costo unitario [€]	70	115	26	73
unità per corridoio	6	-	-	-
totale unità	24	-	-	-
costo totale [€]	1680	-	-	-

Tabella 6.14 Investimento per i corridoi

Si fanno le seguenti ipotesi:

- il costo di investimento per automazione e lightshef si basa sui prezzi di listino. Si ipotizza che il costo di installazione sia compensato da uno sconto applicato ai prodotti;
- 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%.

Una volta noto il costo di investimento si calcola il payback time secondo la formula

$$CI[\text{€}] - \sum_{n=1}^{PB} 0,14 \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cdot (1,02)^{n-1} \cdot E_{risparmiata} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \right] = 0 \quad (5.1)$$

² Theben Eco IR 180 (range di rilevazione 8m)

³ Theben Eco IR 360 (range di rilevazione 11m)

⁴ Philips Luxsense

dove CI è il costo di investimento, 0,14 è un prezzo di partenza dell'energia al kWh, mentre il dato sull'energia risparmiata deriva da considerazioni sul LENI. L'unica incognita è quindi PB.

Per automazione e lightshelf i ritorni di investimento risultano, rispettivamente, di 7 e 46 anni. Ad un livello intermedio si inserisce il PB relativo alla sostituzione degli apparecchi (diverso da quello calcolato nel capitolo 4 in modo semplificato) pari a 11 anni (figura 6.5). Si noti l'andamento sempre più ripido delle curve (osservabile soprattutto nel caso delle lightshelf) dovuto all'aumento del costo dell'energia e, di conseguenza, del risparmio.

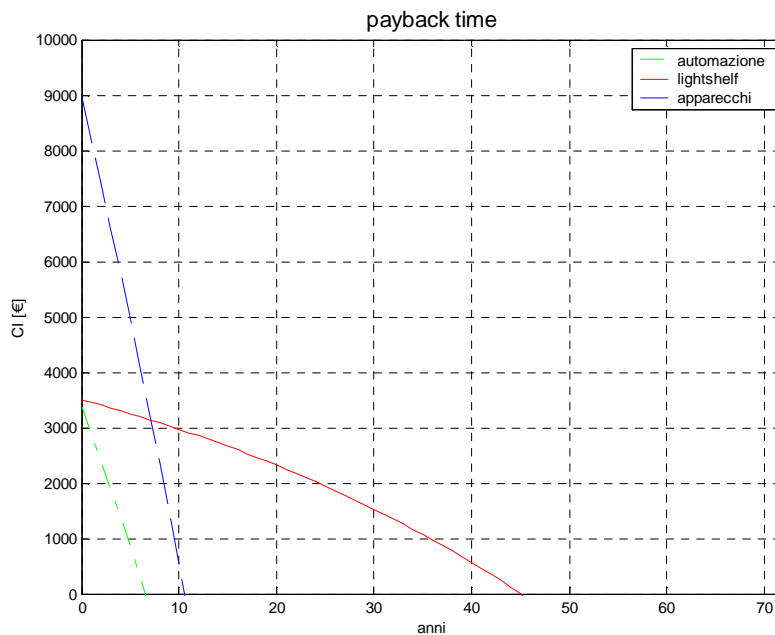


Figura 6.5 Costo di investimento e payback time dei tre interventi discussi

6.3. Conclusioni

Il NO al nucleare sancito a larga maggioranza dal referendum del giugno 2011 ripropone con urgenza i concetti, già da tempo dibattuti, di risparmio ed efficienza energetica.

Molti, ad esempio, i progressi possibili in campo illuminotecnico con interventi sull'illuminazione artificiale e con lo sfruttamento più intensivo della luce naturale.

In questo lavoro si è preso a modello l'edificio scolastico certamente più prestigioso della mia città: la scuola elementare Aristide Gabelli.

Tre i locali considerati: corridoio, aula magna e ovviamente l'aula. Tenendo conto dell'estensione di ciascun locale e del loro numero all'interno della scuola, si è coperto circa il 70% della superficie del fabbricato.

Per minimizzare i consumi si sono proposti tre interventi: 1) sostituzione degli attuali apparecchi di illuminazione con modelli più performanti, 2) adozione di sistemi di automazione in grado di ridurre gli sprechi attivando le luci solo in caso di bisogno (sensori di presenza e di illuminamento) e di mantenere costante il flusso luminoso degli apparecchi nell'arco della vita utile 3) sfruttamento più razionale della luce naturale attraverso particolari sistemi detti di daylighting. Tra i tanti esistenti ci si è focalizzati sulle lightshelf: la robustezza e il basso costo ne fanno infatti un valido candidato per le scuole. Le lightshelf sono vere e proprie mensole di materiale altamente riflettente e speculare (ad es. alluminio) con la funzione di aumentare la quantità di luce entrante nel locale e di ridirigerla soprattutto in fondo, nelle zone lontane dalle finestre, dove ce n'è più bisogno, garantendo nel contempo protezione contro l'abbagliamento. Un problema fondamentale delle aule è infatti la distribuzione disuniforme della luce dovuta alle aperture laterali.

Punto di partenza del progetto è stata l'analisi della situazione attuale per verificare il rispetto delle normative in campo illuminotecnico. Le principali normative di riferimento in questa fase sono state la UNI EN 12464-1 relativa ai posti di lavoro e la UNI EN 10840, specifica per gli edifici scolastici. A queste si è aggiunta successivamente la UNI EN 15193, nella quale viene introdotto il concetto di LENI, parametro espresso in $\left[\frac{kWh}{m^2_{anno}}\right]$ utile per la valutazione energetica dell'impianto di illuminazione e per quantificare l'effetto delle modifiche apportate ai locali.

I principali strumenti di lavoro sono stati due programmi di progettazione illuminotecnica molto diffusi: Relux, e soprattutto Dialux, con il quale si è svolta gran parte delle simulazioni. Proprio per questo Dialux è stato in via

preliminare sottoposto a validazione attraverso il confronto con misurazioni dirette e con prove sperimentali presenti in letteratura.

Di Relux non si è utilizzata l'applicazione base, che come Dialux implementa il metodo della Radiosity, ma Radiance, un programma basato sul metodo del RayTracing che è stato importato all'interno del pacchetto. Il RayTracing, a differenza dell'altro metodo, simula correttamente le interreflessioni della luce diretta su superfici altamente speculari ed è quindi indispensabile per lo studio delle lightshelf in condizioni di cielo sereno.

Per una modellazione più precisa dei locali si sono svolte misurazioni in loco delle dimensioni di volumi e oggetti e, con l'ausilio del luxmetro, della trasmittanza dei vetri e dei coefficienti di riflessione delle principali superfici.

Corridoi e aula magna non necessitano di particolari interventi perché sia l'illuminazione artificiale sia quella naturale soddisfano i requisiti. Per questi locali ci si è quindi limitati a proporre, come unica modifica, l'introduzione dei sistemi di automazione. L'investimento non si è rivelato sempre conveniente: nel caso dei corridoi si è ottenuto effettivamente un notevole risparmio energetico (-52,1%), ma nell'aula magna i consumi sono addirittura aumentati (+26,1%). Si può concludere che questi dispositivi non sono a priori vantaggiosi: bisogna prima verificare che il locale sia frequentato abbastanza da ammortizzare l'energia parassita richiesta per farli funzionare. Il numero di ore all'anno di utilizzo dei corridoi è infatti più di tre volte quello dell'aula magna (2050 contro 610).

Le aule, invece, hanno mostrato diverse carenze: l'illuminamento medio sul piano di lavoro, ad esempio, non raggiunge attualmente i 300 lux previsti dalla normativa; l'esposizione alla luce naturale, nonostante le ampie vetrate e l'esposizione a sud, è insufficiente sia in termini medi sia di distribuzione, principalmente per effetto dell'imbotte molto pronunciata. Questo è quanto emerso dall'analisi di sensibilità svolta sui singoli componenti del modello (arredamento, scena esterna...) che attribuisce all'imbotte una riduzione del fattore medio di luce diurna di quasi il 30%. Un altro 10% di riduzione è causato invece dagli alberi. Oltre ai sistemi di automazione si è proposto in questo caso di integrare le finestre con le lightshelf e di sostituire gli attuali apparecchi ad incasso con prodotti a sospensione che, installati ad un'altezza inferiore (2,65 m contro i 4,165 m attuali), garantiscono gli stessi livelli di illuminamento riducendo di molto i consumi.

Le lightshelf sono state progettate in modo da massimizzare le prestazioni nel rispetto di alcuni vincoli estetici e strutturali. Il risultato è un sistema composto da una parte esterna davanti ad ogni finestra ed una interna unica e lunga quanto la stanza. La lightshelf esterna è risultata quella che effettivamente porta benefici all'illuminamento mentre quella interna è deleteria ma

indispensabile per schermare la zona dei banchi dalla radiazione diretta. Le variabili ottimizzate sono state: inclinazione, lunghezza e altezza. Nel complesso i tre provvedimenti hanno consentito di abbassare i consumi nelle aule del 73%: per il 53% il risparmio è dovuto ai nuovi apparecchi, per il 36% ai sistemi di automazione e per l'11% alle lightshelf, che si sono rivelate, nella configurazione interna più esterna, il sistema migliore tra quelli esaminati. Quest'ultimo valore è emerso facendo la media pesata tra i risultati ottenuti in condizioni di overcast sky e di clear sky considerando le statistiche climatiche della zona. Mentre in condizioni di cielo coperto le lightshelf sostanzialmente non alterano i consumi, nelle giornate serene il risparmio è circa del 17%. Considerando anche gli altri due locali il risparmio scende solo di poco, attestandosi intorno al 65%.

Per giudicare la convenienza di un investimento bisogna però verificare che l'esborso iniziale sia commisurato al risparmio che si riesce ad ottenere. La stima dei payback time ha stabilito che l'intervento più a breve termine è quello di automazione dell'impianto luci, che si ripaga in soli 7 anni. Qualche anno in più bisogna aspettare per gli apparecchi (11 anni) visto l'elevato esborso iniziale, mentre si è rivelata poco redditizia la lightshelf: l'investimento non è eccessivo, è infatti paragonabile a quello per i sistemi di automazione, ma il risparmio non è tale da consentire un rientro dell'investimento in tempi accettabili. Il risparmio energetico non è tuttavia l'unica ragione per dotarsi delle lightshelf: bisogna infatti considerare anche l'effetto positivo sulla distribuzione della luce e quindi sul comfort visivo degli occupanti, risultato, quest'ultimo, pienamente raggiunto.

Bibliografia

- [1] S. Agosti, G. Cecere, M. Claretti, *Giorni di scuola – La scuola Elementare di Pordenone nella storia della Città*, ProPordenone, Pordenone, 2006.
- [2] *Relazione della giunta municipale di Pordenone*, 1921, pag. 3.
- [3] A. Mior, *Relazione del Progetto del Fabbriato scolastico urbano*, 1915.
- [4] ASCP, *Relazione al ricostituito Consiglio comunale di Pordenone sull'amministrazione del comune*, tenuta dal R. commissario avv. Odoardo Cavicchi, 1919.
- [5] L. Pagliano, *Illuminotecnica*, Dispensa del corso di Fisica dell'Edificio 2007-2008, Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano.
- [6] G. Cellai, *Fondamenti di illuminotecnica*, Dispensa del corso di Fisica Tecnica Ambientale, Corso di Laurea in Scienze dell'Architettura, Università di Firenze.
- [7] L. Fellin, G. Forcolini, P. Palladino, *Manuale di illuminotecnica*, realizzato dall'AIDI (Associazione Italiana Di Illuminazione), Tecniche Nuove, Milano, 1999.
- [8] M. Zinzi, *Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermati*, Report RSE/2009/9, ENEA, pag. 10.
- [9] J.-L. Scartezini, *Principi d'Illuminotecnica*, Programma d'impulso RAVEL, Università di Ginevra, pag. 16.
- [10] AA.VV., *Manuale illustrato per l'impianto illuminotecnico-Gli ambienti, i requisiti, gli apparecchi*, Tecniche Nuove, Milano, 2009.
- [11] L. Di Fraia, *Illuminazione naturale e sua importanza per la qualità della vita oggi*, Seminario di aggiornamento promosso dall'AIDI e dall'Università Federico II di Napoli, Napoli, 19 maggio 2008.

- [12] F. Anselmo, *Simulare la luce (introduzione all'uso di Radiance)*, Università di Padova.
- [13] N. Baker, A. Fanchiotti, K. Steemers, *Daylighting in Architecture – A European Reference Book*, James & James, 2001, London.
- [14] M. Fontoynt, *Daylight Performance of Buildings*, chapter Educational Buildings, Stylus Pub Llc, 1999.
- [15] 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, pag. 39
- [16] D.R. Wulfinhoff, *Energy Efficiency Manual*, Chapter 8 “Control and use of sunlight”, 1999.
- [17] M. Boubekri, *Daylighting, Architecture and Health – Building, Design Strategies*, Elsevier, Burlington (USA), 2008
- [18] F.I. Montamar, *Efficacy of Light Shelves: Passive, Dynamic, and Automatic Devices Related to light and Thermal Behaviour*, Ashrae, 2008
- [19] L.O. Betran, E.S. Lee, K.M. Papamichael, S.E. Selkowitz, *The Design and Evaluation of Three Advanced Daylighting Systems: Light Shelves, Light Pipes and Skylights*, ricerca presentata alla manifestazione Solar '94, Golden Opportunities for Solar Prosperity, San Jose (USA), 1994
- [20] M.A. Naseer, *A Reference Material on Daylighting in Architecture*, NITC, Architecture Department, 2008
- [21] E. Rumi, S. D'Onofrio, *4° C.A.S.E Quarto Oggiaro, Complesso abitativo sostenibile ed economico*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, 2010
- [22] B. Cutler, Y. Sheng, S. Martin, D. Glaser, M. Andersen, *Interactive Selection of Optimal Fenestration Materials for Schematic Architectural Daylighting Design*, Automation in Construction 17 (2008), pp. 809-823

- [23] AA.VV., *New lighting Technologies: Low energy and visual comfort with case studies*, presentazione per la manifestazione NextBuilding, Verona, 2009
- [24] S. Secchi, *Fondamenti di illuminotecnica artificiale e naturale*, Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design, Università di FI
- [25] N. Ruck, *Daylight in Buildings: A Source book on Daylighting Systems and Components*, ECBS, 2000
- [26] F. Altamura, M. Graffeo, *Valutazione del comfort luminoso in edifici esistenti: analisi di metodologie e misure in situ*, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano
- [27] W. Wu, E. Ng, *A review of the development of daylighting in schools*, *Lighting Research and Technology* 35,2 (2003) pp. 111-125
- [28] E. Tetri, *Daylight linked dimming: effect on fluorescent lamp performance*, *Lighting research and technology* 34,1 (2002) pp. 3-10
- [29] D.W. Tong, L.K. Sing, T. Chung, C. Leung, *Potential energy saving for a side-lit room using daylight-linked fluorescent lamp installations*, *Lighting research and technology* 34,2 (2002) pp.121-133
- [30] M.C. Dubois, *Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators*, *Lighting research and technology* 35,1 (2003) pp. 61-76
- [31] A. Nassar, M.M. El-Ganainy, F. Muktader, S. El-Kareem, M. Haridi, *Cylindrical illuminance and its importance in integrating daylight with artificial light*, *Lighting research and technology* 35,3 (2003) pp. 217-223
- [35] M.B. Ullah, J.T. Kumiawan, L.K. Poh, T.K. Wai, P.R. Tregenza, *Attenuation of diffuse daylight due to dust deposition on glazing in a tropical urban environment* *Lighting research and technology* 35,1 (2003) pp.19-29
- [36] D. Li, C. Lau, J. Lam, *Predicting daylight illuminance by computer simulation techniques*, *Lighting research and technology* 36,2 (2004) pp. 113-129

- [37] A. Nabil, J. Mardaljevic, *Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*, *Lighting research and technology* 37,1 (2005) pp. 41-59
- [38] D. Li, G. Cheung, *Average daylight factor for the 15 CIE standards skies*, *Lighting research and technology* 38,2 (2006) pp. 137-152
- [39] M. Al Marwaei, D. Carter, *A field study of tubular daylight guidance installations*, *Lighting research and technology* 38,3 (2006) pp. 241-258
- [40] E. Ng, A. Gadi, F. Wong, J. Mu, A. Gadi, M. Lee, *Predicting daylight availability dynamically based on forecasts of a weather observatory*, *Lighting research and technology* 39,1 (2007) pp. 69-80
- [41] D. Carter, M. Marwaei, *User attitudes toward tubular daylight guidance systems*, *Lighting research and technology* 41 (2009) pp. 71-88
- [42] J. Mardaljevic, L. Hescong, E. Lee, *Daylight metrics and energy savings*, *Lighting research and technology* 41 (2009) pp. 261-283
- [43] C. Reinhart, V. LoVerso, *A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight*, *Lighting research and technology* 42 (2010) pp. 7-31
- [44] A. Robertson, R. Hedges, N. Rideout, *Optimisation and design of ducted daylight systems*, *Lighting research and technology* 42 (2010) pp.161-181

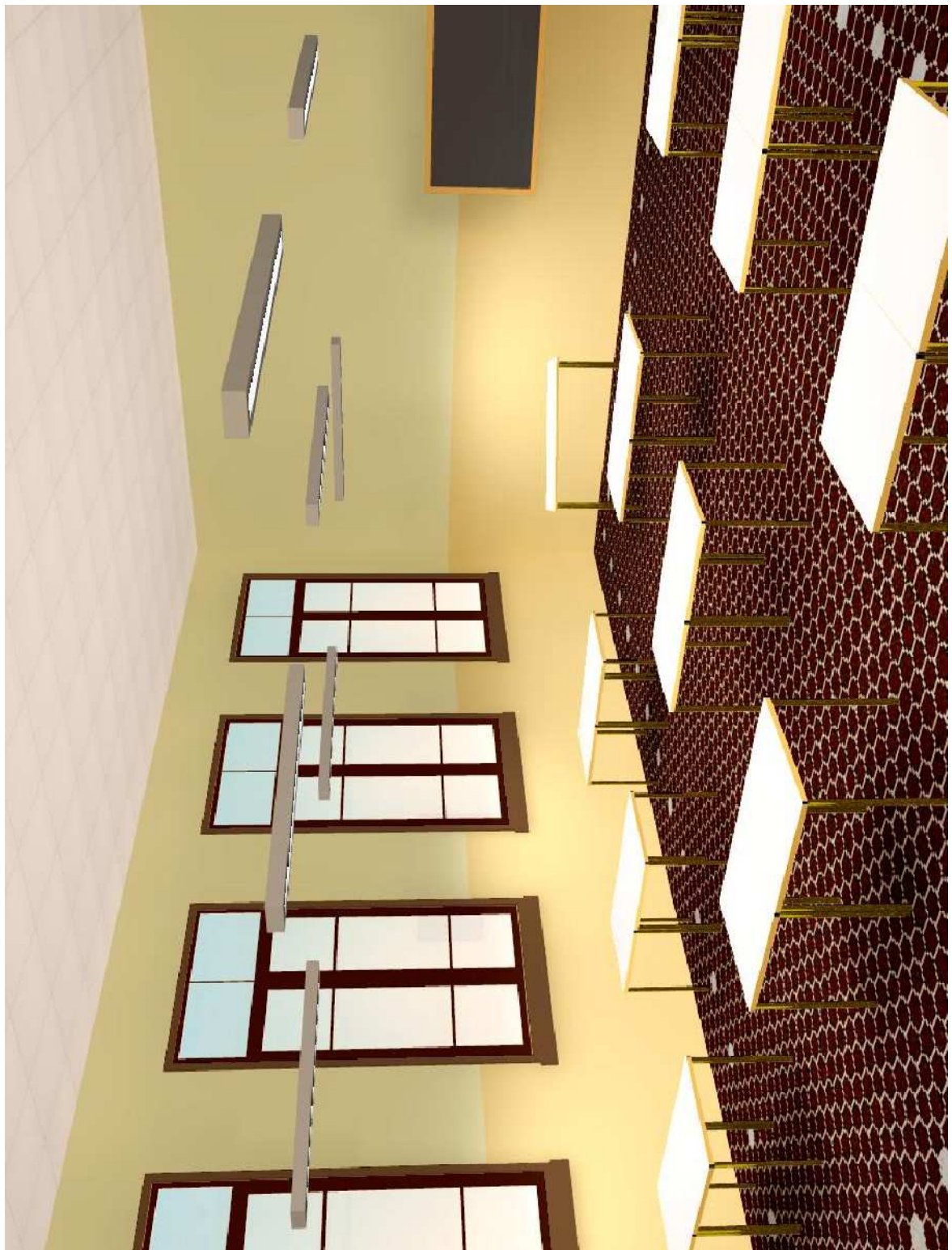
Sitografia

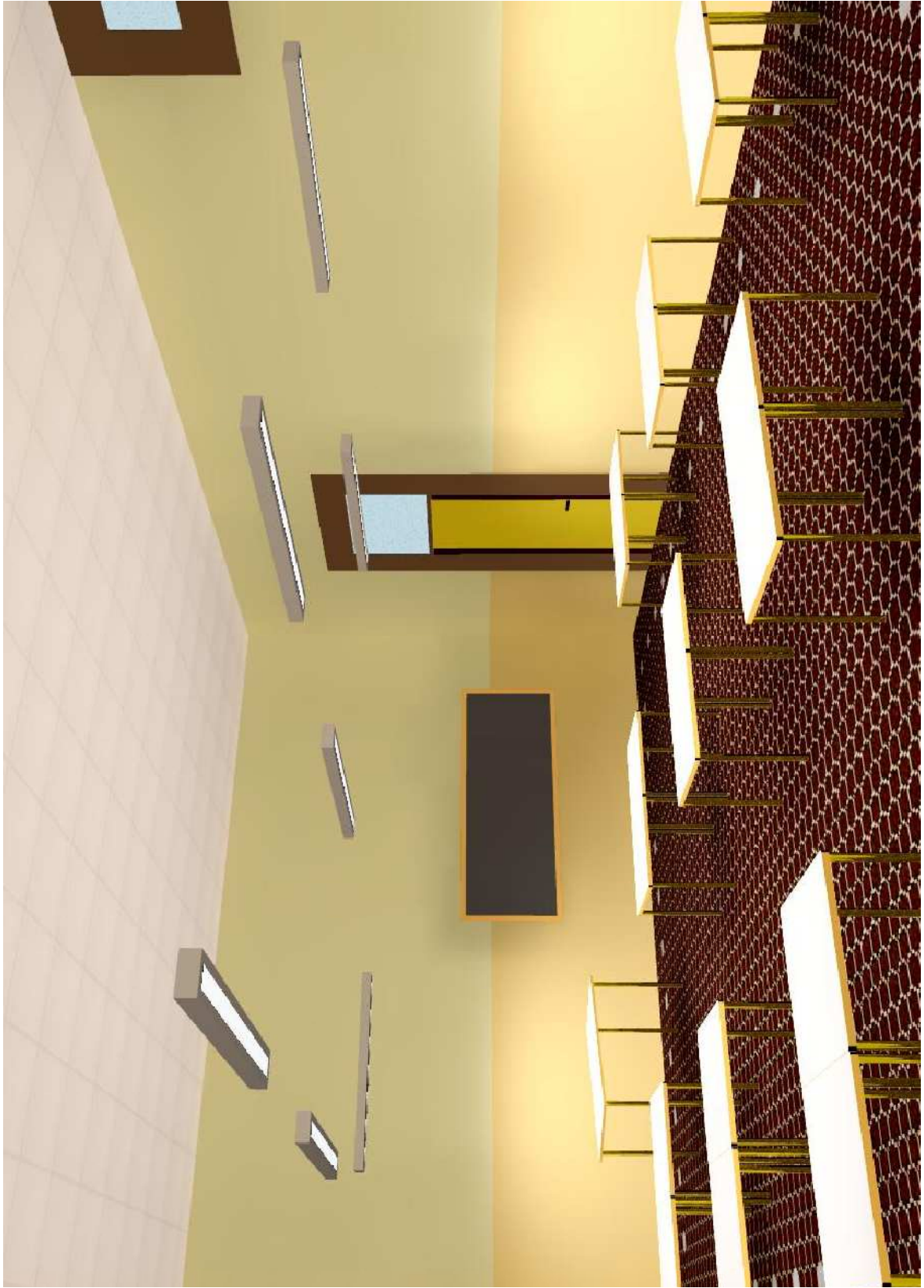
- [S1] www.luxemozione.com/tag/illuminamento
- [S2] www.philips.com/lightcontrols
- [S3] www.relux.biz
- [S4] www.dial.de
- [S5] www.atenalux.com
- [S6] www.3f-filippi.it
- [S7] www.martinilight.com
- [S8] www.ics.ele.tue.nl
- [S9] www.sapagroup.com
- [S10] www.lighting.philips.it
- [S11] www.lightlouver.com
- [S12] www.meteomin.it/Statistiche/Desc_Prec_annue_Raffronto.asp

Normative di riferimento

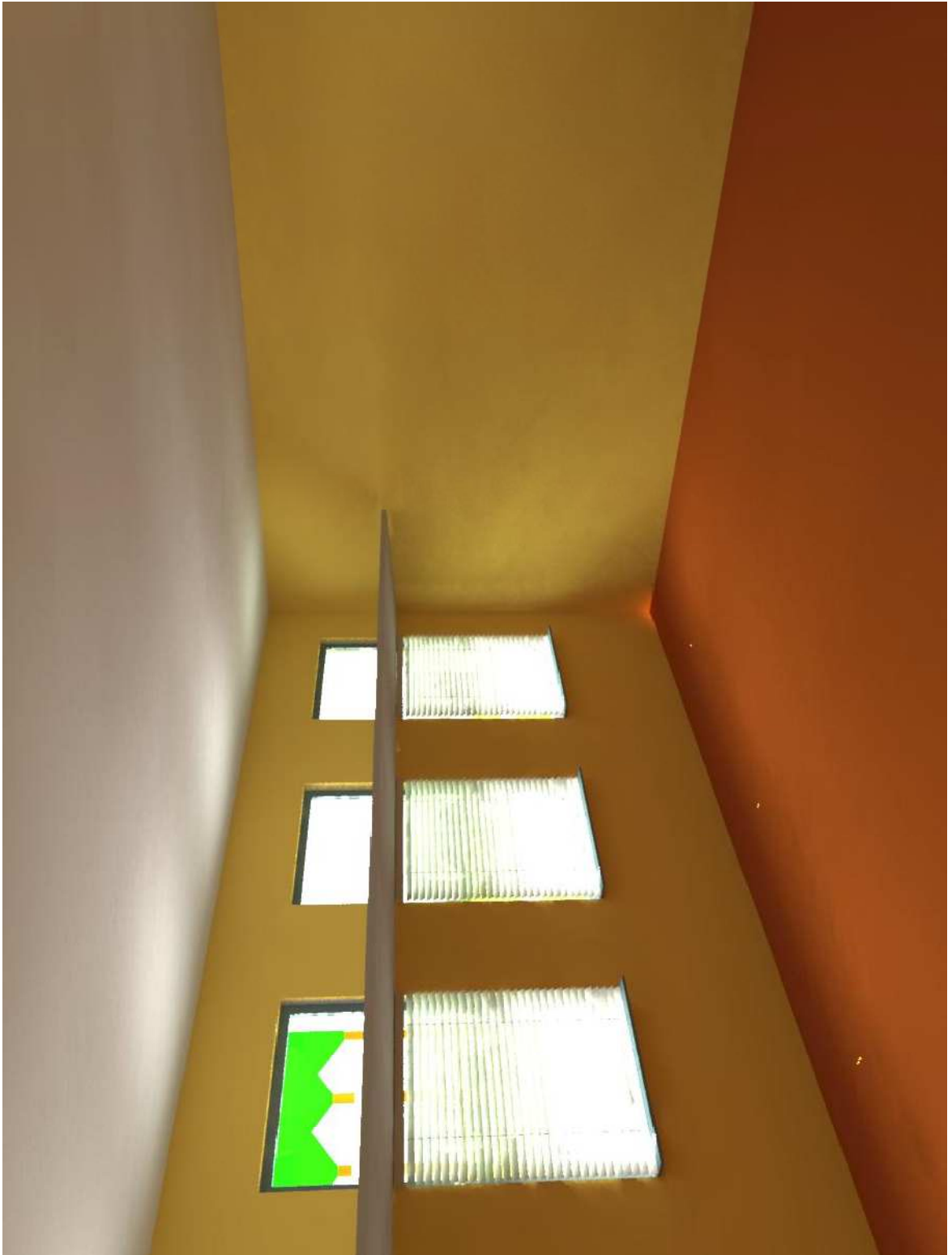
UNI EN 12665	Luce e illuminazione. Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici.
UNI EN 12464-1	Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni.
UNI 11165	Luce e illuminazione. Illuminazione di interni. Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR.
UNI EN 15193	Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione.
UNI EN 15232	Prestazione energetica degli edifici. Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici.
UNI EN 1838	Applicazione dell'illuminotecnica. Illuminazione di emergenza.
UNI EN 15251	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.

Appendice A: Rendering con luce artificiale (Dialux)





Appendice B: Rendering con luce naturale (Relux)





Appendice C: Prestazioni delle lightlouver in facciate con muri sottili

Le lightlouver, applicate alla facciata delle aule, si sono rivelate poco efficienti (cfr. figure 5.22 e 5.23). Una delle ragioni principali è sicuramente l'elevato spessore dei muri (36 cm) che, a seconda della posizione del sole, scherma una parte più o meno estesa del sistema dalla radiazione diretta, impedendone il corretto funzionamento. Per quantificare questa azione di disturbo dell'imbotte sulle lightlouver e anche per valutare le reali potenzialità del sistema si ipotizza che lo spessore dei muri si riduca considerevolmente e al limite scompaia, così da lasciare il sistema completamente esposto alla radiazione solare (figura C.1).

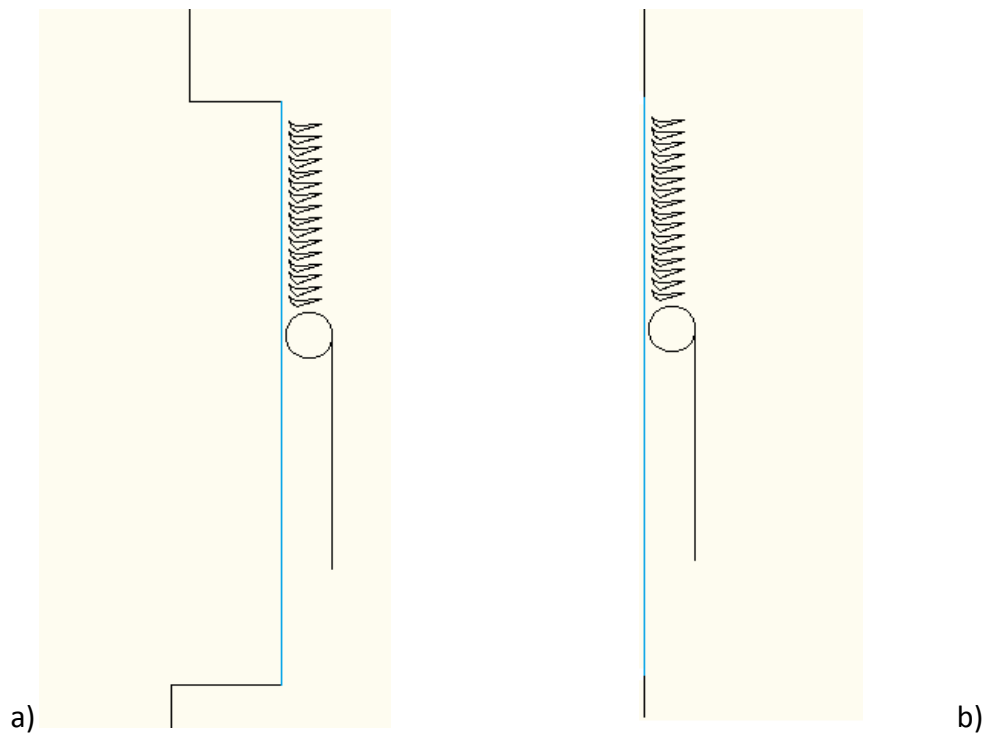
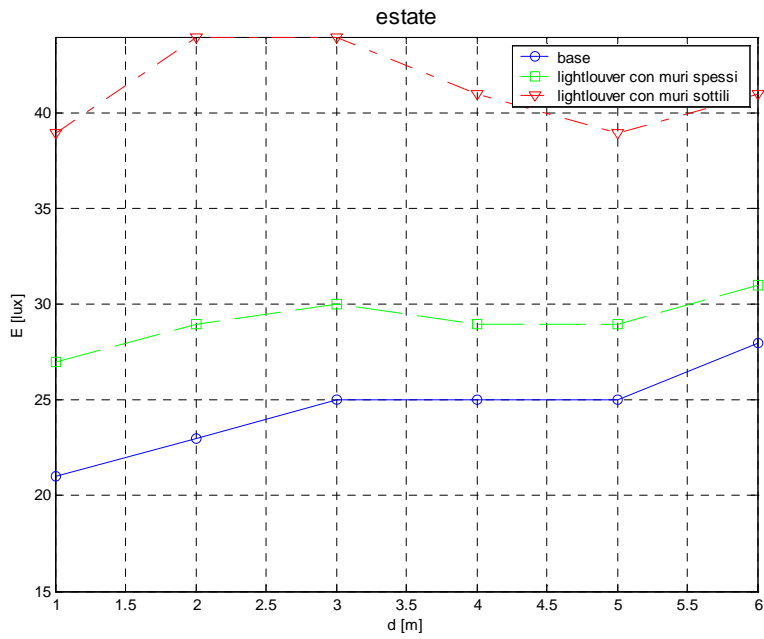
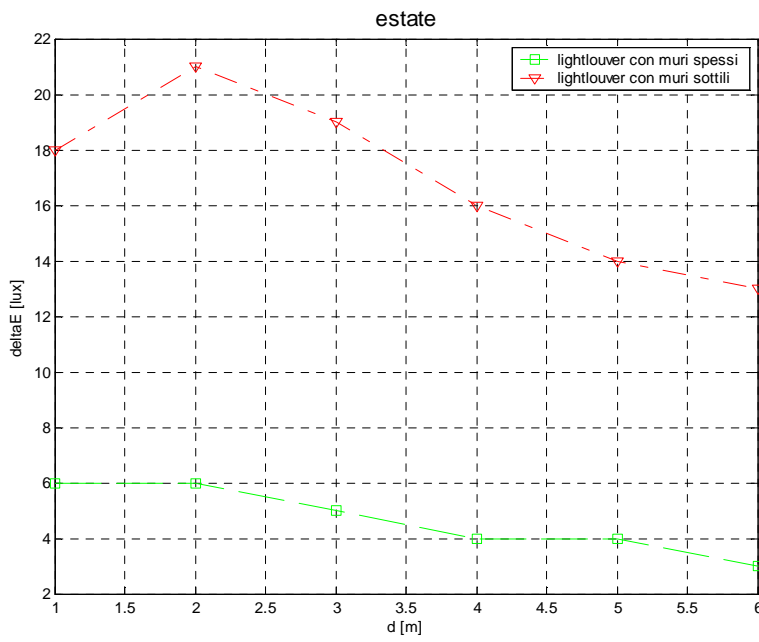


Figura C.1 Lightlouver applicata a parete spessa a) e sottile b)

Per concentrarsi esclusivamente sugli effetti della lightlouver si valuta l'illuminamento E a 1,8 m dal pavimento, e non più a 0,6 m (figure C.2, C.3 e C.4).

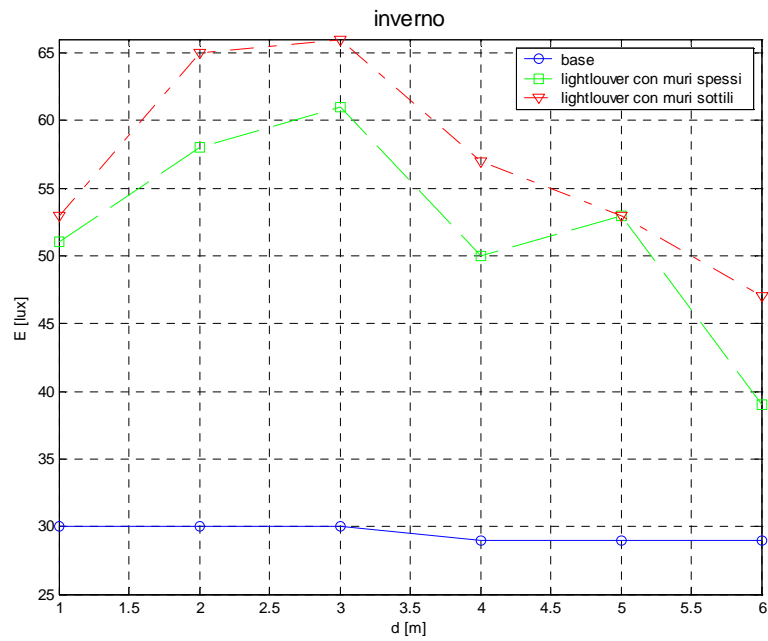


a)

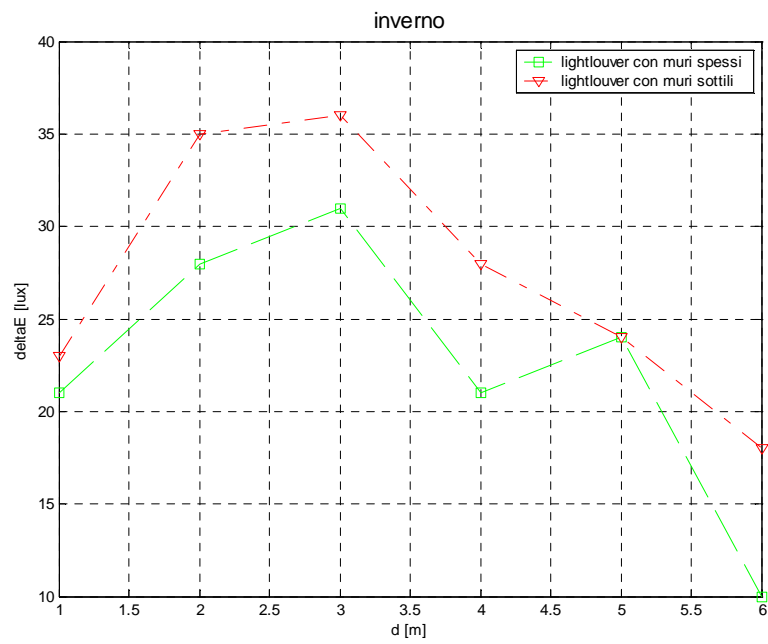


b)

Figura C.2 Prestazioni delle lightlouver in estate: valori assoluti a) e variazione rispetto al caso base b)

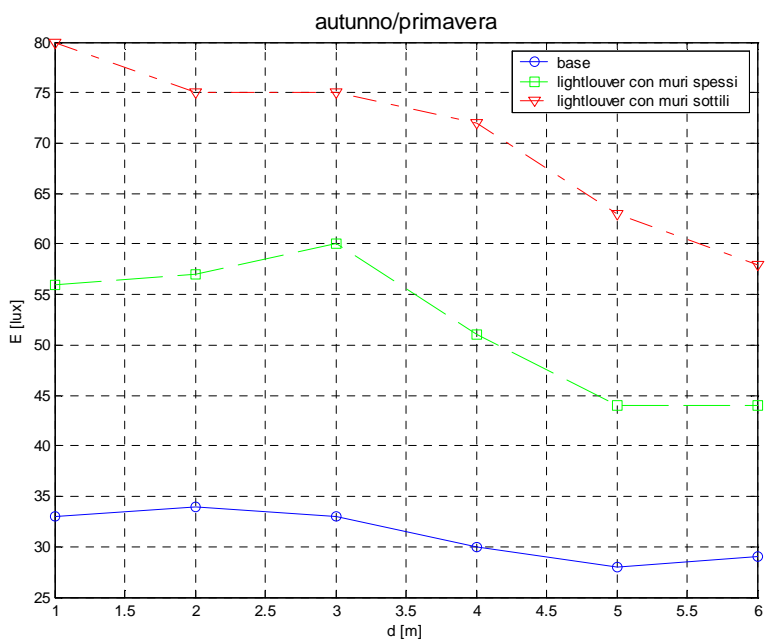


a)

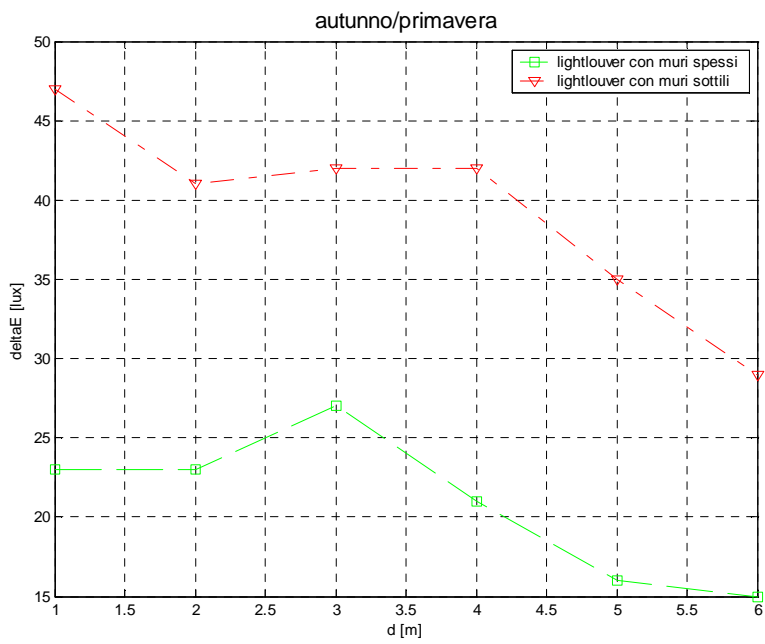


b)

Figura C.3 Prestazioni delle lightlouver in inverno: valori assoluti a) e variazione rispetto al caso base b)



a)



b)

Figura C.4 Prestazioni delle lightlouver all'equinozio: valori assoluti a) e variazione rispetto al caso base b)

In termini percentuali il miglioramento più rilevante si registra in estate (figura C.2). Per la precisione il ΔE aumenta di circa tre volte rispetto al caso con imbotte. In inverno, invece, la variazione è molto più contenuta. Questo perché in estate l'inclinazione della radiazione diretta è elevata e l'imbotte, se presente, scherma parte della lightlouver rendendola inefficace, mentre in inverno il sole è più basso e la lightlouver offre le stesse prestazioni indipendentemente dallo spessore della parete.

All'equinozio l'aumento medio rispetto alla soluzione precedente è di circa 20 lux, in linea con i risultati ottenuti in estate. In inverno, ovviamente, l'aumento è meno marcato (<10 lux).

In tutti i casi la curva di distribuzione rimane pressoché uguale, a conferma del fatto che, in funzione dello spessore del muro e quindi della quantità di luce incidente, variano i livelli di illuminamento ma non le caratteristiche di riflessione del sistema.

Valutando infine l'aumento complessivo di E rispetto al caso base e confrontandolo con quello ottenuto dalle lightshelf si può concludere che il sistema più efficiente rimane comunque quest'ultimo: solo in inverno infatti i due sistemi si equivalgono. Anche intuitivamente appare difficile che un sistema basato su molteplici riflessioni come le lightlouver dia risultati migliori delle lightshelf che invece, a differenza del primo, lasciano penetrare la luce senza schermarla, se non agli occhi degli occupanti. Il vantaggio principale delle lightlouver risulta quindi essere la compattezza, visto che non c'è necessità, per schermare dalla luce, di una parte ingombrante come la lightshelf interna.