



Ricerca di Sistema elettrico

Metodi per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento artificiale considerando il contributo dell'illuminazione naturale

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

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA AERONAUTICA,
ELETTRICA ED ENERGETICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

METODI PER LA VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PER L'ILLUMINAMENTO ARTIFICIALE CONSIDERANDO IL CONTRIBUTO DELL'ILLUMINAZIONE NATURALE

F. Bisegna, B. Mattoni, A. Mangione (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica,
Università di Roma "Sapienza")

D. Iatauro, M. Zinzi (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Metodi per la verifica delle disponibilità di luce naturale e per la stima dei requisiti energetici per illuminazione naturale in edifici nZEB

Responsabile del Progetto: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione Metodi per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminamento artificiale considerando il contributo dell'illuminazione naturale"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Domenico Iatauro

Responsabile scientifico Università di Roma Sapienza: Dott. Fabio Bisegna

Indice

Sommario	2
Summary	2
1 Introduzione	3
2 Obiettivi ed oggetto della ricerca	4
3 Metodologia	5
3.1 Metodi da norma	5
3.2 Metodi Alternativi	7
4 Descrizione del caso studio	9
5 Risultati	14
5.1 Macro-gruppo Metodi da norma	14
5.2 Macro-gruppo Metodi Alternativi	18
6 Conclusioni	23
7 Bibliografia	25

Sommario

È pienamente acclarato come il consumo energetico degli edifici per l'illuminazione artificiale sia consistente ed in crescita. Nel 2008 è stata introdotta la UNI EN 15193 che aveva lo scopo di definire una metodologia di calcolo di questi consumi ed un indice prestazionale (*LENI*), al fine di adoperarli già in fase di progettazione. Nel 2017 la norma ha subito una importante revisione che ha portata all'introduzione di elementi *climate-based*. Il presente lavoro ha permesso di confrontare le due versioni della norma per comprendere le reali differenze tra i due metodi e coprenderne quindi, quelle tra i risultati. Successivamente, tramite l'utilizzo dei dati climatici dei capoluoghi di regione italiani, forniti dal Centro Ricerche ENEA Casaccia, è stato approfondito e perfezionato il Metodo Alternativo (AM) il cui studio ha avuto inizio nel 2014. Il percorso di perfezionamento dell'AM si è sviluppato attraverso diverse sue varianti, le quali hanno permesso di confrontare il peso di diverse variabili in input sui valori del *LENI*. Queste varianti dell'AM e alcuni dei metodi proposti dalla UNI EN 15193 (entrambe le versioni) sono infine state confrontate tra loro, rivelando come l'aggiornamento della UNI EN 15193 non abbia portato a sostanziali differenze, e che l'AM in combinazione ai dati climatici prodotti da ENEA possa essere una importante risorsa.

Summary

Energy consumption for artificial lighting in built environments is highly increasing. There is therefore the need to adequately calculate the contribution of daylight to optimize energy expense. The only available scheme recognized at international level for these assessments, is the European standard EN 15193-1:2017, which specifies calculation methods for evaluating the energy performance of lighting systems and provides an indicator of lighting energy requirements for building certification (*LENI*). Many studies highlighted that the previous version of this Standard (EN 15193:2007) could have led to a significant overestimation of the lighting energy requirements, in particular at Mediterranean latitudes. The updated EN 15193-1:2017 defines a more accurate *LENI* calculation method, introducing also *climate-based* elements. The aim of this work is to compare EN 15193:2007 and EN 15193-1:2017, and define an alternative accurate method for assessing artificial lighting energy use in buildings, that can take into account more precisely the relationship between the time variation of the outdoor illuminance conditions and the building characteristics and geographical location, starting from climate data collected by Centro Ricerche ENEA Casaccia in a measurement campaign from 2006 to 2016, for all Italian municipalities. This alternative method will be compared to EN 15193-1:2017.

1 Introduzione

Il ruolo della luce naturale negli ambienti confinati è fondamentale sia per la salute e il benessere degli utenti, sia per l'ottimizzazione dei consumi energetici. La disponibilità di luce diurna consente infatti di ridurre l'utilizzo di illuminazione artificiale, con conseguente risparmio energetico, e di diminuire le emissioni di CO₂ e il riscaldamento globale [1].

Il calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione artificiale è regolato attualmente dalla norma europea UNI EN 15193-1:2017 [2] la quale definisce un indicatore di densità di energia annua per l'illuminazione (*LENI*), da impiegare nella certificazione energetica degli edifici. Nel calcolo del *LENI* gioca un ruolo chiave la valutazione del contributo della luce naturale nell'ambiente. In questa norma il parametro indicato per mettere in relazione la luce naturale e l'organismo architettonico è il Daylight factor (*D*) [3] [4] [5], parametro di riferimento a livello internazionale.

Nel corso degli anni la stima dell'apporto di luce naturale proposta dalla norma è stata oggetto di numerosi studi [6] [7] [8] [9] [10] [11] che hanno portato all'elaborazione di altrettanti metodi alternativi alla norma per il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale. In tali studi è stato riscontrato come le procedure di calcolo presenti nelle prime versioni della norma, portassero ad un sovradimensionamento del valore di *LENI*, in particolare a causa dell'utilizzo del Daylight factor come parametro di valutazione del contributo di luce diurna, e al mancato utilizzo di dati climatici per la definizione della luminanza del cielo nelle varie località. Gli aspetti critici del Daylight factor [12] [13] sono legati alla staticità di tale parametro poiché non tiene conto della variazione delle condizioni esterne: essendo calcolato considerando una condizione di cielo fortemente nuvoloso è insensibile sia all'orientamento (la luminanza del cielo Overcast è simmetrica rispetto all'asse verticale), sia alla località. A seguito di tali riscontri, la commissione internazionale ha provveduto a revisionare la norma, giungendo a [2]. In questo aggiornamento sono state effettuate varie modifiche, tra le più rilevanti riscontriamo l'introduzione dei dati climatici delle varie località espressi sotto forma di rapporto tra H_{dir}/H_{glob} , con lo scopo di rendere più marcato il contributo del clima luminoso nel calcolo del *LENI*, e la possibilità di ottenere differenti risultati in funzione degli orientamenti. L'utilizzo del Daylight factor come parametro di calcolo del contributo di luce diurna è invece rimasto invariato. In linea con quanto descritto, il lavoro portato avanti in questo triennio della Ricerca di Sistema si è concentrato sulla verifica dell'attendibilità del Metodo Alternativo (AM) proposto nel Report RdS/PAR 2013/120 [14], focalizzandosi fondamentalmente su due aspetti:

- Introdurre i dati climatici reali nel calcolo del Daylight factor utilizzando il modello di cielo di Perez [15] [16] [17] [18] [19] per la definizione del clima luminoso delle località prese in esame. Il Daylight Factor calcolato in questo caso come rapporto orario tra illuminamento interno ed esterno (D_{avg}^*), non è quindi più un valore statico ma variabile, rendendo possibili valutazioni orarie giornaliere e cumulative (settimanali, mensili, annuali, ecc.);
- Valutare se il Daylight factor medio D_{avg} (che indica il rapporto tra l'illuminamento medio mantenuto su un piano orizzontale interno ad un ambiente ed un punto posto all'esterno dell'ambiente, considerando l'assenza di ostruzioni esterne ed un cielo con forte nuvolosità CIE Standard Overcast Sky) risulti sempre conservativo rispetto a (D_{avg}^*).

La verifica della conservatività del D_{avg} era finalizzata a:

- capire se tale parametro potesse essere considerato a livello energetico un "interruttore" per l'accensione e lo spegnimento dell'impianto di illuminazione artificiale;
- definire la condizione di massimo consumo energetico.

Nonostante le sue evidenti limitazioni, questo parametro conserva degli innegabili punti di forza, tra cui la rapidità di calcolo e la facilità d'uso, caratteristiche che non si ritrovano in altri parametri *climate-based* utilizzati nelle analisi illuminotecniche. Per questo, verificata la sua attendibilità come parametro energetico, potrebbe essere adoperato all'interno del Metodo Alternativo con notevoli vantaggi in termini di praticità di calcolo.

I risultati ottenuti nelle precedenti annualità hanno sostanzialmente portato a concludere che, effettuando un'analisi cumulativa annuale, il D_{avg} risulta essere un parametro sempre conservativo e adatto alle

valutazioni di tipo energetico. Il D_{avg}^* cumulativo annuale è infatti risultato superiore al D_{avg} e “statico” come il D_{avg} : a differenza del D_{avg}^* giornaliero e mensile, aggregando i valori a livello annuale, esso è risultato insensibile alla variazione della latitudine e degli orientamenti.

A partire da questi risultati, il presente lavoro si configura come step conclusivo del percorso triennale intrapreso, ponendosi l’obiettivo di testare l’efficacia del Metodo Alternativo proposto in [14] sia in termini quantitativi, applicandolo su 19 capoluoghi di regione italiani per valutare quanto le sue diverse varianti siano sensibili al cambiamento del clima luminoso (anche rispetto a quanto fa la norma), sia in termini qualitativi, variando alcuni parametri di calcolo e confrontando i risultati con quelli ottenuti attraverso [20] e [2], per comprendere quali tra questi siano più adeguati.

2 Obiettivi ed oggetto della ricerca

I risultati delle precedenti ricerche [14] [21] [22] [23] hanno evidenziato che:

- Il Metodo Alternativo studiato in [14] [21] [22] ha dimostrato di riuscire a registrare in maniera più precisa le variazioni geografiche e geometriche del caso studio, presentando tuttavia delle criticità relative ai dati climatici utilizzati nel calcolo e al parametro che misura la penetrazione di luce diurna negli ambienti interni. In particolare, essendo D_{avg} la grandezza standard che mette in relazione la luce naturale misurabile all’interno di un edificio a quella misurabile in esterno, oggetto dell’analisi è stata la valutazione di questo parametro per valutarne la reale conservatività a fronte delle variazioni delle condizioni di cielo.
- In [23], note le sopracitate criticità, sono stati utilizzati i dati climatici orari misurati forniti dal Centro Ricerche Casaccia di ENEA ed è stato approfondito lo studio del D_{avg} . Simulando le condizioni del cielo con il modello di Pere, è stato calcolato il livello di illuminamento interno orario e conseguentemente un D_{avg}^* orario. Esso è risultato essere a livello cumulativo mensile relativamente sensibile alla variazione dell’orientamento e della località ed in alcuni casi anche inferiore al D_{avg} . Effettuando invece un’analisi cumulativa annuale, il D_{avg}^* è risultato superiore al D_{avg} , replicando anche il comportamento di quest’ultimo nel non evidenziare le variazioni di latitudine ed orientamenti. Alle condizioni considerate D_{avg} è quindi risultato essere un parametro conservativo adatto a valutazioni di tipo energetico. In questo studio sono emerse delle criticità legate alla scelta di come aggregare i dati climatici, scelta che può portare ad una variabilità dei risultati.

Nel presente Report, superando le criticità evidenziate nelle precedenti annualità, ci si pone l’obiettivo di testare l’AM effettuando il calcolo del $LENI$ per lo stesso caso studio in diversi comuni italiani, al fine di perfezionare tale metodo rendendolo di semplice utilizzo e quanto più accurato possibile, capace quindi di tenere in considerazione il reale rapporto tra il clima luminoso di una determinata località e l’ambiente interno da analizzare. L’obiettivo verrà raggiunto attraverso un confronto tra i valori del $LENI$ ottenuti con la procedura definita in [20] e in [2], e quelli calcolati con l’AM, per il quale sono stati combinati i seguenti parametri:

- le variabili di calcolo necessarie al conteggio delle ore di disponibilità di luce diurna t_{AM} : D_{avg} (variabile orario, da [2], standard) e Daylight autonomy (DA) [24] [25] [26] [27];
- le variabili necessarie a definire il clima luminoso delle diverse località: grandezze fotometriche per i livelli di illuminamento (E_{gh} ed E_{dh}) e radiometriche per i dati climatici (DHI e DNI);
- la componente temporale del dato climatico (orario su 365 giorni e orario medio mensile).
- il numero dei giorni lavorativi.

L’analisi sarà estesa su scala nazionale consentendo quindi di conoscere l’impatto dei diversi climi luminosi sulla variazione del $LENI$.

3 Metodologia

L'analisi è stata condotta calcolando il *LENI* per 19 capoluoghi di regione utilizzando, come caso studio, l'ufficio del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA a Cesano di Roma, analizzato nelle precedenti ricerche.

Le metodologie di calcolo possono essere raggruppate in due macro-categorie:

1. Metodi da norma
2. Metodi Alternativi

Al primo macro-gruppo afferiscono le metodologie previste dagli standard normativi. Il *LENI* è stato calcolato attraverso delle routine scritte con Grasshopper v.0.9 [28], un editor di algoritmi grafico integrato nel software di modellazione tridimensionale Rhinoceros [29], sviluppato da David Rutten presso Robert McNeel & Associates. Le routine ricalcano le procedure complete definite dalla UNI EN 15193 del 2008 e dal suo aggiornamento del 2017. Il confronto tra i risultati ottenuti con questi due metodi permetterà di quantificare l'impatto dell'aggiornamento normativo sui valori del *LENI* nelle diverse località considerate.

Al secondo macro-gruppo appartengono le varianti dell'AM distinte in base alla modalità di calcolo delle ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale t_{AM} .

3.1 Metodi da norma

La UNI EN 15193:2008 "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione" è la norma entrata in vigore il 13 marzo 2008 che definiva i metodi di calcolo per la quantificazione dell'energia elettrica utilizzata per l'illuminazione degli edifici non residenziali esistenti, di nuova edificazione o in ristrutturazione. Essa introduceva il *LENI*, un indice finalizzato a questa valutazione, che poteva essere ottenuto con un metodo semplificato o con uno completo. Il 30 maggio 2017 la suddetta norma è stata ritirata e sostituita da un aggiornamento che consta di due parti: la UNI EN 15193-1:2017 "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 1: Specificazioni, Modulo M9" e la UNI CEN/TR 15193-2:2017 "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 2: Spiegazione e giustificazione della EN 15193-1, modulo M9". Le principali modifiche hanno riguardato l'estensione del metodo di calcolo del *LENI* e l'inclusione della valutazione dell'illuminazione degli edifici residenziali. La nuova versione della norma prevede la valutazione del *LENI* attraverso 3 Metodi: il "Metodo 1" o metodo completo (quello analizzato nel presente Report), il "Metodo 2" o metodo rapido ed il "Metodo 3" o metodo calcolato. Il "Metodo 1" permette la valutazione dei requisiti energetici per l'illuminazione in edifici residenziali e non residenziali. Può essere utilizzato in fase di progettazione di nuovi edifici, in caso di ristrutturazione o su edifici esistenti. In (Figura 1) è riportato lo schema a blocchi della procedura di calcolo con questo metodo. Entrando più approfonditamente nella norma, le parti che hanno subito una più importante modifica riguardano il fattore di disponibilità di luce diurna $F_{D,S}$ che nel 2008 era l'unico parametro legato alla località dell'edificio, peraltro in maniera affatto significativa. Ora ha una formula piuttosto complessa riportata qui di seguito:

$$F_{D,S} = t_{rel,D,SNA} \cdot F_{D,S,SNA} + t_{rel,D,SA} \cdot F_{D,S,SA}$$

Equazione 1

Dove:

- $t_{rel,D,SNA}$ è la porzione del periodo operativo in cui le eventuali schermature solari non sono attive;
 $F_{D,S,SNA}$ è il fattore di disponibilità di luce diurna della porzione di area quando le eventuali schermature solari non sono attive;
 $t_{rel,D,SA}$ è la porzione del periodo operativo in cui le eventuali schermature solari sono attive;
 $F_{D,S,SA}$ è il fattore di disponibilità di luce diurna della porzione di area quando le eventuali schermature solari sono attive.

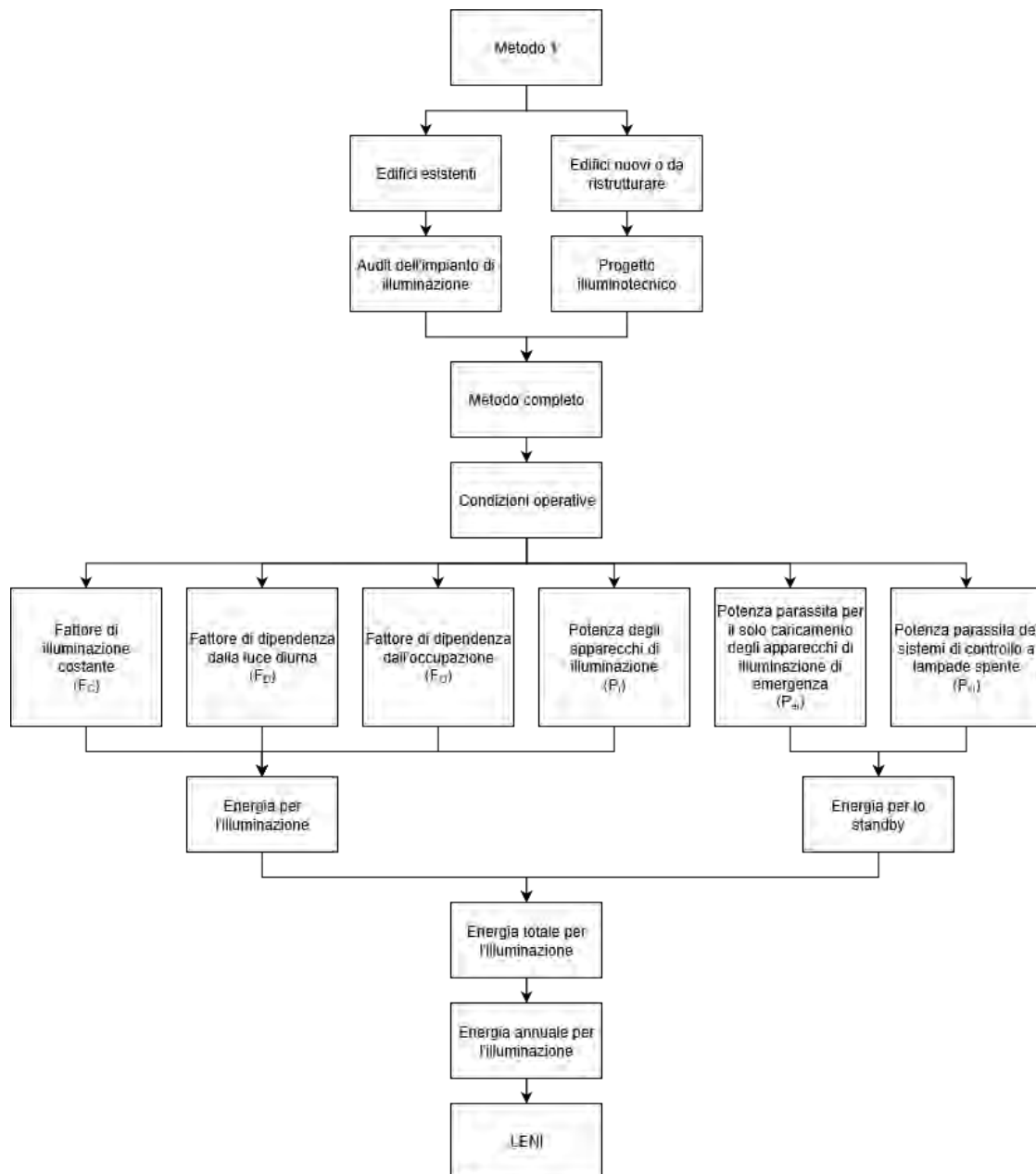


Figura 1 Schema a blocchi del “Metodo 1” della UNI EN 15193-1:2017 per il calcolo del LENI

In tutti e 4 questi parametri entra in gioco il rapporto tra l’illuminamento esterno diretto medio H_{dir} e quello globale medio H_{glob} , rapporto caratteristico per ogni località. In più, per il calcolo di $t_{rel,D,SNA}$ e $F_{D,S,SNA}$, viene chiesto di indicare l’orientamento della facciata.

Altra importante modifica la troviamo nella procedura di calcolo di t_D e di t_N che compaiono nel calcolo dell’energia necessaria per soddisfare i requisiti di illuminamento dell’edificio W_L (Equazione 2), formula rimasta sostanzialmente invariata dal 2008:

$$W_L = \sum (P_n \cdot F_c) \cdot F_o [(t_D \cdot F_D) + t_N] / 1000 \text{ [kWh/anno]}$$

Equazione 2

Dove:

t_D è il periodo di utilizzo dell’impianto nelle ore diurne in un anno;
 t_N è il periodo di utilizzo dell’impianto nelle ore notturne in un anno.

Queste due grandezze vengono calcolate con un'articolata procedura fornendo in input:

t_{start}	l'ora di inizio del periodo operativo;
t_{end}	l'ora di fine del periodo operativo;
C_{we}	fattore di riduzione che tiene conto dei fine-settimana;
t_{start}	l'ora di inizio delle attività nell'edificio;
φ	la latitudine della località.

3.2 Metodi Alternativi

L'AM definito in [14] differiva dal metodo standard indicato in [20] per l'utilizzo di dati di illuminamento esterno misurati, per la valutazione del contributo all'illuminazione interna dovuto alla luce naturale. I dati utilizzati erano i livelli di illuminamento diffuso orari su media mensile determinati su un piano orizzontale a terra, tramite una campagna durata dal 1996 al 2000 utilizzando le informazioni provenienti dai satelliti geostazionari Meteosat. Questi dati sono presenti nel database del sito *satel-light.com* [30]. L'AM prevede la modifica dell'equazione per il calcolo di W_L nella quale viene eliminato il termine F_D e sostituiti t_D e t_N con t_{AMn} . La formula valida per tutte le nuove varianti dell'AM è la seguente:

$$W_L = \sum (P_n \cdot F_C \cdot F_O \cdot t_{AMn}) / 1000 \text{ [kWh/anno]} \quad \text{Equazione 3}$$

Dove la nuova grandezza t_{AMn} è il numero delle 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 12464-1:2011 [31]. Ogniqualvolta i livelli di illuminamento esterno consentiranno da soli il raggiungimento di $\bar{E}_m$, l'impianto si riterrà spento. In [14] questa verifica è stata effettuata a partire dal D :

$$D = \frac{E_i}{E_e} [\%] \quad \text{Equazione 4}$$

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 (che si fa corrispondere al valore di $\bar{E}_m$ tratto da [31]) e D_{avg} (quindi non il semplice D ma del suo valore medio calcolato sul piano operativo), è stato possibile ottenere E_e , che corrisponderà quindi al livello di illuminamento esterno che garantisce il raggiungimento di quello interno $\bar{E}_m$ prescritto, per un determinato D_{avg} secondo la formula:

$$E_e = \frac{\bar{E}_m}{D_{avg}} [\text{lux}] \quad \text{Equazione 5}$$

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 è proceduto a confrontarli con i valori di E_e calcolati con (Equazione 5): 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 $\bar{E}_m$, considerando quindi l'impianto di illuminazione acceso: la somma delle ore di accensione in un anno calcolata con questo metodo rappresenta il valore di t_{AMn} in (Equazione 3).

Il presente studio prevede l'approfondimento dell'AM studiandone 8 differenti varianti che si caratterizzano per l'utilizzo della combinazione di alcuni parametri per calcolare t_{AMn} . In (Tabella 1) sono riportate tutti i nuovi AM studiati e i parametri che li caratterizzano.

Tabella 1 Varianti del Metodo Alternativo per il calcolo del LENI

Variante dell'AM	Grandezze radiometriche e fotometriche	Dati climatici di input	Giorni dell'anno	Componente temporale del dato climatico	Parametro di calcolo per E_e	Software di calcolo	Numero località	Variazione degli orientamenti
AM1	E _{gh}	ENEA	365	oraria	D _{avg}	Excel / Grasshopper	19	No
AM2	E _{dh}	ENEA	365	oraria	D _{avg}	Excel / Grasshopper	19	No
AM3	E _{dh}	ENEA	giorni lavorativi	orario medio mensile	D _{avg}	Excel / Grasshopper	19	No
AM4	E _{dh}	ENEA	giorni lavorativi	oraria	D _{avg}	Excel / Grasshopper	19	No
AM5	DHI e DNI	ENEA	365	oraria	calcolo diretto	Excel	3	Sì
AM6	DHI e DNI	ENEA	giorni lavorativi	oraria	calcolo diretto	Excel	3	Sì
AM7	DHI e DNI	DOE	365	oraria	DA	Excel / Diva-for-Rhino	15	Sì
AM8	DHI e DNI	DOE	giorni lavorativi	oraria	DA	Excel / Diva-for-Rhino	15	Sì

Come si può vedere in (Tabella 1) i vari AM utilizzano per la definizione del clima luminoso grandezze radiometriche o fotometriche, estrapolate da file di dati climatici forniti dall'ENEA o dall'U.S. Department of Energy (DOE) [32]. Altre variabili che servono a calcolare t_{AMn} sono la componente temporale del dato climatico ed il numero di giorni dell'anno. Per la valutazione di E_e (Equazione 5) è utilizzato il D_{avg} , ad esclusione di AM5 e AM6 (in cui E_e ed $\bar{E}_m$ vengono calcolati contemporaneamente) e AM7 e AM8 (in cui si introduce una nuova grandezza *climate-based*). Analizzando più nello specifico i diversi AM possiamo vediamo che:

- **AM1** Nella prima variante sono stati estrapolati dai dati ENEA i valori di illuminamento esterno globale E_{gh} per ogni località per 8760 ore ed in seguito, sono stati scelti quelli corrispondenti al periodo operativo 8.00 – 17.00. A partire dal D_{avg} di 5.7% riferito al nostro caso studio, è stato calcolato il valore di E_e secondo (Equazione 5), che consente di mantenere $\bar{E}_m$ pari a 500 lux [31] nell'area operativa dell'ufficio analizzato. Il dato è stato confrontato con E_{gh} per ottenere t_{AM1} e quindi il *LENI*.
- **AM2** Nella seconda variante, rispetto alla precedente, sono stati estrapolati dai dati ENEA solamente i valori della componente diffusa dell'illuminamento esterno E_{dh} per ogni località.
- **AM3** La terza variante ricalca esattamente l'AM del 2014, ad esclusione della fonte dei dati climatici (ENEA) da cui sono stati estratti i valori di E_{dh} forniti da ENEA per le 19 località per le 8760 ore, per la sola fascia oraria 8.00 -17.00. Sono stati successivamente calcolati i relativi valori medi mensili orari. A questo punto il set di dati si è ridotto a 9 valori ore per ogni mese. È stato seguito lo stesso procedimento degli AM precedenti per il calcolo delle ore medie giornaliere di accensione dell'impianto di illuminazione per ogni mese, successivamente moltiplicate per i giorni lavorativi mensili
- **AM4** In questa opzione, il metodo di calcolo ricalca esattamente l'AM2 considerando però solamente i giorni lavorativi. Ciò è stato possibile attraverso l'utilizzo di un fattore riduttivo pari a 0.69 per il quale è stato moltiplicato il valore di *LENI* delle 19 località: tale fattore corrisponde al rapporto tra i 253 giorni lavorativi e i 365 giorni annuali.

- **AM5** In questa variante dell'AM, il numero delle ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale t_{AM5} è stato ottenuto utilizzando i risultati elaborati nella precedente ricerca, in cui è stato simulato il cielo di Milano, Roma e Palermo con il modello di Perez e i dati climatici forniti da ENEA. Questo ha permesso il calcolo di $\bar{E}_m$ ed E_{gh} per 8760 ore variando l'orientamento dell'ufficio secondo i quattro punti cardinali. Definito il periodo operativo (8.00 - 17.00), il software ha calcolato l'effettivo numero di ore in cui E_m sull'area operativa risultava essere uguale o superiore 500 lux. Questa variante presenta delle importanti differenze rispetto a quelle precedentemente descritte:
 - i dati climatici di input sono DHI e DNI ;
 - sono presi in considerazione tutti e quattro gli orientamenti;
 - i livelli di illuminamento interni $\bar{E}_m$ sono calcolati dal software Radiance che tiene in considerazione tutte le variabili fisico-geometriche dell'ambiente, mentre nelle precedenti varianti dell'AM, il calcolo di $\bar{E}_m$ è mediato da un D_{avg} fisso.
- **AM6** I risultati di questa variante sono ottenuti adottando lo stesso criterio di riduzione dei giorni lavorativi proposto nell'AM4.
- **AM7** In questa variante il numero delle ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale t_{AM7} è stato ottenuto utilizzando il parametro della Daylight Autonomy (DA). Attraverso l'uso del software Rhinoceros e della plug-in DIVA-for-Rhino è stata calcolata la DA per l'ufficio analizzato, per i 4 diversi orientamenti, per 15 comuni italiani in relazione alla disponibilità dei dati climatici. Scelto il periodo operativo (dalle 8.00 alle 17.00 per 365 giorni), per ogni località considerata è stato scaricato il file di dati climatici da [32]. In Rhinoceros sono stati realizzati 4 modelli del medesimo ufficio orientati secondo i 4 punti cardinali. Ognuno di questi modelli ha restituito un valore di DA che è stato adoperato come fattore di riduzione delle 3285 ore lavorative del periodo operativo.
- **AM8** I risultati di questa variante sono ottenuti adottando lo stesso criterio di riduzione dei giorni lavorativi proposto nell'AM4.

4 Descrizione del caso studio

Tutte le simulazioni sono state condotte sul modello tridimensionale di uno degli uffici dell'edificio F51 (Figura 3) del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, costruzione caratterizzata da un'impronta a terra rettangolare di 48 m x 12 m, suddivisa in due piani, entrambi con altezza utile interna di 2.7 m.



Figura 2 Planimetria dell'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.



Figura 3 Edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA – fonte Bing Maps.

Nell'edificio, gli uffici (mono-affaccio) sono esposti a nord e a sud, separati da un corridoio.

Nel presente report è stato preso in esame l'ambiente 108 (Figura 2) le cui dimensioni e caratteristiche principali sono riportate in (Tabella 2).

I coefficienti di riflessione sono stati calcolati tramite lo spettroradiometro colorimetro Minolta CS-1000-A (Figura 4) che permette di effettuare misure di riflettanza alle varie lunghezze d'onda del visibile. L'illuminante di riferimento utilizzato per le misure è la luce naturale D65.



Figura 4 Spettroradiometro-colorimetro Minolta CS-1000-A.

Le misure di riflettanza medie alle varie lunghezze d'onda e pesate sulla curva di visibilità per ognuna delle superfici dell'ambiente sono riportate in (Tabella 2).

Tabella 2 Caratteristiche fisico/geometriche dell'ufficio n. 108 dell'edificio F51 nel Centro Ricerche Casaccia.

Dimensioni dell'ambiente	Larghezza [m]	3.5
	Profondità [m]	4
	Altezza [m]	2.7
Caratteristiche della finestra	Altezza [m]	1.3
	Larghezza [m]	3.3
	Altezza davanale [m]	1
	Distanza dal soffitto [m]	0.5
	Coefficiente di trasmissione del vetro τ	0.8
Coefficienti di riflessione	Pareti	0.8
	Soffitto	0.9
	Pavimento	0.2

Si è scelto di simulare l'ufficio ponendo idealmente l'edificio in 19 capoluoghi di regione italiani: Trento, Aosta, Trieste, Milano, Venezia, Torino, Bologna, Genova, Firenze, Ancona, Perugia, L'Aquila, Roma, Campobasso, Bari, Napoli, Potenza, Catanzaro, Palermo. Non per tutte le varianti dell'AM è stato effettuato il calcolo del *LENI* nei 19 comuni (Tabella 1): data la complessità ed i tempi di calcolo, per l'AM5 e l'AM6 i comuni sono stati ridotti a 3 (Milano, Roma, Palermo). Nell'AM7 e AM8 i comuni considerati sono stati 15, in quanto il sito [32] dal quale sono stati estrapolati i file climatici per i calcoli con queste due varianti dell'AM, non riporta i dati dei comuni di Catanzaro, L'Aquila, Aosta, Trento. I periodi operativi sono stati ricavati da [2]. Il caso studio è stato analizzato numericamente modellando l'ambiente con il software Rhinoceros, mentre l'analisi illuminotecnica è stata condotta tramite il software Grasshopper e la sua plug-in DIVA-for-Rhino, interfaccia del motore di calcolo Radiance. I parametri della simulazione sono elencati nella (Tabella 3).

Tabella 3 Parametri del modello per le simulazioni

Griglia di calcolo	Altezza [m]	0.75
	Distanza dalle pareti [m]	0.5
	Distanze dei punti [m]	0.1
Parametri di calcolo di Radiance	Qualità di calcolo	Alta
	Ambient Bounces (-ab)	8
	Ambient Divisions (-ad)	512
	Ambient super-samples (-as)	256
	Ambient Resolution (-ar)	32

I materiali in Radiance sono descritti tramite i tre valori di riflettanza in corrispondenza delle lunghezze d'onda del rosso, del verde e del blu, la componente speculare e il fattore di ruvidità (Tabella 4).

Tabella 4 Definizione dei materiali dell'ambiente in Radiance

Soffitto	Coefficiente di riflessione	0.9
	Specularity	0
	Roughness	0
Pareti	Coefficiente di riflessione	0.8
	Specularity	0
	Roughness	0.2
Pavimento	Coefficiente di riflessione	0.2
	Specularity	0
	Roughness	0.3
Porta	Coefficiente di riflessione	0.5
	Specularity	0
	Roughness	0
Infisso	Coefficiente di riflessione	0.5
	Specularity	0.2
	Roughness	0.1
Vetro	Coefficiente di riflessione	0.8
Piano esterno	Coefficiente di riflessione	0.1
	Specularity	0
	Roughness	0

In (Figura 5) è rappresentata la routine scritte in Grasshopper che permette di calcolare il *LENI* secondo il Metodo completo descritto in [20]. In (Figura 6) è rappresentato l'algoritmo che permette di calcolare, a partire dai dati climatici forniti da ENEA, la media annuale dei rapporti tra l'illuminamento esterno diretto (H_{dir}) e globale (H_{glob}) su un piano orizzontale, tra le ore 8.00 e le 17.00. Per [2] questa grandezza fornisce un dato caratteristico di ogni località, e serve a calcolare la porzione del periodo operativo durante il quale i sistemi di schermatura sono o non sono attivi ($trel, D, SA, j$ e $trel, D, SNA, j$), ed il fattore di disponibilità della luce diurna nel caso in cui i sistemi di schermatura siano o non siano (FD, S, SA, j e FD, S, SNA, j) (Equazione 1). Questi dati servono al calcolo del *LENI* secondo il "Metodo 1" descritto in [2], per cui è stato scritto l'algoritmo in (Figura 7). L'algoritmo in (Figura 8) permette invece di calcolare valore orario medio mensile di E_{dh} a partire dai dati climatici forniti da ENEA. Questo valore è stato utilizzato nel calcolo del *LENI* con l'AM3. I valori del *LENI* ottenuti con le diverse varianti del Metodo Alternativo schematizzate nella (Tabella 1), sono stati calcolati utilizzando gli algoritmi di Grasshopper in (Figura 9).

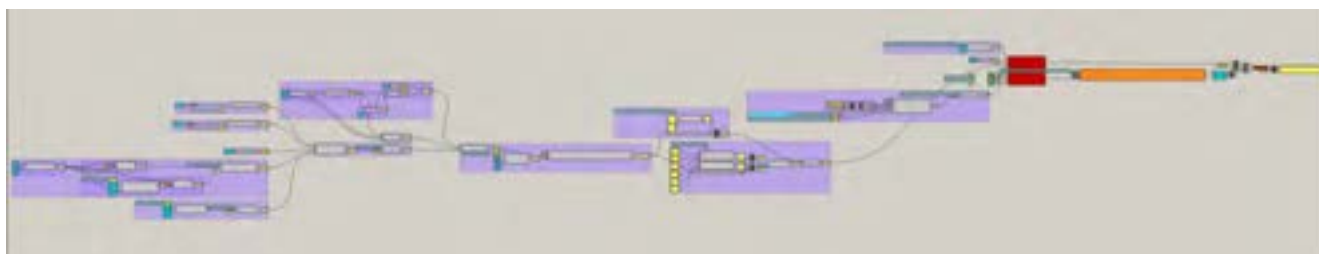


Figura 5 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo del *LENI* secondo il metodo completo descritto nella UNI EN 15193:2008.

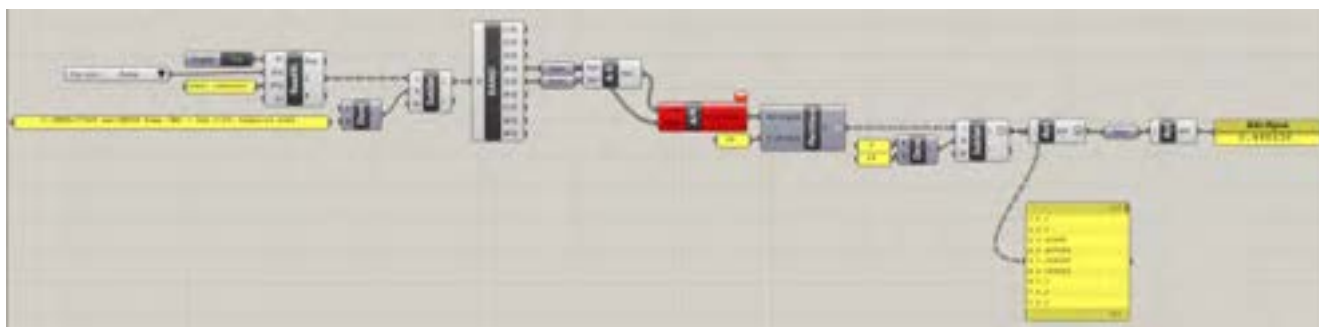


Figura 6 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo di H_{dir}/H_{glob} come previsto dalla UNI EN 15193-1:2017 a partire dai dati climatici forniti da ENEA.

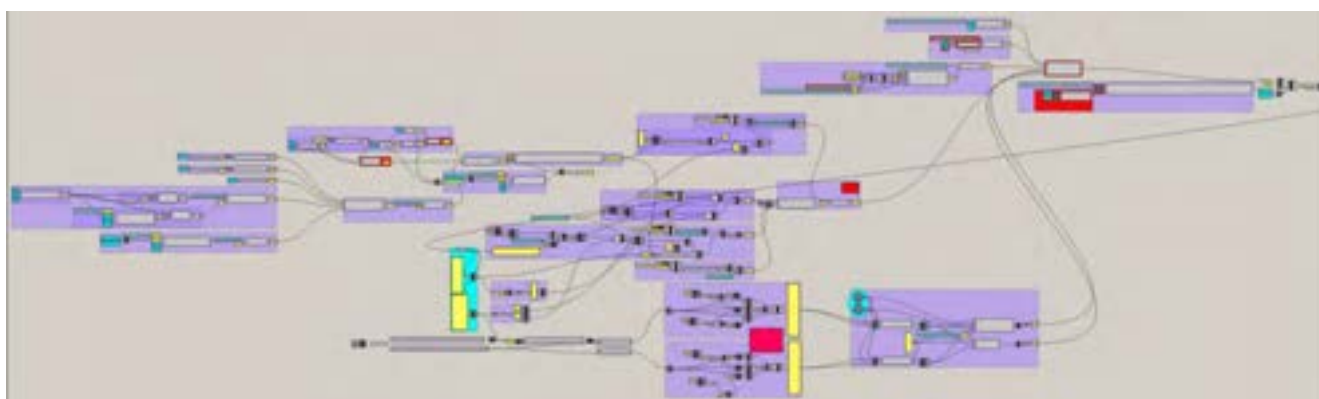


Figura 7 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo del LENI secondo il "Metodo 1" descritto nella UNI EN 15193-1:2017.

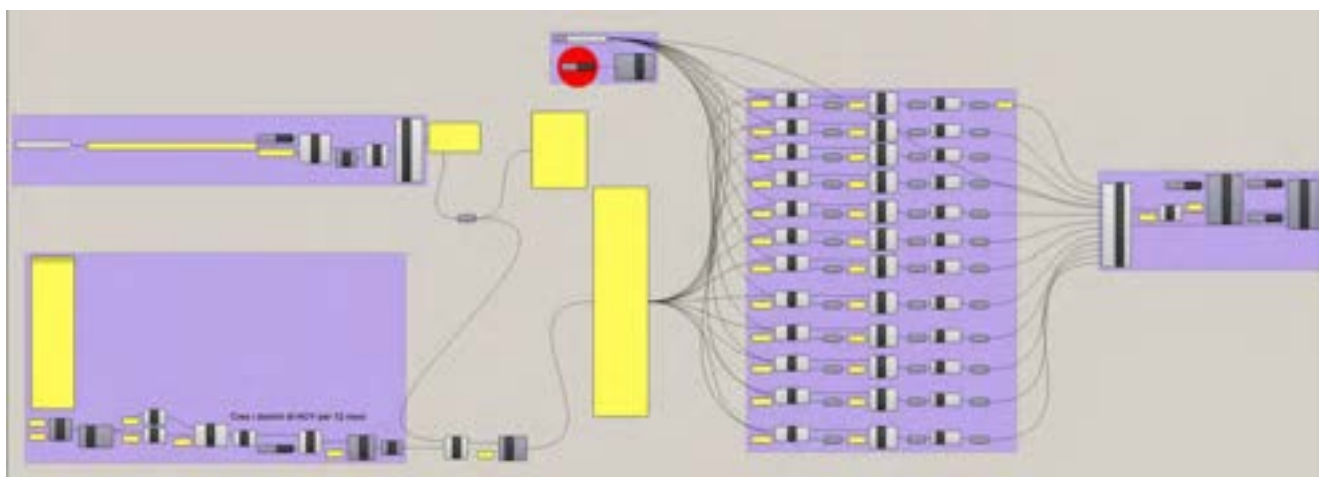


Figura 8 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo del valore orario medio mensile di E_{dh} a partire dai dati climatici forniti da ENEA.



Figura 9 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo del LENI secondo le diverse varianti del Metodo Alternativo.

5 Risultati

I risultati qui presentati sono stati raggruppati nelle due macro-categorie precedentemente descritte nel capitolo “Metodologia”. Il primo gruppo include i valori del *LENI* calcolati per 19 capoluoghi d’Italia attraverso il “Metodo completo” della UNI EN 15193:2008 ed il “Metodo 1” della UNI EN 15193-1:2017. Il secondo gruppo include i *LENI* calcolati per le stesse città con diverse varianti dell’AM (Tabella 1).

5.1 Macro-gruppo Metodi da norma

Il “Metodo completo” del 2008 ed il “Metodo 1” presentano differenze (descritte nel paragrafo 3.1) che consistono principalmente nel calcolo dell’influenza delle schermature solari e dell’orientamento, nell’inserimento di parametri che possano descrivere più accuratamente il clima luminoso e di altri che determinino in maniera più precisa le ore lavorative con presenza o meno di luce naturale. Altre parti sono rimaste invariate, come nel caso del calcolo del parametro di valutazione di penetrazione della luce diurna. Nelle due versioni della norma, il valore di *D* viene ottenuto allo stesso modo ed è in entrambi del 4.25%. Dal momento che la norma prevede la possibilità di utilizzare un valore di *D* calcolato separatamente, è stato inserito nella routine di calcolo del *LENI* scritta in Grasshopper, il valore di 5.7% ottenuto attraverso la procedura di calcolo standard. Il *D* nelle norme ha lo scopo di definire una classe di penetrazione di luce diurna., ma dalle verifiche effettuate, un valore di del 4.25% o del 5.7% lascia invariata la classe di penetrazione (*Medium*) dell’ambiente oggetto di studio, lasciando di conseguenza invariato anche il valore del *LENI*. In (Tabella 5) e (Figura 10) è confrontato il *LENI* delle 19 località ottenuto con procedure da norma versione 2008 e 2017. Le variazioni percentuali ottenute tra i due metodi spaziano in un range compreso tra il 14.1% a Trieste (differenza in valore assoluto pari a 1.98 kWh/m²anno) ed il 16.8% a Bologna (differenza in valore assoluto pari a 2.34 kWh/m²anno). Il decremento medio è del 14.8% corrispondente a un valore assoluto di 2.04 kWh/m²anno. Ciò mostra che il calcolo con la nuova norma restituisce valori inferiori rispetto alla precedente versione, ma in nessuna delle due versioni la variazione del *LENI* in funzione della località è significativa: per [20] la differenza maggiore è del 3.8% (0.53 kWh/m²anno) tra Trento e Palermo; per [2] la differenza maggiore è sempre del 4.3% (0.51 kWh/m²anno) tra Trieste e Palermo.

Tabella 5 LENI calcolati con i metodi descritti nella UNI EN 15193:2008 e UNI EN 15193-1:2017

location	latitude	Hdir/Hglob	LENI		LENI 2008 - LENI 2017 [%]
			EN 15193:2008 (Davg 4.25%)	EN 15193-1:2017 (Davg 4.25%)	
			[kWh/m ² *year]	[kWh/m ² *year]	
Palermo	38.12	0.455	13.49	11.51	14.7
Catanzaro	38.90	0.419	13.55	11.54	14.9
Potenza	40.63	0.366	13.67	11.55	15.5
Napoli	40.85	0.442	13.67	11.55	15.5
Bari	41.12	0.427	13.69	11.55	15.6
Campobasso	41.55	0.376	13.72	11.55	15.8
Roma	41.90	0.447	13.74	11.56	15.9
L'Aquila	42.35	0.391	13.78	11.57	16.1
Perugia	43.10	0.394	13.82	11.57	16.3
Ancona	43.62	0.380	13.86	11.58	16.5
Firenze	43.77	0.388	13.88	11.58	16.6
Genova	44.40	0.393	13.91	11.58	16.8
Bologna	44.48	0.383	13.92	11.58	16.8
Torino	45.05	0.379	13.96	11.95	14.4
Venezia	45.43	0.372	13.99	11.96	14.5
Milano	45.45	0.372	13.98	11.95	14.5
Trieste	45.63	0.347	14.00	12.02	14.1
Aosta	45.73	0.357	14.00	11.96	14.6
Trento	46.07	0.377	14.02	11.96	15.5
LENI mean value			13.82	11.69	

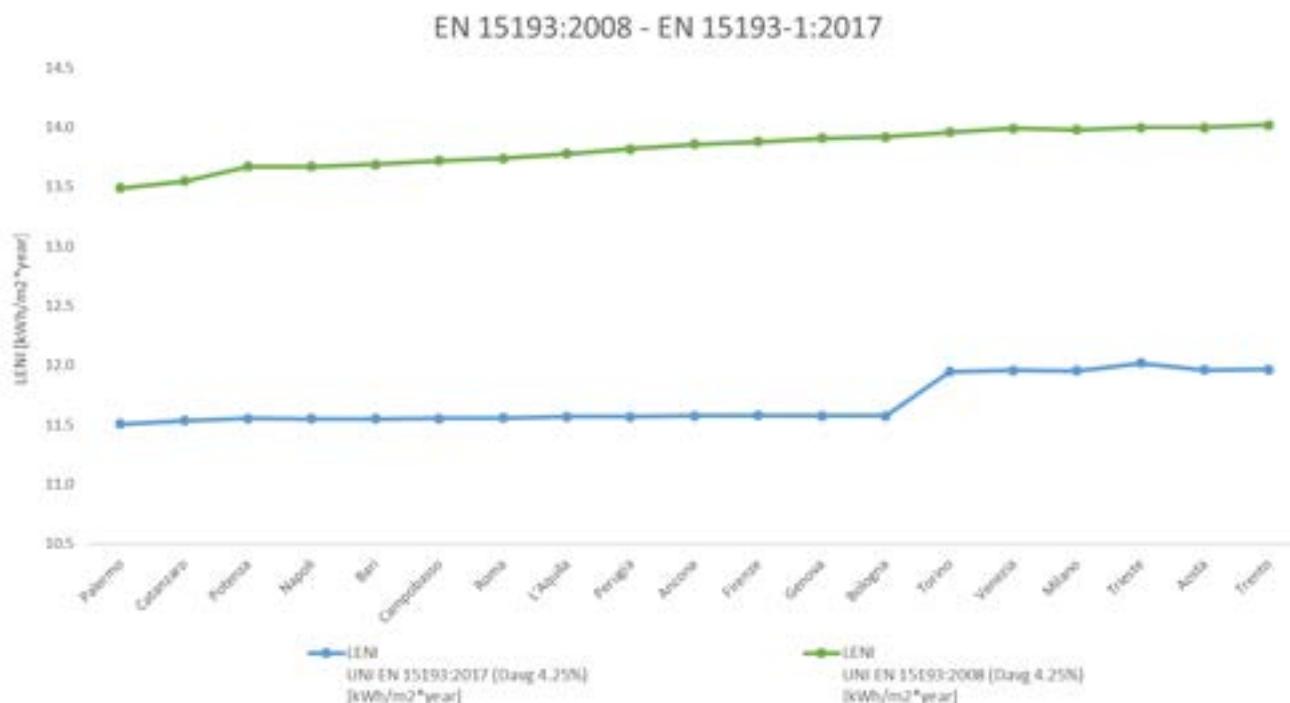


Figura 10 Andamento del LENI calcolato con i metodi descritti nella UNI EN 15193:2008 e UNI EN 15193-1:2017

Nella versione della norma del 2008 la latitudine era una delle variabili nel calcolo del fattore di dipendenza dalla luce diurna (F_D), fattore che definisce la riduzione del tempo di utilizzo degli ambienti nelle ore diurne. Il peso della latitudine nella formula dell' F_D comportava che a latitudini maggiori corrispondesse una minore

riduzione delle ore di luce diurna. È invece un elemento caratteristico della versione 2017 l'introduzione di dati climatici delle varie località espressi sotto forma di rapporto tra H_{dir}/H_{glob} , con lo scopo di rendere più marcato il contributo del clima luminoso nel calcolo del $LENI$, rispetto a quello che avveniva considerando semplicemente la latitudine. Come già sottolineato, i rapporti H_{dir}/H_{glob} possono essere calcolati sulla base di dati climatici forniti direttamente dall'utente: in questa analisi tale rapporto è stato calcolato a partire dai dati forniti dall'ENEA. I dati elaborati evidenziano come non ci sia una diretta correlazione tra la latitudine e questo rapporto come mostrato in (Figura 11).

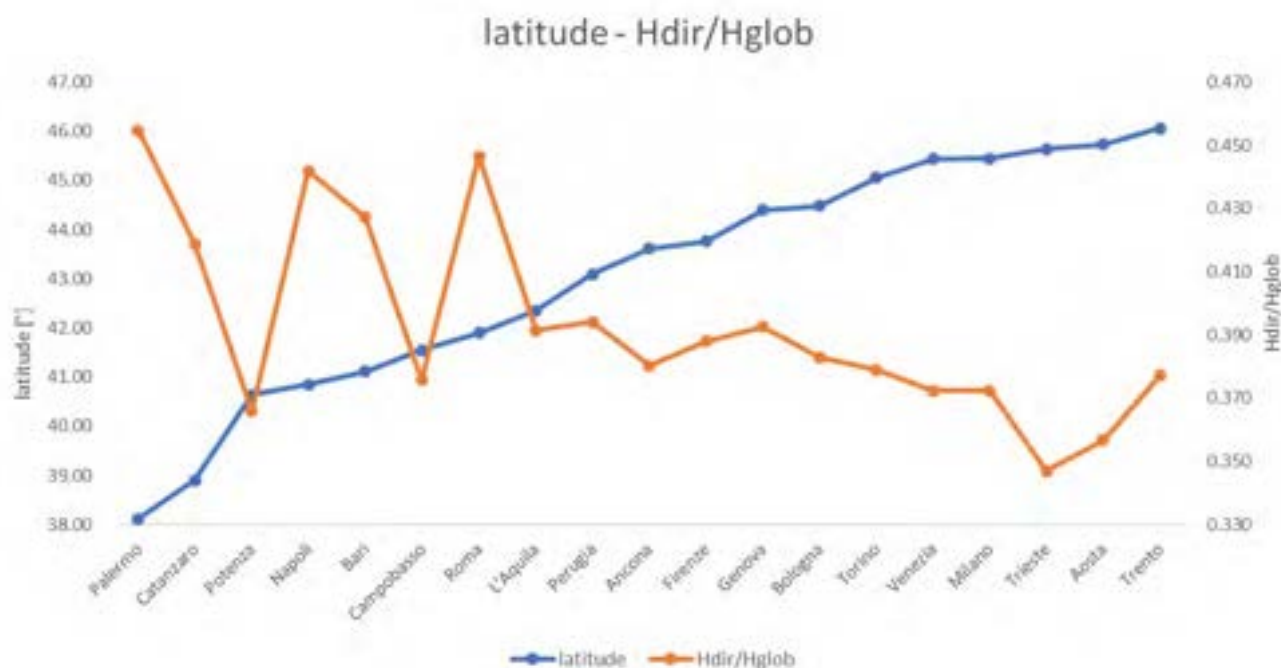


Figura 11 Andamenti della latitudine delle località e del rispettivo rapporto H_{dir}/H_{glob}

Altra introduzione nella nuova versione della norma è la valutazione della differenza di orientamento delle aperture. Nella (Figura 12) sono mostrati, per ogni località, il valore del $LENI$ per i diversi orientamenti ed il valore medio tra questi ultimi. Si nota che le differenze sono molto ridotte: la massima differenza percentuale a nord tra Trieste e Palermo è dell'1.3% (0.16 kWh/m²anno), ad est/ovest tra Trieste e Palermo è del 5.4% (0.65 kWh/m²anno) e a sud tra Trieste e Catanzaro è del 6.4% (0.74 kWh/m²anno). Le differenze di $LENI$ al variare dell'orientamento all'interno di ogni località sono comprese tra il 13% e l'8%. Nella (Figura 13) sono invece confrontati i valori del $LENI$ medio dei quattro orientamenti calcolati con la procedura di [2] al variare del rapporto H_{dir}/H_{glob} . Si evince che nonostante siano stati introdotti elementi *climate based* nel calcolo, non sembrerebbe presente una correlazione diretta tra la riduzione di H_{dir}/H_{glob} e la variazione del $LENI$. Questo è più evidente per valori di H_{dir}/H_{glob} superiori a 0.38: la differenza massima del $LENI$ riscontrata è di 0.07 kWh/m² anno tra Ancora (H_{dir}/H_{glob} di 0.38) e Palermo (H_{dir}/H_{glob} di 0.46).

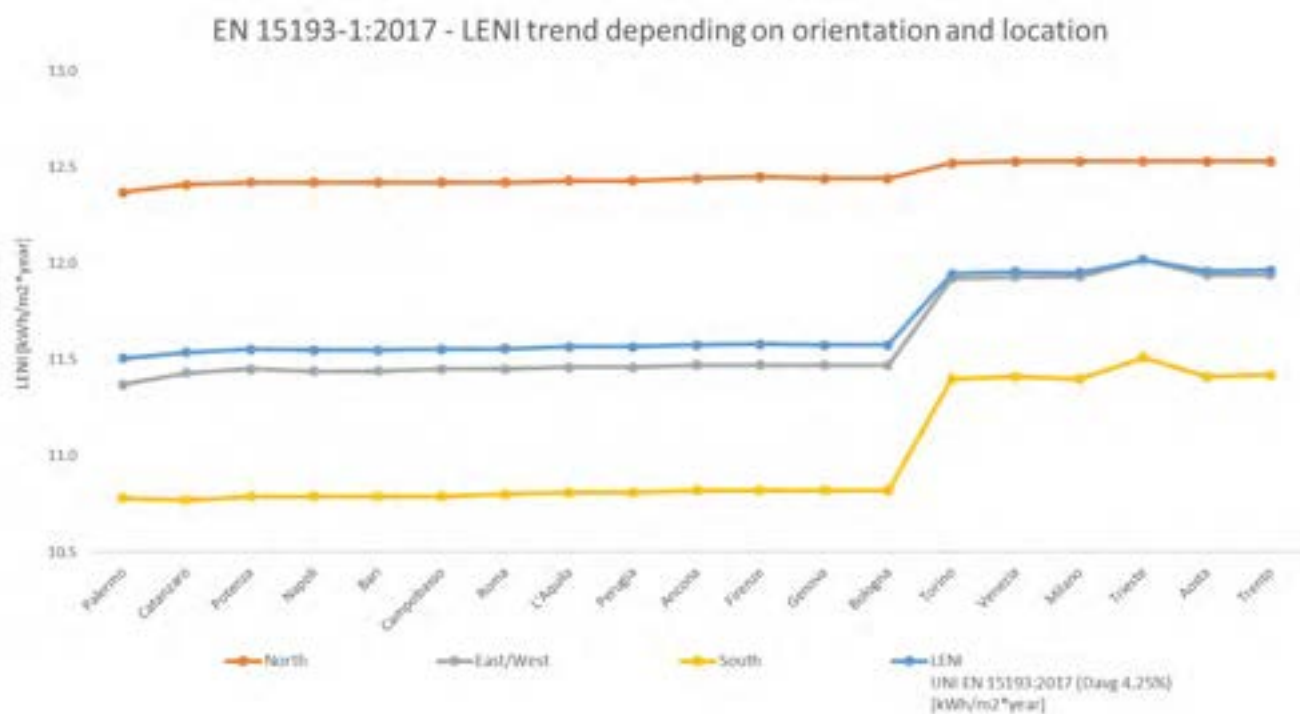


Figura 12 Valori del LENI al variare dell'orientamento e della località ("Metodo 1" della UNI EN 5193:2017)

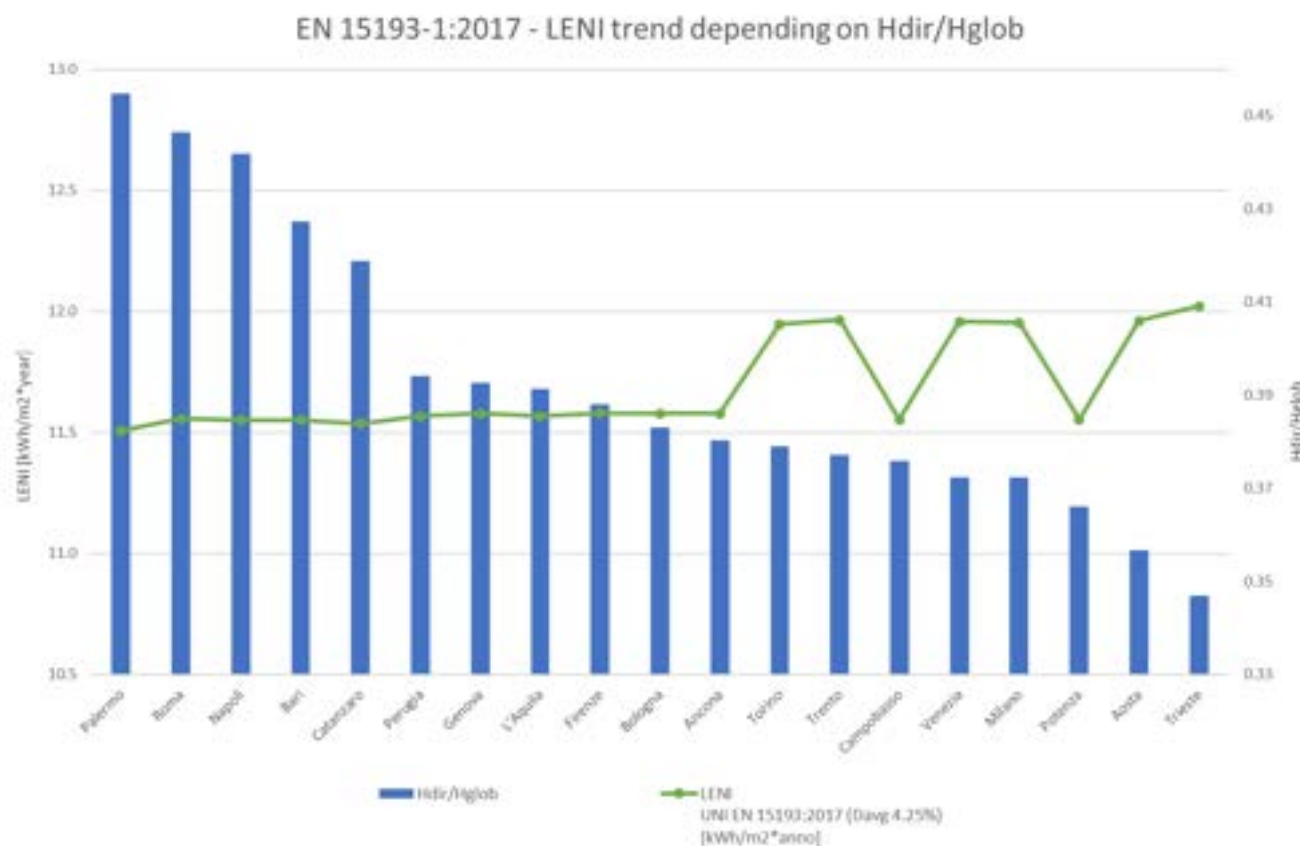


Figura 13 Andamento del LENI al variare del rapporto H_{dir}/H_{glob}

5.2 Macro-gruppo Metodi Alternativi

Attraverso un set di algoritmi scritti in Grasshopper è stato calcolato il valore del *LENI* con diverse varianti del Metodo Alternativo (Tabella 1). Come descritto precedentemente, le varianti sono tutte finalizzate al calcolo delle ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale t_{AMn} , ma si differenziano per la modalità di calcolo e per le variabili di input.

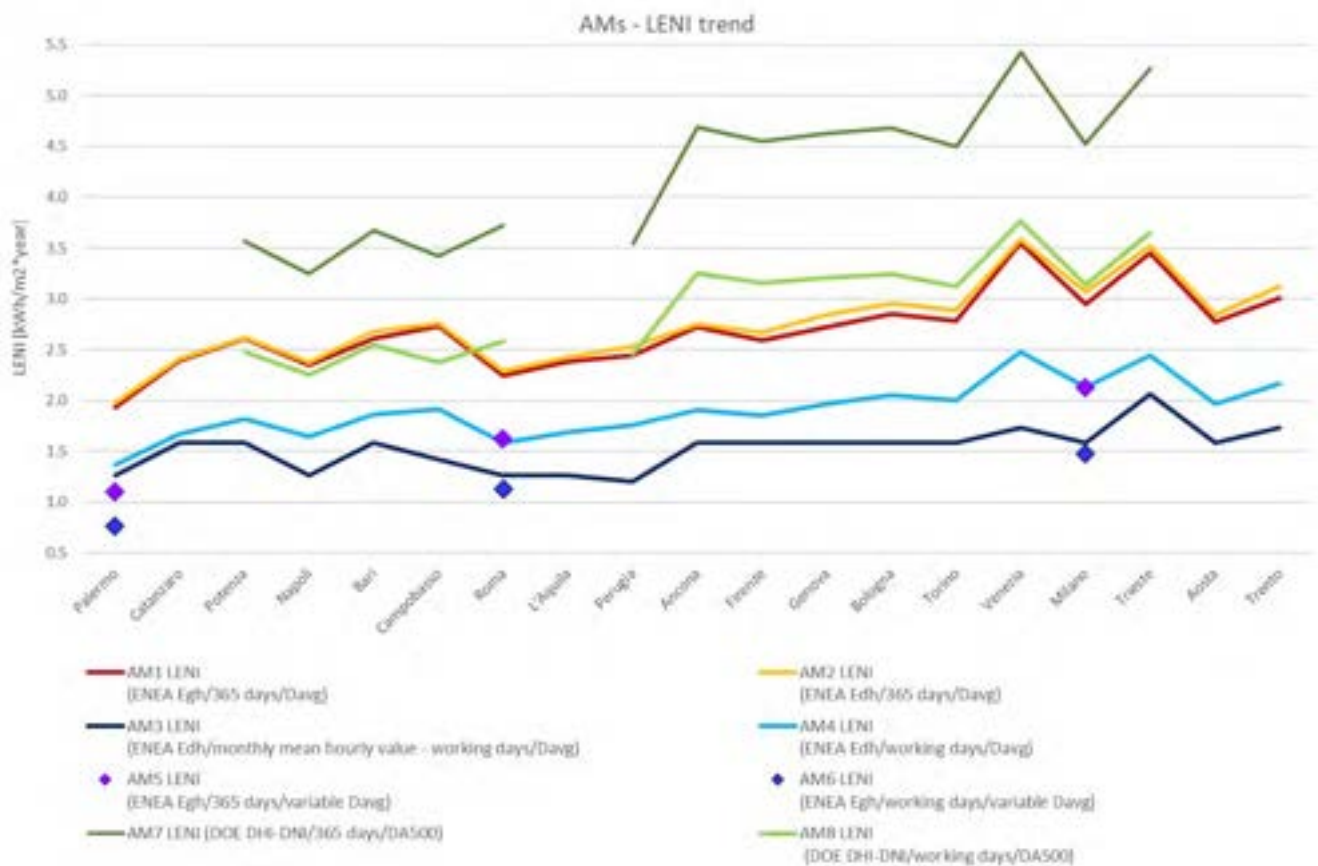


Figura 14 Andamento del LENI al variare della località per i diversi AM

- AM1** Dai risultati in (Tabella 6) e (Figura 14) emerge che i valori massimi e minimi di *LENI* registrati con questa variante sono rispettivamente Venezia 3.55 kWh/m²anno e Palermo 1.93 kWh/m²anno, la cui differenza è del 46%.
- AM2** Dai risultati in (Tabella 7) e (Figura 14) emerge che i valori massimi e minimi di *LENI* registrati con questa variante sono rispettivamente Venezia 3.58 kWh/m²anno e Palermo 1.97 kWh/m²anno, la cui differenza è del 45%. Questi risultati dimostrano che nell'applicazione di queste due varianti dell'AM, l'influenza della componente diretta della luce naturale non è significativa in quanto, i valori del *LENI* per le varie località scegliendo in input E_{gh} o E_{dh} sono inconsistenti: la minima variazione a Potenza tra i due metodi è di 0.01 kWh/m²anno, la massima è di 0.12 kWh/m²anno a Genova e a Milano. L'allineamento dei risultati tra le due varianti è dovuto al fatto che all'interno delle due procedure di calcolo si fa ricorso allo stesso D_{avg} , il quale permette di trattare i dati climatici di input solo dal punto di vista quantitativo numerico e non direzionale, aspetto fondamentale della componente diretta.

Tabella 6 Valori del LENI calcolati con l'AM1

location	latitude	AM1 LENI
		(ENEA Egh/365 days/Davg) [kWh/m2*year]
Palermo	38.12	1.93
Catanzaro	38.90	2.39
Potenza	40.63	2.61
Napoli	40.85	2.35
Bari	41.12	2.61
Campobasso	41.55	2.73
Roma	41.90	2.24
L'Aquila	42.35	2.38
Perugia	43.10	2.44
Ancona	43.62	2.72
Firenze	43.77	2.59
Genova	44.40	2.72
Bologna	44.48	2.85
Torino	45.05	2.78
Venezia	45.43	3.55
Milano	45.45	2.95
Trieste	45.63	3.45
Aosta	45.73	2.77
Trento	46.07	3.01
LENI mean value		2.69

Tabella 7 Valori del LENI calcolati con l'AM2

location	latitude	AM2 LENI
		(ENEA Edh/365 days/Davg) [kWh/m2*year]
Palermo	38.12	1.97
Catanzaro	38.90	2.41
Potenza	40.63	2.62
Napoli	40.85	2.37
Bari	41.12	2.68
Campobasso	41.55	2.76
Roma	41.90	2.29
L'Aquila	42.35	2.43
Perugia	43.10	2.53
Ancona	43.62	2.75
Firenze	43.77	2.67
Genova	44.40	2.84
Bologna	44.48	2.96
Torino	45.05	2.89
Venezia	45.43	3.58
Milano	45.45	3.07
Trieste	45.63	3.52
Aosta	45.73	2.84
Trento	46.07	3.12
LENI mean value		2.75

- **AM3** Dai valori in (Tabella 8) e (Figura 14) si nota come questa variante, che ricalca l'AM originario [14], permetta di ottenere valori del *LENI* tra i più bassi, a fronte però di una semplificazione effettuata sui valori E_{dh} (aggregazione media mensile oraria). La grande differenza rispetto ad AM1 e AM2 è dovuta al numero totale di ore calcolate in quanto, in questo caso, sono considerati soltanto i giorni lavorativi (253 invece che 365). I valori massimi e minimi del *LENI* registrati con questa variante sono rispettivamente a Trieste 2.06 kWh/m²anno e a Perugia 1.2 kWh/m²anno, la cui differenza è pari al 42%.

Tabella 8 Valori del *LENI* calcolati con l'AM3

location	latitude	AM3 LENI	
		(ENEA E_{dh} /monthly mean hourly value - working days/ D_{avg})	
		[kWh/m ² *year]	
Palermo	38.12		1.26
Catanzaro	38.90		1.58
Potenza	40.63		1.58
Napoli	40.85		1.26
Bari	41.12		1.58
Campobasso	41.55		1.42
Roma	41.90		1.26
L'Aquila	42.35		1.26
Perugia	43.10		1.20
Ancona	43.62		1.58
Firenze	43.77		1.58
Genova	44.40		1.58
Bologna	44.48		1.58
Torino	45.05		1.58
Venezia	45.43		1.73
Milano	45.45		1.58
Trieste	45.63		2.06
Aosta	45.73		1.58
Trento	46.07		1.73
LENI mean value			1.53

- **AM4** In questa variante ridotta dell'AM2 i risultati ottenuti sono inferiori ovviamente rispetto a questo metodo, ma comunque superiori rispetto a quelli dell'AM3. Ciò è dovuto al fatto che per quanto sia stato allineato il numero di ore lavorative totali, l'AM3 conserva la semplificazione nel calcolo degli E_{dh} . I valori massimi e minimi del *LENI* registrati con questa variante sono rispettivamente a Venezia 2.48 kWh/m²anno e a Palermo 1.37 kWh/m²anno, la cui differenza è pari al 44%.
- **AM5** Nella (Figura 14) sono riportati i valori medi del *LENI* dei quattro orientamenti, mentre in (Tabella 10) sono riportati i dati di tutti e quattro gli orientamenti per le 3 località considerate. I valori massimi e minimi ottenuti sono rispettivamente a Milano di 2.13 kWh/m²anno e a Palermo di 1.1 kWh/m²anno, la cui differenza è del 48%. Confrontando il valore medio del *LENI* dei quattro orientamenti con il valore del *LENI* dell'AM1, si possono individuare differenze significative: questo avviene perché nell'AM5 la componente diretta della luce naturale ha una grossa rilevanza nel calcolo degli illuminamenti interni in quanto sono considerati 4 affacci verso i 4 punti cardinali. La massima differenza a nord tra Milano e Palermo è del 45% (1.23 kWh/m²anno), ad est tra Milano e Palermo è del 46% (0.92 kWh/m²anno), ad ovest tra Milano e Palermo è del 69% (1.55 kWh/m²anno) e a sud tra Milano e Roma è del 29% (0.45 kWh/m²anno). All'interno della stessa località registriamo differenze a livello percentuale comprese tra il 43% ed il 52%. Si nota come i *LENI* dell'AM5 siano praticamente allineati con quelli calcolati nelle 3 località con l'AM4. Qualora questa condizione fosse verificata per tutte le altre località, questo allineamento potrebbe far pensare che le semplificazioni introdotte dall'AM4 portino comunque a risultati precisi.

Tabella 9 Valori del LENI calcolati con l'AM4

location	latitude	AM4 LENI
		(ENEA Edh/working days/Davg) [kWh/m ² *year]
Palermo	38.12	1.37
Catanzaro	38.90	1.67
Potenza	40.63	1.82
Napoli	40.85	1.64
Bari	41.12	1.86
Campobasso	41.55	1.91
Roma	41.90	1.59
L'Aquila	42.35	1.68
Perugia	43.10	1.75
Ancona	43.62	1.91
Firenze	43.77	1.85
Genova	44.40	1.97
Bologna	44.48	2.05
Torino	45.05	2.00
Venezia	45.43	2.48
Milano	45.45	2.13
Trieste	45.63	2.44
Aosta	45.73	1.97
Trento	46.07	2.16
LENI mean value		1.91

Tabella 10 Valori del LENI calcolati con l'AM5

location	latitude	AM5 LENI					max-min [kWh/m2*year]	max-min [%]
		(ENEA DHI-DNI/365 days/variable Davg)						
		[kWh/m2*year]						
		North	East	West	South	orientation avg		
Palermo	38.12	1.49	1.08	0.71	1.12	1.10	0.78	52.3
Roma	41.90	1.90	1.40	1.56	1.09	1.62	0.81	42.6
Milano	45.45	2.72	2.00	2.26	1.54	2.13	1.18	43.4
LENI mean value		2.04	1.49	1.51	1.25	1.62		

- **AM6** I valori medi per i 4 orientamenti sono mostrati in (Figura 14) e (Tabella 11). Questa variante restituisce i valori del *LENI* più bassi tra tutte quelle qui studiate. Il valore massimo tra la media dei 4 orientamenti lo si registra a Milano con 1.48 kWh/m²anno, il minimo a Palermo con 0.76 kWh/m²anno. La differenza è pari al 48%.

Tabella 11 Valori del LENI calcolati con l'AM6

AM6 LENI (orientation avg)		
location	latitude	(ENEA DHI-DNI/working days/variable Davg) [kWh/m ² *year]
Palermo	38.12	0.76
Roma	41.90	1.12
Milano	45.45	1.48
LENI mean value		1.12

- **AM7** Nella (Figura 14) sono riportati i valori medi del *LENI* dei quattro orientamenti, mentre in (Tabella 12) sono mostrati anche i valori delle 15 località per ogni orientamento. Confrontando i diversi orientamenti, la massima differenza percentuale si riscontra sempre tra Milano e Palermo: a nord è del 52% (3.67 kWh/m²anno), ad est del 56% (3.15 kWh/m²anno), ad ovest del 63% (3.19 kWh/m²anno) e a sud del 69% (2.78 kWh/m²anno). All'interno della stessa località registriamo sempre differenze considerevoli a livello percentuale tra gli orientamenti con i valori del *LENI* massimi a nord e minimi a sud: la differenza più consistente è a Roma con il 68.1%, quella inferiore è a Trieste con il 38%. È interessante notare come i valori ottenuti con questa variante siano i più alti rispetto agli altri casi. Ciò può essere dovuto sia ai diversi dati climatici di input, che in questo caso derivano da misurazioni risalenti agli anni 70, sia alla modalità di valutazione della penetrazione della luce diurna: l'accensione dell'impianto di illuminazione è prevista laddove non si registrino 500 lux su almeno il 50% dell'area operativa.

Tabella 12 Valori del *LENI* calcolati con l'AM7

location	latitude	AM7 LENI					max-min [kWh/m2*year]	max-min [%]
		(DOE DHI-DNI/365 days/DA500)						
		[kWh/m2*anno][kWh/m2*anno]						
		North	East	West	South	orientation avg		
Palermo	38.12	3.36	2.47	1.86	1.24	2.23	2.12	63.1
Potenza	40.63	4.65	3.56	2.50	1.93	3.16	2.72	58.5
Napoli	40.85	4.77	3.58	2.68	1.96	3.25	2.81	58.9
Campobasso	41.55	5.42	4.16	2.84	2.26	3.67	3.16	58.3
Roma	41.90	5.43	3.82	2.72	1.73	3.43	3.70	68.1
L'Aquila	42.35	4.84	3.51	2.84	1.99	3.30	2.85	58.9
Ancona	43.62	5.32	3.76	3.05	2.03	3.54	3.29	61.8
Firenze	43.77	6.24	4.95	4.22	3.34	4.69	2.90	46.5
Genova	44.40	6.14	4.70	4.21	3.14	4.55	3.00	48.9
Bologna	44.48	6.17	4.69	4.40	3.27	4.63	2.90	47.0
Torino	45.05	6.24	4.83	4.36	3.30	4.68	2.94	47.1
Venezia	45.43	6.15	4.53	4.31	3.02	4.50	3.13	50.9
Milano	45.45	7.03	5.62	5.05	4.02	5.43	3.01	42.8
Trieste	45.63	5.69	4.60	4.29	3.53	4.53	2.16	38.0
Aosta	45.73	6.89	5.48	4.89	3.82	5.27	3.07	44.6
LENI mean value		5.62	4.28	3.61	2.71	4.06		

- **AM8** I risultati di questa variante sono ottenuti adottando lo stesso criterio di riduzione dei giorni lavorativi proposto nell'AM4. I valori medi del *LENI* per i 4 orientamenti sono mostrati (Figura 14) e (Tabella 11). Il valore massimo tra la media dei 4 orientamenti lo si registra a Milano con 3.76 kWh/m²anno, il minimo a Palermo con 1.55 kWh/m²anno. La differenza è pari al 58%. I risultati di questa variante si vanno ad allineare a quelli dell'AM1 e AM2.

Tabella 13 Valori del LENI calcolati con l'AM8

location	latitude	AM8 LENI (orientation avg)
		(DOE DHI-DNI/working days/DA500) [kWh/m ² *anno]
Palermo	38.12	1.55
Potenza	40.63	2.47
Napoli	40.85	2.25
Campobasso	41.55	2.54
Roma	41.90	2.37
L'Aquila	42.35	2.59
Ancona	43.62	2.45
Firenze	43.77	3.25
Genova	44.40	3.15
Bologna	44.48	3.21
Torino	45.05	3.25
Venezia	45.43	3.12
Milano	45.45	3.76
Trieste	45.63	3.14
Aosta	45.73	3.65
LENI Mean value		2.67

6 Conclusioni

L'analisi dei risultati ottenuti dai due macro-gruppi ci permette di trarre delle conclusioni globali elencate di seguito:

- La UNI EN 15193-1:2017 introducendo elementi *climate based* e, raffinando il calcolo di t_d e t_n , ha permesso una diminuzione media del *LENI* tra tutte le località analizzate del 15% rispetto alla versione precedente della norma. Il *LENI* medio delle 19 località con la versione del 2008 è di 13.82 kWh/m²anno mentre con la versione del 2017 è 11.69 kWh/m²anno.
- I *LENI* medi tra tutte le località calcolati con le varianti del Metodo Alternativo AM1, AM2, AM3 ed AM4 sono compresi tra un minimo di 1.53 kWh/m²anno (AM3) ed un massimo di 2.75 kWh/m²anno (AM2). Il valore massimo tra le località invece è di 3.58 kWh/m²anno (a Venezia, AM2), il minimo di 1.20 kWh/m²anno (a Perugia, AM3).
- Le differenze di *LENI* tra il metodo da norma versione 2017 e l'AM3 (l'AM definito in [14] ma usando i nuovi dati climatici forniti da ENEA) come mostrato in (Tabella 14) sono consistenti (mediamente pari all'87%) nonostante il perfezionamento del metodo di calcolo rispetto al 2008.
- Sono state introdotte delle varianti di calcolo dell'AM del 2014 che permettessero di superare le criticità allora evidenziate. Tra i vari metodi proposti si può dire che i più accurati siano l'AM5 e l'AM6 i quali sono basati su calcoli orari simultanei di $\bar{E}_m$ ed E_{gh} per un numero di giorni lavorativi pari a 253, considerando anche la direzionalità della radiazione. Questo metodo è tuttavia piuttosto complesso da applicare e dispendioso in termini di tempo. Inoltre, poiché è basato sul modello del cielo di Perez che calcola la componente globale della luce naturale a partire da irradianze diffusa e diretta normale, non è stato possibile fare valutazioni sui fenomeni di abbagliamento nell'ambiente.
- L'AM7 basato sulla DA richiede anch'esso un calcolo piuttosto articolato oltre a fare uso di dati climatici in formato EPW, non reperibili aggiornati.
- Tra le altre varianti AM1, AM2 e AM4, quest'ultima è stato valutato come miglior compromesso tra accuratezza e semplicità di utilizzo. Esso infatti usa dati di illuminamento esterno orari forniti da ENEA nella sua componente diffusa, coniugandosi dunque perfettamente con l'utilizzo del D_{avg} standard; inoltre prevede una riduzione dei giorni dell'anno in funzione degli effettivi giorni lavorativi. Inoltre, si

è riscontrato come vi sia un allineamento dei valori del *LENI* calcolati tra questo metodo e l'AM5, ovvero quello ritenuto più accurato. Come mostrato in (Tabella 14) la differenza media percentuale tra il metodo da norma 2017 e l'AM4 è dell'84%.

Tabella 14 Confronto tra “Metodo 1” della UNI EN 15193-1, AM3 ed AM4

location	latitude	Hdir/Hglob	LENI	AM3 LENI	Δ EN 15193-1:2017 - AM3 [%]	AM4 LENI	Δ EN 15193-1:2017 - AM4 [%]
			EN 15193-1:2017 (Davg 4.25%) [kWh/m2*year]	(ENEA Edh/monthly mean hourly value - working days/Davg 5.7%) [kWh/m2*year]		(ENEA Edh/working days/Davg 5.7%) [kWh/m2*year]	
Palermo	38.12	0.455	11.51	1.26	89.0	1.37	88.1
Catanzaro	38.90	0.419	11.54	1.58	86.3	1.67	85.5
Potenza	40.63	0.366	11.55	1.58	86.3	1.82	84.3
Napoli	40.85	0.442	11.55	1.26	89.1	1.64	85.8
Bari	41.12	0.427	11.55	1.58	86.3	1.86	83.9
Campobasso	41.55	0.376	11.55	1.42	87.7	1.91	83.4
Roma	41.90	0.447	11.56	1.26	89.1	1.59	86.3
L'Aquila	42.35	0.391	11.57	1.26	89.1	1.68	85.4
Perugia	43.10	0.394	11.57	1.20	89.6	1.75	84.8
Ancona	43.62	0.380	11.58	1.58	86.4	1.91	83.5
Firenze	43.77	0.388	11.58	1.58	86.4	1.85	84.0
Genova	44.40	0.393	11.58	1.58	86.4	1.97	83.0
Bologna	44.48	0.383	11.58	1.58	86.4	2.05	82.3
Torino	45.05	0.379	11.95	1.58	86.8	2.00	83.2
Venezia	45.43	0.372	11.96	1.73	85.5	2.48	79.2
Milano	45.45	0.372	11.95	1.58	86.8	2.13	82.2
Trieste	45.63	0.347	12.02	2.06	82.9	2.44	79.7
Aosta	45.73	0.357	11.96	1.58	86.8	1.97	83.5
Trento	46.07	0.377	11.96	1.73	85.5	2.16	81.9
LENI mean value			11.69	1.53		1.91	

7 Bibliografia

- [1] D. P. Jenkins e M. Newborough, «An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution,» *Applied Energy*, vol. 84, n. 6, pp. 608-622, 2007.
- [2] Technical Committee CEN/TC 169 Light and lighting, *UNI EN 15193-1:2017 - Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 1: Specificazioni, Modulo M9*, Ente, 2017.
- [3] J. Mardaljevic, J. Christoffersen e P. Raynham, «A proposal for European Standard for Daylight in buildings,» 2006.
- [4] J. Longmore, «Daylighting: a current view,» *Light and Lighting*, vol. 68, n. 3, pp. 113-119, 1975.
- [5] K. Johnsen e J. Christoffersen, «Dagslys i rum og bygninger. (SBianvisning 219),» Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.København., 2008.
- [6] M. Zinzi e A. Mangione, «The Daylighting Contribution in the Electric Lighting Energy Uses: EN Standard and Alternative Method Comparison,» *Energy Procedia*, vol. 38, pp. 2663-2668, 2015.
- [7] M. Tian e S. Yuehong, «An Improvement to Calculation of Lighting Energy Requirement in the European Standard EN 15193:2007,» *Journal of Daylighting*, vol. 1, pp. 16-28, 2014.
- [8] V. R. Lo Verso, A. Pellegrino e F. Pellerey, «A multivariate non-linear regression model to predict the energy demand for lighting in rooms with different architectural features and lighting control systems,» *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 151-163, 2014.
- [9] S. Moret, M. Noro e K. Papamicha, «Daylight harvesting: a multivariate regression linear model for predicting the impact on lighting, cooling and heating,» in *Building Simulation Applications, BSA 2013 - 1st IBPSA Italy Conference*, Bolzano (Italy), 2013.
- [10] D. H. W. Li e S. L. Wong, «Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings,» *Applied Energy*, vol. 84, n. 12, pp. 1199-1209, 2007.
- [11] R. Walger da Fonseca, E. L. Didoné e F. O. Ruttkay Pereira, «Using artificial neural networks to predict the impact of daylighting on building final electric energy requirements,» *Energy and Buildings*, vol. 61, pp. 31-38, 2013.
- [12] B. Mattoni, F. Bisegna, A. Mangione, C. Rizzo, G. Scaccianoce e M. Zinzi, «Towards a more sustainable city: the role of the Daylight Factor in evaluationg the energy requirements of buildings,» in *Conference Proceedings - 2018 International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE2018)*, Tokyo, 2018.
- [13] A. Mangione, B. Mattoni, F. Bisegna, D. Iatauro e M. Zinzi, «On the validity of Daylight Factor for evaluating the energy performance of building,» in *IEEE Xplore, Conference Proceedings – 18th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Palermo, 2018.
- [14] M. Zinzi, A. Mangione e G. Fasano, «Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici,» ENEA, 2014.
- [15] R. Perez, K. Webster, R. Seals, R. Stewart e J. Barron, «Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions—description of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation data bases,» *Solar Energy*, vol. 38, n. 1, pp. 33-44, 1987.
- [16] R. Perez, R. Seals, A. Zelenka e P. Ineichen, «Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: Prospects for performance improvements,» *Solar Energy*, vol. 44, n. 2, pp. 99-108, 1990.
- [17] R. Perez, J. Michalsky e R. Seals, «Modeling Sky Luminance Angular Distribution for Real Sky Conditions: Experimental Evaluation of Existing Algorithms,» *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 21, n. 2, pp. 84-92, 2013.

- [18] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky e R. Stewart, «Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance,» *Solar Energy*, vol. 44, n. 5, pp. 271-289, 1990.
- [19] R. Perez, R. Seals e J. Michalsky, «All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation,» *Solar Energy*, vol. 50, n. 3, pp. 235-245, 1993.
- [20] Technical Committee CEN/TC 169 Light and lighting, *UNI EN 15193:2008 - Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2008.
- [21] M. Zinzi, A. Mangione, B. Mattoni e F. Bisegna, «Analisi critica per l'individuazione di Metodi Semplificati di calcolo del LENI,» ENEA, 2015.
- [22] D. Iatauro, B. Mattoni, A. Mangione, F. Bisegna e M. Zinzi, «Analisi critica per l'individuazione di correlazioni tra il Fattore di luce Diurna e le condizioni di cielo,» ENEA, 2016.
- [23] D. Iatauro, B. Mattoni, A. Mangione e F. Bisegna, «Verso un nuovo parametro per la valutazione del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione,» ENEA, 2017.
- [24] Z. Rogers, «Daylighting metric development using Daylight Autonomy calculations in the sensor placement optimization tool,» Architectural Energy Corporation, Boulder, Colorado, 2006.
- [25] C. Reinhart e M. Andersen, «Development and validation of a RADIANCE model for translucent panel,» *Energy and Buildings*, vol. 38, n. 7, pp. 890-904, 2006.
- [26] C. Reinhart e O. Walkenhorst, «Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulation for a test office with external blinds,» *Energy and Buildings*, vol. 33, n. 7, pp. 683-697, 2001.
- [27] C. Reinhart, J. Mardaljevic e Z. Rogers, «Dynamic daylight performance metrics for sustainable building,» *LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, vol. 3, n. 1, pp. 1-25, 2006.
- [28] D. Rutten, «Grasshopper,» Robert McNeel & Associates, [Online]. Available: <https://www.grasshopper3d.com/>. [Consultato il giorno 1 10 2017].
- [29] Robert McNeel & Associates, «Rhinoceros,» Robert McNeel & Associates, [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/>. [Consultato il giorno 1 10 2017].
- [30] European Union (Directorate General XII), «Satel-Light,» [Online]. Available: <http://satel-light.com/core.htm>. [Consultato il giorno 1 10 2017].
- [31] Technical Committee CEN/TC 169 Light and lighting, *UNI EN 12464-1:2011 - Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2011.
- [32] U.S. Department of Energy's (DOE), «EnergyPlus,» [Online]. Available: <https://www.energyplus.net/>. [Consultato il giorno 1 10 2017].