



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi critica per l'individuazione di metodi semplificati di calcolo del LENI

M. Zinzi, A. Mangione, B. Mattoni, F. Bisegna



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DIAEE - Area Fisica Tecnica

ANALISI CRITICA PER L'INDIVIDUAZIONE DI METODI SEMPLIFICATI DI CALCOLO DEL LENI

M. Zinzi (ENEA)

F. Bisegna, B. Mattoni (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica DIAEE, Facoltà di Ingegneria, Sapienza Università di Roma)

A. Mangione (Architetto)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione d'interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Implementazione di una metodologia per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi critica per l'individuazione di metodi alternativi per il calcolo del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale in funzione della disponibilità di illuminazione naturale"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico SAPIENZA Università di Roma: Fabio Bisegna

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 OBIETTIVI	6
3 DESCRIZIONE DEL METODO PROPOSTO DALLA NORMATIVA VIGENTE.....	6
3.1 ANALISI CRITICA DEL METODO PROPOSTO DALLA NORMA.....	7
4 DESCRIZIONE DEL METODO ALTERNATIVO	9
5 METODOLOGIA	11
6 DESCRIZIONE DEI CASI STUDIO	11
7 APPLICAZIONE DEL METODO ALTERNATIVO: CALCOLO DEL <i>FLD</i> E DEL <i>tsat</i>	15
8 RISULTATI: CONFRONTO TRA I VALORI DI <i>LENI</i> ANNUALI.....	19
8.1 AULE	19
8.1.1 <i>Analisi 1: Comparazione tra i due LENI al variare della latitudine</i>	22
8.1.2 <i>Analisi 2: Comparazione tra i due LENI al variare della tipologia della finestra</i>	23
8.1.3 <i>Analisi 3: Comparazione tra i due LENI al variare dei rapporti aeroilluminanti</i>	25
8.2 UFFICI.....	27
8.2.1 <i>Analisi 1: Comparazione tra i due LENI al variare della latitudine</i>	29
8.2.2 <i>Analisi 2 : Comparazione tra i due LENI al variare della tipologia della finestra</i>	30
8.2.3 <i>Analisi 3: Comparazione tra i due LENI al variare dei rapporti aeroilluminanti</i>	30
9 <i>LENI</i> MENSILE	31
10 VALORI DEL <i>LENI</i> CON DIVERSE TIPOLOGIE DI SORGENTI LUMINOSE	34
11 CONFRONTO TRA I VARI METODI DI CALCOLO DEL <i>LENI</i>	36
11.1 AULE	38
11.2 UFFICI.....	39
12 CRITICITÀ DEL METODO ALTERNATIVO	41
12.1 DATI CLIMATICI DI RIFERIMENTO.....	41
12.2 DEFINIZIONE DELL'APPORTO DI LUCE DIURNA NEGLI AMBIENTI PER IL CALCOLO DEL <i>tsat</i>	44
13 CONCLUSIONI.....	44
14 BIBLIOGRAFIA.....	46
15 SITOGRAFIA	47
16 ABBREVIAZIONI	47

Sommario

L'analisi dei dati sui consumi di energia elettrica in Italia evidenzia quanto sia consistente l'incidenza dell'illuminazione artificiale nel settore terziario. La norma UNI EN 15193, che definisce il metodo di calcolo del fabbisogno energetico dovuto all'illuminazione, è attualmente in fase di revisione in quanto numerosi studi hanno evidenziato la sovrastima dei risultati ottenuti con il procedimento in essa descritto. Obiettivo di questo lavoro è quello di confrontare il metodo di calcolo del *LENI* da norma con un metodo alternativo, già definito in un precedente report di ENEA, attraverso la simulazione su più tipologie di ambienti determinati sulla base di un set di parametri variabili, in modo tale da identificare le relazioni tra i parametri in gioco e i valori del *LENI*, approfondire le criticità del metodo da norma, evidenziare quelle del metodo alternativo e suggerire soluzioni migliorative. Le due tipologie di ambienti scelti sono uffici e ed aule scolastiche, mentre i parametri di variazione applicati ai casi studio sono la latitudine a cui si trova l'ambiente analizzato, i rapporti aeroilluminanti (*RAI*), la geometria dei locali e delle finestre, la tipologia di sorgente luminosa installata. I risultati del confronto confermano che il *LENI* ottenuto con il metodo da norma è superiore a quello ottenuto con il metodo alternativo, e che questi registra le variazioni dei parametri geometrici e geografici considerati in modo più significativo.

Summary

According to recent reports, in Italy a large part of the electricity consumptions in the tertiary sector is due to the artificial lighting. The European Standard UNI EN 15193, which specifies the calculation methodology for the evaluation of the amount of energy used for indoor lighting inside the building and provides a numeric indicator for lighting energy requirements used for certification purposes, is currently under review. In fact many studies pointed out that the calculation method introduced in the UNI EN 15193 lead to a significant overestimation of the lighting energy requirements.

The purpose of this report is to compare the European Standard method for the calculation of the Lighting Energy Numeric Indicator (*LENI*) with the alternative method proposed in the Report ENEA RdS/PAR2013/120 by applying these two methodologies to different case studies. The case studies are defined on the basis of the variation of a set of parameters. The final aim is to: identify the relationships between the variation of the involved parameters and the *LENI* results; to deepen the knowledge of the critical issues of the Standard method; to highlight the critical aspects of the alternative methodology and to suggest solutions for improving it.

The two typologies of case studies are an office and a classroom. Therefore the variable parameters applied to the case studies are: the geographical coordinates, the ratio between the window area and floor area, the geometrical characteristics of the room and windows, the typology of installed lighting source. The results of this analysis show that the values of the *LENI* calculated with the Standard methodology are always higher than the ones calculated with the alternative method; in addition, the alternative method is much more sensible to the variation of the parameters.

1 Introduzione

La Direttiva 2002/91/CE *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)* che recepisce le indicazioni del Protocollo di Kyoto ratificato nel 1997 [1], ha rappresentato a livello Europeo uno spartiacque normativo in materia di risparmio energetico. Recepita dall'Italia attraverso il D.Lgs. 19 agosto 2005 n. 192, corretto e integrato dal D.Lgs. 29 dicembre 2006 n. 311, è stata poi attuata mediante i D.P.R. 2 aprile del 2009 n. 59 e il D.M. 26 giugno 2009. Questo D.M. introduce un sistema di classificazione degli edifici basato sulle loro prestazioni energetiche, espresse complessivamente attraverso l'indice di prestazione globale EP_{gl} .

Le più recenti evoluzioni di tale iter normativo hanno portato alla sostituzione della Direttiva 2002/91/CE con la Direttiva 2010/31/UE [2], recepita a livello nazionale dal D.L. 4 Giugno 2013 n. 63 [3] a sua volta convertito in legge dalla L. 3 agosto 2013 n. 90 [4]. Tra le novità del D.L. 63/2013 vi è la sostituzione dell'Attestato di Certificazione (ACE) con l'attestato di prestazione energetica (APE); tra le indicazioni della L. 90/2013 si precisa inoltre che, nelle more dell'aggiornamento delle specifiche norme, le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici sono, oltre alle norme UNI/TS 11300 parti 1, 2, 3 e 4 [5] e Raccomandazione CTI 14/2013 [6], anche la UNI EN 15193 del 2008 [7] (Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione) in cui l'indice per l'illuminazione artificiale (EP_{il}) viene indicato con il nome di *LENI* (Lighting Energy Numeric Indicator o Indice di efficienza energetica del sistema di illuminazione).

Nel 2014 le parti 1 e 2 della UNI/TS 11300 hanno subito una variazione che ha riguardato il calcolo degli scambi di energia termica per ventilazione, il calcolo degli apporti termici solari, l'introduzione del calcolo dei fabbisogni di energia termica latente, la riduzione dell'utilizzo dei dati precalcolati e tabellati.

Gli strumenti attuativi della L. 90/2013, che entreranno in vigore a partire dal 1 ottobre del 2015, sono due: Il "Decreto Requisiti Minimi" [8], che sostituirà il D.P.R. 2 Aprile del 2009 n. 59, e le "Nuove Linee Guida sull'APE 2015" [9] che sostituiranno il D.M. 26 giugno 2009. Il "Decreto Requisiti Minimi" fornirà precisazioni in merito a nuovi limiti e requisiti per gli edifici di nuova costruzione, per le ristrutturazioni importanti e per gli interventi di riqualificazione energetica, ed in merito a due nuovi concetti già introdotti nella L. 90/2013:

1. L'edificio ad "Energia quasi zero", che rispetta contemporaneamente i requisiti del nuovo decreto (al 2019 per edifici pubblici e al 2021 per tutti gli altri edifici) e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili secondo il D.Lgs. 28/2011;
2. L'"Edificio di riferimento", omologo all'edificio reale dal punto di vista delle caratteristiche geometriche, climatiche, geografiche e funzionali, ma avente caratteristiche termiche e parametri energetici conformi ai valori prescritti dalla norma. Il calcolo dell'indice di prestazione globale verrà effettuato su entrambi gli edifici, quello reale e quello di riferimento, al fine di verificare ed attestare che l' EP_{gl} dell'edificio reale sia inferiore a quello di riferimento. Questo concetto modifica sostanzialmente il modo di certificare e di assegnare la classe energetica all'edificio oggetto di verifica.

Le "Nuove Linee Guida sull'APE 2015" uniformeranno al "Decreto Requisiti Minimi" le modalità di classificazione energetica degli edifici a livello nazionale e il modello di attestato di prestazione energetica APE. Nella fattispecie le classi energetiche saliranno da 7 a 10 e verranno calcolate sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'Edificio di riferimento.

Inoltre i due nuovi decreti attuativi della L.90/2013 sopracitati introducono una sostanziale novità: come espresso nelle "Nuove Linee Guida sull'Attestato di Prestazione Energetica APE 2015" Allegato 1, Capitolo 2 "La determinazione dell'indice di prestazione energetica per l'illuminazione degli ambienti e dell'indice di prestazione energetica per il trasporto di persone o cose è obbligatoria per gli immobili appartenenti alle categorie E.1, limitatamente a collegi, conventi, case di pena e caserme, E.2, E.3, E.4, E.5, E.6, e E.7, come definite all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412, di seguito D.P.R. 412/93." e rispetto al precedente D.M. 26 giugno del 2009 Allegato A, Capitolo 3, è stata abolita la dicitura "Tuttavia, nella fase di avvio, ai fini della certificazione degli edifici, si considerano nelle presenti Linee guida solamente gli indici di prestazione di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici e sanitari". Ciò rende a tutti gli effetti fondamentale la determinazione del

fabbisogno energetico per l'illuminazione nel settore terziario e quindi uno studio attento della UNI EN 15193 che ne regola il calcolo.

2 Obiettivi

Sulla base di recenti dati sui consumi di energia elettrica in Italia, è evidente quanto sia consistente l'incidenza dell'illuminazione artificiale nel settore terziario [10, 11, 12]. Questo aspetto è stato riconosciuto di notevole importanza anche dal punto di vista normativo laddove nel "Decreto Requisiti Minimi" e "Nuove Linee Guida sull'Attestato di Prestazione Energetica APE 2015" la definizione dell'indice di prestazione relativa all'illuminazione nel settore terziario è parte integrante e obbligatoria per il calcolo dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ e per la conseguente classificazione degli edifici stessi.

Al fine di definire quindi quali possano essere gli interventi più adatti per l'efficientamento energetico degli impianti di illuminazione esistenti e/o per la progettazione di nuovi impianti, è necessario effettuare una corretta valutazione del fabbisogno energetico dovuto all'illuminazione degli ambienti, evitando sottostime e sovrastime che potrebbero portare ad un inutile incremento dei costi del progetto.

La UNI EN 15193 è attualmente in fase di revisione e diversi studi fino a qui svolti [13, 14, 15] hanno evidenziato la sovrastima dei fabbisogni energetici per l'illuminazione calcolati con il metodo presente nella norma.

L'obiettivo principale del lavoro è quello di confrontare il metodo di calcolo del *LENI* da norma con quello alternativo, attraverso la simulazione su più tipologie di ambienti definiti sulla base di un set di parametri variabili, in modo tale da identificare le relazioni tra i parametri in gioco e i valori del *LENI*, approfondire le criticità del metodo da norma, evidenziare quelle del metodo alternativo e suggerire soluzioni migliorative.

3 Descrizione del metodo proposto dalla normativa vigente

La UNI EN 15193 definisce metodi di calcolo per la quantificazione dell'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione degli edifici non residenziali esistenti, di nuova edificazione o in ristrutturazione. Il *LENI* è l'indice introdotto dalla norma per questa valutazione e può essere ottenuto o con un metodo semplificato o attraverso l'utilizzo di un metodo completo.

Il valore del *LENI* si ricava dalla seguente formula:

$$LENI = W/A [kWh/m^2 anno] \quad (1)$$

dove W è l'energia totale annua utilizzata per l'illuminazione, mentre A è la superficie utile dell'edificio in esame. W , è ricavato dalla (2):

$$W = W_L + W_P [kWh/anno] \quad (2)$$

in cui W_L è l'energia necessaria per soddisfare i requisiti di illuminamento dell'edificio e si ricava dalla formula (3):

$$W_L = \sum(P_n \cdot F_C) + [(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_N \cdot F_O)]/1000 [kWh/anno] \quad (3)$$

dove

$P_n [W]$ è la potenza di illuminazione installata totale nel locale o nella zona

$F_C [-]$ è il fattore di illuminamento costante

$t_D [h]$ è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore diurne in un anno

$F_O [-]$ è il fattore di dipendenza dall'occupazione

$F_D [-]$ è il fattore di dipendenza dalla luce diurna

$t_N [h]$ è il periodo di utilizzo dell'impianto nelle ore notturne in un anno

mentre W_p rappresenta l'energia necessaria per la ricarica delle batterie dei sistemi di illuminazione di emergenza e per la fase di stand-by dei sistemi di controllo. In questa ricerca, sia nel calcolo con il metodo completo da norma che in quello con il metodo alternativo, non è stata presa in considerazione l'energia parassita W_p perché l'obiettivo del report è confrontare ed evidenziare le criticità dei due metodi nei quali le variazioni si verificano solamente in funzione della energia per l'illuminazione W_L .

Il metodo semplificato prevede che l'energia annua utilizzata per l'illuminazione sia stimata attraverso le formule (1), (2) e (3) ma alle variabili di calcolo t_D, t_N, F_C, F_D, F_o e W_p vengono assegnati valori predefiniti indicati nelle tabelle riportate nelle appendici E, F, e G.

Il metodo completo prevede una valutazione più accurata dei consumi energetici per illuminazione, che può essere effettuata per periodi mensili, oltre che annuali. Il metodo utilizza sempre le medesime formule ma prevede la determinazione analitica di F_C, F_D, F_o , secondo quanto previsto rispettivamente negli allegati C, D, ed E. E' possibile anche in questo caso utilizzare i valori di t_D e t_N tabellati, ricavabili dal prospetto G.1, oppure usare valori calcolati su base nazionale su un anno tipo.

Il fattore di illuminamento costante F_C si calcola con il metodo descritto nell'appendice E della norma e tiene conto del progressivo degrado delle sorgenti e dei relativi apparecchi illuminanti.

Il fattore di dipendenza dall'occupazione F_o è sempre uguale ad 1 se l'illuminazione è attivata "centralmente" o se l'area che viene illuminata da un gruppo di apparecchi attivati assieme (manualmente o automaticamente) è maggiore di 30 m², ad eccezione delle sale riunioni. Negli altri casi F_o è determinato con il metodo descritto nell'appendice D ed è legato alle variabili F_{OC} ed F_A .

Il fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D consente di valutare i valori relativi al risparmio energetico ottenibile attraverso una corretta integrazione tra illuminazione artificiale e illuminazione naturale degli ambienti interni e la procedura di calcolo è descritta nell'appendice C della norma. La definizione di questo fattore è legata alla determinazione del fattore di disponibilità della luce diurna ($F_{D,S}$) ed il fattore di controllo della luce diurna ($F_{D,C}$). Questi ultimi, a loro volta, sono calcolabili con un processo a cascata attraverso la definizione delle classi di penetrazione di luce diurna, determinate dal calcolo del fattore di luce diurna D .

Per la valutazione del *LENI* secondo il metodo da norma sono stati utilizzati alternativamente il foglio di calcolo ed il software commerciale DIALux [16]. In alcuni casi non è stato possibile utilizzare il software a causa di limitazioni dello stesso nella determinazione di alcune variabili:

1. La norma, nel paragrafo C.3.1.3, indica che il fattore di disponibilità della luce diurna F_{DS} è valido per un orario operativo quotidiano che va dalle ore 08.00 alle ore 17.00 e che per orari operativi quotidiani prolungati i valori dovrebbero essere moltiplicati per un fattore di correzione di 0.7. DIALux non tiene conto di questa specifica.
2. Per la determinazione del valore di $F_{D,S}$, il software calcola F_D sulla base del fattore di luce diurna D_C , relativo all'apertura della facciata della struttura (ovvero senza finestratura) e non sulla base del fattore di luce diurna D (che invece tiene conto di fattori relativi al tipo di vetro, all'infisso, allo sporco e alla incidenza non perpendicolare della luce naturale). E' possibile in tal modo che il calcolo del *LENI* possa non essere sufficientemente accurato.

3.1 Analisi critica del metodo proposto dalla norma

Dall'analisi critica del metodo di calcolo completo sono state evidenziate le seguenti criticità:

1. La norma prevede che possano essere identificate due tipologie di aree in ogni locale: le zone di luce diurna A_D e quelle prive di luce diurna A_{ND} . Per ogni zona viene calcolato uno specifico valore di W_L ; i W_L delle diverse zone vengono poi sommati e divisi per l'area totale del locale per ottenere il valore del *LENI*.

La norma non specifica tuttavia in che modo ripartire la potenza degli apparecchi installati nel locale per le singole zone. Possono infatti verificarsi i seguenti casi:

- A. A_D corrisponde all'area di tutto il locale;
- B. nel locale sono presenti sia A_D che A_{ND} e la distribuzione dei corpi illuminanti è chiaramente distinta per le due zone;

- C. nel locale sono presenti sia A_D che A_{ND} , ma una delle due è di dimensioni irrilevanti per cui nessun corpo illuminante insiste sulla stessa;
- D. nel locale sono presenti sia A_D che A_{ND} , ma per la particolare distribuzione dei corpi illuminanti, nessun apparecchio insiste su una delle due zone;
- E. nel locale sono presenti sia A_D che A_{ND} , ma alcuni corpi illuminanti installati, per la loro geometria, insistono su entrambe le zone.¹

Se nei primi quattro casi sono facilmente definibili le potenze installate per le diverse zone, nell'ultimo caso la quantificazione della P_N da assegnare alla zona non è immediatamente individuabile. Un esempio rappresentativo dei cinque casi elencati è illustrato in Figura 1.

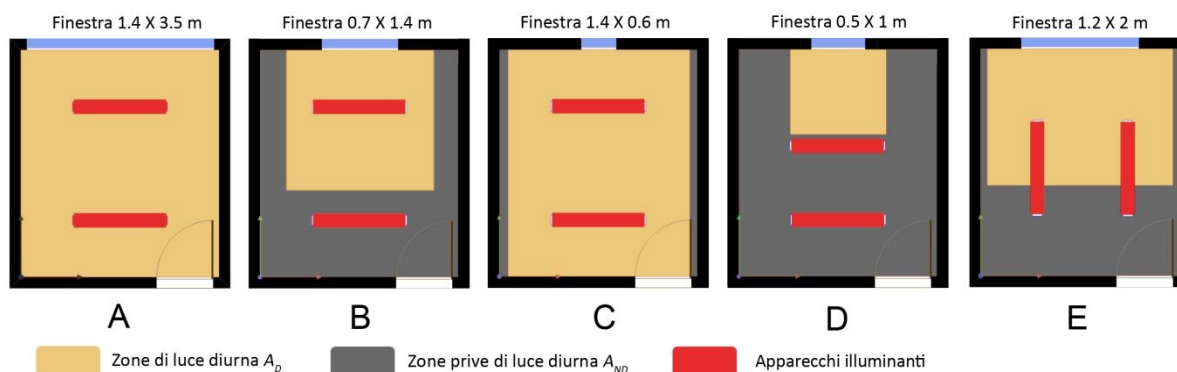


Figura 1. Possibili ripartizioni delle potenze degli apparecchi nelle zone di luce diurna A_D e delle zone prive di luce diurna A_{ND} - Caso esemplificativo di un locale di dimensioni 3,5 x 4 m e finestra di dimensioni variabili

2. Nel punto C.3.1.3 la norma indica che per orari operativi quotidiani prolungati rispetto alla fascia 8-17, il fattore di disponibilità della luce diurna $F_{D,S}$ dovrebbe essere moltiplicato per un fattore di correzione di 0.7. Non è però indicato cosa si intenda per prolungamento e se questo fattore di correzione debba essere il medesimo per qualsiasi prolungamento, o perché non esista un fattore accrescitivo di $F_{D,S}$ laddove l'orario operativo fosse inferiore. Lo stesso punto della norma indica che per periodi prolungati di assenza di luce diurna durante il periodo operativo si applica $F_{D,S} = 0$. Anche in questo caso non è chiaramente definito questo periodo prolungato di assenza della luce.
3. Il fattore di luce diurna definito dalla norma (D) serve a determinare delle classi di penetrazione della luce diurna (prospetto C.1b), che a loro volta sono utilizzate per individuare i coefficienti necessari a definire $F_{D,S}$ ed $F_{D,C}$. Nella procedura di calcolo di D non è possibile distinguere tutti i diversi termini che compongono la formula:

$$D = D_C \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \text{ [%]} \quad (4)$$

dove D_C a sua volta viene calcolato con la formula:

$$D_C = (4.13 + 20 \cdot I_T - 1.36 \cdot I_{De}) \cdot I_O \text{ [%]} \quad (5)$$

¹ Nel caso e) Il software Dialux assegna alle due zone la stessa quota parte di potenza se l'apparecchio insiste per almeno metà della sua estensione su entrambe le zone; viceversa, se l'apparecchio insiste in una zona per meno della metà della sua estensione, l'intera potenza dello stesso viene assegnata all'altra zona.

Fra tutti i coefficienti considerati nelle due formule precedenti non risulta chiaro se siano presenti riferimenti ai coefficienti di riflessione delle superfici interne dell'ambiente, presenti invece nella formula standard per il calcolo del fattore di luce diurna [17].

Esistono differenti metodi per la determinazione del FLD ed in generale essi prevedono il calcolo secondo le varie componenti della formula seguente [18]:

$$FLD = SC + ERC + IRC \quad (6)$$

dove

SC è la componente dovuta alla luce naturale diffusa che raggiunge direttamente il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

ERC è la componente dovuta alla luce naturale diffusa riflessa dalle superfici esterne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato;

IRC è la componente dovuta alle riflessioni multiple della luce naturale diffusa sulle superfici interne che raggiunge il punto di riferimento per il calcolo che si trova all'interno dell'ambiente considerato.

In aggiunta, nella norma la classificazione a cui rimanda il calcolo del fattore di luce diurna D definisce rigidamente tre categorie (forte, media e debole) all'interno delle quali esistono intervalli di valori piuttosto ampi (ad esempio dal 2% al 3% per una penetrazione di luce diurna media). In aggiunta l'eventuale apporto di luce riflessa proveniente dalla zona A_{ND} non è preso in considerazione.

4. In nessun punto della norma vi è un diretto riferimento alle condizioni di illuminamento esterno naturale per le singole località. L'unico fattore che tiene in considerazione la posizione geografica dell'edificio è $F_{D,S}$ nel quale compare l'angolo di latitudine γ , evidentemente non sufficiente a descrivere le condizioni di illuminamento esterno. In aggiunta, anche i valori dei coefficienti a e b presenti nella formula dell' $F_{D,S}$ sembrano essere di non chiara interpretazione e derivazione.
5. La norma prevede il calcolo del $LENI$ considerando sulle superfici utili solamente tre livelli di illuminamento: 300, 500 e 750 lx. Ciò costringe a considerare questi livelli anche per casi in cui ne siano prescritti di diversi.

Sulla base di questa analisi emerge che l'aspetto più critico è legato alla definizione del fattore di luce diurna D e alla definizione del fattore di disponibilità della luce diurna $F_{D,S}$. A tal proposito il metodo alternativo si propone di definire il fattore di luce diurna sulla base del calcolo standard e di utilizzare i dati di illuminamento esterno misurati.

4 Descrizione del metodo alternativo

Il metodo alternativo differisce dal metodo da norma in quanto utilizza dati di illuminamento esterno misurati per la valutazione del contributo dovuto all'illuminazione naturale. I dati utilizzati per questa ricerca, presenti nel database di satel-light.com [31], sono dati di illuminamento diffuso orari su media mensile e provengono dalle misurazioni effettuate tra il 1996 ed il 2000 dai satelliti geostazionari Meteosat². La formula utilizzata dalla norma per il calcolo del $LENI$ è stata modificata nel termine W_L . Il W_p , come esplicitato precedentemente, non è stato considerato in questa ricerca.

² I satelliti registrano immagini sull'Europa ogni 30 minuti. Da queste immagini vengono stimati i valori di radiazione solare globale orizzontale al suolo. Dai dati vengono calcolate anche la componente diretta e diffusa della radiazione solare al suolo. L'illuminamento orizzontale al suolo (globale, diffuso e diretto) viene computato dal dato di radiazione orizzontale utilizzando il modello dell'efficienza luminosa sviluppato da Olseth nel 1989.

La variazione della formula (3) prevede l'eliminazione di F_D e la sostituzione dei termini t_D e t_N con t_{sat} . L' $F_{D,C}$ presente insieme a $F_{D,S}$ nella formula per il calcolo di F_D , non è stato considerato nel metodo alternativo.

La nuova formula è la seguente:

$$W_L = \sum(P_n \cdot F_C \cdot t_{sat} \cdot F_O)]/1000 [kWh/anno] \quad (7)$$

dove t_{sat} è il numero delle ore di accensione dell'impianto calcolate analizzando i dati prelevati dal database di satel-light.com.

Per calcolare t_{sat} bisogna conteggiare il numero di ore in un anno in cui l'impianto di illuminazione artificiale dovrà essere in funzione per garantire i livelli di illuminamento mantenuto \bar{E}_m nell'ambiente considerato, prescritti dalla norma UNI EN 12464-1 [19]. Ogniquale volta i livelli di illuminamento esterno garantiranno da soli il raggiungimento dei livelli di illuminamento mantenuto indicati per gli interni, l'impianto si riterrà spento.

E' possibile effettuare questa verifica a partire dal FLD , una grandezza sintetica adimensionale che indica il rapporto tra illuminamento di una superficie posta all'interno di un ambiente comunicante con l'esterno tramite un'apertura ed una superficie posta all'esterno, nello stesso istante e in condizioni di illuminamento diffuso. Il fattore di luce diurna può essere dunque calcolato con la formula seguente:

$$FLD = \frac{E_i}{E_e} \quad (8)$$

dove

E_i è il livello di illuminamento calcolato in un punto su un piano orizzontale all'interno dell'ambiente, dovuto alla luce naturale diffusa dalla sola volta celeste;

E_e è il livello di illuminamento calcolato simultaneamente ad E_i in un punto su un piano orizzontale all'esterno, dovuto alla luce diffusa della sola volta celeste ed in assenza di ostruzioni.

Noti il livello di illuminamento interno da raggiungere per il compito visivo svolto E_i (corrispondente al valore di \bar{E}_m tratto dalla UNI EN 12464-1) ed il FLD (o FLD_m) dell'ambiente preso in esame, è possibile ottenere E_e che in questo caso indica il livello di illuminamento esterno che garantisce il raggiungimento di quello interno E_i prescritto, per un determinato FLD

$$E_e = \frac{E_i}{FLD} \quad (9)$$

Prelevati dal database di satel-light.com i valori di illuminamento sul piano orizzontale in esterno E_{Sat} in una determinata località e per una specifica fascia oraria, si procede a confrontarli con i valori di E_e calcolati con la formula (9): nelle ore in cui si verifica la condizione $E_{Sat} \geq E_e$, si considera l'impianto di illuminazione spento. Viceversa, quando il valore $E_{Sat} < E_e$, la sola luce naturale non potrà garantire i livelli di illuminamento interno E_i e bisognerà quindi considerare l'impianto di illuminazione acceso: la somma delle ore di accensione in un anno calcolata con questo metodo rappresenta il valore di t_{sat} nella formula (7).

Nel metodo alternativo la posizione dei corpi illuminanti nel locale non è influente ai fini del calcolo del $LENI$ a differenza del metodo da norma.

Per il calcolo del $LENI$ con il metodo alternativo è stato utilizzato il foglio di calcolo precedentemente compilato per il metodo da norma. Il file è stato modificato per poter inserire i dati provenienti dal database di satel-light.com. Il FLD medio e puntuale in ogni ambiente è stato calcolato con il software commerciale gratuito DIALux 4.12.

5 Metodologia

L'approccio utilizzato per confrontare i valori del *LENI* ottenuti con il metodo completo da norma e quelli con il metodo alternativo, si fonda sulla procedura definita ed utilizzata nel Report RdS/PAR2013/120 [15].

Si è scelto di utilizzare il metodo completo in quanto più preciso: la norma stessa specifica infatti che il metodo semplificato può restituire valori del *LENI* più elevati rispetto a quelli ottenibili con il metodo completo. Il calcolo del *LENI* definito dalla UNI EN 15193 è stato effettuato utilizzando un foglio di calcolo che consentisse un maggior controllo su tutti i parametri.

I risultati così ottenuti sono stati poi paragonati a quelli calcolati con un software commerciale per verificare eventuali incongruenze.

Il calcolo del *LENI* con il metodo alternativo su base annuale e mensile è stato svolto modificando il foglio di calcolo per inserire i dati di illuminamento esterno misurati.

Il confronto fra i risultati del metodo alternativo e quelli ottenuti secondo la UNI EN 15193 con tempi di accensione calcolati su base nazionale, è stato effettuato su tutti i casi studio combinando differenti variabili quali la latitudine dell'ambiente analizzato, i livelli di illuminamento medio mantenuto a seconda del compito svolto, le tipologie di sorgenti, le caratteristiche geometriche dei locali e delle finestre.

Infine, su un set limitato di casi, è stato svolto un ulteriore confronto tra i risultati di *LENI* ottenuti con gli altri metodi di calcolo definiti dalla norma (il metodo semplificato su base annuale ed il metodo completo su base annuale con t_D e t_N indicate nel prospetto G.1) e con il metodo alternativo su base annuale calcolando le ore di disponibilità di luce diurna utilizzando i diagrammi di Dresler.

6 Descrizione dei casi studio

Dal punto di vista funzionale si è deciso di analizzare un ambiente scolastico ed un ambiente di tipo ufficio. Tale scelta è legata al fatto che queste due tipologie di locali sono differenti in termini di orari operativi, di utilizzo e di requisiti illuminotecnici prescritti dalle norme, permettendo quindi di effettuare una valutazione ad ampio spettro dei due metodi di calcolo del *LENI*. Per quanto riguarda le aule, sono stati definiti dei casi studio tipo rispondenti ai requisiti normativi del D.M. 18-12-75 [20], del D.M. 28-06-92 [21], delle UNI 10840:2007 e UNI EN 12464-1:2011, dei Regolamenti edilizi comunali delle tre località prese in esame e alle prescrizioni definite nelle linee guida ISPESL [22]. Viceversa per gli uffici sono stati identificati ambienti tipo rispondenti ai requisiti normativi della UNI EN 12464-1 e ai Regolamenti edilizi comunali. I parametri di variazione applicati ai casi studio sono: la latitudine, i rapporti aeroilluminanti (*RAI*), la geometria dei locali e delle finestre, la tipologia di sorgente artificiale installata. Si è deciso di posizionare gli ambienti idealmente a tre latitudini differenti - Milano (45.50°), Roma (41.80°) e Palermo (38.10°) - per poter osservare le variazioni del *LENI* in base alla posizione geografica. Sono stati acquisiti i dati di illuminamento esterno dal database di satel-light.com (E_{Sat}) per tutte e tre le località considerate (Tabella 1-3) come descritto nel capitolo 4.

S@tel-Light		Site : Milano, Italy											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
8-9	2.9	6.6	11.4	11.2	16.6	17.3	16.4	13.3	9.4	5.4	5.7	2.8	9.9
9-10	7.8	11.7	15.8	16.5	22.0	22.7	21.3	19.0	15.2	10.9	9.9	7.3	15.0
10-11	10.7	15.4	18.7	20.2	25.7	26.4	24.4	22.6	19.5	14.8	12.0	10.2	18.4
11-12	12.7	17.3	20.4	22.6	29.8	28.9	27.2	24.8	21.2	16.8	13.3	11.8	20.6
12-13	13.2	17.6	20.9	24.4	31.8	30.4	28.4	26.2	22.8	18.7	13.6	12.4	21.7
13-14	13.0	17.3	19.8	25.1	31.9	29.9	28.4	26.6	22.8	19.2	12.8	11.7	21.6
14-15	11.3	15.8	18.2	23.7	31.5	30.0	27.1	25.5	22.3	18.0	10.6	9.7	20.3
15-16	7.9	12.3	15.8	21.8	28.6	28.2	25.5	23.8	20.2	15.4	7.2	5.9	17.7
16-17	3.5	7.9	12.1	19.1	24.2	24.5	23.6	20.8	16.9	11.7	2.3	1.2	14.0

Tabella 1. Milano - Livelli di illuminamento diffuso esterni (klx)

S@tel-Light		Site : Roma, Italy											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
8-9	5.9	8.8	13.2	13.0	16.1	16.9	15.4	14.5	11.3	8.0	8.7	6.0	11.5
9-10	10.6	13.1	17.8	18.8	21.0	20.9	19.1	19.5	16.2	13.9	12.9	10.2	16.2
10-11	13.7	16.0	20.7	22.8	24.3	22.7	21.9	22.6	20.0	18.6	15.7	13.0	19.4
11-12	15.3	17.4	22.2	25.7	26.7	24.0	22.8	25.1	23.0	21.4	17.5	14.9	21.4
12-13	15.3	18.2	23.9	27.7	28.8	25.0	23.1	26.9	24.7	23.1	18.2	14.9	22.5
13-14	14.7	17.6	23.6	28.5	27.6	24.9	23.9	27.1	24.7	22.6	16.0	13.5	22.1
14-15	12.5	16.0	21.2	27.7	26.2	25.3	22.8	26.2	24.8	21.0	12.7	10.9	20.6
15-16	8.9	12.7	17.6	24.9	23.4	24.2	22.0	24.2	22.7	17.9	8.1	6.8	17.8
16-17	3.7	8.0	12.5	20.2	20.6	22.1	20.0	21.0	18.5	12.6	2.4	1.5	13.6

Tabella 2. Roma - Livelli di illuminamento diffuso esterni (klx)

S@tel-Light		Site : Palermo, Italy											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
8-9	7.7	10.4	15.1	14.4	17.5	18.0	16.4	14.3	12.8	9.4	10.8	7.9	12.9
9-10	13.0	15.6	20.1	20.9	23.1	22.1	20.2	18.3	19.1	15.1	15.9	12.7	18.0
10-11	16.3	19.2	23.9	25.2	26.5	25.2	22.6	20.1	24.1	19.4	18.5	15.5	21.4
11-12	18.6	21.4	25.8	27.8	28.1	26.3	23.6	21.3	26.6	21.8	19.7	17.2	23.2
12-13	19.1	21.8	25.6	29.4	28.4	27.3	23.8	22.5	28.0	23.0	19.7	17.3	23.8
13-14	18.2	21.4	24.5	29.4	27.9	26.3	25.0	22.9	28.6	23.3	17.9	15.6	23.4
14-15	15.1	18.7	22.1	27.5	27.4	26.2	24.6	22.8	26.5	20.6	14.2	12.5	21.5
15-16	10.6	14.0	17.9	24.6	26.1	25.5	23.4	21.8	23.5	17.3	9.2	7.8	18.5
16-17	4.5	8.6	12.6	20.5	22.5	22.7	21.1	19.5	18.8	12.7	3.0	2.1	14.1

Tabella 3. Palermo - Livelli di illuminamento diffuso esterni (klx)

La fascia oraria operativa scelta per l’ambiente scolastico è 8.00-16.00 con un intervallo di chiusura tra le ore 13.00 e le ore 14.00, mentre per gli uffici è stato scelto un orario continuato 8.00-18.00. Le ore complessive annuali nel primo caso sono state definite sulla base del calendario dell’anno scolastico 2014/2015, nel secondo caso sulla base dei dati nazionali sui giorni lavorativi per anno tipo [32]. In particolare i valori di t_D e t_N sono stati ridefiniti utilizzando gli orari di alba e tramonto [33] per ognuna delle tre latitudini prese in esame.

Essendo stata definita per gli uffici una fascia oraria operativa compresa tra le ore 8.00 e le 18.00, per i motivi precedentemente indicati relativi alle limitazioni del software DIALux, per il calcolo secondo il metodo da norma si è impiegato esclusivamente il foglio di calcolo. Nella tabella 4 sono indicati i giorni e le ore lavorative mensili utilizzate per le aule e per gli uffici.

AULE SCOLASTICHE	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
giorni lavorativi	18	20	22	18	20	4	0	0	12	23	20	15	172
ore lavorative	126	140	154	126	140	28	0	0	84	161	140	105	1204

UFFICI	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
giorni lavorativi	22	20	21	20	22	20	23	21	21	23	20	20	253
ore lavorative	220	200	210	200	220	200	230	210	210	230	200	200	2530

Tabella 4. Giorni e ore lavorative mensili

Per la definizione dei requisiti illuminotecnici si è fatto riferimento alle normative vigenti. Secondo la UNI 10840 e la UNI EN 12464-1, nelle aule scolastiche devono essere garantiti 300 lux ed un fattore medio di luce diurna $\eta_m \geq 3\%$. In merito ai RAI per Roma e Palermo non ci sono prescrizioni specifiche per gli edifici scolastici quindi si applicano le prescrizioni relative ai locali di abitazione riportate negli art. 54 comma 5 lettera (c) del Regolamento edilizio di Palermo [23] “La superficie finestrata apribile non deve essere

inferiore ad 1/8 della superficie del pavimento e comunque mai inferiore a mq 2.00 nel caso il locale sia provvisto di una sola apertura di finestra” e nell’ art. 40 lettera (f) del Regolamento generale edilizio del comune di Roma [24]: “... la superficie finestrata apribile non dovrà essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento”. el caso del comune di Milano, il Regolamento locale di igiene [25] definisce al Capitolo 9, art. 3.9.6 che “Gli ambienti destinati ad attività didattica (aule per lezione, studio e disegno) devono essere dotati di aeroilluminazione naturale mediante aperture finestrate apribili, aventi superficie non inferiori a 1/5 della superficie del pavimento di cui almeno il 25% apribile anche a vasistas”.

Secondo la UNI EN 12464-1, negli uffici sono prescritti 500 lux per le funzioni di scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati, sale conferenza e riunioni. Il fattore di luce diurna medio è invece solamente definito nei singoli Regolamenti edilizi comunali e per ognuna delle tre latitudini scelte si applicano le prescrizioni relative ai locali di abitazione “L’ampiezza delle finestre deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore di fattore luce diurna medio non inferiore a 2%. La superficie finestrata apribile non deve essere inferiore ad 1/8 della superficie del pavimento”.

In base a queste prescrizioni si è deciso di calcolare il *LENI* per due livelli di illuminamento, 300 lx per le scuole e 500 lx per gli uffici, e di garantire *RAI* di 1/5 ed 1/8 per ogni tipologia di ambiente studiato e per ognuna delle tre località.

Per simulare casi studio quanto più possibili vicini a condizioni reali e rispettosi delle normative, per le aule sono state scelte dimensioni di 7 x 7 m e 10 x 5 m, in modo tale da garantire sempre una superficie totale di circa 50 m², valore minimo prescritto dal DM 18-12-75 per aule da 25 alunni nelle scuole elementari, medie e superiori.

Per entrambe le aule sono stati applicati *RAI* di 1/5 ed 1/8 identificando poi diverse tipologie di finestre:

- Tipologia 1: finestra a nastro con altezza 1.4 m e lunghezza variabile (casi 1, 3, 6, 9)
- Tipologia 2: finestre 1.4 x 2.4 m in numero variabile (casi 5, 10)
- Tipologia 3: finestre 1.8 x 1.8 m in numero variabile (casi 2, 4, 8, 11).

La variazione sia in altezza che in lunghezza delle finestre ha permesso di verificare se ci fossero eventuali differenze nella penetrazione di luce diurna negli ambienti al variare delle proporzioni geometriche delle aperture.

Per la sua particolare dimensione, nel caso dell’aula 7 x 7 m con *RAI* 1/5 non è stato possibile inserire la finestra di tipologia 2.

Negli uffici è stata utilizzata una sola tipologia di finestra:

- Finestra a nastro con altezza di 1.4 m con lunghezza variabile in funzione del valore del *RAI* da ottenere

Le 11 tipologie di aule scolastiche risultanti da questa combinazione sono mostrate nella tabella 5.

AULE SCOLASTICHE						
<i>RAI</i>	Caso	Dimensioni dell’ambiente (m)		Finestre		
		Larghezza (m)	Profondità (m)	Altezza (m)	Larghezza (m)	Numero
1/5	1	7	7	1.4	7	1
	2	7	7	1.8	1.8	3
	3	10	5	1.4	7	1
	4	10	5	1.8	1.8	3
	5	10	5	1.4	2.4	3
1/8	6	7	7	1.4	4.5	1
	7	7	7	1.4	2.4	2
	8	7	7	1.8	1.8	2
	9	10	5	1.4	4.5	1
	10	10	5	1.4	2.4	2
	11	10	5	1.8	1.8	2

Tabella 5. Aule - Caratteristiche geometriche dei casi studio

Le due tipologie di ufficio prese in esame misurano 4 x 3.5 m e 6 x 3.5 m per un totale rispettivamente di 14 m² e 21 m². In ognuno dei due tipi di locali sono state inserite due finestre rispondenti a *RAI* di 1/5 e 1/8.

Le combinazioni delle 4 tipologie di ufficio sono mostrate nella tabella 6.

UFFICI						
RAI	Caso	Dimensioni dell'ambiente (m)		Finestre		
		Larghezza (m)	Profondità (m)	Altezza (m)	Larghezza (m)	Numero
1/5	1	3.5	4	1.4	2	1
	2	3.5	6	1.4	3	1
1/8	3	3.5	4	1.4	1.3	1
	4	3.5	6	1.4	1.9	1

Tabella 6. Uffici - Caratteristiche geometriche dei casi studio

Sia nelle aule che negli uffici non sono stati inseriti arredi, ed in entrambi i casi il coefficiente di riflessione delle pareti è 0.5, quello del soffitto è 0.7 e quello del pavimento è 0.2, valori minimi prescritti nella UNI EN 12464-1. Un aumento di questi valori porterebbe inevitabilmente a far scendere il *LENI* ottenuto con il metodo alternativo. Il piano di lavoro è stato impostato alla quota di 0.75 m sia per gli uffici che per le aule.

I dati di progetto impostati per i serramenti sono:

τ_{D65} (trasmissione emisferica della superficie vetrata) = 0.82

k_1 (fattore che tiene conto del telaio del sistema di finestratura) = 0.80

k_2 (fattore che tiene conto dello sporco sul vetro) = 0.80

k_3 (fattore che tiene conto dell'incidenza non perpendicolare della luce sulla facciata) = 0.85

Per il confronto completo tra i due metodi sono stati utilizzati corpi illuminanti con sorgente LED. E' stata successivamente effettuata una comparazione tra i valori del *LENI* ottenibili utilizzando altri corpi illuminanti con sorgenti fluorescenti lineari T5 e T8.

I corpi illuminanti con sorgente LED sono per tutte le aule 6 plafoniere da 35W con un flusso luminoso di 4000 lm (Figura 2). Per gli uffici caso 1 e 3 sono state utilizzare 2 plafoniere da 38.5W e 4000 lm (Figura 3), per gli uffici caso 2 e 4 sono state utilizzate 4 plafoniere da 25.5W e 2800 lm (Figura 4).

I valori del fattore di dipendenza dall'occupazione F_O sono stati impostati ad 1 per le aule, 0.8 per gli uffici di dimensioni 3.5 x 4.0 m e 0.9 per gli uffici di dimensioni 3.5 x 6.0 m.

Il fattore di illuminamento costante F_C è stato impostato ad 1 sia per le aule che per gli uffici.

I comandi di accensione e spegnimento sono per tutti gli ambienti manuali e non prevedono la possibilità di regolazione del flusso luminoso.

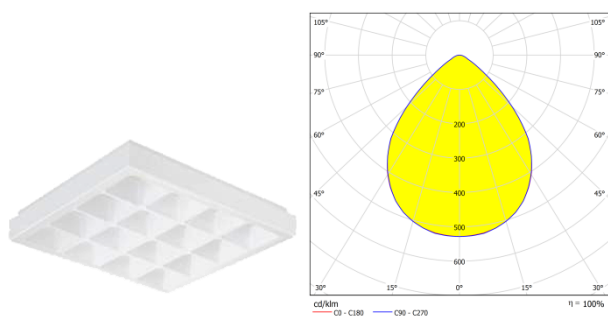


Figura 2. Corpo illuminante previsto nelle aule e relativa curva fotometrica con sorgente LED

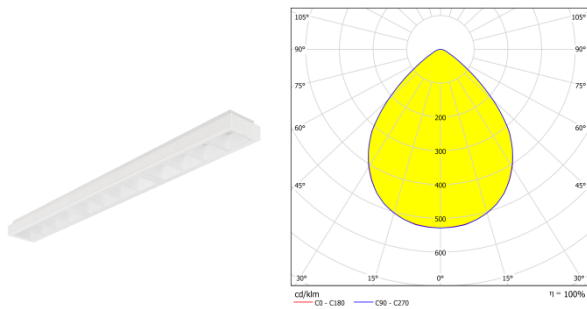


Figura 3. Corpo illuminante installato negli uffici (casi 1 e 3) e curva fotometrica con sorgente LED

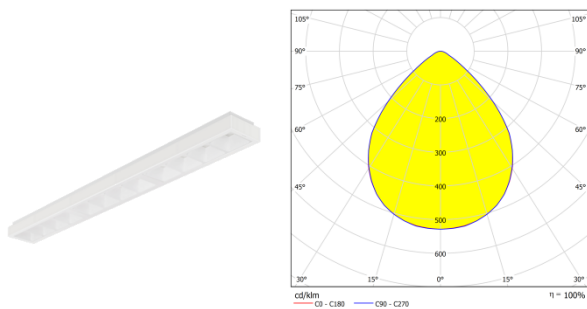


Figura 4. Corpo illuminante installato negli uffici (casi 2 e 4) e curva fotometrica con sorgente LED

7 Applicazione del metodo alternativo: calcolo del FLD e del t_{sat} .

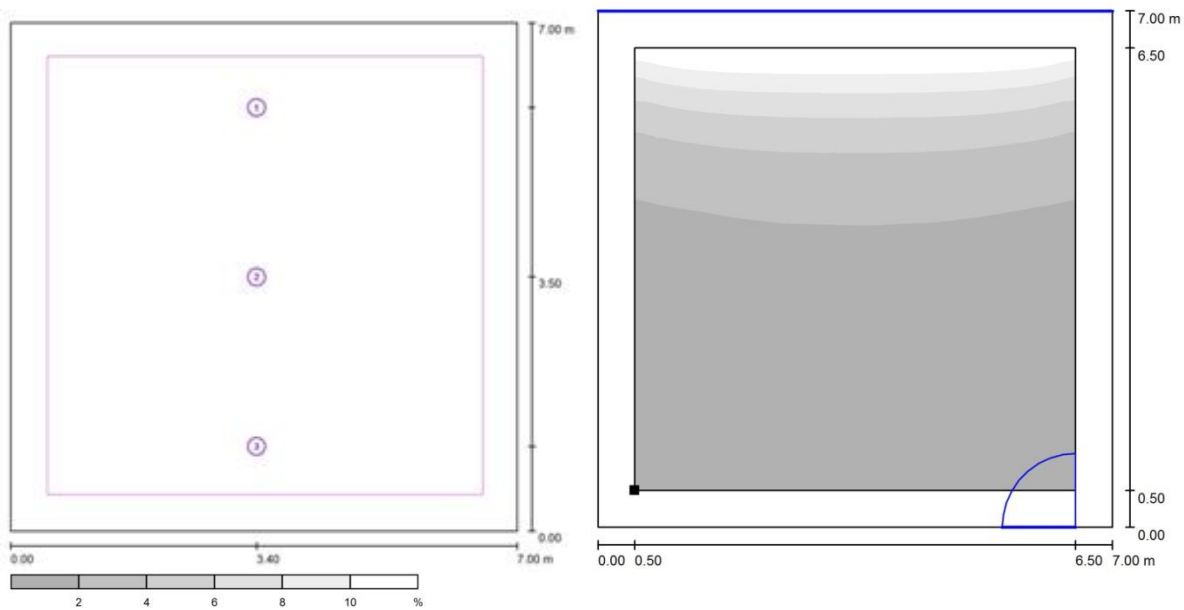
Come descritto nel capitolo 4, il metodo alternativo utilizza t_{sat} nella formula di calcolo del W_L per ottenere una maggiore precisione nella valutazione del contributo dovuto all'illuminazione naturale. Tale variabile è legata al numero di ore in un anno in cui l'impianto di illuminazione artificiale dovrà essere in funzione per garantire i livelli di illuminamento mantenuto \bar{E}_m nell'ambiente considerato prescritti dalla UNI EN 12464-1. Per il calcolo del t_{sat} è stato determinato innanzitutto il fattore di luce diurna medio FLD_m e puntuale FLD (a distanze variabili dalla finestra di ogni ambiente) mediante il software DIALux. Nelle aule sono stati valutati valori di FLD in specifici punti: per le aule di dimensione 7.0 x 7.0 m e per gli uffici di 3.5 x 4.0 m i punti calcolati sono 3, per gli uffici 3.5 x 6.0 m i punti calcolati sono 4, mentre per le aule 10.0 x 5.0 m sono 2, in conformità con la possibile disposizione di due file di banchi in uno spazio di profondità così ridotta.

Per le scuole, la zona del compito visivo è stata definita come la differenza tra l'area dell'ambiente ed una fascia perimetrale distante dalle pareti 0.5 m, nella quale presumibilmente non viene svolto il compito.

Per quanto riguarda gli uffici invece è stata presa in considerazione un'area di calcolo distante 0.5 m dalle pareti laterali e dalla parete finestrata ed 1 m dalla parete in cui è localizzata la porta di ingresso all'ambiente.

A titolo esemplificativo, nelle figure 5 e 6 sono mostrate le aree di calcolo e la distribuzione del FLD_m in livelli di grigio dell'aula Caso 1 (7.0 x 7.0 m con una finestra da 1.4 x 7.0 m) e dell'ufficio Caso 2 (3.5 x 6.0 m con una finestra da 1.4 x 3.0 m).

Nelle tabelle 7 e 8 sono invece raccolti i valori calcolati di FLD_m e FLD puntuale di tutte le tipologie di ufficio ed aula.

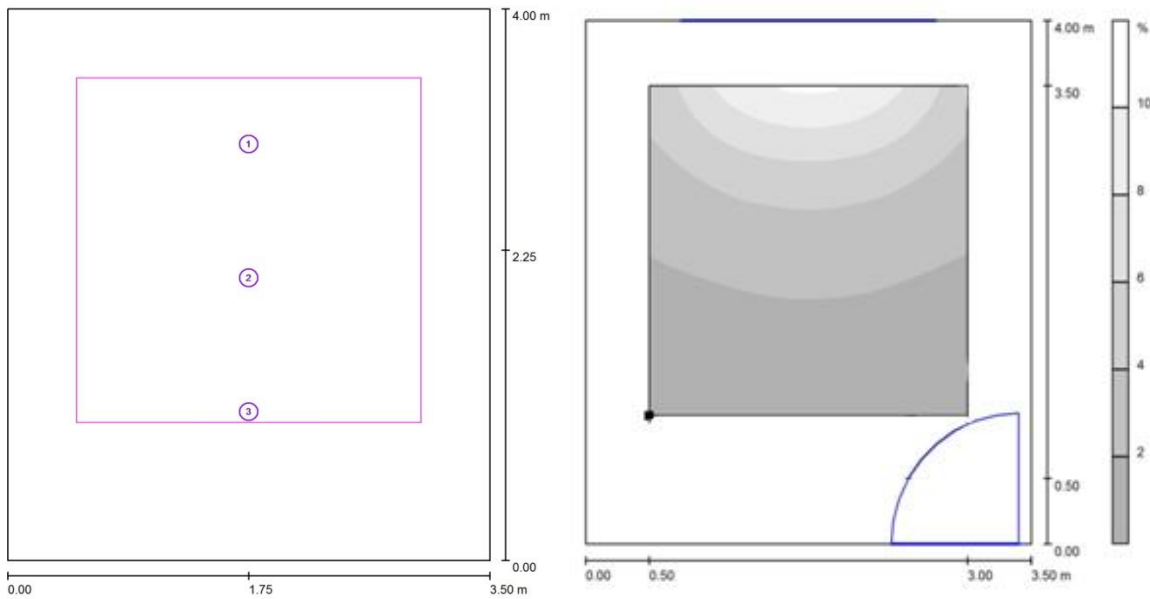


Punto	Distanza dalla finestra (m)	FLD
1	1.2	7.57
2	3.5	1.45
3	5.8	0.63
FLD_m		2.76

Figura 5. Aula scolastica Caso 1 - Punti e area di calcolo e livelli di grigio FLD_m

RAI	AULE				
	Caso	FLD_m	FLD_p		
			1	2	3
1/5	7x7-1x1.4x7	2.76	7.57	1.45	0.63
	7x7-3x1.8x1.8	2.85	7.83	1.67	0.73
	10x5-1x1.4x7	3.13	7.23	1.27	/
	10x5-3x1.8x1.8	3.02	6.34	1.33	/
	10x5-3x1.4x2.4	3.04	6.18	1.14	/
1/8	7x7-1x1.4x4.5	2.00	7.05	1.11	0.43
	7x7-2x1.4x2.4	2.02	5.00	1.05	0.45
	7x7-2x1.8x1.8	2.02	4.69	1.21	0.49
	10x5-1x1.4x4.5	2.06	6.88	0.96	/
	10x5-2x1.4x2.4	2.13	2.69	0.82	/
	10x5-2x1.8x1.8	2.09	2.60	0.96	/

Tabella 7. Aule scolastiche - Valori di FLD_m e FLD puntuali



Punto	Distanza dalla finestra (m)	FLD
1	1	6.61
2	2	2.27
3	3	1.06
FLD_m		3.32

Figura 6. Ufficio Caso 1 - Punti e area di calcolo e livelli di grigio FLD_m

UFFICI						
RAI	Caso	FLD_m	FLD			
			1	2	3	4
1/5	3.5x4-1x1.4x2	3.32	6.61	2.27	1.06	/
	3.5x6-1x1.4x3	2.80	7.92	2.98	1.38	0.81
1/8	3.5x4-1x1.4x1.3	2.24	5.03	1.54	0.73	/
	3.5x6-1x1.4x1.9	1.96	6.41	2.12	0.93	0.53

Tabella 8. Uffici - Valori di FLD_m e FLD puntuali

Noti i valori di FLD_m e FLD puntuale per ogni ambiente, è stato possibile definire i livelli di illuminamento esterno E_e necessari a garantire i livelli di illuminamento medio interno \bar{E}_m prescritti dalle norme, in base alla formula (9). Questi valori di E_e per ogni tipologia di ambiente sono stati raccolti nelle tabelle 9 e 10.

AULE									
E_m (lux)	Caso	FLD_m	E_e (klux)	FLD					
				1	E_e (klux)	2	E_e (klux)	3	E_e (klux)
300 lx	7x7-1x1.4x7	2.76	10.9	7.57	4	1.45	20.7	0.63	47.6
	7x7-3x1.8x1.8	2.85	10.5	7.83	3.8	1.67	18	0.73	41.1
	10x5-1x1.4x7	3.13	9.6	7.23	4.1	1.27	23.6	/	/
	10x5-3x1.8x1.8	3.02	9.9	6.34	4.7	1.33	22.6	/	/
	10x5-3x1.4x2.4	3.04	9.9	6.18	4.9	1.14	26.3	/	/
	7x7-1x1.4x4.5	2.00	15	7.05	4.3	1.11	27	0.43	69.8
	7x7-2x1.4x2.4	2.02	14.9	5.00	6	1.05	28.6	0.45	66.7
	7x7-2x1.8x1.8	2.02	14.9	4.69	6.4	1.21	24.8	0.49	61.2
	10x5-1x1.4x4.5	2.06	14.6	6.88	4.4	0.96	31.3	/	/
	10x5-2x1.4x2.4	2.13	14.1	2.69	11.2	0.82	36.6	/	/
	10x5-2x1.8x1.8	2.09	14.4	2.60	11.5	0.96	31.3	/	/

Tabella 9. Aule scolastiche - Valori di E_e per i diversi ambienti al variare del FLD_m e FLD puntuali

UFFICI											
E_m (lux)	Caso	FLD_m	E_e (klux)	FLD							
				1	E_e (klux)	2	E_e (klux)	3	E_e (klux)	4	E_e (klux)
500 lx	3.5x4-1x1.4x2	3.32	15.1	6.61	7.6	2.27	22	1.06	47.2	/	/
	3.5x6-1x1.4x3	2.80	17.9	7.92	6.3	2.98	16.8	1.38	36.2	0.81	61.7
	3.5x4-1x1.4x1.3	2.24	22.3	5.03	9.9	1.54	32.5	0.73	68.5	/	/
	3.5x6-1x1.4x1.9	1.96	25.5	6.41	7.8	2.12	23.6	0.93	53.8	0.53	94.3

Tabella 10. Uffici - Valori di E_e per i diversi ambienti al variare del FLD_m e FLD puntuali

Il passo successivo per la definizione del t_{sat} prevede il confronto fra i dati di illuminamento esterno E_e necessari allo svolgimento del compito con i valori di illuminamento esterno E_{sat} di ogni località acquisiti dal database di satel-light (Tabelle 1, 2 e 3) per verificare quante ore al giorno mediamente in ogni mese l'impianto di illuminazione dovrà essere acceso per garantire i livelli di illuminamento mantenuto prescritti. Moltiplicando questo valore per la media dei giorni lavorativi di ogni mese e sommando i risultati, si ottiene il valore di t_{sat} annuale. Nelle tabelle 11, 12 e 13 sono mostrati a titolo esemplificativo i t_{sat} giornalieri, mensili e annuali dell'aula Caso 1 localizzata idealmente nelle tre località (Milano Roma e Palermo), calcolati sulla base dei valori di FLD_m nella fascia oraria prevista (8-16).

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
9-10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10-11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
15-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	4	1	0	0	0	0	0	0	1	1	4	5
ore/mese	72	20	0	0	0	0	0	0	12	23	80	75
t_{sat} totali	282											

Tabella 11. t_{sat} dell'aula Caso 1 localizzata a Milano (7 x 7 m con una finestra da 1.4 x 7 m) con FLD_m pari a 2.76 per un livello di illuminamento interno \bar{E}_m di 300 lx

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9-10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
ore/mese	54	20	0	0	0	0	0	0	0	23	40	45
t_{sat} totali	182											

Tabella 12. t_{sat} dell'aula Caso 1 localizzata a Roma (7 x 7 m con una finestra da 1.4 x 7 m) con FLD_m pari a 2.76 per un livello di illuminamento interno \bar{E}_m di 300 lx

ora	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
8-9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
ore/giorno	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
ore/mese	36	20	0	0	0	0	0	0	0	23	40	30
t_{sat} totali	149											

Tabella 13. t_{sat} dell'aula Caso 1 localizzata a Palermo (7 x 7 m con una finestra da 1.4 x 7 m) con FLD_m pari a 2,76 per un livello di illuminamento interno \bar{E}_m di 300 lx

Come definito nel capitolo 4, è possibile inserire i valori di t_{sat} ottenuti nella formula (7) e calcolare così i valori del $LENI$ alle diverse latitudini, per diversi valori di illuminamento mantenuto \bar{E}_m , in ambienti con diversi fattori di luce diurna FLD .

8 Risultati: confronto tra i valori di $LENI$ annuali

Di seguito si presentano i risultati del $LENI$ annuale calcolato secondo la norma con t_D e t_N definiti su base nazionale (MCC) e con il metodo alternativo (MAS) per tutti i casi presi in esame.

I due parametri variati in questa analisi sono la latitudine e la geometria dei locali e delle finestre, lasciando invariata la tipologia di sorgente luminosa (LED).

Nel caso del metodo alternativo, i valori del $LENI$ sono stati calcolati tenendo in considerazione sia i FLD_m che i FLD puntuali. Nelle tabelle, sono evidenziati in arancione e azzurro gli ambienti di uguali dimensioni, in verde i casi in cui il $LENI$ del metodo alternativo è inferiore a quello calcolato secondo la norma, ed in rosso quelli in cui il $LENI$ del metodo alternativo è superiore a quello calcolato attraverso il metodo proposto dalla normativa.

8.1 Aule

Nelle tabelle 14, 15 e 16 e nelle figure dalla 7 alla 12 sono riportati i valori del $LENI$ ottenuti con il metodo da norma e con il metodo alternativo, sia sulla base del FLD_m che sulla base dei FLD puntuali, per ognuna delle località.

AULA			LENI - MILANO [kWh/m ² anno]											
RAI	Caso	FLD_m	MCC	MAS con FLD_m	Δ ($MCC - MAS$) FLD_m	MAS con FLD								
						1			2			3		
						Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 1	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 2	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 3	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 1	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 2	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 3	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 1	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 2	Δ ($MCC - MAS$) FLD Punto 3
1/5	1	7x7-1x1.4x7	2.76	4.2	1.2	3.0	0.1	4.1	4.5	-0.2	5.9	-1.7		
	2	7x7-3x1.8x1.8	2.85	4.2	1.0	3.1	0.1	4.1	3.6	0.6	5.9	-1.7		
	3	10x5-1x1.4x7	3.13	3.8	0.8	3.0	0.1	3.7	4.9	-1.1	-	-		
	4	10x5-3x1.8x1.8	3.02	3.8	1.0	2.8	0.1	3.7	4.8	-1.0	-	-		
	5	10x5-3x1.4x2.4	3.04	3.8	0.9	2.9	0.1	3.7	5.3	-1.5	-	-		
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	2.00	4.5	2.6	1.9	0.1	4.4	5.4	-0.9	5.9	-1.4		
	7	7x7-2x1.4x2.4	2.02	4.5	2.6	1.9	0.4	4.1	5.4	-0.9	5.9	-1.4		
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.02	4.5	2.6	1.9	0.4	4.1	5.2	-0.7	5.9	-1.4		
	9	10x5-1x1.4x4.5	2.06	3.8	2.4	1.4	0.1	3.7	5.5	-1.7	-	-		
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.13	4.3	2.4	1.9	1.3	3.1	5.8	-1.4	-	-		
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.09	4.3	2.4	1.9	1.5	2.8	5.5	-1.2	-	-		

Tabella 14. Valori del $LENI$ per le aule scolastiche situate idealmente a Milano

AULA			LENI – ROMA [kWh/m ² anno]									
RAI	Caso	FLD _m	MCC	MAS con FLD _m	Δ (MCC - MAS) FLD _m	MAS con FLD						
						1	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 1	2	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 2	3	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 3	
1/5	1	7x7-1x1.4x7	2.76	4.2	0.8	3.4	0.0	4.2	3.6	0.6	5.9	-1.7
	2	7x7-3x1.8x1.8	2.85	4.2	0.7	3.5	0.0	4.2	3.2	1.0	5.9	-1.7
	3	10x5-1x1.4x7	3.13	3.7	0.6	3.1	0.0	3.7	4.7	-0.9	-	-
	4	10x5-3x1.8x1.8	3.02	3.7	0.6	3.1	0.0	3.7	4.1	-0.4	-	-
	5	10x5-3x1.4x2.4	3.04	3.7	0.6	3.1	0.0	3.7	5.3	-1.6	-	-
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	2.00	4.5	2.0	2.5	0.0	4.5	5.5	-1.0	5.9	-1.4
	7	7x7-2x1.4x2.4	2.02	4.5	1.9	2.6	0.1	4.4	5.8	-1.3	5.9	-1.4
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.02	4.5	1.9	2.6	0.1	4.3	5.1	-0.6	5.9	-1.4
	9	10x5-1x1.4x4.5	2.06	3.7	1.8	2.0	0.0	3.7	5.8	-2.0	-	-
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.13	4.3	1.8	2.5	0.8	3.5	5.8	-1.5	-	-
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.09	4.3	1.8	2.5	0.9	3.4	5.8	-1.5	-	-

Tabella 15. Valori del LENI per le aule scolastiche situate idealmente a Roma

AULA			LENI – PALERMO [kWh/m ² anno]									
RAI	Caso	FLD _m	MCC	MAS con FLD _m	Δ (MCC - MAS) FLD _m	MAS con FLD						
						1	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 1	2	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 2	3	Δ (MCC - MAS) FLD Punto 3	
1/5	1	7x7-1x1.4x7	2.76	4.2	0.6	3.5	0.0	4.2	3.3	0.9	5.9	-1.7
	2	7x7-3x1.8x1.8	2.85	4.2	0.5	3.7	0.0	4.2	2.3	1.9	5.9	-1.7
	3	10x5-1x1.4x7	3.13	3.7	0.4	3.3	0.0	3.7	4.1	-0.4	-	-
	4	10x5-3x1.8x1.8	3.02	3.7	0.4	3.3	0.0	3.7	3.8	-0.1	-	-
	5	10x5-3x1.4x2.4	3.04	3.7	0.4	3.3	0.0	3.7	4.8	-1.2	-	-
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	2.00	4.5	1.1	3.3	0.0	4.5	5.1	-0.7	5.9	-1.4
	7	7x7-2x1.4x2.4	2.02	4.5	1.1	3.3	0.0	4.5	5.7	-1.2	5.9	-1.4
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.02	4.5	1.1	3.3	0.0	4.5	4.5	-0.1	5.9	-1.4
	9	10x5-1x1.4x4.5	2.06	3.7	1.1	2.6	0.0	3.7	5.8	-2.1	-	-
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.13	4.3	1.0	3.3	0.6	3.6	5.8	-1.5	-	-
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.09	4.3	1.0	3.2	0.6	3.6	5.8	-1.5	-	-

Tabella 16. Valori del LENI per le aule scolastiche situate idealmente a Palermo

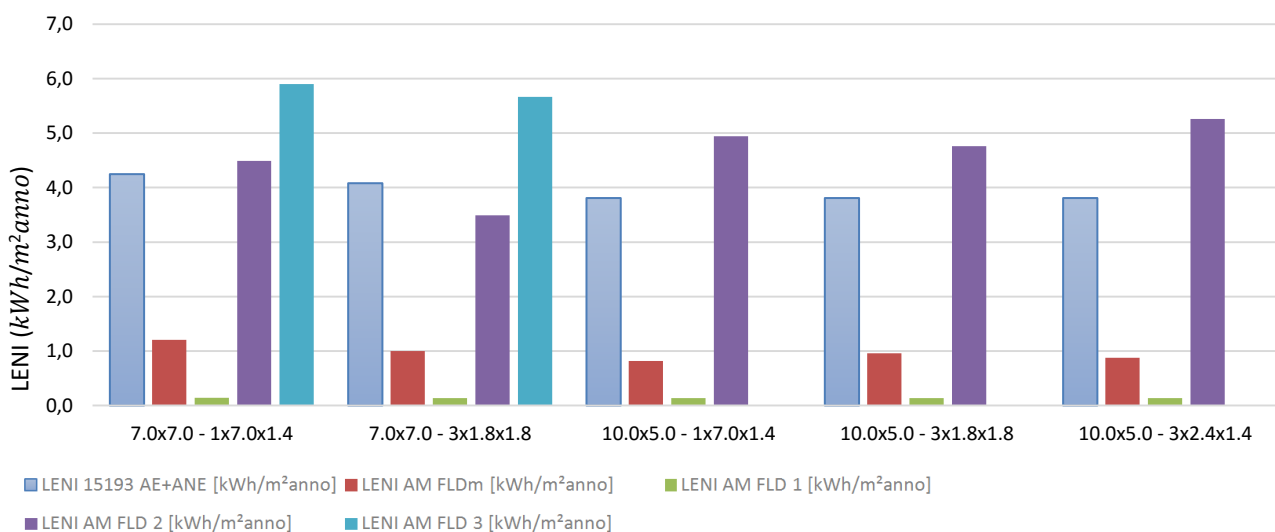


Figura 7. Confronto tra i valori del LENI per le aule scolastiche situate idealmente a Milano (RAI 1/5)

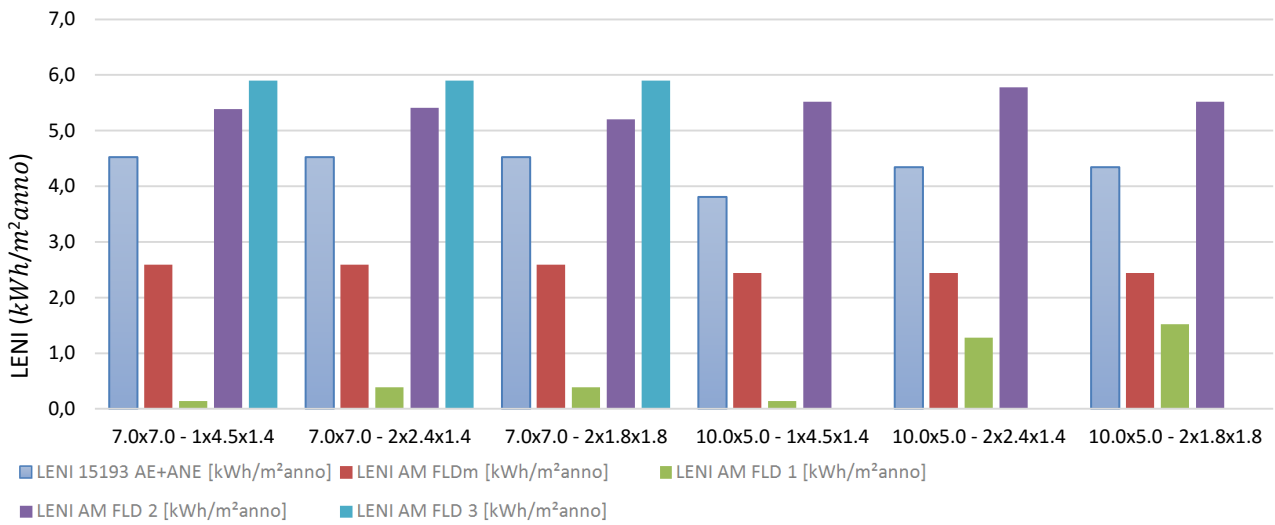


Figura 8. Confronto tra i valori del *LENI* per le aule scolastiche situate idealmente a Milano (RAI 1/8)

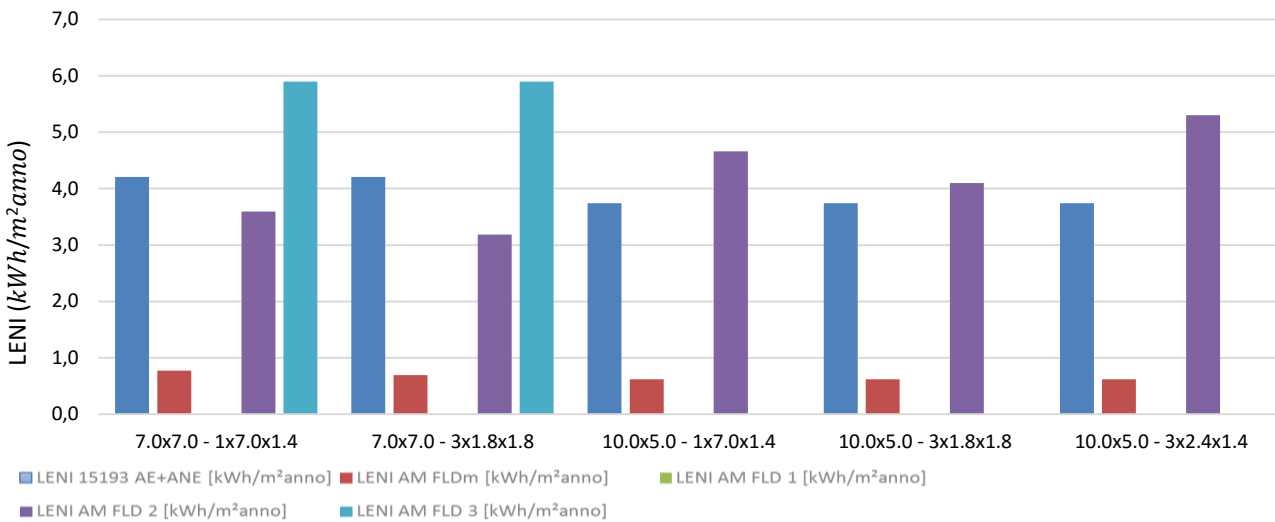


Figura 9. Confronto tra i valori del *LENI* per le aule scolastiche situate idealmente a Roma (RAI 1/5)

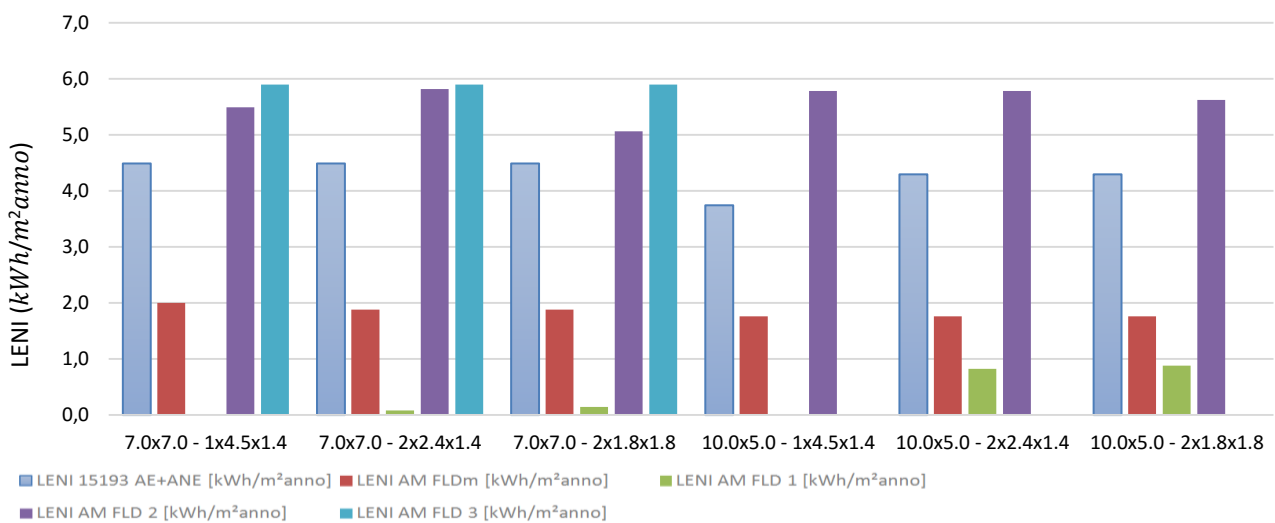


Figura 10. Confronto tra i valori del *LENI* per le aule scolastiche situate idealmente a Roma (RAI 1/8)

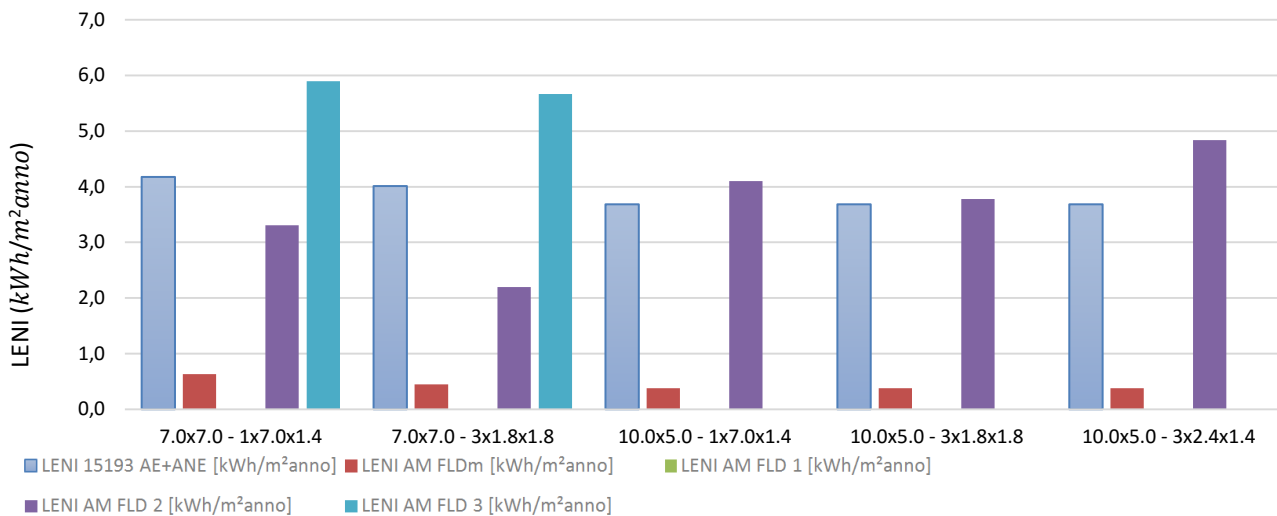


Figura 11. Confronto tra i valori del *LENI* per le aule scolastiche situate idealmente a Palermo (*RAI* 1/5)

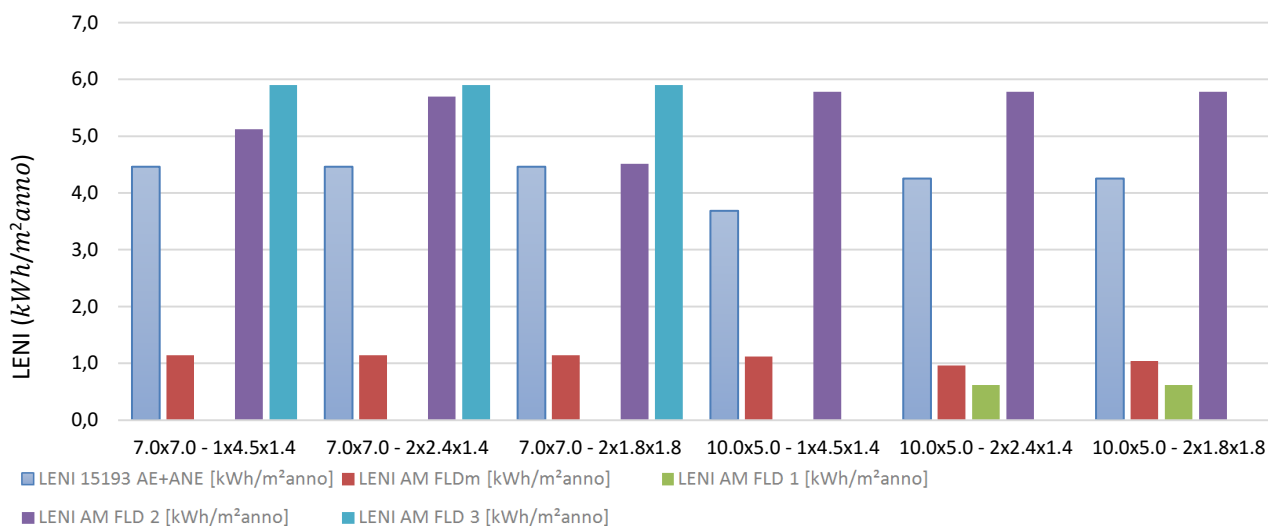


Figura 12. Confronto tra i valori del *LENI* per le aule scolastiche situate idealmente a Palermo (*RAI* 1/8)

Nelle aule i risultati ottenuti mostrano che il *LENI* calcolato con il metodo alternativo sulla base del *FLD_m* è sempre inferiore a quello calcolato secondo la norma.

Se si tiene in considerazione il *FLD* puntuale:

- quando il punto è molto vicino alle finestre (punto 1 distanza 1.2 m) il valore del *LENI* calcolato con il metodo alternativo è inferiore a quello da norma per tutte e tre le latitudini;
- con un *FLD* calcolato nel punto 2 (3.5 m dalla finestra), il valore del *LENI* calcolato con il metodo alternativo è invece quasi sempre superiore a quello da norma, ad eccezione di qualche caso che si verifica soprattutto al diminuire della latitudine (casi 1, 2, 4 e 8 a Palermo).
- con un *FLD* calcolato nel punto 3 (5.8 m dalla finestra), possibile solo in alcuni casi per la geometria dell'ambiente, il *LENI* del metodo alternativo è sempre superiore a quello calcolato da norma.

8.1.1 Analisi 1: comparazione tra i due *LENI* al variare della latitudine In questa analisi, per ognuno dei due metodi, sono messi a confronto i valori del *LENI* di ogni caso studio al variare della latitudine. Con il metodo alternativo il *LENI* è calcolato sulla base del *FLD_m*.

E' possibile notare che:

1. il *LENI* da norma non presenta sostanziali differenze: l'unica minima variazione si verifica nei casi evidenziati nella Tabella 17 dove è visibile una variazione pari a $0.1 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$, pari ad un incremento del 3%:

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO	Δ (MI-RM)	Δ (RM-PA)	Δ (MI-PA)
			UNI 15193	UNI 15193	UNI 15193			
1/5	1	7x7-1x1.4x7	4.2	4.2	4.2	-	-	-
	2	7x7-3x1.8x1.8	4.2	4.2	4.2	-	-	-
	3	10x5-1x1.4x7	3.8	3.7	3.7	3%	-	3%
	4	10x5-3x1.8x1.8	3.8	3.7	3.7	3%	-	3%
	5	10x5-3x1.4x2.4	3.8	3.7	3.7	3%	-	3%
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	4.5	4.5	4.5	-	-	-
	7	7x7-2x1.4x2.4	4.5	4.5	4.5	-	-	-
	8	7x7-2x1.8x1.8	4.5	4.5	4.5	-	-	-
	9	10x5-1x1.4x4.5	3.8	3.7	3.7	3%	-	3%
	10	10x5-2x1.4x2.4	4.3	4.3	4.3	-	-	-
	11	10x5-2x1.8x1.8	4.3	4.3	4.3	-	-	-

Tabella 17. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo normativo al variare della latitudine.

2. Con il metodo alternativo le differenze tra i valori del *LENI* dovute alla latitudine sono più evidenti: nei casi analizzati esso decresce proporzionalmente al diminuire della latitudine, sia se calcolato sulla base del FLD_m che se calcolato con il FLD puntuale. Nella tabella 18 sono riportati solo i valori del *LENI* calcolati a partire dal FLD_m dove si registrano variazioni minime di $0.4 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ e massime di $1.5 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$. Gli incrementi in percentuale risultano evidentemente più marcati tra Palermo e Milano con un massimo del 150%. Gli incrementi minori li abbiamo tra Roma e Milano, dove il massimo è del 67%.

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO	Δ (MI-RM)	Δ (RM-PA)	Δ (MI-PA)
			AM con FLD_m	AM con FLD_m	AM con FLD_m			
1/5	1	7x7-1x1.4x7	1.2	0.8	0.6	50%	33%	100%
	2	7x7-3x1.8x1.8	1	0.7	0.5	43%	40%	100%
	3	10x5-1x1.4x7	0.8	0.6	0.4	33%	50%	100%
	4	10x5-3x1.8x1.8	1	0.6	0.4	67%	50%	150%
	5	10x5-3x1.4x2.4	0.9	0.6	0.4	50%	50%	125%
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	2.6	2	1.1	30%	82%	136%
	7	7x7-2x1.4x2.4	2.6	1.9	1.1	37%	73%	136%
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.6	1.9	1.1	37%	73%	136%
	9	10x5-1x1.4x4.5	2.4	1.8	1.1	33%	64%	118%
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.4	1.8	1	33%	80%	140%
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.4	1.8	1	33%	80%	140%

Tabella 18. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo al variare della latitudine sulla base del FLD_m

8.1.2 Analisi 2: comparazione tra i due *LENI* al variare della tipologia della finestra

In questa analisi sono messi a confronto per ogni metodo e per ogni latitudine i casi studio che presentano lo stesso RAI e le stesse dimensioni del locale ma differenti tipologie di finestre. Con il metodo alternativo il *LENI* è calcolato sulla base del FLD_m :

1. Con il metodo da norma non si registrano differenze al variare della geometria della finestra, ad eccezione dell'aula di 10 x 5 m (casi 9, 10, 11) con *RAI* 1/8 come nell'esempio mostrato nella tabella 19. La variazione è di 0.5 / 0.6 *kWh/m²anno*.

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			UNI 15193	UNI 15193	UNI 15193
1/5	1	7x7-1x1.4x7	4.2	4.2	4.2
	2	7x7-3x1.8x1.8	4.2	4.2	4.2
1/5	3	10x5-1x1.4x7	3.8	3.7	3.7
	4	10x5-3x1.8x1.8	3.8	3.7	3.7
	5	10x5-3x1.4x2.4	3.8	3.7	3.7
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	4.5	4.5	4.5
	7	7x7-2x1.4x2.4	4.5	4.5	4.5
	8	7x7-2x1.8x1.8	4.5	4.5	4.5
1/8	9	10x5-1x1.4x4.5	3.8	3.7	3.7
	10	10x5-2x1.4x2.4	4.3	4.3	4.3
	11	10x5-2x1.8x1.8	4.3	4.3	4.3

Tabella 19. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo normativo al variare della tipologia della finestra

2. Con il metodo alternativo, si registrano differenze nel valore del *LENI* al variare della geometria della finestra. Nella tabella 20 sono riportati solo i valori del *LENI* calcolati a partire dal FLD_m . Si può notare che, rispetto al metodo da norma, tali differenze sono presenti in più casi ma che le variazioni sono più contenute, comprese tra 0.1 e 0.2 *kWh/m²anno*.

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/5	1	7x7-1x1.4x7	1.2	0.8	0.6
	2	7x7-3x1.8x1.8	1	0.7	0.5

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/5	3	10x5-1x1.4x7	0.8	0.6	0.4
	4	10x5-3x1.8x1.8	1	0.6	0.4
	5	10x5-3x1.4x2.4	0.9	0.6	0.4

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	2.6	2	1.1
	7	7x7-2x1.4x2.4	2.6	1.9	1.1
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.6	1.9	1.1

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/8	9	10x5-1x1.4x4.5	2.4	1.8	1.1
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.4	1.8	1
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.4	1.8	1

Tabella 20. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo al variare della tipologia della finestra sulla base del FLD_m

8.1.3 Analisi 3: comparazione tra i due *LENI* al variare dei rapporti aeroilluminanti

In questa analisi, sono stati confrontati per ogni metodo i casi studio che presentano le stesse dimensioni del locale e le stesse tipologie di finestre ma differenti *RAI*. Con il metodo alternativo il *LENI* è calcolato sulla base del FLD_m .

1. Con il metodo da norma, come evidenziato in tabella 21, al variare dei rapporti si registrano minime differenze del *LENI* comprese tra 0.3 e 0.6 kWh/m^2 anno in tutti i casi fatta eccezione per l'aula di 10 x 5 m (casi 3 e 9). Gli incrementi sono in media dell'11%.

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			UNI 15193	UNI 15193	UNI 15193
1/5	1	7x7-1x1.4x7	4.2	4.2	4.2
1/8	6	7x7-1x1.4x4.5	4.5	4.5	4.5
		$\Delta (1/5-1/8)$	7%	7%	7%
1/5	2	7x7-3x1.8x1.8	4.2	4.2	4.2
1/8	8	7x7-2x1.8x1.8	4.5	4.5	4.5
		$\Delta (1/5-1/8)$	7%	7%	7%
1/5	3	10x5-1x1.4x7	3.8	3.7	3.7
1/8	9	10x5-1x1.4x4.5	3.8	3.7	3.7
		$\Delta (1/5-1/8)$	-	-	-
1/5	4	10x5-3x1.8x1.8	3.8	3.7	3.7
1/8	11	10x5-2x1.8x1.8	4.3	4.3	4.3
		$\Delta (1/5-1/8)$	13%	16%	16%
1/5	5	10x5-3x1.4x2.4	3.8	3.7	3.7
1/8	10	10x5-2x1.4x2.4	4.3	4.3	4.3
		$\Delta (1/5-1/8)$	13%	16%	16%

Tabella 21. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo normativo al variare dei rapporti aeroilluminanti

2. Nel metodo alternativo le differenze del *LENI* risultano essere molto maggiori: come evidenziato in tabella 22, si registrano variazioni comprese tra 0.5 e 1.6 kWh/m²anno. Gli incrementi sono in media del 159%.

RAI	CASO	AULA	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/5	1	7x7-1x1.4x7	1.2	0.8	0.6
	6	7x7-1x1.4x4.5	2.6	2	1.1
Δ (1/5-1/8)			117%	150%	83%
1/5	2	7x7-3x1.8x1.8	1	0.7	0.5
	8	7x7-2x1.8x1.8	2.6	1.9	1.1
Δ (1/5-1/8)			160%	171%	120%
1/5	3	10x5-1x1.4x7	0.8	0.6	0.4
	9	10x5-1x1.4x4.5	2.4	1.8	1.1
Δ (1/5-1/8)			200%	200%	175%
1/5	4	10x5-3x1.8x1.8	1	0.6	0.4
	11	10x5-2x1.8x1.8	2.4	1.8	1
Δ (1/5-1/8)			140%	200%	150%
1/5	5	10x5-3x1.4x2.4	0.9	0.6	0.4
	10	10x5-2x1.4x2.4	2.4	1.8	1
Δ (1/5-1/8)			167%	200%	150%

Tabella 22. Aule scolastiche - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo al variare dei rapporti aeroilluminanti sulla base del *FLD_m*

8.2 Uffici

Nelle tabelle 23, 24 e 25 e nelle figure 13, 14 e 15 sono riportati i valori del *LENI* ottenuti con il metodo normativo e con il metodo alternativo, sia sulla base del *FLD_m* che sulla base dei *FLD* puntuali, per ognuna delle tre località.

UFFICIO			<i>LENI</i> - MILANO											
RAI	Caso	<i>FLD_m</i>	<i>MCC</i>	<i>MAs</i> con <i>FLD_m</i>	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD_m</i>	<i>MAs</i> con <i>FLD</i>								
						1	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.1	2	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.2	3	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.3	4	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.4	
1/5	1	3.5x4-1x1.4x2	3.32	9.6	4.3	5.3	1.6	8.0	7.9	1.7	11.1	-1.6	-	-
	2	3.5x6-1x1.4x3	2.80	10.3	5.8	4.5	1.1	9.2	5.3	5.0	11.1	-0.8	11.1	-0.8
1/8	3	3.5x4-1x1.4x1.3	2.24	10.4	8	2.4	2.1	8.3	5.3	-0.8	11.1	-0.8	-	-
	4	3.5x6-1x1.4x1.9	1.96	10.7	9.4	1.3	1.6	9.0	8.3	2.3	11.1	-0.4	11.1	-0.4

Tabella 23. Calcolo del *LENI* per gli uffici situati idealmente a Milano

UFFICIO			<i>LENI</i> - ROMA											
RAI	Caso	<i>FLD_m</i>	<i>MCC</i>	<i>MAs</i> con <i>FLD_m</i>	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD_m</i>	<i>MAs</i> con <i>FLD</i>								
						1	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.1	2	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.2	3	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.3	4	Δ (<i>MCC</i> - <i>MAs</i>) <i>FLD</i> P.4	
1/5	1	3.5x4-1x1.4x2	3.32	9.5	3.7	5.8	1.1	8.4	7.5	2.0	11.1	-1.7	-	-
	2	3.5x6-1x1.4x3	2.80	10.2	5.4	4.8	0.8	9.4	4.7	5.6	11.1	-0.8	11.1	-0.8
1/8	3	3.5x4-1x1.4x1.3	2.24	10.3	7.7	2.6	1.7	8.7	11.1	-0.8	11.1	-0.8	-	-
	4	3.5x6-1x1.4x1.9	1.96	10.7	10.1	0.6	1.1	9.6	8.7	2.0	11.1	-0.4	11.1	-0.4

Tabella 24. Calcolo del *LENI* per gli uffici situati idealmente a Roma

UFFICIO			LENI - PALERMO												
RAI	Caso	FLD _m	MCC	MAS con FLD _m	Δ (MCC - MAS) FLD _m	MAS con FLD									
						1	Δ (MCC - MAS) FLD P.1	2	Δ (MCC - MAS) FLD P.2	3	Δ (MCC - MAS) FLD P.3	4	Δ (MCC - MAS) FLD P.4		
1/5	1	3.5x4-1x1.4x2	3.32	9.4	2.7	6.7	0.8	8.5	7.0	2.3	11.1	-1.8	-	-	
	2	3.5x6-1x1.4x3	2.80	10.2	4.2	6	0.7	9.5	3.7	6.5	11.1	-0.9	11.1	-0.9	
1/8	3	3.5x4-1x1.4x1.3	2.24	10.3	7.2	3.1	1.4	8.9	11.1	-0.9	11.1	-0.9	-	-	
	4	3.5x6-1x1.4x1.9	1.96	10.6	9.2	1.4	1.0	9.6	8.2	2.4	11.1	-0.4	11.1	-0.4	

Tabella 25. Calcolo del LENI per gli uffici situati idealmente a Palermo

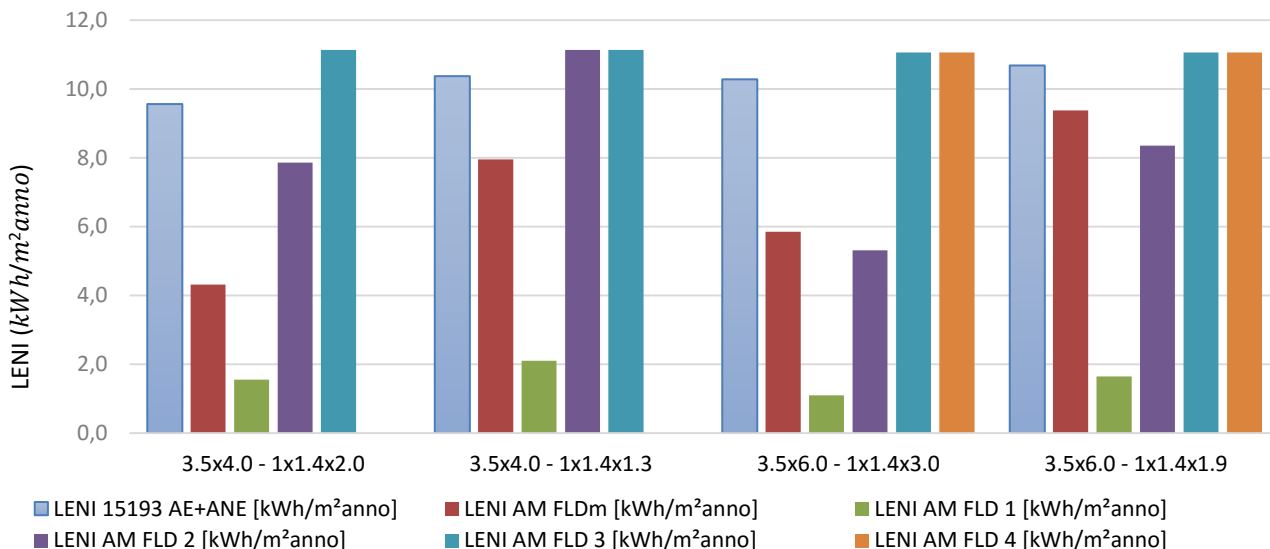


Figura 13. Confronto tra i valori del LENI per gli uffici situati idealmente a Milano

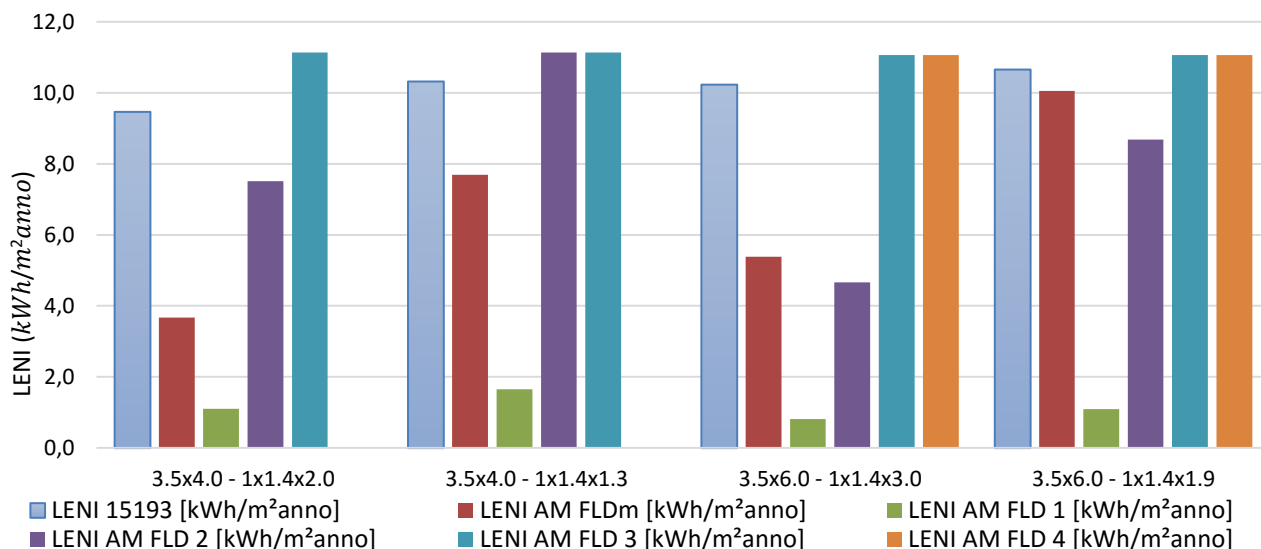


Figura 14. Confronto tra i valori del LENI per gli uffici situati idealmente a Roma

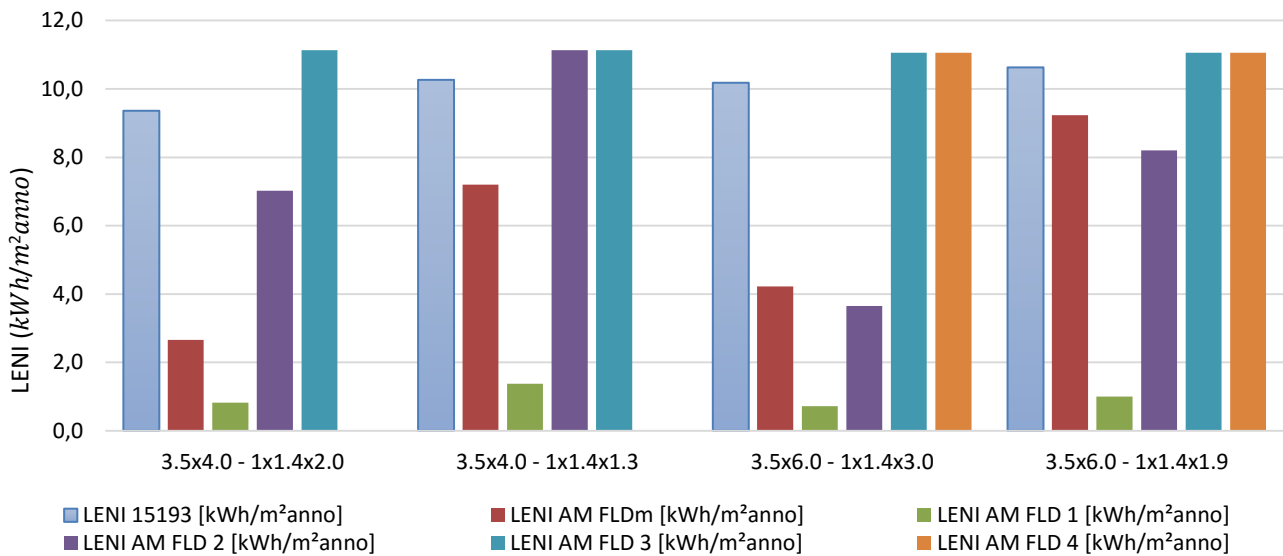


Figura 15. Confronto tra i valori del *LENI* per gli uffici situati idealmente a Palermo

Come per le aule, anche nel caso degli uffici il *LENI* calcolato con il metodo alternativo sulla base del FLD_m è sempre inferiore a quello calcolato secondo la norma.

Se si tiene in considerazione il *FLD* puntuale, è possibile constatare che:

- quando il punto è molto vicino alle finestre (punto 1 distanza 1 m) il valore del *LENI* con il metodo alternativo è inferiore a quello da norma per tutte e tre le latitudini.
- con un *FLD* calcolato nel punto 2 (2 m dalla finestra), il valore del *LENI* con il metodo alternativo è inferiore a quello da norma in tutti i casi ad eccezione del caso 3;
- nei punti 3 e 4, distanti rispettivamente 3 e 4 m dalle finestre, il *LENI* calcolato con il metodo alternativo è sempre superiore a quello da norma.

8.2.1 Analisi 1: comparazione tra i due *LENI* al variare della latitudine

Effettuando anche per gli uffici un'analisi dei risultati in funzione della latitudine è possibile notare che:

1. A differenza delle aule, il *LENI* da norma subisce delle variazioni in ognuno dei casi analizzati come visibile nella tabella 26. Questa variazione è dovuta al fatto che gli orari operativi in questo caso sono molto più estesi (8 - 18). Le variazioni in ogni caso sono poco significative, nell'ordine di 0.1 - 0.2 kWh/m²anno, con un incremento che raggiunge al massimo il 2%.

UFFICIO	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO	Δ (MI-RM)	Δ (RM-PA)	Δ (MI-PA)
	UNI 15193	UNI 15193	UNI 15193			
3.5x4-1x1.4x2	9.6	9.5	9.4	1%	1%	2%
3.5x6-1x1.4x3	10.3	10.2	10.2	1%	0%	1%
3.5x4-1x1.4x1.3	10.4	10.3	10.3	1%	0%	1%
3.5x6-1x1.4x1.9	10.7	10.7	10.6	0%	1%	1%

Tabella 26. Uffici - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo normativo al variare della latitudine

2. Con il metodo alternativo, nei casi da noi analizzati, si evidenzia che il *LENI* calcolato sia sulla base del FLD_m che sulla base del *FLD* puntuale, decresce proporzionalmente ed in modo più sostanziale al diminuire della latitudine in ogni ambiente ad eccezione del caso 4: infatti il *LENI* alternativo di Roma in questo caso è maggiore di quello di Milano. Questo risultato è legato alla combinazione di più variabili, come gli orari operativi, i dati climatici di riferimento, i livelli di illuminamento nell'area

de compito. Nella tabella 27 sono riportati solo i valori del *LENI* calcolati a partire dal FLD_m in cui si registrano variazioni comprese tra 0.2 e 1.6 kWh/m^2 anno. Gli incrementi maggiori si registrano tra Palermo e Milano dove raggiungono anche il 59%. Tra Palermo e Roma l'incremento massimo è del 37%, tra Roma e Milano del 16%.

UFFICIO	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO	Δ (MI-RM)	Δ (RM-PA)	Δ (MI-PA)
	AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm			
3.5x4-1x1.4x2	4.3	3.7	2.7	16%	37%	59%
3.5x6-1x1.4x3	5.8	5.4	4.2	7%	29%	38%
3.5x4-1x1.4x1.3	8	7.7	7.2	4%	7%	11%
3.5x6-1x1.4x1.9	9.4	10.1	9.2	-7%	10%	2%

Tabella 27. Uffici - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo al variare della latitudine sulla base del FLD_m

8.2.2 Analisi 2: comparazione tra i due *LENI* al variare della tipologia della finestra

Non è possibile effettuare questo tipo di analisi nel caso degli uffici in quanto, a parità di *RAI* e dimensioni del locale, è stata considerata una sola tipologia di finestra.

8.2.3 Analisi 3: comparazione tra i due *LENI* al variare dei rapporti aeroilluminanti

Confrontando per ogni metodo i casi studio che presentano le stesse dimensioni del locale ma differenti *RAI*, è possibile notare che:

1. Come nelle aule, con il metodo da norma si registrano minime differenze del *LENI*, comprese tra 0.4 e 0.9 kWh/m^2 anno (Tabella 28). Gli incrementi si attestano in media sul 7%.

RAI	CASO	UFFICI	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			UNI 15193	UNI 15193	UNI 15193
1/5	1	3.5x4-1x1.4x2	9.6	9.5	9.4
1/8	3	3.5x4-1x1.4x1.3	10.4	10.3	10.3
Δ (1/5-1/8)			8%	8%	10%
1/5	2	3.5x6-1x1.4x3	10.3	10.2	10.2
1/8	4	3.5x6-1x1.4x1.9	10.7	10.7	10.6
Δ (1/5-1/8)			4%	5%	4%

Tabella 28. Uffici - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo normativo al variare dei rapporti aeroilluminanti

2. Con il metodo alternativo, le differenze del *LENI* risultano essere molto maggiori, comprese tra 3.6 e 5 kWh/m^2 anno (Tabella 29). Gli incrementi si attestano in media sul 105%.

RAI	CASO	UFFICI	Leni MILANO	Leni ROMA	Leni PALERMO
			AM con FLDm	AM con FLDm	AM con FLDm
1/5	1	3.5x4-1x1.4x2	4.3	3.7	2.7
1/8	3	3.5x4-1x1.4x1.3	8	7.7	7.2
Δ (1/5-1/8)			86%	108%	167%
1/5	2	3.5x6-1x1.4x3	5.8	5.4	4.2
1/8	4	3.5x6-1x1.4x1.9	9.4	10.1	9.2
Δ (1/5-1/8)			62%	87%	119%

Tabella 29. Uffici - Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo al variare dei rapporti aeroilluminanti sulla base del *FLD_m*

Riassumendo, da tutti i risultati analizzati, si evince che:

1. Il metodo alternativo registra le variazioni di latitudine in modo più significativo rispetto alla norma;
2. Con il metodo alternativo al variare della tipologia della finestra, a parità di *RAI* e dimensioni del locale, le differenze del *LENI* sono presenti in più casi rispetto al metodo da norma ma sono meno consistenti. Questa considerazione è valida solo per le aule scolastiche dove è possibile che si verifichino queste condizioni;
3. Con il metodo alternativo al variare dei *RAI*, a parità di tipologia della finestra e di dimensioni del locale, si registrano differenze nei valori del *LENI* molto più marcate rispetto al metodo da norma.

Queste considerazioni confermano che, rispetto al metodo definito dalla norma, nel metodo alternativo il contributo dovuto all'illuminazione naturale ha un peso notevolmente maggiore.

9 *LENI* mensile

Un ulteriore approfondimento è stato effettuato su alcuni casi studio precedentemente descritti alla latitudine di Roma, per verificare come i due metodi (quello alternativo e quello da norma) possano descrivere l'andamento mensile del *LENI*.

La UNI EN 15193 permette di effettuare il calcolo del *LENI* per periodi diversi dell'anno come definito nella NOTA 1 paragrafo 4.1.1 ("L'energia totale per l'illuminazione può essere stimata per qualsiasi periodo *t* richiesto (orario, giornaliero, settimanale, mensile o annuale) in conformità con il periodo di tempo dei fattori di dipendenza utilizzati") e nella NOTA 1 paragrafo 6.2.2.2 (" $F_{D,n}$ può essere determinato per qualsiasi periodo di tempo (annuale, mensile oppure orario). È necessario che il fattore sia computato in base al periodo del tempo di funzionamento in luce diurna t_D ").

Questo può avvenire procedendo come indicato nella appendice C paragrafi 1 e 5: è necessario determinare il fattore di disponibilità di luce diurna $F_{D,S}$ del mese attraverso l'utilizzo del fattore di redistribuzione mensile $c_{D,S,n}$ (Prospetto C.10), preferibilmente utilizzando t_D e t_N specifici per ogni mese.

Il fattore $c_{D,S,n}$ tabellato è in funzione della latitudine e della classe di penetrazione della luce.

Non essendo presenti dati relativi alle latitudini utilizzate nel presente report, per il calcolo del *LENI* mensile a Roma con il metodo normativo, è stata operata un'interpolazione dei valori di $c_{D,S,n}$ tra le latitudini di Lione ed Atene.

In seguito, sulla base dei livelli di penetrazione diurna e dei valori di $F_{D,S}$ ed $F_{D,C}$ di ogni ambiente, sono stati calcolati i rispettivi F_D mensili con la formula:

$$F_{D,n} = 1 - (F_{D,S,n} \times F_{D,C,n} \times c_{D,S,n}) \quad (10)$$

Dopo aver inserito i valori di t_D e t_N mensili esatti, sono stati calcolati i conseguenti W_L nelle zone di luce diurna A_D e nelle zone prive di luce diurna A_{ND} che, sommati e divisi per l'area totale di ogni ambiente, hanno portato alla determinazione del *LENI* mensile.

Per quanto concerne il metodo alternativo è stato calcolato per ogni mese il numero di ore $t_{sat,giornaliere}$. Tale numero è stato poi moltiplicato per lo specifico numero dei giorni lavorativi di ogni mese per ottenere il valore di $t_{sat,mensile}$ da inserire nella formula (7) e conseguentemente ottenere i valori del *LENI* mensile. Il confronto tra i due metodi è possibile in quanto in entrambi vengono presi in considerazione i medesimi giorni lavorativi.

Nei grafici seguenti (Figure 16-19) sono mostrati i valori dei *LENI* mensili calcolati con i due metodi per le aule e per gli uffici localizzati idealmente a Roma. Per quanto riguarda le aule essendo i risultati tra loro molto simili, si è scelto di mostrare solamente quelli relativi a 4 casi (1, 3, 6, 10).

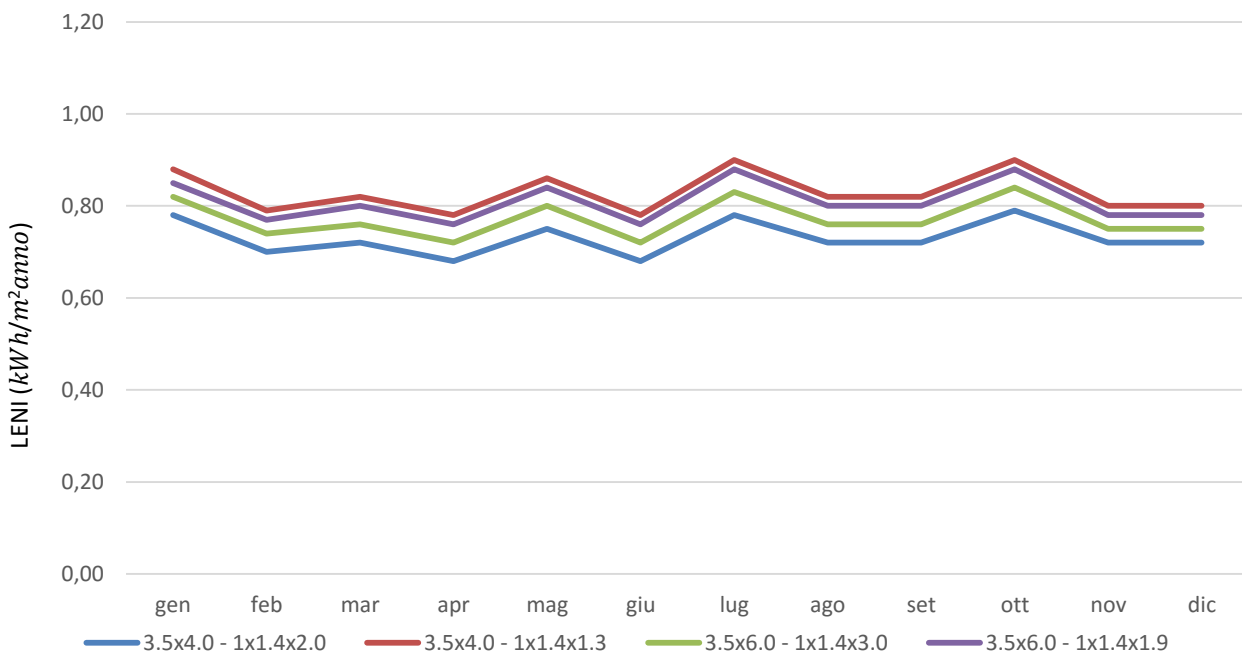


Figura 16. Uffici (ROMA) - *LENI* mensile calcolato con il Mcc

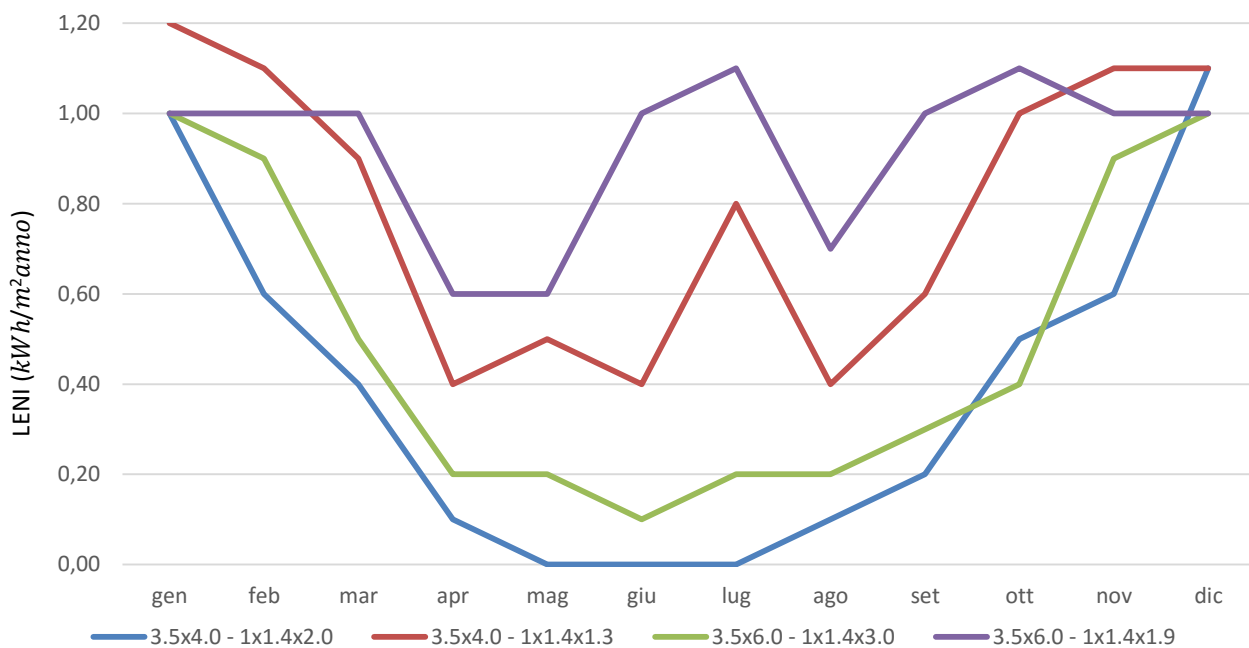


Figura 17. Uffici (Roma) - *LENI* mensile calcolato con il MAS

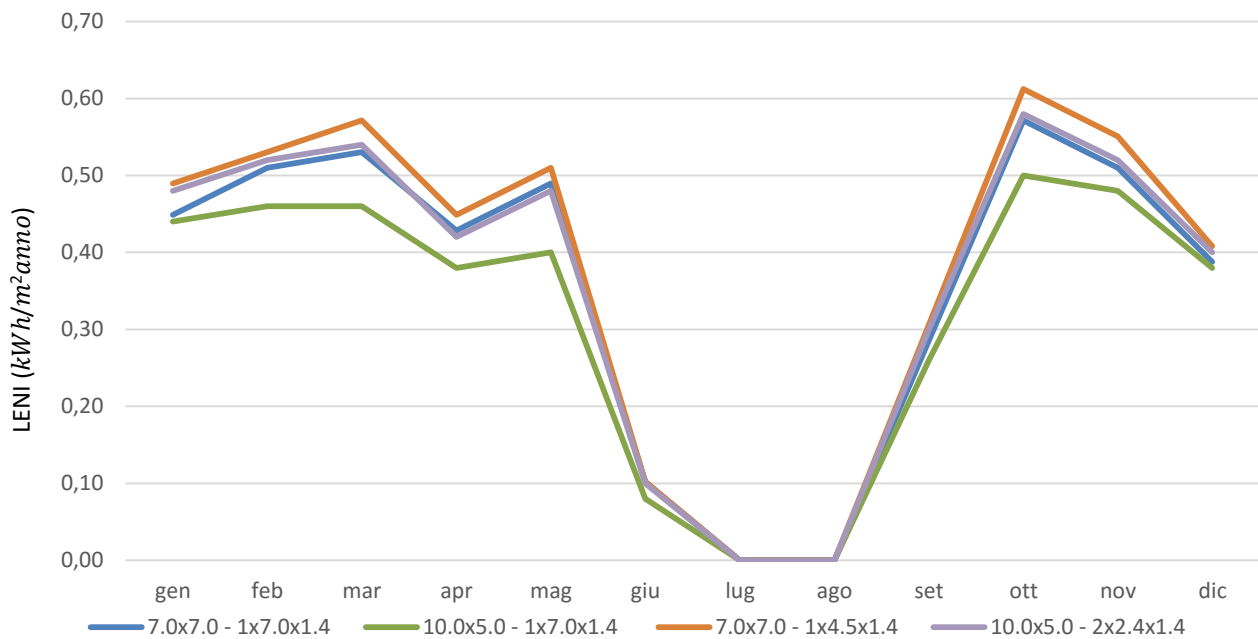


Figura 18. Aule scolastiche (Roma)- LENI mensile calcolato con il Mcc

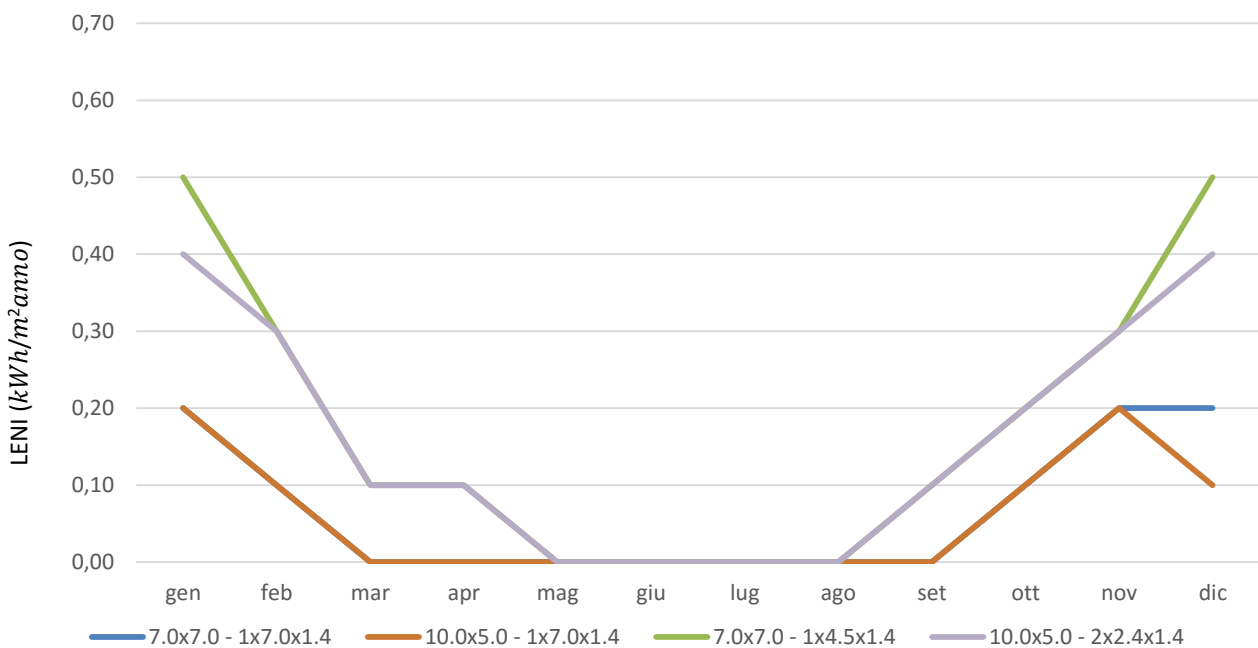


Figura 19. Aule scolastiche (Roma) - LENI mensile calcolato con il MAs

Nel metodo da norma possiamo notare che:

- negli uffici non si registrano sostanziali variazioni mensili;
- nelle aule l'andamento registra variazioni più consistenti esclusivamente in relazione al fatto che nei mesi estivi le attività sono ridotte o assenti.

I risultati con il metodo alternativo hanno un andamento del tutto differente rispetto a quello ottenuto con il metodo da norma. Ciò è dovuto al fatto che, nonostante i giorni e le ore lavorative mensili considerati siano gli stessi, il metodo alternativo registra le variazioni di illuminamento esterno determinando in alcuni casi un $t_{sat,mensile}$ pari a zero.

Ad esempio negli uffici possiamo notare che nel caso 1, il *LENI* nei mesi di maggio, giugno, luglio è zero a differenza del metodo da norma i cui corrispettivi valori di *LENI* sono rispettivamente 0.75, 0.68 e 0.78 come visibile nella tabella 30.

UFFICI <i>LENI</i> MENSILE <i>MCC</i>													
RI	Caso	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1/5	3.5x4.0 - 1x1.4x2.0	0,78	0,70	0,72	0,68	0,75	0,68	0,78	0,72	0,72	0,79	0,72	0,72
UFFICI <i>LENI</i> MENSILE <i>MAS</i>													
RI	Caso	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1/5	3.5x4.0 - 1x1.4x2.0	1,0	0,6	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,6	1,1

Tabella 30. Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo e con il metodo normativo per l'Ufficio Caso 1 (3.5 x 4.0 m – 1 x 1.4 x 2.0) localizzato a Roma

Nelle aule il *LENI* da norma è zero nei mesi di luglio ed agosto per via dell'assenza di attività, mentre il *LENI* calcolato con il metodo alternativo è zero da marzo a settembre quando abbiamo un *RAI* di 1/5, e da maggio ad agosto quando il *RAI* è di 1/8. Un esempio relativo all'aula Caso 1 è mostrato nella tabella 31.

AULE <i>LENI</i> MENSILE <i>MCC</i>													
RI	Caso	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1/5	7x7 - 1x1.4x7	0,45	0,51	0,53	0,43	0,49	0,1	0,0	0,0	0,29	0,57	0,51	0,39
AULE <i>LENI</i> MENSILE <i>MAS</i>													
RI	Caso	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1/5	7x7 - 1x1.4x7	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,2

Tabella 31. Comparazione dei valori del *LENI* calcolati con il metodo alternativo e con il metodo normativo per l'Aula Caso 1 (7 x 7 m – 1 x 1.4 x 7) localizzata a Roma

Da queste analisi emerge che il metodo alternativo, registrando in modo più precisa rispetto al metodo normativo le variazioni dei livelli di illuminamento esterno, permette di definire in modo più accurato il valore del *LENI* mensile per ogni tipologia di ambiente.

10 Valori del *LENI* con diverse tipologie di sorgenti luminose

In questo capitolo si presentano i dati del confronto tra i valori del *LENI* ottenuti utilizzando corpi illuminanti con sorgente a LED, esposti nel capitolo 8, con quelli ricavati usando corpi illuminanti con fluorescenti lineari T5 e T8.

Per le aule, i corpi illuminanti con le T5 sono 6 plafoniere da 63W (4 T5 da 14W) e 5000 lm (figura 20); i corpi illuminanti con le T8 sono invece 6 plafoniere da 69.5W (4 T8 da 18W) e 5400 lm (figura. 21).

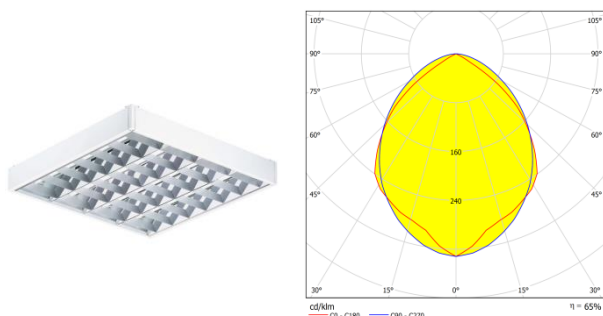


Figura 20. Corpo illuminante previsto nelle aule e relativa curva fotometrica con sorgente T5

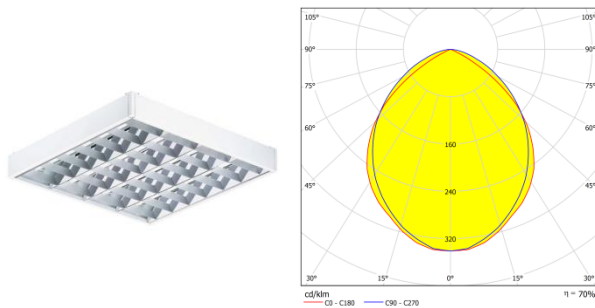


Figura 21. Corpo illuminante previsto nelle aule e relativa curva fotometrica con sorgente T8

Tutti gli apparecchi hanno in comune dimensione, orientamento e posizione di installazione. Con tutti i corpi illuminanti sono sempre rispettate le prescrizioni imposte dalla UNI EN 12464-1 sia in termini di \bar{E}_m che di l'uniformità orizzontale (U_0), come riportato nella tabella 32:

n. di riferimento	Tipo di zona, compito visivo	\bar{E}_m [lux]	U_0
5.36.1	Aule scolastiche	300	0,60

Tabella 32. Requisiti di illuminazione per zone interne, compiti e attività (UNI EN 12464-1 – 5.3)

Dovendo rispettare i requisiti previsti dalla UNI EN 12464-1, negli uffici non è stato possibile utilizzare gli stessi corpi illuminanti in tutti gli ambienti e quindi effettuare dei confronti tra i valori del *LENI*.

Si è scelto di effettuare il calcolo per una sola località (Milano) in quanto, essendo il *LENI* proporzionale alla potenza installata, il rapporto tra le diverse sorgenti luminose rimane il medesimo anche per le altre località prese in esame. Nella figura 22 sono riportati i risultati relativi alle aule.

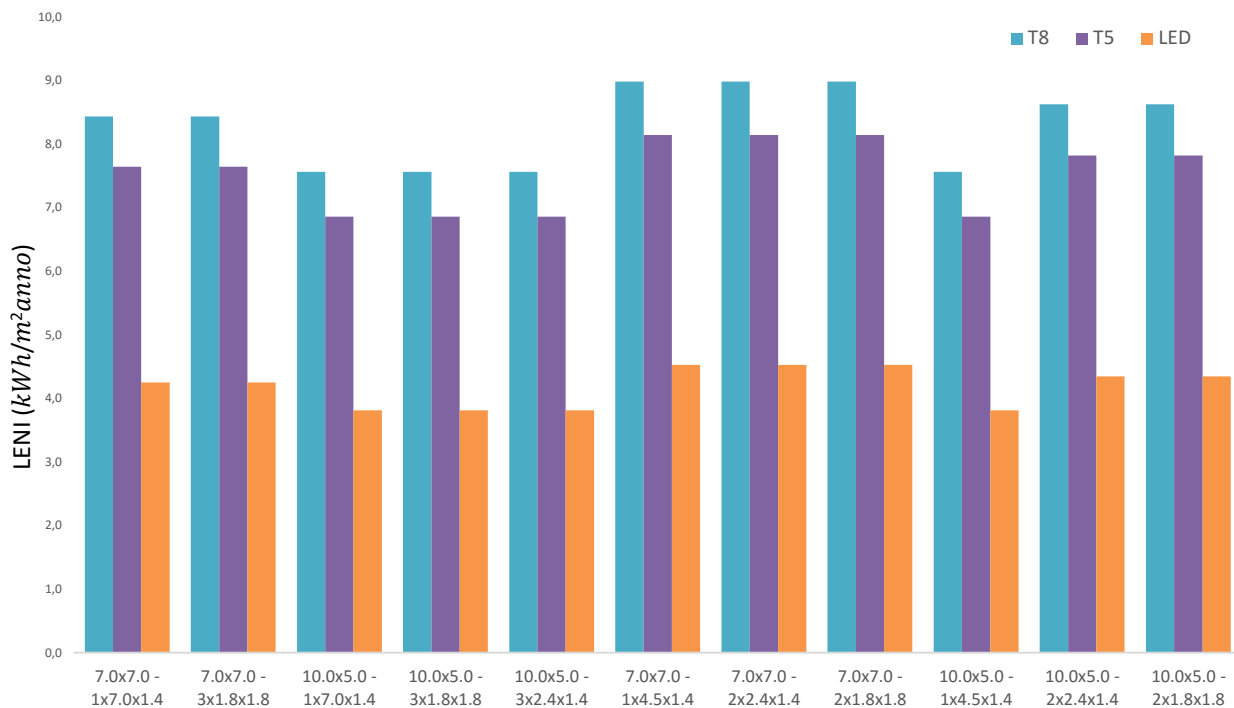


Figura 22. Confronto tra i valori del *LENI* nelle stesse aule scolastiche a Milano, con sorgenti luminose differenti.

Per le aule scolastiche, il *LENI* calcolato con sorgenti T5 è il 91% di quello calcolato con sorgenti T8. Il *LENI* calcolato con i LED è il 56% di quello con sorgenti T5 ed il 50% di quello con sorgenti T8. I casi presi in esame non possono essere considerati indicativi per l'intera categoria di ambienti o zone con il medesimo compito. Inoltre le innumerevoli tipologie di corpi illuminanti e le varie tipologie di lampade permetterebbero di realizzare diverse combinazioni per lo stesso progetto illuminotecnico. Come precedentemente dichiarato, nelle prove effettuate si è cercato di mantenere dimensioni, orientamento e posizione di installazione dei corpi illuminanti a LED; questo però non sempre ha però rappresentato il miglior progetto illuminotecnico realizzabile, in quanto in alcuni casi, i livelli di illuminamento sono risultati molto superiori a quelli previsti dalla UNI EN 12464-1.

11 Confronto tra i vari metodi di calcolo del *LENI*

Un ulteriore approfondimento è stato effettuato confrontando tra loro tutti i metodi con i quali è possibile calcolare i valori del *LENI*. Questa comparazione è stata eseguita su due aule e due uffici di uguali dimensioni ma con differenti *RAI* (1/5 ed 1/8). I dati sono stati ottenuti attraverso:

1. *MS*: il metodo semplificato su base annuale secondo la UNI EN 15193 (con questo metodo alle diverse variabili vengono assegnati valori precalcolati presenti nei prospetti delle appendici della norma);
2. *MCp*: il metodo completo su base annuale secondo la UNI EN 15193, con t_D e t_N indicati nel prospetto G.1 della norma;
3. *MCC*: il metodo completo su base annuale secondo la UNI EN 15193, con t_D e t_N calcolati su base nazionale su un anno tipo (facendo riferimento agli orari di alba e tramonto delle specifiche località esaminate);
4. *MAs*: il metodo alternativo su base annuale, calcolando t_{sat} servendosi dei dati di illuminamento esterno provenienti dal database di satel-light.com;
MAD: il metodo alternativo su base annuale, calcolando le ore di utilizzo dell'impianto di illuminazione artificiale servendosi dei diagrammi di Dresler (si è impiegato il foglio di calcolo compilato per questa ricerca). Il confronto con questo metodo è stato effettuato per le sole aule, in quanto le fasce orarie di occupazione degli ambienti secondo i diagrammi di Dresler, differenti da quelle che sono state utilizzate per gli uffici: è possibile effettuare analisi solo tra 6.00 - 18.00, 7.00 - 17.00, 8.00 - 16.00, 7.00 - 15.00 (le percentuali di disponibilità di luce diurna per questa ultima fascia oraria hanno validità anche nella fascia 9.00 - 17.00).

I diagrammi di Dresler presentano una ulteriore limitazione data dal fatto che i livelli di illuminamento massimi esterni devono essere inferiori a 15000 lux.

I diagrammi di Dresler (figura 23) permettono di ottenere la percentuale di ore di disponibilità di luce diurna partendo dalla definizione della latitudine della località presa in considerazione, del livello di illuminamento esterno e della fascia oraria di utilizzo dell'ambiente. Si è proceduto seguendo questi passaggi:

- sui diagrammi è stata individuata sulle ascisse la latitudine delle tre località analizzate (Milano 45.5°, Roma 41.9°, Palermo 38.1°) e sulle ordinate il livello di illuminamento esterno per cui, definito il FLD_m dell'ambiente esaminato, viene garantito il livello di illuminamento interno previsto per il compito;
- i punti così individuati intercettano le curve che indicano il dato percentuale di disponibilità di luce diurna a seconda della fascia oraria di occupazione dell'ambiente. Il valore percentuale che corrisponde alle ore di non disponibilità di luce diurna, è stato moltiplicato per t_D di un anno e poi sommato all'eventuale t_N (usando le ore calcolate su base nazionale). Questo totale ($t_{Dresler}$) è stato inserito nella formula (7) sostituendolo a t_{sat} :

$$W_{LDresler} = \sum(P_n \cdot F_C \cdot t_{Dresler} \cdot F_O) / 1000 [kWh/anno] \quad (11)$$

- si è calcolato il *LENI* dividendo $W_{LDresler}$ per la superficie dell'ambiente preso in esame.

percentuali orarie annue di
disponibilità di luce diurna

fasce orarie

75	70	65	60	50	40	6-18
95	85	75	65	55	45	7-17
100	100	95	85	70	60	8-16
75	70	65	60	50	40	7-15/9-17

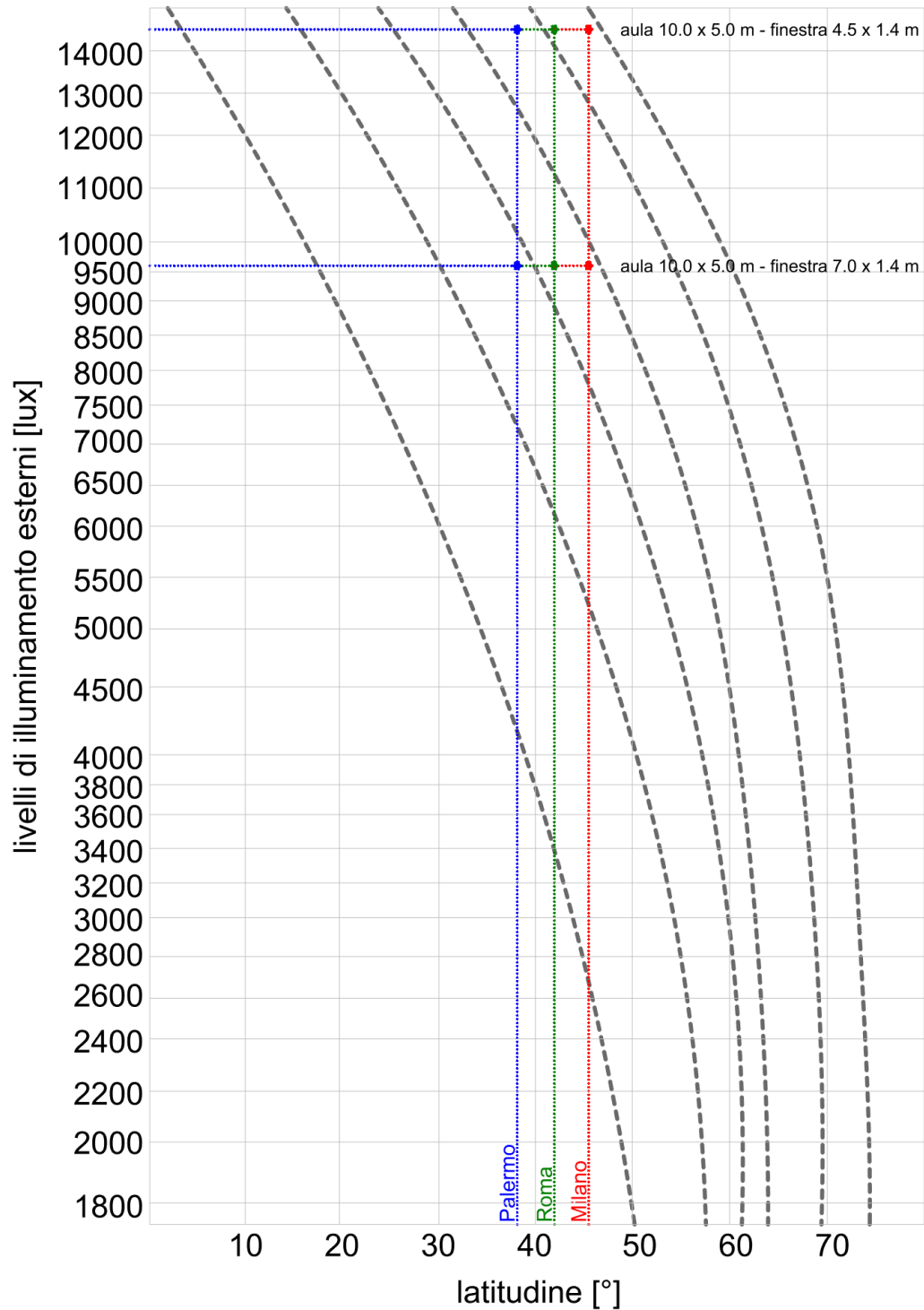


Figura 23. Diagrammi di Dresler con indicazione della latitudine delle tre località prese in esame

11.1 Aule

I risultati ottenuti analizzando le due aule sono riportati nelle figure 24 e 25:

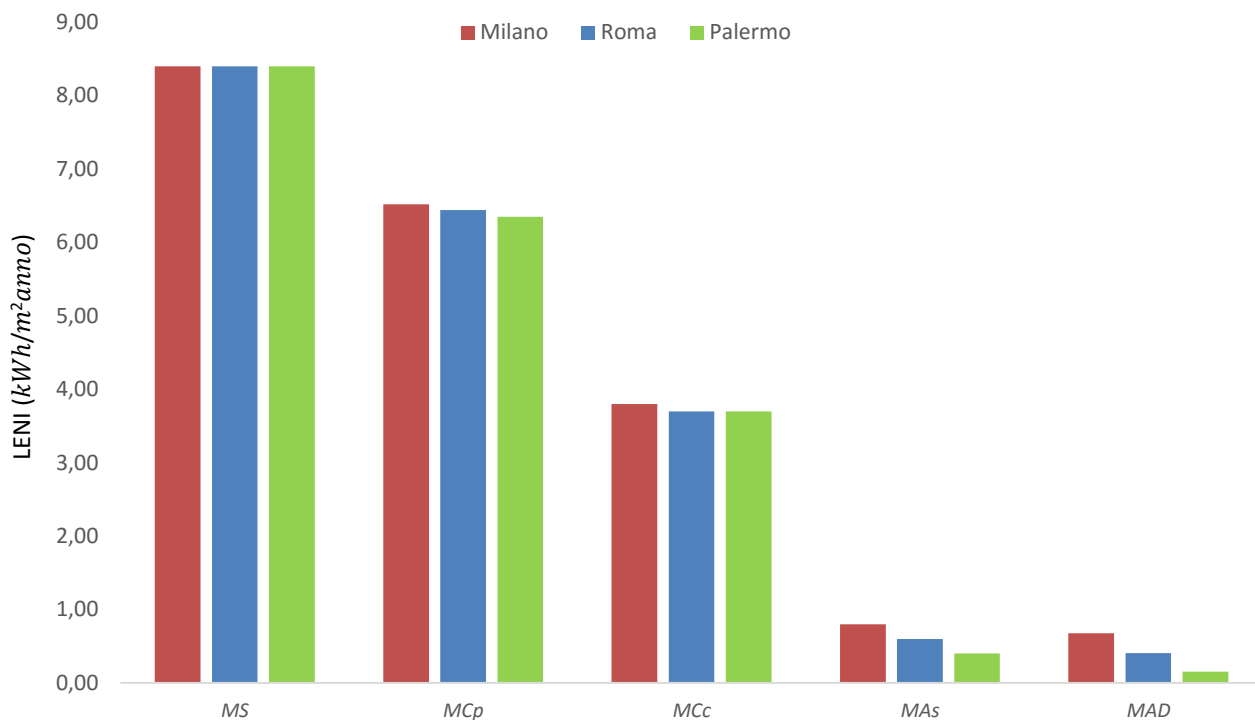


Figura 24. Confronto tra diversi metodi di calcolo del *LENI* - aula 10.0 x 5.0 m con una finestra a nastro di dimensione 7.0 x 1.4 m, *RAI* 1/5, calcolato per \bar{E}_m di 300 lux.

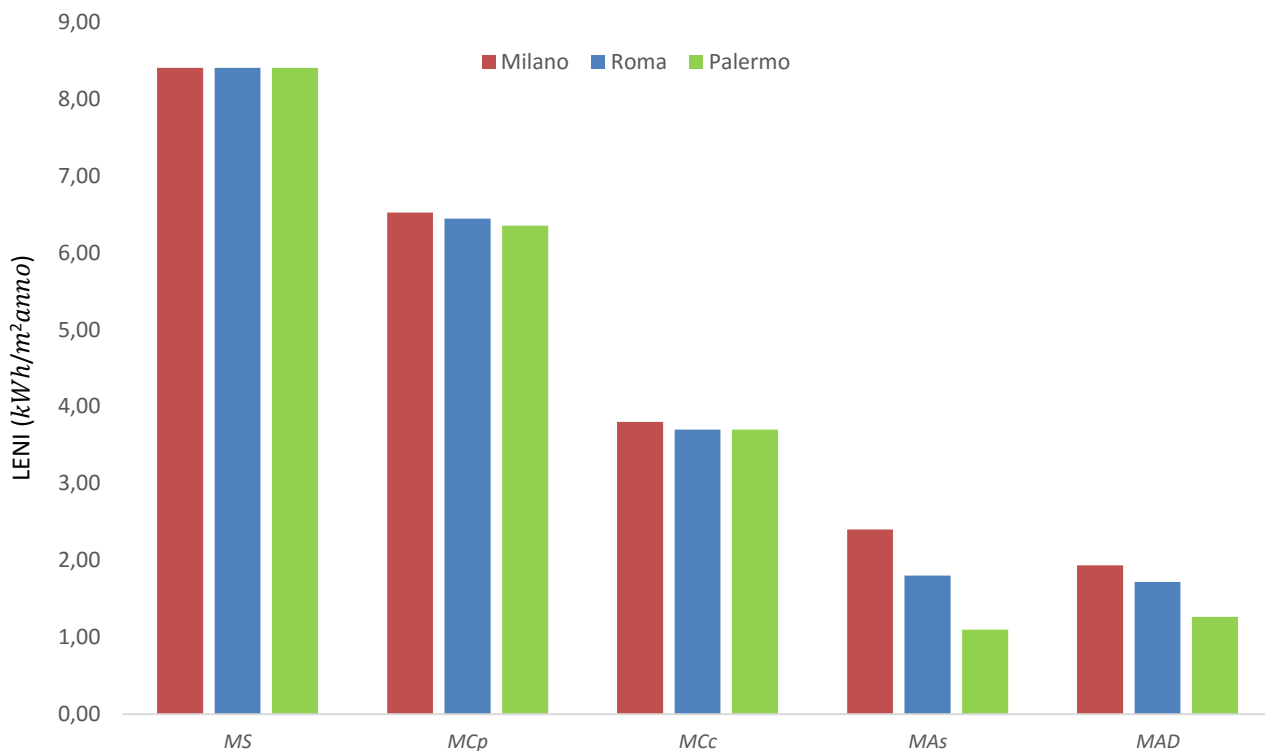


Figura 25. Confronto tra diversi metodi di calcolo del *LENI* - aula 10.0 x 5.0 m con una finestra a nastro di dimensione 4.5 x 1.4 m, *RAI* 1/8, calcolato per \bar{E}_m di 300 lux

Il confronto fra i metodi è stato effettuato utilizzando il valore medio tra gli incrementi delle tre località che risultano non essere molto differenti tra loro (Tabella 33).

Le differenze tra il *MAD* ed il *MAs* sono in valore assoluto insignificanti: in media $0.19 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/5* e $0.13 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/8*. Questo primo confronto confermerebbe l'attendibilità del database di *satel-light.com*.

L'incremento del *MAs* rispetto all'*MCc* è in media $3.1 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/5* e $2 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/8*. Se il confronto avviene invece con l'*MCp*, l'incremento è in media $5.8 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/5* e $4.7 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/8*. Gli incrementi maggiori ottenuti tra il *MAs* e l'*MCp* rispetto a quelli tra il *MAs* e l'*MCc* come, dimostrano che nel caso delle aule analizzate, il numero annuale delle ore operative indicate nel prospetto della norma non è preciso.

Rispetto all'*MS* si possono raggiungere incrementi superiori, in media pari a $7.8 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/5* e $6.6 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per *RAI 1/8*.

Questo conferma l'inattendibilità del *MS* che non considera in alcun modo il contributo della luce naturale (F_D sempre uguale ad 1) oltre ad operare diverse altre approssimazioni.

Differenze di LENI tra metodi da norma e metodo alternativo - valori medi per le tre località [kWh / m2anno]				
	AULA 10.0x5.0 - 1x7x1.4 - RAI 1/5		AULA 10.0x5.0 - 1x4.5x1.4 - RAI 1/8	
Mas-MAD	0.2	46%	0.13	8%
MCc-Mas	3.1	522%	1.97	111%
MCp-Mas	5.8	973%	4.67	264%
MS-Mas	7.8	1300%	6.63	375%

Tabella 33. Confronto tra diversi metodi di calcolo del *LENI* - aula 10.0 x 5.0 m con *RAI 1/5* e *1/8*, calcolato per \bar{E}_m di 300 lux

11.2 Uffici

I risultati ottenuti analizzando i due uffici sono riportati nelle figure 26 e 27:

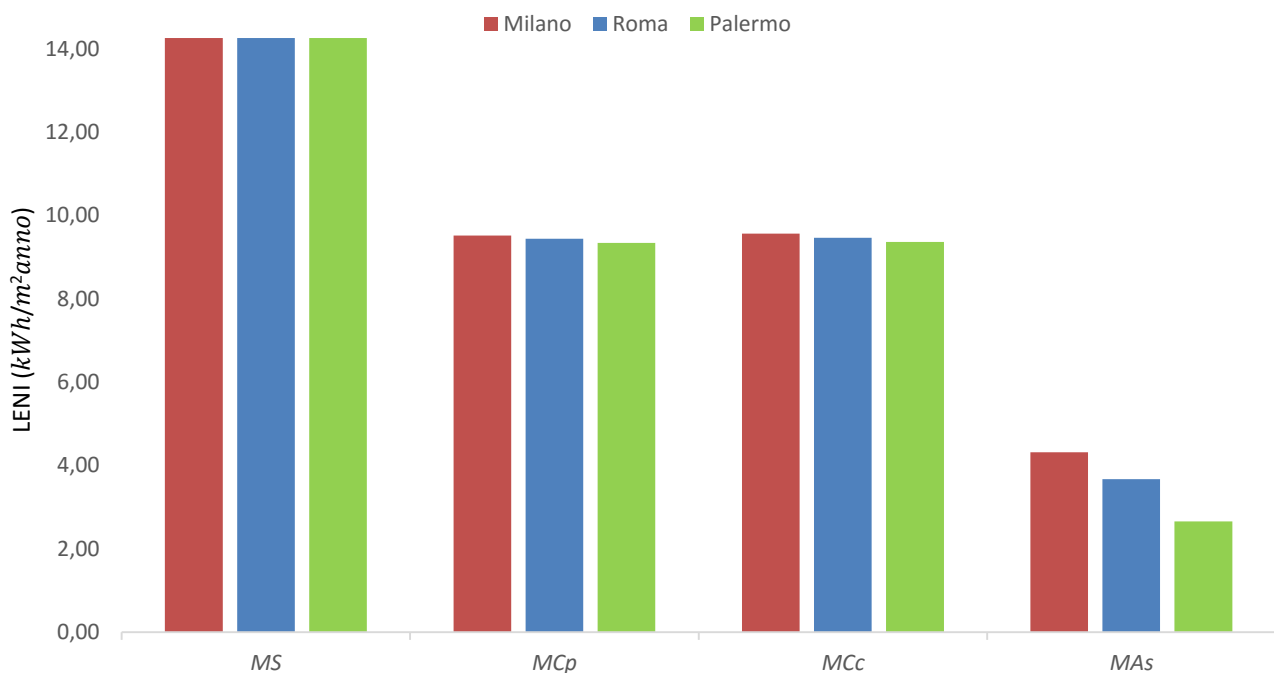


Figura 26. Confronto tra diversi metodi di calcolo *LENI* - ufficio 3.5 x 4.0 m con una finestra a nastro di dimensione 2.0 x 1.4 m *RAI 1/5*, calcolato per \bar{E}_m di 500 lux

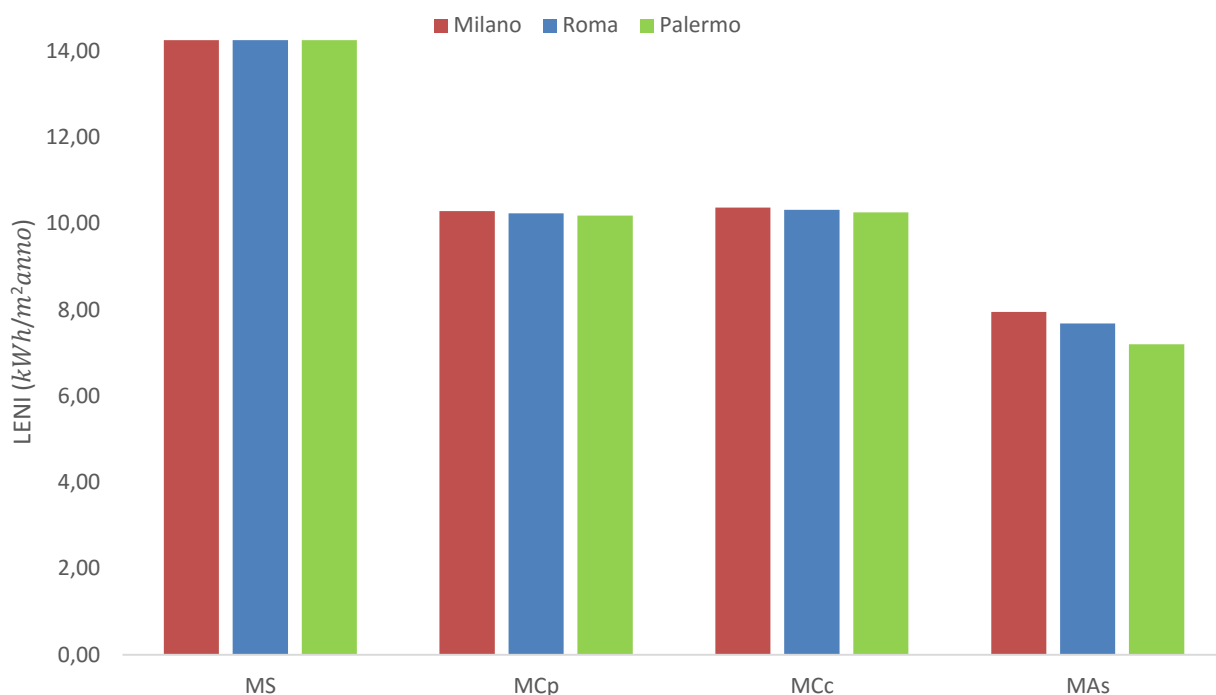


Figura 27. Confronto tra diversi metodi di calcolo *LENI* - ufficio 3.5 x 4.0 m con una finestra di dimensione 1.3 x 1.4 m, *RAI* 1/8, calcolato per \bar{E}_m di 500 lux

In questo caso le differenze del *LENI* tra i metodi risultano più marcati in valore assoluto, soprattutto negli uffici quelli con *RAI* 1/5 (Tabella 34). Di contro, gli incrementi in percentuale risultano essere molto più elevati nelle aule.

L'incremento del *MAS* rispetto all'*MCc* è in media 5.9 kWh/m²/anno per *RAI* 1/5 e 2.7 kWh/m²/anno per *RAI* 1/8. Se il confronto avviene invece con l'*MCp*, l'incremento resta praticamente invariato in tutte e due gli uffici. In questo caso il ricalcolo del numero annuale delle ore operative ha portato valori del *LENI* sovrapponibili a quelli ottenuti con gli orari indicati nel prospetto della norma.

Rispetto all'*MS* si possono raggiungere incrementi medi di 10.7 kWh/m²/anno per *RAI* 1/5 e 6.6 kWh/m²/anno per *RAI* 1/8.

Rispetto alle aule c'è da sottolineare che il valore medio dell'incremento si discosta dai singoli incrementi delle tre località.

Differenze di <i>LENI</i> tra metodi da norma e metodo alternativo - valori medi per le tre località [kWh / m2anno]				
	UFFICIO 3.5 x 4.0 - 1 x 1.4 x 2.0 - <i>RAI</i> 1/5		UFFICIO 3.5 x 4.0 - 1 x 1.4 x 1.3 - <i>RAI</i> 1/8	
MCc-Mas	5.9	166%	2.7	36%
MCp-Mas	5.9	166%	2.6	35%
MS-Mas	10.7	302%	6.6	87%

Tabella 34. Confronto tra diversi metodi di calcolo del *LENI* – uffici 3.5 x 4.0 m con *RAI* 1/5 e 1/8, calcolato per \bar{E}_m di 500 lux

12 Criticità del metodo alternativo

Dai risultati del *LENI* ottenuti con il *MAs*, è stato possibile mettere in luce due importanti fattori la cui scelta è determinante per l'ottenimento di risultati precisi.

Il primo è la verifica dell'attendibilità dei dati di illuminamento esterno presi a riferimento per le varie località, il secondo è la scelta di quale valore di *FLD* prendere in considerazione per il calcolo del t_{sat} .

Dall'analisi dei risultati è emerso che nel *MAs* i valori di illuminamento esterno hanno una funzione decisiva nella determinazione del *LENI*.

Utilizzando i dati di *satel-light.com* si sono riscontrati risultati inattesi come nel caso 4 degli uffici, dove a Milano i valori del *LENI* sono inferiori di quelli di Roma.

Vi è da aggiungere che il tipo di *FLD* considerato nel calcolo (valore medio o puntuale) porta evidentemente ad ottenere valori di *LENI* molto diversi tra loro, ma tendenzialmente sempre inferiori a quelli ottenuti con i metodi da norma.

12.1 Dati climatici di riferimento

Il metodo alternativo si basa sui dati di illuminamento esterno misurati.

Si è deciso di utilizzare i dati di illuminamento presenti nel database di *satel-light.com* perché altri database di dati climatici non riportano separatamente le varie componenti dell'illuminamento e soprattutto non per tutte le città europee questi dati sono rilevati e catalogati.

Un'approfondita analisi della sola componente diffusa dell'illuminamento (figura 28) nella fascia oraria presa in considerazione in questa ricerca (8.00 - 18.00), nei mesi autunnali e invernali, e ad aprile e settembre, vede crescere i valori per le tre località in quest'ordine: Milano, Roma, Palermo.

A maggio, giugno e luglio i livelli di illuminamento esterno crescono in quest'ordine: Milano, Palermo e Roma; ad agosto i livelli crescono seguendo quest'ordine: Palermo, Milano, Roma.

Successivamente è stata effettuata un'ulteriore analisi dei dati di radiazione diffusa al suolo presenti nel database di *satel-light.com* (figura 29), ottenendo i risultati attesi, in quanto l'andamento ricalca precisamente (a parte alcuni casi) quello della componente diffusa dell'illuminamento.

Per testare l'attendibilità di questi dati sono stati presi in esame i valori della componente diffusa della radiazione solare al suolo provenienti dal sito del dell' U.S. Department of Energy (DOE) [34], utilizzando file in formato IWEC (International Weather for Energy Calculation)³.

Il confronto delle tre località ha portato a risultati diversi rispetto a quelli ottenuti analizzando i dati di *satel-light.com* (figura 30).

Se a gennaio, febbraio, novembre e dicembre l'andamento è simile, tendenzialmente i dati dei mesi primaverili ed estivi crescono seguendo l'ordine Palermo, Milano, Roma. Nelle ore centrali della giornata da maggio ad agosto crescono seguendo l'ordine Palermo, Roma, Milano.

³ Questi file contengono dati climatici tipici in formato ASCII e derivano da misure orarie del database DATSAV3 effettuate per 18 anni ed archiviate nel National Climatic Data Center. La radiazione solare oraria e i dati di illuminamento sono calcolati seguendo la geometria terra-sole e la copertura nuvolosa.

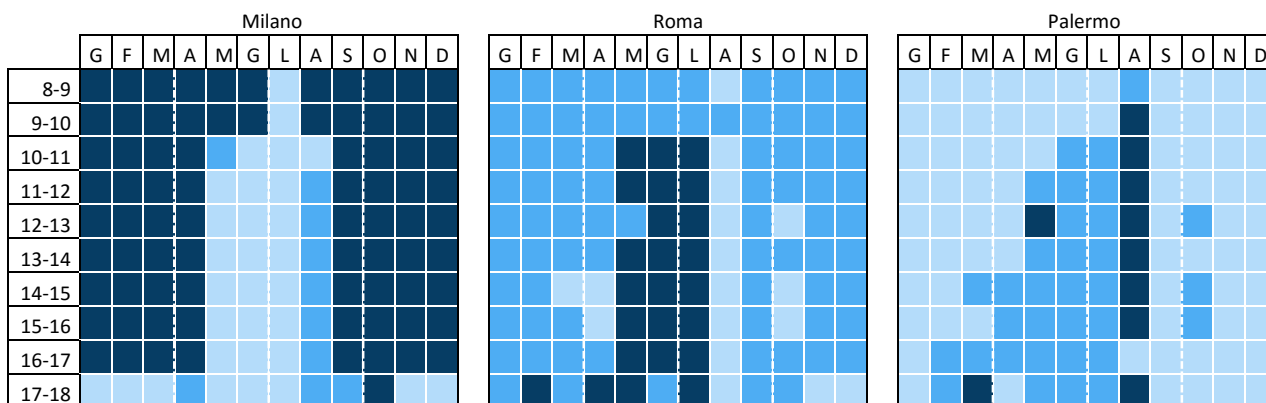


Figura 28. Componente diffusa dei livelli di illuminamento al suolo (satel-light.com): il colore più chiaro corrisponde al valore più alto tra le 3 località

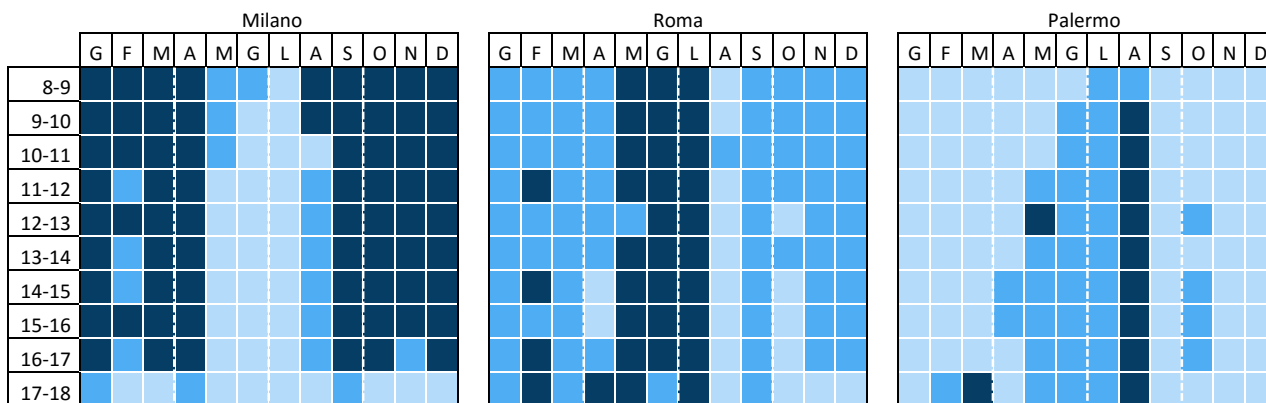


Figura 29. Componente diffusa della radiazione solare al suolo (satel-light.com): il colore più chiaro corrisponde al valore più alto tra le 3 località

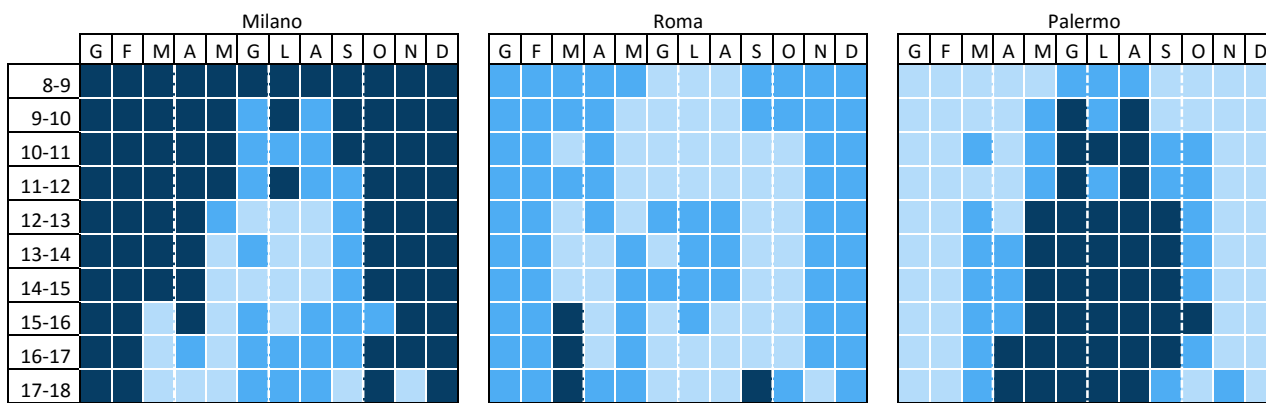


Figura 30. Componente diffusa della radiazione solare rilevata al suolo (file ISEC del U.S. Department of Energy): il colore più chiaro corrisponde al valore più alto tra le 3 località

Successivamente si è confrontata la componente diffusa della radiazione dal database del DOE e da quello di satel-light.com su base oraria per ognuna delle località, registrando un andamento pressoché analogo (figure 31-33): i dati del DOE sono superiori a quelli di satel-light.com (ad esclusione della fascia 8.00 - 11.00 nei soli mesi invernali ed autunnali dove i dati da satel-light.com sono più alti di quelli del DOE) raggiungendo in alcuni casi un incremento del 79% circa (a Milano nel mese di marzo dalle 15.00 alle 16.00). Le differenze tra i valori dei due database sono in generale più marcate a Roma e meno a Palermo.

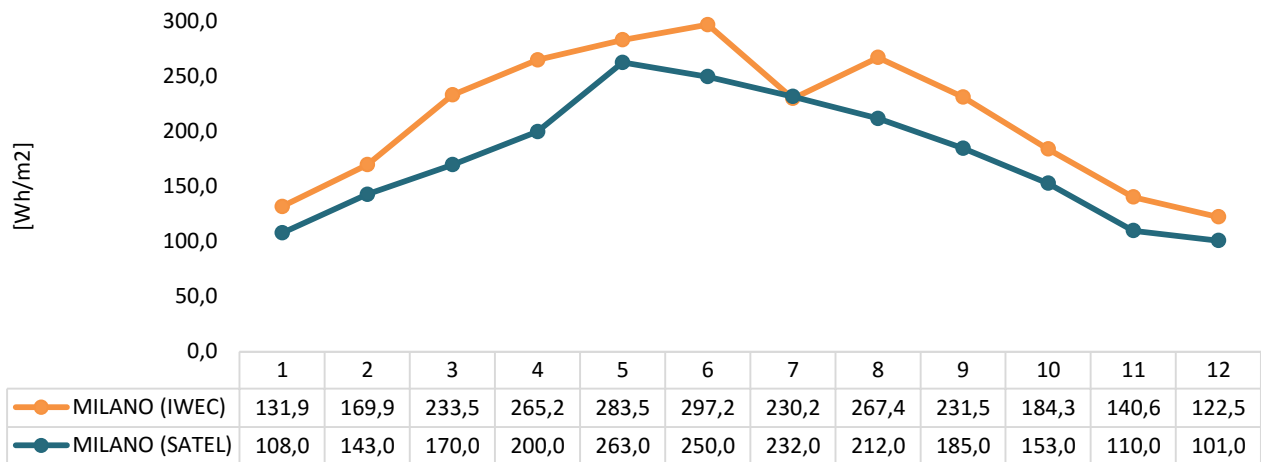


Figura 31. Confronto tra i dati di radiazione diffusa (valore medio mensile) dei file IWECC e di satel-light.com a Milano tra le 12 e le 13

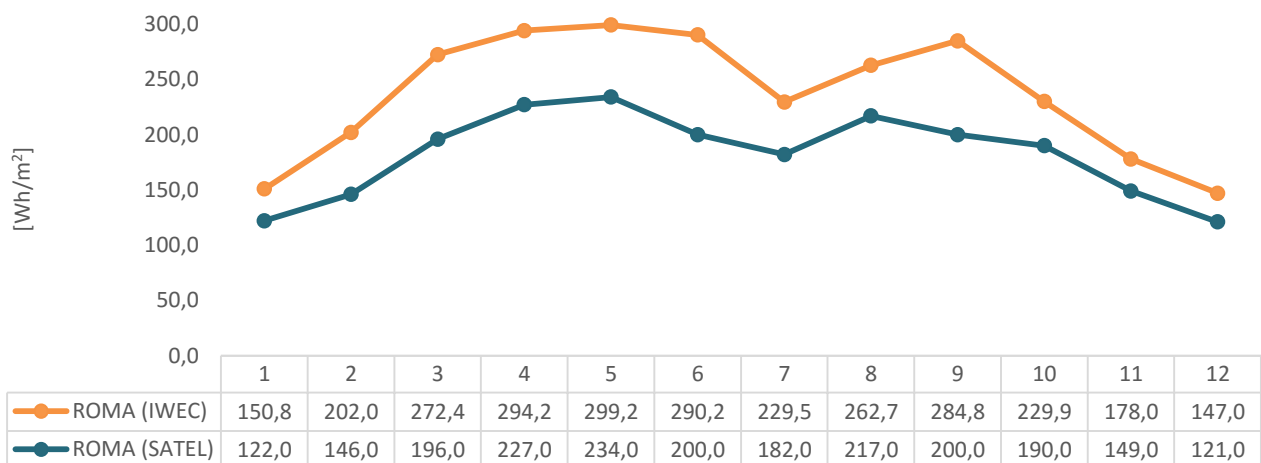


Figura 32. Confronto tra i dati di radiazione diffusa (valore medio mensile) dei file IWECC e di satel-light.com a Roma tra le 12 e le 13

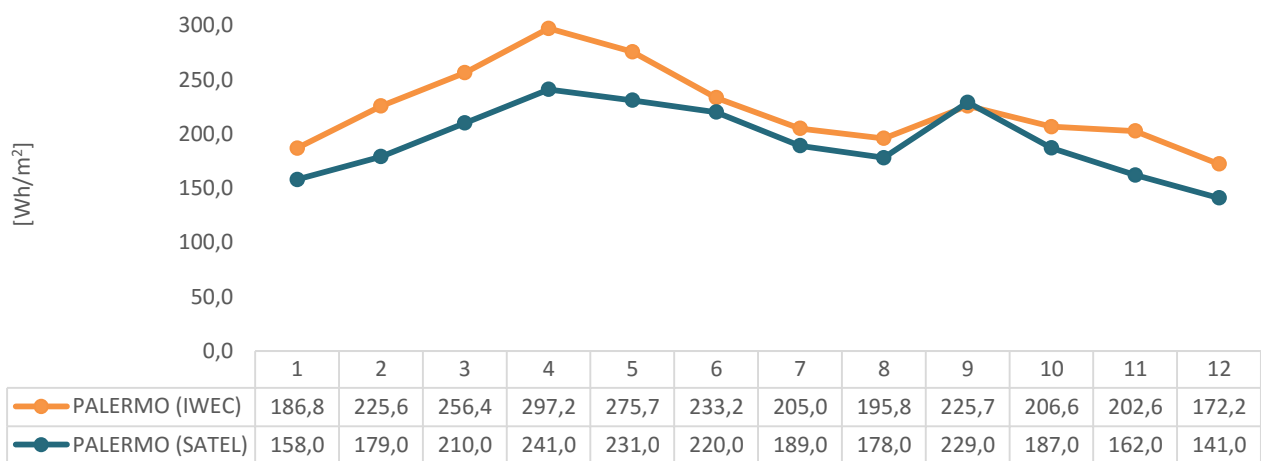


Figura 33. Confronto tra i dati di radiazione diffusa (valore medio mensile) dei file IWECC e di satel-light.com a Palermo tra le 12 e le 13

Sulla base di queste osservazioni si evidenziano delle differenze tra i dati che richiedono ulteriori approfondimenti, essendo questi di fondamentale importanza per il corretto calcolo del *LENI* con il metodo alternativo.

12.2 Definizione dell'apporto di luce diurna negli ambienti per il calcolo del t_{sat}

Con il *MAs* ci si prefigge lo scopo di dare una definizione più precisa del *LENI* partendo dal calcolo del *FLD*, termine attraverso il quale determinare il t_{sat} .

La distribuzione della luce naturale all'interno degli ambienti dipende dall'orientamento delle aperture, dalle loro dimensioni, forma e collocazione, dalla presenza di sistemi di schermatura, dalla geometria dell'ambiente e dai fattori di riflessione delle superfici interne dell'ambiente.

Risulta evidente come a valori del *FLD* alti, corrispondono valori del *LENI* bassi e viceversa: in pratica maggiore è la penetrazione di luce diurna nell'ambiente (*FLD* alti), minore sarà il fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale (*LENI* bassi).

Possiamo inoltre constatare come il *FLD* puntuale decresca rapidamente allontanandosi dall'apertura sulla facciata.

Resta però evidente che è necessario definire quale *FLD* utilizzare per il calcolo del *LENI*.

In base ai risultati ottenuti, il *LENI* calcolato con il metodo alternativo basato sul FLD_m risulta sempre inferiore a quello ottenuto con il metodo descritto nella norma ma non necessariamente esso rappresenta la variabile più precisa per la determinazione dell'apporto di luce diurna in un ambiente. Potrebbe essere interessante a tal proposito, per il calcolo del t_{sat} , utilizzare parametri più rispondenti alla reale distribuzione della luce naturale [26, 27, 28, 29, 30].

13 Conclusioni

I consumi energetici dovuti all'illuminazione nel settore terziario hanno un peso notevole sul totale fabbisogno di energia elettrica. Diversi studi svolti sulla UNI EN 15193 fin dalla sua emanazione, hanno evidenziato come essa presenti alcuni aspetti critici che portano ad una sostanziale sovrastima dei fabbisogni energetici per l'illuminazione degli edifici non residenziali, comportando, nell'ambito della certificazione energetica, una errata valutazione del "valore" dell'edificio.

A partire dall'analisi di un metodo alternativo di calcolo del *LENI*, l'obiettivo di questo lavoro è di approfondire le criticità del metodo definito dalla norma e validare la procedura di quello alternativo, attraverso l'applicazione su un set di casi studio, confrontando i risultati ottenuti.

I casi studio sono stati scelti a partire dalla variazione di precisi parametri al fine di analizzare l'impatto di tali variabili sul calcolo del *LENI* in entrambi i metodi.

I due ambienti scelti sono uffici e ed aule scolastiche, mentre i parametri di variazione applicati ai casi studio sono la latitudine, i rapporti illuminanti, la geometria dei locali e delle finestre, la tipologia di sorgente luminosa installata.

Le differenze riscontrate tra i valori del *LENI* ricavate con i diversi metodi di calcolo, rispecchiano i risultati presenti nei precedenti studi.

Riassumendo, da tutti i risultati analizzati, si evince che:

1. Per ognuno dei casi studio analizzati, il *LENI* ottenuto con il metodo alternativo basato sul FLD_m , è inferiore a quello ottenuto con il metodo completo da norma con t_D e t_N calcolati su base nazionale;
2. Il metodo alternativo registra le variazioni di latitudine in modo più significativo rispetto alla norma;
3. Con il metodo alternativo al variare della tipologia della finestra, a parità di *RAI* e dimensioni del locale, le differenze del *LENI* sono presenti in più casi rispetto al metodo da norma ma sono meno consistenti. Questa considerazione è valida solo per le aule scolastiche dove è possibile che si verifichino queste condizioni;
4. Con il metodo alternativo al variare dei *RAI*, a parità di tipologia della finestra e di dimensioni del locale, si registrano differenze nei valori del *LENI* molto più marcate rispetto al metodo da norma.
5. Sostanziali differenze tra i due metodi si evidenziano anche dal confronto tra i risultati del *LENI* mensile.

E' stato possibile evidenziare alcuni aspetti critici anche del metodo alternativo che hanno portato a delle proposte per miglioramenti e futuri sviluppi di ricerca:

- Come evidenziato nel capitolo 12, i dati di illuminamento esterno utilizzati per il calcolo del t_{sat} sono una variabile molto significativa per il calcolo del $LENI$ ed occorre quindi prendere in considerazione dati attendibili. Sulla base di queste considerazioni, in future ricerche potrebbero essere confrontati i dati di illuminamento esterno provenienti da altri database per valutare le eventuali variazioni nei valori del $LENI$; in aggiunta potrebbe essere valutata anche l'illuminazione naturale dovuta a radiazione diretta che, alle latitudini europee più basse in cui la condizione di cielo coperto non risulta essere preponderante nel corso dell'anno, potrebbe avere un apporto significativo nel calcolo del $LENI$.
- Per quanto concerne la valutazione dell'apporto di luce diurna negli ambienti, ulteriori parametri in alternativa al FLD potrebbero essere utilizzati, anche nell'ottica di tenere in considerazione la componente diretta dell'illuminazione naturale.
- Dal punto di vista delle caratteristiche degli ambienti, potrebbe essere analizzato un set più ampio di casi studio per verificare in modo più dettagliato l'influenza delle variazioni di dimensioni del locale, geometria e posizione delle finestre sul valore del $LENI$; sarebbe interessante testare anche se e quanto l'utilizzo differenti coefficienti di riflessione per le superfici interne degli ambienti possano influire sui valori del $LENI$.
- Potrebbero essere effettuate misure sul campo (consumi elettrici, orari di accensione, livelli di illuminamento interno, ecc.) in ambienti di riferimento.
- Dal punto di vista geografico si potrebbe verificare se in località con uguale latitudine ma diversa longitudine, possano esserci differenze nei livelli di illuminamento esterno tali da comportare variazioni nel calcolo del $LENI$.
- Per quanto concerne la norma, di cui sono già state messe in evidenza le principali criticità, si potrebbe svolgere uno studio comparativo sulle norme e decreti di recepimento, oltre alle sue applicazioni in altri paesi europei.

14 Bibliografia

1. Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change, UNITED NATIONS, 1998
2. DIRECTIVE 2010/31/EU of the European Parliament and of The Council of 19 May 2010 on the Energy Performance Of Buildings, Official Journal of the European Union, 2010, L. 153, pp. 13-35.
3. DECRETO-LEGGE 4 giugno 2013, n. 63, “ Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 Maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale”. (13G00107)
4. LEGGE 3 agosto 2013, n. 90, “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale”. (13G00133) (GU Serie Generale n.181 del 3-8-2013)
5. UNI/TS 11300-1-2-3-4: 2014, “Prestazioni energetiche del edifici”.
6. CTI 14:2013, “Raccomandazione - Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edificio”, Comitato Termotecnico Italiano, Marzo 2013.
7. UNI EN 15193:2008, “Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione”, Marzo 2008.
8. DECRETO MINISTERIALE 26/06/2015, “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”, (15A05198) (GU Serie Generale n.162 del 15-7-2015 - Suppl. Ordinario n. 39).
9. DECRETO MINISTERIALE 26/06/2015, “Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. (15A05200) (GU Serie Generale n.162 del 15-7-2015 - Suppl. Ordinario n. 39)
10. Associazione Nazionale Produttori di illuminazione (ASSIL), “Gestione intelligente dell'illuminazione urbana e stradale”, Giugno 2015.
11. International Energy Agency (IEA), “World Energy outlook 2014”, November 2014.
12. PAEE 2014, “Piano d’Azione Italiano per l’Efficienza Energetica”, ENEA, Luglio 2014.
13. D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni, M. Zinzi, “Artificial lighting energy consumption in buildings: a comparison between EN 15193 and an alternative method based on the Dresler diagrams”. Centro La Casaccia ENEA, 2008.
14. F. Gugliermetti, F. Laudani, F. Bisegna, “ Definizione di criteri di diagnosi per una correzione delle stime di consumi energetici dovuti all’illuminazione”, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/2013/142, ENEA, 2013.
15. M. Zinzi, A. Mangione, G. Fasano, “Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici”, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Report RdS/PAR2013/120, ENEA, 2013.
16. DIAL GmbH , “Manuale DIALux 4.12.”, 2011.
17. UNI 10840:2007, “Locali scolastici – Criteri generali per l’illuminazione artificiale e naturale”, Maggio 2007
18. M. S. Rea, “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application, 9th edition “, New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
19. UNI EN 12464-1:2011, “Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni, Luglio 2011.

20. DECRETO MINISTERIALE 18 Dicembre 1975, “Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica”, (G.U. 2 febbraio 1976, n.29).
21. DECRETO MINISTERIALE 26 Agosto 1992, “Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica”, (G.U. 16 settembre 1992, n. 218).
22. Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome, “Microclima, Areazione e illuminazione nei luoghi di lavoro - Requisiti e standard - Indicazioni operative e progettuali – Linee Guida, in collaborazione con ISPESL, Giugno 2006.
23. Regolamento edilizio del Comune di Palermo, Adeguato al D.Dir. 558/02, di rettifica del Dir 124/DRU/02 di approvazione, 2004.
24. Regolamento generale edilizio del comune di Roma (Testo coordinato ed aggiornato), Delibera 18.8.1934 n. 5261
25. A.S.L. della provincia di Milano n.1, “Aggiornamento del Titolo 3° del Regolamento di Igiene, Capitoli: 1,2,3,4 e 9”, Deliberazione del Direttore Generale, n 270, Aprile 2004.
26. C.F. Reinhart, O. Walkenhorst, “Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds”, Energy and Buildings, 33(7), 2001, pp.683-697
27. Z. Rogers, “Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization”, Tool. Boulder, Colorado, USA: Architectural Energy Corporation, 2006.
28. C.F. Reinhart, J. Mardaljevic, Z. Rogers, “Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design”, Leukos, 3 (1), 2006, pp.1-25.
29. A. Nabil, J. Mardaljevic, “Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings”, Lighting Res. Technol., 37(1), 2005, pp. 41-59
30. J. Mardaljevic, “Climate-Based Daylight Analysis for Residential Buildings”, Proc. of VELUX Daylight Symposium, Rotterdam, May 13-14, 2009.

15 Sitografia

31. www.satel-light.com
32. www.giorni-lavorativi.com
33. www.sunearthtools.com/it/solar/sunrise-sunset-calendar.php
34. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm?CFID=3013720&CFTOKEN=413abb6b9fc61241-66729660-F579-B3BB-F20D4E3BA4EA2F9B&jsessionid=607F1EB9140B8FCDD25CB51807139662.eere

16 Abbreviazioni

MS	metodo semplificato da norma
MCp	metodo completo con ore di di utilizzo diurne (t_D) e non diurne (t_N) da prospetto G.1.
MCC	metodo completo da norma con orari operativi calcolati su base nazionale
MAs	metodo alternativo con orari operativi diurni () calcolati con il database di satel-light.com
MAD	metodo alternativo con orari operativi diurni () calcolati con i diagrammi di Dresler
RAI	rapporto aeroilluminante
DOE	U.S. Department of Energy