



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi e approfondimenti di grandezze alternative al Daylight factor per la valutazione del contributo della luce naturale negli edifici

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

ANALISI E APPROFONDIMENTI DI GRANDEZZE ALTERNATIVE AL DAYLIGHT FACTOR PER LA VALUTAZIONE DEL CONTRIBUTO DELLA LUCE NATURALE NEGLI EDIFICI

B. Mattoni (PhD presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, Università di Roma "Sapienza")

A. Mangione (Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, Università di Roma "Sapienza")

F. Bisegna (Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, Università di Roma "Sapienza")

D. Iatauro (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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: Analisi e approfondimenti di grandezze alternative al Daylight factor per la valutazione del contributo della luce naturale negli edifici

Responsabile del Progetto: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi e approfondimenti di grandezze alternative al Daylight factor per la valutazione del contributo della luce naturale negli edifici"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Domenico Iatauro

Responsabile scientifico, Università di Roma "Sapienza", DIAEE : Dott. Fabio Bisegna

Sommario

1	Introduzione	4
2	Obiettivi ed oggetto della ricerca	5
3	Metodologia	6
3.1	Descrizione della grandezza alternativa al D_{avg} per il calcolo del $LENI$: il Daylight Factor Target	6
3.2	Applicazione della grandezza nel nostro studio	7
4	Descrizione del caso studio	8
5	Risultati	10
6	Conclusioni	18
7	Analisi sperimentale	19
8	Bibliografia.....	21

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 metodi alternativi alla norma per il calcolo del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale. Tali studi hanno portato all'attuale revisione della norma. Questo aggiornamento riporta diverse modifiche, tra le più rilevanti l'introduzione dei dati climatici delle varie località espressi sotto forma di rapporto tra H_{air}/H_{glob} (radiazione solare diretta/radiazione solare globale), 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 *D* come parametro di calcolo del contributo di luce diurna è invece rimasto invariato.

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 [12], focalizzandosi fundamentalmente su due aspetti:

- introdurre i dati climatici reali nel calcolo del *D* utilizzando il modello di cielo di Perez [13] [14] [15] [16] [17] 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 e annuali);
- valutare se il 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}^* .

Per quel che riguarda l'introduzione dei dati climatici nelle procedure di valutazione del fabbisogno di energia per l'illuminazione, le difficoltà riscontrate hanno riguardato principalmente l'complessità dei processi di calcolo. Per quanto riguarda invece la verifica della conservatività del D_{avg} , si è proceduto cercando di:

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

Nonostante le sue evidenti limitazioni, il Daylight factor 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": a differenza del D_{avg}^* giornaliero e mensile, aggregando i valori annualmente non si registrano variazioni modificando la latitudine e gli orientamenti.

A partire da queste conclusioni, il report presentato in quest'ultima annualità ha rappresentato lo step conclusivo del percorso triennale intrapreso: l'efficacia del Metodo Alternativo proposto in [12] è stata testata sia in termini quantitativi, calcolando il *LENI* per 19 capoluoghi di regione italiani al fine di 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 ottenuti per comprendere quali varianti del metodo siano più adeguate.

L'addendum del report di cui sopra prevede l'analisi di un ulteriore parametro alternativo al Daylight Factor e della sua procedura di calcolo, al fine di testarlo nella valutazione della disponibilità di luce diurna nel calcolo del LENI.

2. Obiettivi ed oggetto della ricerca

Partendo dai dati ottenuti nel precedente Report, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Dal confronto tra le due versioni della UNI EN 15193, in seguito agli aggiornamenti e le migliorie approntate nell'ultima stesura in ottica *climate-based* (attraverso il rapporto H_{dir}/H_{glob} per caratterizzare le diverse località, il calcolo per orientamento, il raffinamento del calcolo di t_{Day} e t_{Night}), si evince che con la nuova norma vi è una generale diminuzione del valore del *LENI* per ogni località rispetto alla versione precedente; tuttavia, come già avveniva nella versione 2008, non si registrano sostanziali variazioni tra le diverse località. L'introduzione degli orientamenti ha invece permesso una diversificazione del valore del *LENI* all'interno della stessa località (compresa tra l'8% e il 13%), rimanendo invece prevalentemente statico comparando uno stesso orientamento al variare della località.
- Le varianti del metodo alternativo (AM) proposte, restituiscono tutte valori del *LENI* sensibilmente inferiori a quelli delle UNI EN 15913-1:2017. Il metodo che coniuga semplicità di utilizzo e accuratezza è l'AM4: esso prevede l'uso di dati di illuminamento esterno orari forniti da ENEA nella sua componente diffusa, integrandosi perfettamente con l'utilizzo del D_{avg} standard; inoltre prevede una riduzione del numero di giorni per cui si effettua il calcolo in funzione degli effettivi giorni lavorativi. Confrontando il metodo presente nella UNI EN 15193-1:2017 e l'AM4 registriamo che la riduzione media del *LENI* si attesta sull'84%. È stato inoltre riscontrato che i risultati ottenuti con l'AM4 sono allineati con quelli ottenuti attraverso l'AM5 che è invece sicuramente il metodo più accurato (ma anche il più complesso): in questa variante il numero delle ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale è stato ottenuto simulando il cielo di Milano, Roma e Palermo con il modello di Perez e i dati climatici forniti da ENEA, e calcolando ora per ora i livelli di illuminamento interni attraverso il software Radiance (non utilizzando quindi il D_{avg}).
- Di particolare interesse sono anche i risultati ottenuti con l'AM7 e l'AM8 basati sulla Daylight autonomy (DA), che hanno permesso di valutare il *LENI* per le diverse località al variare dell'orientamento e tenendo in considerazione la distribuzione spaziale degli illuminamenti interni.

Per l'applicazione delle varianti del metodo alternativo nel precedente Report sono state quindi utilizzate due grandezze per la valutazione della disponibilità di luce diurna in ambiente: il Daylight factor standard e la Daylight autonomy. Il primo è risultato essere un parametro conservativo, semplice da utilizzare e quindi adatto a valutazioni di tipo energetico, mantenendo tuttavia delle limitazioni legate alla sua staticità (non variabile in base a latitudine ed orientamento). Esso è una grandezza sintetica adimensionale che indica il rapporto tra l'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, considerando un cielo coperto (CIE Standard Overcast Sky), esclusa quindi la componente diretta della luce solare. Può essere inserito nel calcolo del *LENI* tramite il metodo alternativo per la valutazione delle ore di accensione dell'impianto artificiale a partire da dati di illuminamento esterno misurati.

Al contrario la Daylight autonomy è una grandezza *climate-based* che tiene in considerazione le variazioni del clima luminoso, dell'orientamento e della distribuzione di luce naturale nell'ambiente. Essa è definita come la percentuale di tempo in un anno in cui in ogni punto dell'ambiente si registra il raggiungimento del livello di illuminamento minimo richiesto per il compito, grazie alla sola luce naturale. Il metodo di calcolo della DA risulta essere piuttosto articolato rispetto a quello del Daylight factor.

Come mostrato, entrambe le grandezze presentano aspetti positivi, in un caso legati alla rapidità e semplicità, nell'altro all'accuratezza dei risultati. L'aspetto che però rallenta il superamento del Daylight factor è la grande diffusione che ha tra i tecnici del settore, rendendolo utilizzabile praticamente a tutti i livelli, sia in ambito progettuale che di verifica. Un compromesso tra gli aspetti caratteristici di queste due grandezze potrebbe rappresentare una alternativa valida per la valutazione della disponibilità di luce diurna in ambiente.

A partire da queste considerazioni, il presente studio si focalizzerà sull'utilizzo di un'ulteriore grandezza alternativa e sullo studio delle sue procedure di calcolo, per la valutazione del contributo della luce diurna in un ambiente interno, al fine di determinare le ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale e calcolare infine il *LENI* attraverso il Metodo alternativo sviluppato nel Report RdS/PAR2015/087. La scelta è questa volta ricaduta su una grandezza presente nella nuova proposta di normativa prEN 17037 [18]: una normativa ormai in fase di promulgazione che, al pari della EN 12464 per l'illuminazione artificiale degli ambienti interni, definisce metodi di calcolo e requisiti per valutazione della disponibilità di luce naturale.

È sembrato ragionevole proporre questo parametro alla fine delle tre annualità per diverse ragioni, la più importante delle quali è legata al fatto che a breve i tecnici del settore dovrebbero trovarsi a lavorare con tale grandezza, ad oggi nota solo a pochi, e di cui non si conoscono le effettive potenzialità. In particolare, è sembrato opportuno consentirne una rapida divulgazione, mostrando come questa variabile possa contribuire (o, al contrario, non contribuire) alla ancora accesa questione sulla capacità del *D* di essere opportunamente rappresentativo di informazioni energetiche relative all'utilizzo di illuminazione artificiale, aspetto su cui ci si è concentrati nelle attività di questo triennio.

3. Metodologia

L'elaborazione di una grandezza alternativa al Daylight factor standard, nasce dalla necessità di tenere maggiormente in considerazione la reale disponibilità di luce diurna e le caratteristiche dell'ambiente interno ed esterno. Gli autori di [19], nell'ambito del gruppo di lavoro CEN TC169/WG11 hanno proposto di modificare i criteri di valutazione della disponibilità di luce diurna da condizioni standard basate su cieli codificati dalla CIE (attraverso il Daylight factor), a condizioni di cielo reali partendo da dati misurati. Fornendo questo tipo di input, sarà possibile valutare la ricorrenza dei valori di illuminamento in un ambiente interno previsti dalla UNI EN 12464-1:2011, ottenendo risultati differenti a seconda della località presa in considerazione. Il nuovo parametro che mette in relazione il clima luminoso e i livelli di illuminamento interni è stato definito Daylight factor target (D_T) e sarà il parametro chiave per la valutazione della presenza di luce naturale negli ambienti della nuova norma EN 17037 [18] in fase di pubblicazione.

3.1 Descrizione della grandezza alternativa al D_{avg} per il calcolo del *LENI*: il Daylight Factor Target

In base alla proposta fatta in [19], per dimostrare il raggiungimento di una adeguata condizione di luce naturale in un ambiente interno, è necessario verificare che sia garantito un determinato livello di illuminamento target, per una determinata percentuale di ore nell'anno, su una determinata percentuale di area rilevante. I livelli di illuminamento interno di riferimento sono calcolati a partire dalla disponibilità cumulativa di illuminamento diffuso esterno derivante da file climatici. Il rapporto tra queste grandezze si esprime con la seguente equazione:

$$\frac{E_T \times 100}{H_T} = D_T [\%] \quad \text{Equazione 1}$$

dove

E_T è il valore di illuminamento interno target;

H_T è il valore di illuminamento orizzontale diffuso esterno target;

D_T è il Daylight factor target ottenuto come rapporto tra le due grandezze.

Il valore di E_T dovrebbe corrispondere ai valori di illuminamento predefiniti all'interno dell'ambiente in funzione del compito visivo. Nel paper [19], gli autori stabiliscono questo target a 300 lx facendo riferimento ad alcuni studi [20] [21] che hanno dimostrato come 300 lx siano sufficienti per garantire un buon livello di illuminamento interno. In particolare, in [22] è stato analizzato che la probabilità di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale è molto alta per livelli di illuminamento inferiori ai 100 lx e al contrario piuttosto bassa per livelli di illuminamento pari o superiori ai 300 lx. Di conseguenza questi due valori sono stati presi in considerazione in [19] come limiti di riferimento - 300 lx per il calcolo del Daylight factor target (D_T) e 100 lx per il calcolo del Daylight factor target minimo (D_{TM}) - nella la progettazione di ambienti interni.

Per determinare su che periodo dell'anno calcolare H_T , in [19] sono state fatte 4 proposte:

1. considerare un periodo fisso dell'anno (ad esempio orario operativo);

2. basare il calcolo sulla posizione del sole definendo una certa altitudine come valore di riferimento;
3. prendere come riferimento gli illuminamenti orizzontali diffusi che superano una determinata soglia, in particolare solo le ore diurne;
4. definire una proporzione fissa dei valori di illuminamento nel dataset climatico.

Dopo varie prove, la scelta è ricaduta sull'ultima ipotesi che è risultata la più idonea, in grado di eliminare problematiche dovute a discrepanze tra le varie latitudini e/o effetti correlati non controllabili. Si è scelto quindi di prendere in considerazione un set fisso di dati di illuminamento esterno diffuso comune a tutti i paesi: il valore H_T di ogni località è stato determinato anzitutto ponendo in ordine decrescente i livelli di illuminamento esterno diffuso sul piano orizzontale per le 8760 ore dell'anno. Successivamente sono state estrapolate solo le prime 4380 ore (quelle con valori di illuminamento maggiore, escludendo cioè le ore notturne e quelle con valori di illuminamento particolarmente bassi) e, da questa serie di valori, è stato scelto l' E_{dh} mediano che rappresenta proprio l' H_T tipico di una determinata località.

Infine, utilizzando l'Equazione 1, sono stati calcolati in questo modo i valori di D_T di 33 località europee di cui l'unica italiana presente è Roma. L'aspetto principale di questa grandezza è che si tratta di un parametro di riferimento delle località indipendente dalla geometria dell'edificio: è il valore limite con cui i progettisti possono confrontarsi per valutare se l'edificio è progettato adeguatamente dal punto di vista illuminotecnico. In particolare, questo parametro costituisce il riferimento per ambienti con distribuzione dell'illuminazione di tipo unilaterale, con finestra cioè su un solo lato.

A partire da questo database di valori, gli autori hanno definito una proposta normativa: in un ambiente con illuminazione naturale proveniente da un solo prospetto, si dovrà raggiungere il valore di D_T su almeno il 50% dello spazio interno e per il 50% delle ore diurne (2190 ore) nell'anno, e contemporaneamente si dovrà garantire il raggiungimento del D_{TM} per tutto lo spazio, sempre per il 50% delle ore diurne nell'anno.

Questa implementazione, benché non corrisponda esattamente ad una valutazione *climate-based* completa, dovrebbe essere maggiormente aderente alle realtà climatiche locali oltre ad avere il vantaggio di poter effettuare i nuovi calcoli prevedendo una modesta variazione alla procedura implementate dai software attualmente basati sul Daylight factor standard.

Infatti, una volta identificato il parametro di riferimento D_T , i progettisti potranno calcolare il D dell'edificio con le procedure standard e valutare se esso sia uguale o maggiore a D_T .

È possibile notare come questa nuova grandezza possenga le caratteristiche di semplicità del Daylight factor standard e al contempo sembrerebbe poter prendere in considerazione tanto la distribuzione spaziale quanto i dati climatici reali come la Daylight autonomy. Per come è definita e per quello che rappresenta, il D_T parrebbe essere una grandezza efficace da utilizzare in valutazioni energetiche, in particolare all'interno dell'AM [12] per ottenere valori di *LENI*.

3.2 Applicazione della grandezza nel nostro studio

Per rendere chiaro il significato che questa nuova grandezza può assumere nel contesto normativo nazionale, e il ruolo che potrà quindi giocare in termini di valutazione energetica degli edifici, nel presente lavoro verrà calcolato il D_T per i 19 capoluoghi italiani considerando varie soglie di illuminamento interno (100, 300, 500 e 750 lx) a partire dai dati di illuminamento esterno diffuso forniti da ENEA seguendo la procedura di calcolo descritta nel paragrafo precedente.

Una volta determinato il valore di D_T di una località, a questo potrà essere associato anche un valore di *LENI*. Infatti, a partire dai valori dell' E_{dh} mediano (che determina uno specifico D_T), attraverso il suo confronto con gli E_{dh} orari forniti da ENEA all'interno del periodo operativo di riferimento (nel nostro caso 8.00 – 17.00) nelle ore in cui si verifica la condizione $E_{dh\text{orario}} \geq E_{dh\text{mediano}}$, si considera l'impianto di illuminazione "off". Viceversa, quando $E_{dh\text{orario}} < E_{dh\text{mediano}}$, la sola luce naturale non potrà garantire i livelli di illuminamento interno, e si considera quindi l'impianto di illuminazione "on": la somma delle ore di accensione in un anno calcolata con questo metodo rappresenta il valore di t_{AM} in (Equazione 2), dove invece:

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

$F_c[-]$ è il fattore di illuminamento costante;

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

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

Equazione 2

Se il D_T rappresenta il valore di riferimento per un edificio illuminato adeguatamente dal punto di vista della luce naturale, il valore di $LENI$ ad esso associato dovrebbe rappresentare il consumo energetico per l'illuminazione relativo ad un edificio che, indipendentemente dalle sue caratteristiche fisico-geometriche, garantirà il raggiungimento di un valore soglia di disponibilità di luce diurna espresso dal Daylight factor target.

4. Descrizione del caso studio

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando come caso studio un ufficio dell'edificio F51 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.

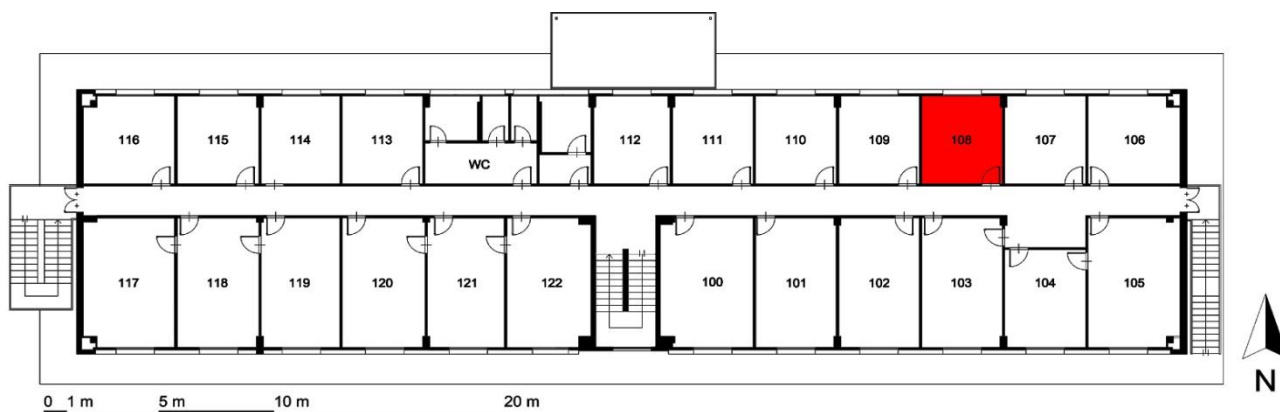


Figura 1 Planimetria dell'edificio F51 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Nel presente report è stato preso in esame l'ambiente 108 (Figura 1) le cui dimensioni e caratteristiche principali sono riportate in (Tabella 1).

Tabella 1 Caratteristiche 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 davanzale [m]	1
	Distanza dal soffitto [m]	0.5
	Coefficiente di trasmissione del vetro τ	0.8

Per il calcolo del Daylight factor target, si sono scelti 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. I periodi operativi sono stati ricavati da [2]. I calcoli sono stati effettuati con il software Grasshopper, plug-in del software di modellazione Rhinoceros.

Nell'ufficio analizzato, i valori di illuminamento medio mantenuto E_m previsti sono stati calcolati su una superficie utile posta a 0.50 m dalle pareti dell'ambiente, ad un'altezza di 0.75 m. L'ottenimento di tali risultati si avrà impiegando potenze totali installate per l'illuminazione P_n (Equazione 2) come descritte in Tabella 2, calcolate con il software commerciale gratuito DIALux 4.13.

Tabella 2 Valori di potenza impiegata per l'illuminazione per l'ottenimento di E_m

E_m	P_n
100 lx	36 W
300 lx	55 W
500 lx	110 W
750 lx	165 W

In Figura 2 è rappresentata la routine scritte in Grasshopper che permette di calcolare il valore di H_T per ogni località, rappresentato dall' E_{dh} mediano. In Figura 3 è rappresentata la routine scritte in Grasshopper che permette di calcolare il $LENI$ secondo l'AM scegliendo la località ed il valore di E_T di riferimento.

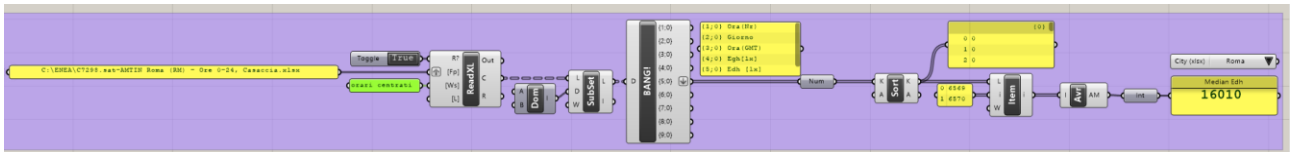


Figura 2 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo dell' H_T di ogni località analizzata finalizzato al calcolo dei diversi D_T

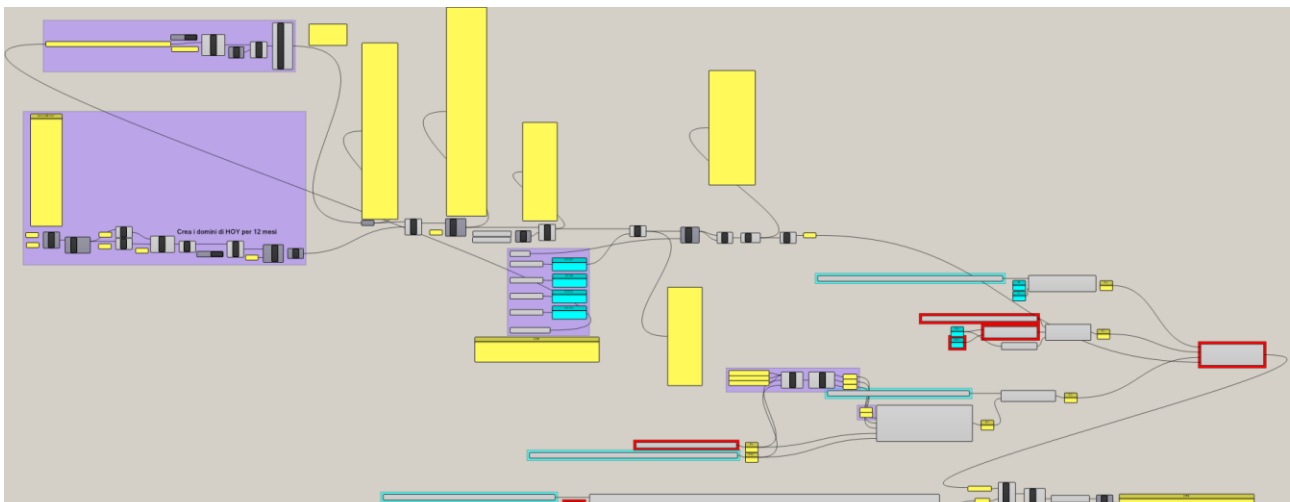


Figura 3 Algoritmo scritto in Grasshopper per il calcolo del $LENI$ secondo l'AM inserendo in input i valori E_{dh} mediano di ogni località per diversi P_n che garantiscono il raggiungimento di diversi E_T .

5. Risultati

I valori di E_{dh} mediano delle varie località calcolati secondo la procedura descritta in [19] a partire dai dati misurati da ENEA, sono riportati in (Tabella 3).

Tabella 3 Valori di E_{dh} mediano dei capoluoghi di regione italiani

city	latitude	median Edh [lx]
Palermo	38.12	17757
Catanzaro	38.90	17263
Potenza	40.63	17140
Napoli	40.85	16873
Bari	41.12	16882
Campobasso	41.55	16489
Roma	41.90	16010
L'Aquila	42.35	16484
Perugia	43.10	16188
Ancona	43.62	16204
Firenze	43.77	16051
Genova	44.40	16082
Bologna	44.48	15759
Torino	45.05	15866
Venezia	45.43	16148
Milano	45.45	15735
Trieste	45.63	15974
Aosta	45.73	15885
Trento	46.07	14907

Il valore massimo lo si registra a Palermo (17757 lx) ed il minimo a Milano (15735 lx) con una differenza di 2022 lx pari al 13% ed un valore medio di 16377 lx.

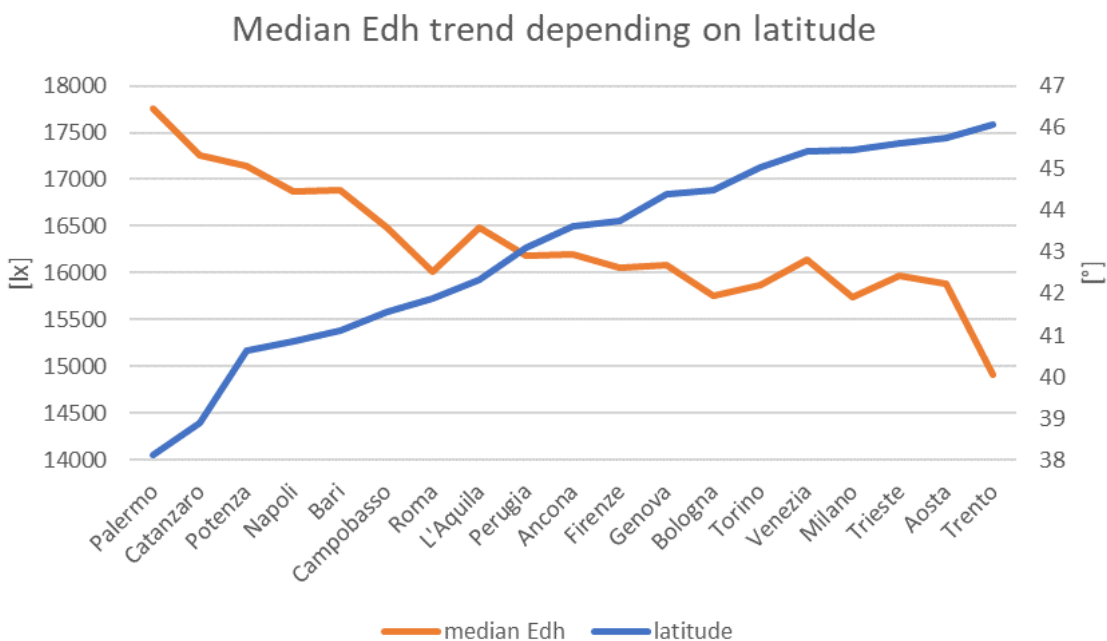


Figura 4 Andamento dell' E_{dh} mediano delle diverse località in relazione all'andamento della latitudine

Nella UNI EN 15193-1:2017 il parametro sintetico che descrive il clima luminoso di una località è il rapporto H_{dir}/H_{glob} che, tra i capoluoghi di regione italiani, ha una differenza tra il valore massimo ed il minimo pari al 39%, con una ricaduta sulla differenza del $LENI$ nelle stesse località del 4%. Come sopra descritto, la differenza tra l' E_{dh} mediano maggiore ed il minore (registrati rispettivamente a Palermo e a Trieste) è solo del 13% ma, come vedremo più avanti, porta ad una differenza tra il $LENI$ di queste due località al 7%. Ai fini energetici l' E_{dh} mediano risulta diversificare meglio il clima luminoso al variare della città rispetto al rapporto H_{dir}/H_{glob} introdotto nella norma. Se analizziamo l'andamento dei valori in relazione all'incremento della latitudine (Figura 4) ne riscontriamo un prevedibile decremento: se questa è la tendenza, esistono comunque alcune eccezioni in cui, località con latitudine inferiore hanno un E_{dh} mediano inferiore a località con latitudine superiore (ad esempio Campobasso e Roma, o Bologna e Venezia).

Se analizziamo i D_T derivati da E_{dh} mediano al variare di E_T (Equazione 1) riportati in (Tabella 4) per le varie località considerate, notiamo come per D_{T100} non ci siano grandi differenze al cambio della latitudine: il valore medio è di 0.61%, il minimo a Palermo di 0.56%, il massimo a Trento di 0.67% per una differenza di soli 0.11 punti percentuali. Come è immediatamente evidente, considerando il Daylight factor target come il valore da raggiungere perché l'edificio risulti essere adeguatamente illuminato dalla luce naturale, con un valore massimo di 0.67% non sarà difficile ottenere all'interno degli ambienti valori di illuminamento mantenuto con luce diurna non inferiori ai 100 lx. Le normative in materia di illuminazione naturale [23] [24] [25] [26] attualmente già prevedono per edifici scolastici e residenziali valori molto superiori allo 0.67% indicato. Analizzando i valori di D_{T300} vediamo che il valore medio è di 1.84%, il valore massimo di 2.01% è a Trento, il minimo di 1.69% a Palermo con una differenza di 0.32 punti percentuali. In questo caso i valori di Daylight factor si avvicinano molto a quelli previsti dalle normative vigenti [23] [24] [25] [26]. Con il D_{T500} le differenze cominciano farsi leggermente più accentuate: il valore medio è di 3.07%, il valore minimo è a Palermo con 2.82% ed il massimo sempre a Trento con il 3.35%, per una differenza di 0.54 punti percentuali. Il raggiungimento di questi valori di Daylight factor richiederà certamente una progettazione architettonica più attenta affinché possa esserci una maggiore penetrazione di luce diurna. Il valore medio di D_{T750} risulta essere di 4.61%, il minimo di 4.22% a Palermo ed il massimo di 5.03% a Trento, con una differenza di 0.81 punti percentuali.

Tabella 4 D_T delle varie località al variare di E_T

city	latitudo	D_{T100} [%]	D_{T300} [%]	D_{T500} [%]	D_{T750} [%]
Palermo	38.12	0.56	1.69	2.82	4.22
Catanzaro	38.90	0.58	1.74	2.90	4.34
Potenza	40.63	0.58	1.75	2.92	4.38
Napoli	40.85	0.59	1.78	2.96	4.44
Bari	41.12	0.59	1.78	2.96	4.44
Campobasso	41.55	0.61	1.82	3.03	4.55
Roma	41.90	0.62	1.87	3.12	4.68
L'Aquila	42.35	0.61	1.82	3.03	4.55
Perugia	43.10	0.62	1.85	3.09	4.63
Ancona	43.62	0.62	1.85	3.09	4.63
Firenze	43.77	0.62	1.87	3.12	4.67
Genova	44.40	0.62	1.87	3.11	4.66
Bologna	44.48	0.63	1.90	3.17	4.76
Torino	45.05	0.63	1.89	3.15	4.73
Venezia	45.43	0.62	1.86	3.10	4.64
Milano	45.45	0.64	1.91	3.18	4.77
Trieste	45.63	0.63	1.88	3.13	4.70
Aosta	45.73	0.63	1.89	3.15	4.72
Trento	46.07	0.67	2.01	3.35	5.03

Ottenere questi valori di D potrebbe risultare piuttosto complesso, ma è altrettanto improbabile trovare un ambiente che abbia come requisito l'ottenimento di 750 lx su metà della superficie utile per metà delle ore di luce diurna, senza considerare quelli che potrebbero risultare essere problemi legati al surriscaldamento e all'abbagliamento. In Figura 5 è riportato il grafico con l'andamento dei diversi D_T al variare della latitudine. È

evidente come le variazioni tra le diverse località siano impercettibili, decisamente meno evidenti di quelle dell' E_{dh} mediano (H_T).

Confrontando i valori di D_T di Roma presenti in [19] (D_{T100} 0.5%; D_{T300} 1.6%; D_{T500} 2.6%; D_{T750} 3.9%) con quelli qui calcolati, è interessante notare come le differenze risultino essere piuttosto marcate. Questa discrepanza è certamente prodotta dai dati di illuminamento esterno diffuso: nel nostro caso sono stati forniti da ENEA (ottenuti attraverso una campagna di misure), nel paper [19] sono invece estrapolati da file climatici in formato EPW. Tale differenza cresce al crescere del target: tra il D_{T750} di [19] e quello calcolato nel presente studio si registra una differenza del 20%.

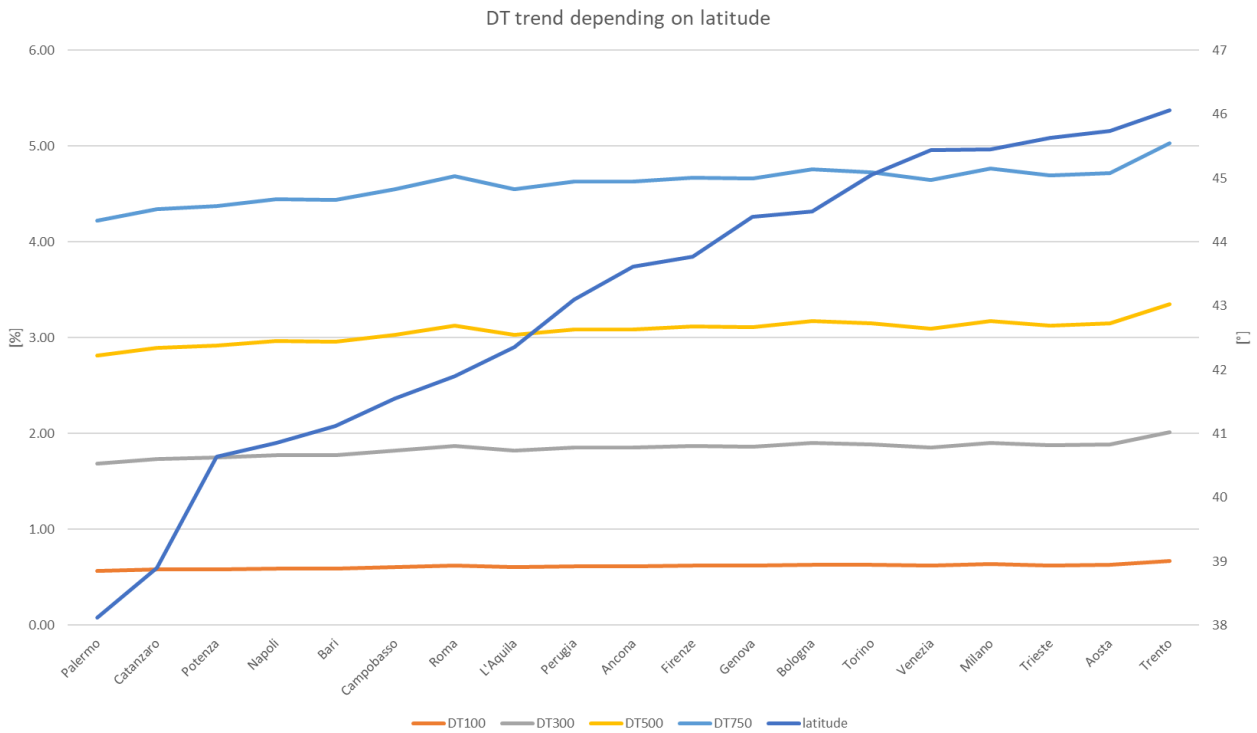


Figura 5 Andamento dei D_T in relazione all'andamento della latitudine

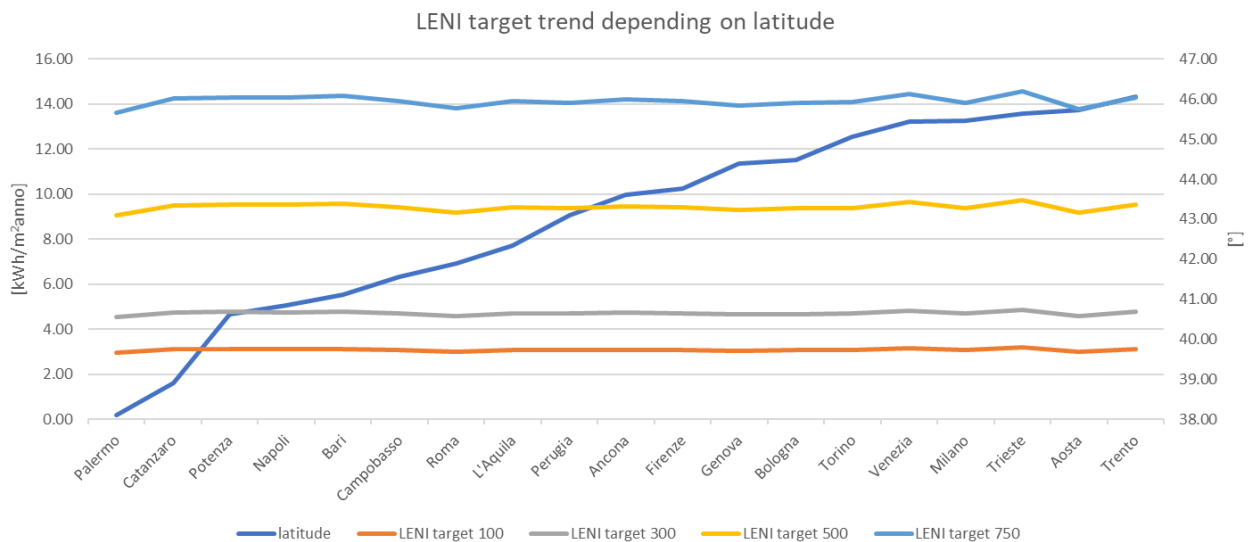
Il $LENI$ target calcolato con il Metodo alternativo risulta proporzionale a P_n come mostrato in (Tabella 5). Essendo infatti l' E_{dh} mediano per un determinato periodo operativo il medesimo nella stessa località al variare di E_T , rimangono invariate anche le ore di accensione dell'impianto di illuminazione artificiale t_{AM} : pur crescendo il valore di illuminamento interno mantenuto (da 100 a 750 lux) cresce proporzionalmente anche il valore di D_T comportando una mancata variazione delle ore di accensione. L'unica cosa che cambia è appunto la potenza impiegata dai corpi illuminanti per raggiungere i livelli di illuminamento interno target.

Analizzando nel dettaglio i valori del $LENI$ in Tabella 5, notiamo che la scarsa variabilità del D_T al variare della latitudine si ripercuote sulla variabilità del $LENI$ target: con E_T di 100 lx il valore medio è di 3.08 kWh/m²anno, il massimo a Trieste (3.18 kWh/m²anno) ed il minimo a Palermo (2.97 kWh/m²anno) con una differenza di 0.21 kWh/m²anno (un incremento del 7% che, data la proporzionalità, si registrerà anche per gli altri $LENI$ target). Per E_T di 300 lx il valore medio è di 4.71 kWh/m²anno, il massimo ed il minimo sempre nelle stesse città ma con una differenza di 0.33 kWh/m²anno. Per E_T di 500 lx e 750 lx, le differenze tra il minimo ed il massimo, sempre per le stesse città, è rispettivamente di 0.65 kWh/m²anno e 0.98 kWh/m²anno.

Tabella 5 *LENI target per un orario operativo 08.00-17.00*

city	latitude [°]	tAM (08-17)	LENI target 100 [kWh/m2*year]	LENI target 300 [kWh/m2*year]	LENI target 500 [kWh/m2*year]	LENI target 750 [kWh/m2*year]
Palermo	38.12	1202	2.97	4.54	9.07	13.61
Catanzaro	38.90	1258	3.11	4.75	9.49	14.24
Potenza	40.63	1264	3.12	4.77	9.54	14.31
Napoli	40.85	1262	3.12	4.76	9.52	14.28
Bari	41.12	1269	3.13	4.79	9.57	14.36
Campobasso	41.55	1250	3.09	4.72	9.43	14.15
Roma	41.90	1220	3.01	4.60	9.20	13.80
L'Aquila	42.35	1244	3.08	4.71	9.41	14.12
Perugia	43.10	1244	3.07	4.69	9.38	14.07
Ancona	43.62	1255	3.10	4.74	9.47	14.21
Firenze	43.77	1250	3.09	4.72	9.43	14.15
Genova	44.40	1233	3.04	4.65	9.30	13.95
Bologna	44.48	1242	3.07	4.69	9.37	14.06
Torino	45.05	1243	3.07	4.70	9.39	14.09
Venezia	45.43	1277	3.15	4.82	9.64	14.46
Milano	45.45	1246	3.07	4.69	9.38	14.07
Trieste	45.63	1289	3.18	4.86	9.72	14.58
Aosta	45.73	1218	3.01	4.60	9.19	13.79
Trento	46.07	1263	3.12	4.77	9.53	14.30
LENI mean value			3.08	4.71	9.42	14.13
Pn			43 W	66.0 W	132.0 W	198 W

Riproducendo su un grafico gli andamenti dei *LENI* target, vediamo come questi siano perfettamente sovrapponibili agli andamenti dei D_T , essendo i *LENI* target direttamente proporzionale alla variazione del D_T e dell' E_{dh} mediano con cui quest'ultimo è calcolato.


Figura 6 *Andamento dei LENI target al variare della latitudine*

L'introduzione del D_T e dell' E_{dh} mediano rendono molto semplice il calcolo del *LENI* target, bypassando il calcolo del D dell'ambiente e imponendolo come minimo pari a D_T : il *LENI* così calcolato sarà un valore target di un edificio (con Daylight factor pari a D_T) che ottempera alle normative in materia di luce naturale.

Come precedentemente descritto è possibile quindi, partendo dalla (Equazione 2), conoscere già a priori il valore di t_{AM} della località per un determinato periodo operativo: rimarrebbero così da definire le variabili P_n , F_c , F_o .

La prima è legata alla potenza impiegata per illuminare l'ambiente interno e raggiungere un determinato livello di illuminamento; F_c ed F_o possono essere ricavati dalle tabelle presenti in [2]. Definendo queste tre variabili è possibile determinare il valore di *LENI target* al variare dei periodi operativi per un edificio che rispetti i parametri illuminotecnici previsti dalla EN 17037, posto in una qualsiasi località con clima luminoso noto. A titolo esemplificativo, nel presente lavoro sono state prese in esame tre località, Palermo, Roma e Trieste (Tabella 6) il cui valore di *LENI target* è mostrato in Tabella 7 al variare degli orari operativi (quelli proposti sono stati estrapolati dalla norma EN 15193 e dalle curve di Dresler).

Tabella 6 Dati caratteristici di input per il calcolo dei *LENI target*

Et [lx]	500
Pn [W]	132
Fc	1
Fo	0.8

Tabella 7 *LENI target* a Palermo, Roma e Trieste di un edificio che rispetti i requisiti illuminotecnici della EN 17037.

operating time	hours	tAM	Roma	tAM	Palermo	tAM	Trieste
		Roma [h]	LENI target [kWh/m2*year]	Palermo [h]	LENI target [kWh/m2*year]	Trieste [h]	LENI target [kWh/m2*year]
8.00 - 16.00	8	898	6.77	856	6.46	1007	7.60
7.00 - 15.00	8	943	7.11	904	6.82	1013	7.64
9.00 - 17.00	8	1044	7.87	1032	7.78	1130	8.52
8.00 - 17.00	9	1220	9.20	1202	9.07	1289	9.72
7.00 - 17.00	10	1477	11.14	1467	11.07	1507	11.37
6.00 - 18.00	12	2190	16.52	2188	16.50	2190	16.52

Se paragoniamo questi risultati a quelli ottenuti nel precedente report (Tabella 7), vediamo come rispetto al *LENI* calcolato con il metodo da norma, il *LENI target* è inferiore e registra le differenze del clima luminoso in maniera un po' più marcata. Rispetto all'AM4 invece, le differenze restano comunque elevate.

Dobbiamo però non dimenticare che il *LENI target* non è il *LENI* esatto del nostro edificio, ma quello che otterremmo se il nostro edificio rispettasse esattamente i requisiti illuminotecnici da norma. Evidentemente con un D_{avg} calcolato per il nostro ufficio pari a 5.7%, i valori del *LENI* saranno certamente inferiori a quelli calcolati con un D_{T500} di 2.82% a Palermo, 3.12% a Roma e 3.13% a Trieste.

Tabella 8 Confronto tra differenti *LENI* e *LENI target*

location	latitude	LENI	AM4 LENI	LENI target 500
		EN 15193-1:2017 (Davg 4.25%) [kWh/m2*year]	(ENEA Edh/working days/Davg) [kWh/m2*year]	(ENEA Edh/working days) [kWh/m2*year]
Palermo	38.12	11.51	1.37	6.29
Roma	41.90	11.56	1.59	6.38
Trieste	45.63	12.02	2.44	6.74
$\Delta(max-min)$ [kWh/m2*year]		0.51	1.07	0.45
$\Delta(max-min)$ [%]		4%	79%	7%

Imponendo anche i valori di P_n (crescenti a step di 10W), di F_c (uguale ad 1), ed F_o (uguale ad 1), sarà possibile ottenere dei grafici attraverso i quali definire rapidamente il valore di W_L (Equazione 2) per differenti orari operativi e per diverse città, e conseguentemente il rispettivo *LENI* (Figura 7) (Figura 8) (Figura 9) a seconda dell'area dell'ambiente.

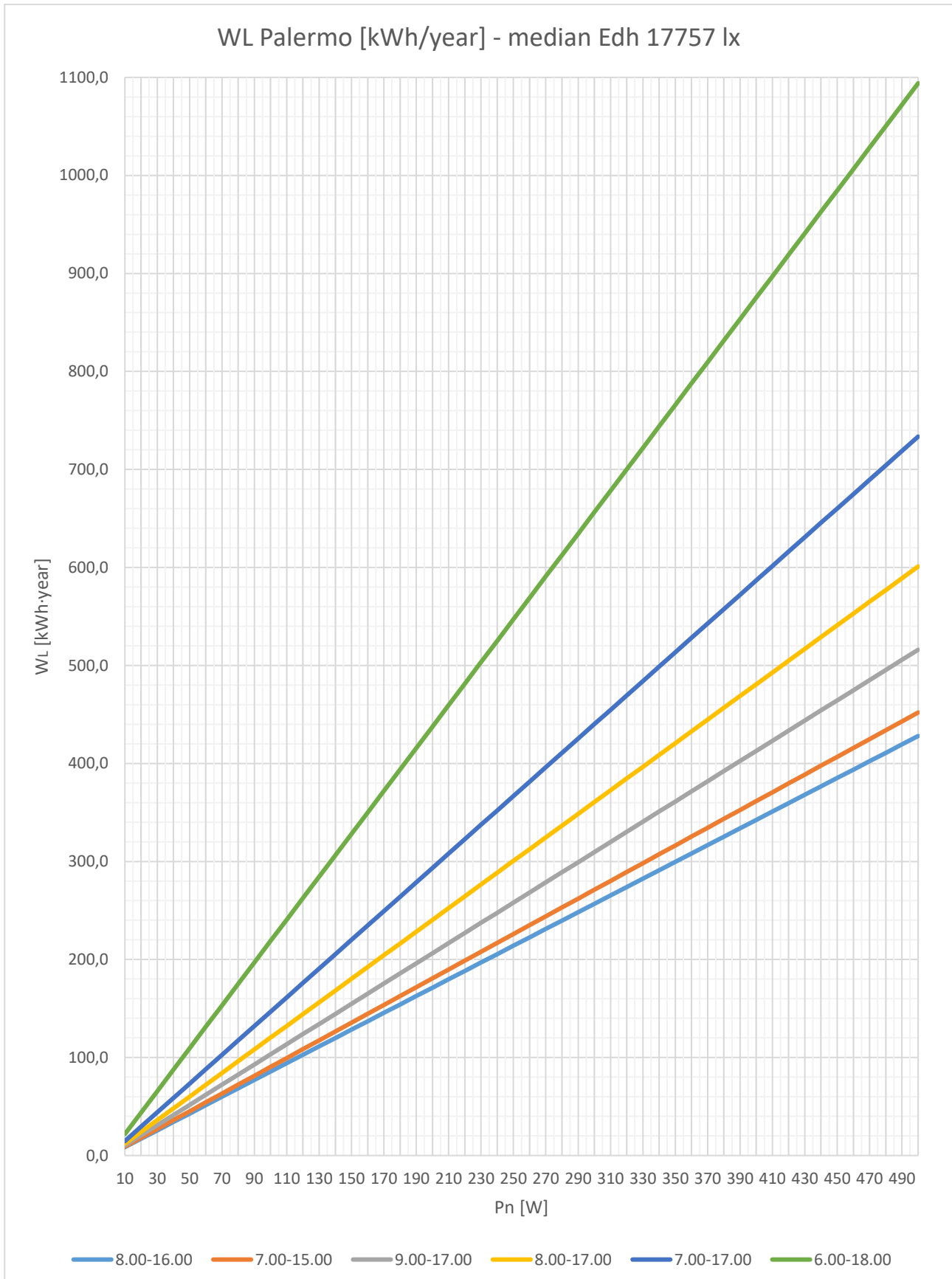


Figura 7 Andamento di W_L per differenti orari operativi a Palermo

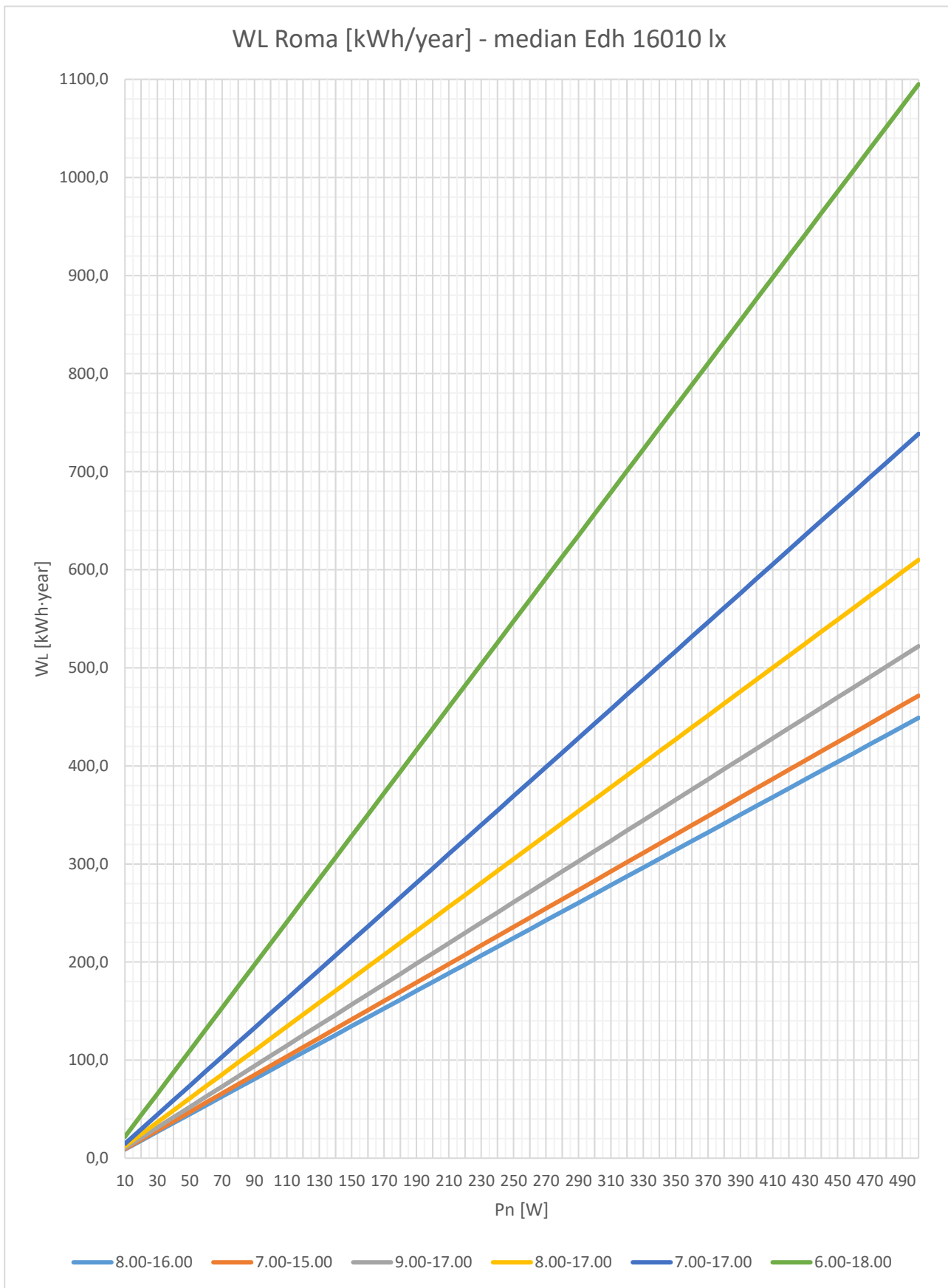


Figura 8 Andamento di W_L per differenti orari operativi a Roma

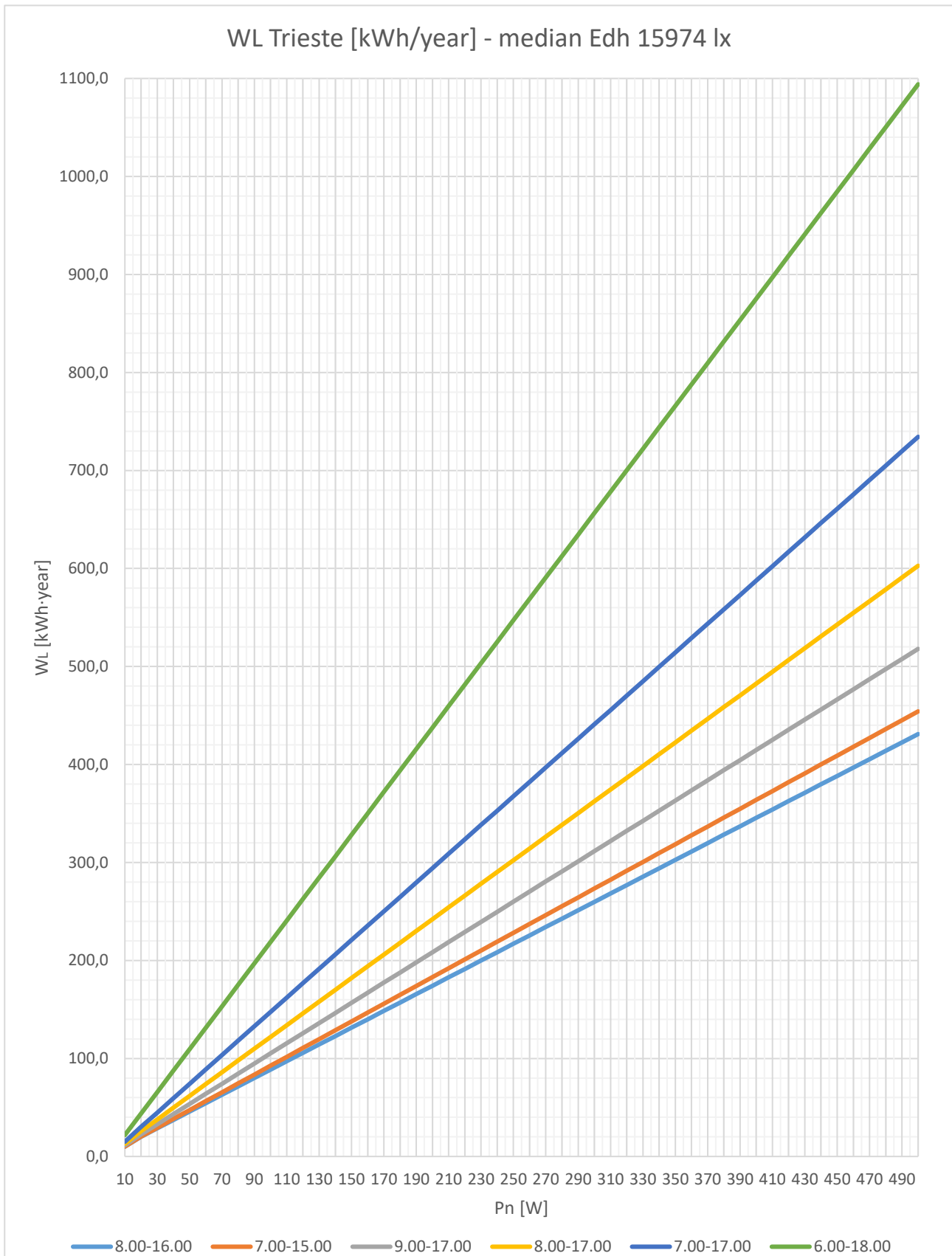


Figura 9 Andamento di W_L per differenti orari operativi a Trieste

6. Conclusioni

Il Daylight factor target è un parametro introdotto in un percorso che ha negli ultimi anni condotto alla stesura della EN 17037 [18], norma che per la prima volta definisce, tra i vari aspetti, la valutazione della luce diurna negli spazi interni e i metodi di calcolo e di valutazione della disponibilità di luce naturale. Sulla base degli studi condotti nell'arco del triennio sull'efficacia degli attuali parametri illuminotecnici (ed in particolare del D), il presente approfondimento ha lo scopo di introdurre questa nuova grandezza illuminotecnica e la sua metodologia di calcolo nelle procedure di calcolo del $LENI$, per consentire il collegamento e l'integrazione tra i vari aspetti delle più recenti normative in ambito di luce naturale ed energetica degli edifici. Il D_T in ambito illuminotecnico rappresenta la soglia minima di penetrazione di luce diurna al fine di garantire una adeguata illuminazione naturale. La sua analisi applicata ai capoluoghi di regione italiani ha mostrato che:

- l'utilizzo di dati climatici misurati (come quelli forniti da ENEA per questa ricerca) nella procedura di calcolo di D_T è estremamente semplice;
- un singolo valore di illuminamento esterno diffuso (H_T ossia l' E_{dh} mediano) potrebbe essere sufficiente a definire in maniera rapida e relativamente precisa il clima luminoso di una località;
- il D_T ha il grande vantaggio di essere indipendente delle caratteristiche fisico-geometriche degli ambienti.

L'introduzione di D_T e della sua procedura di calcolo ha permesso la definizione di grafici semplificativi applicabili alle varie località (Figura 7) (Figura 8) (Figura 9), attraverso i quali sarà possibile calcolare rapidamente già nelle prime fasi della progettazione il $LENI$ di qualsiasi edificio che rispetti i nuovi requisiti illuminotecnici imposti dalla EN 17037, indipendentemente dalla sua geometria, semplicemente scegliendo l'orario operativo ed ipotizzando la potenza installata per l'illuminazione. C'è da precisare che in questa valutazione non è stata presa in considerazione la potenza impiegate da i sistemi di controllo dell'illuminazione e dei dispositivi di illuminazione di emergenza. Sono comunque emerse delle criticità, in quanto l'uso di un E_{dh} mediano calcolato con dati misurati porta evidentemente ad avere risultati diversi a seconda della località scelta, ma le differenze registrate sui capoluoghi italiani non sono state sufficienti a far variare il D_T in maniera significativa, e di conseguenza le differenze dei valori di $LENI$ target per località diverse con clima luminoso diverso, risultano non particolarmente marcate come con altri metodi. La particolare condizione di calcolo di D_T attraverso dati di illuminamento misurati (un E_{dh} mediano tra 4380 ore di massimo illuminamento), è stata ritenuta adatta a superare il Daylight factor standard per valutazioni di tipo illuminotecnico, ma potrebbe risultare eccessivamente semplificativa per analisi energetiche. Va però ricordato che i valori di $LENI$ target calcolati sono risultati essere inferiori di circa il 50 % rispetto a quelli ottenuti con la metodologia da norma: questo confronto mette in luce come, pur trattandosi di una metodologia semplificativa da utilizzare, come proposto, nelle prime fasi della progettazione di uno spazio, è comunque più accurata nel descrivere il clima luminoso delle località rispetto alla norma. Le semplificazioni della procedura di calcolo del D_T tagliano fuori la variabilità registrata nei precedenti report dovuta alla variazione degli orientamenti, anche considerando la sola componente diffusa.

Sviluppi futuri potranno sicuramente partire da un'approfondita analisi della EN 17037, per meglio comprendere quali aspetti potrebbero entrare nelle procedure di calcolo del fabbisogno energetico per l'illuminazione di un edificio.

7. Analisi sperimentale

Al fine di validare le simulazioni effettuate oltre che ampliare ed approfondire la ricerca, si è cominciato a raccogliere dati sperimentali attraverso una campagna di misura effettuata nel 2016 e nel 2017. Sono stati registrati gli illuminamenti interni nell'ufficio del Centro Ricerche ENEA Casaccia utilizzato per le analisi numeriche. Si è proceduto disponendo all'interno dell'ambiente (Figura 10) dei luxmetri, posti su cavalletti ad un'altezza di 0.75 m dal pavimento, a distanza di 0.5 m a partire dalla finestra, nella mezzeria della stanza.



Figura 10 Ufficio del Centro Ricerche ENEA Casaccia dove è stato allestito un set di luxmetri per effettuare misurazioni sul campo.

Il monitoraggio è stato eseguito con luxmetri Skye Instruments Limited: si tratta di sensori da interno/esterno con fotodiode al silicio di elevata qualità con filtri spettrali. Le misurazioni sono state eseguite per il periodo da dicembre a marzo e per quello da giugno ad ottobre, effettuando le registrando ad intervalli orari. I dati raccolti sono ad oggi in fase di elaborazione, e verranno utilizzati in successive pubblicazioni. Di seguito sono riportati gli andamenti degli illuminamenti interni misurati da 3 sensori posti rispettivamente a 1m, 2m e 4m dalla finestra.

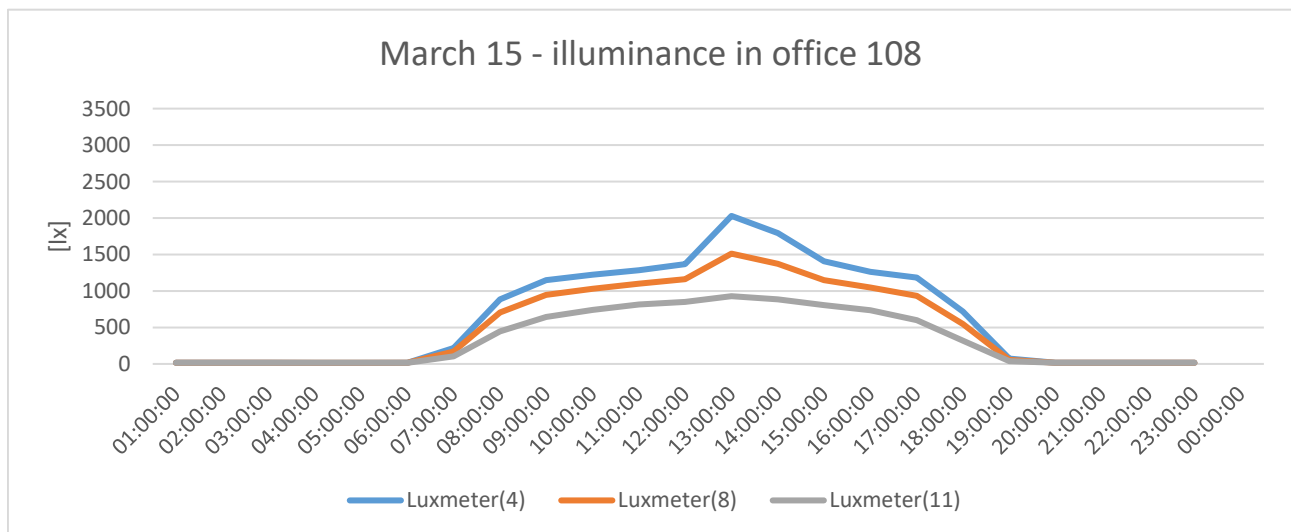


Figura 11 Andamento degli illuminamenti misurato il 15 marzo nell'ufficio 108 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA

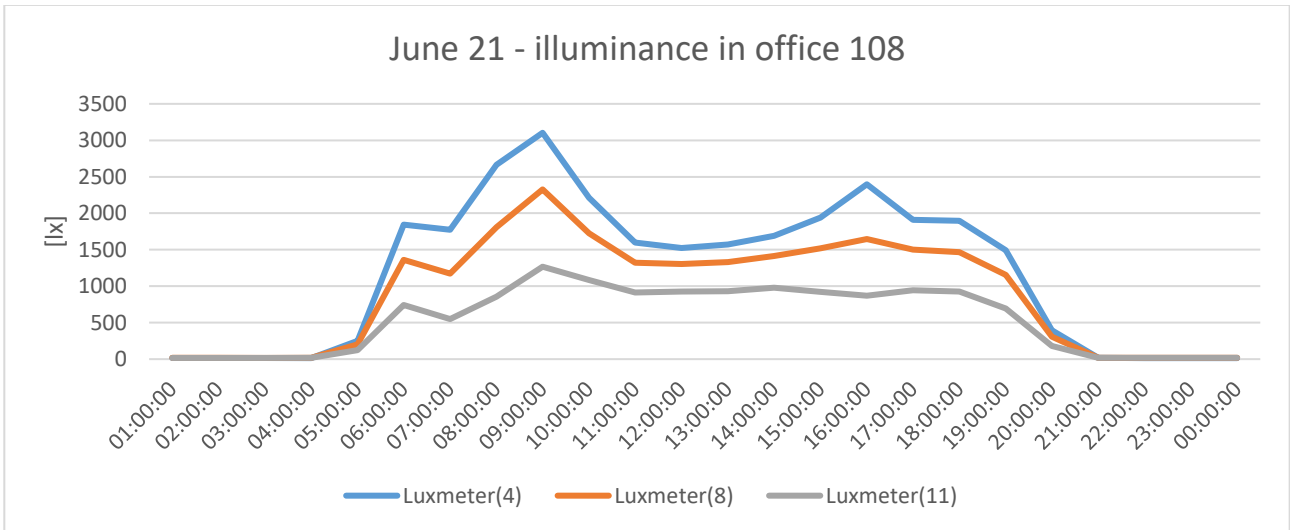


Figura 13 Andamento degli illuminamenti misurato il 21 giugno nell'ufficio 108 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA

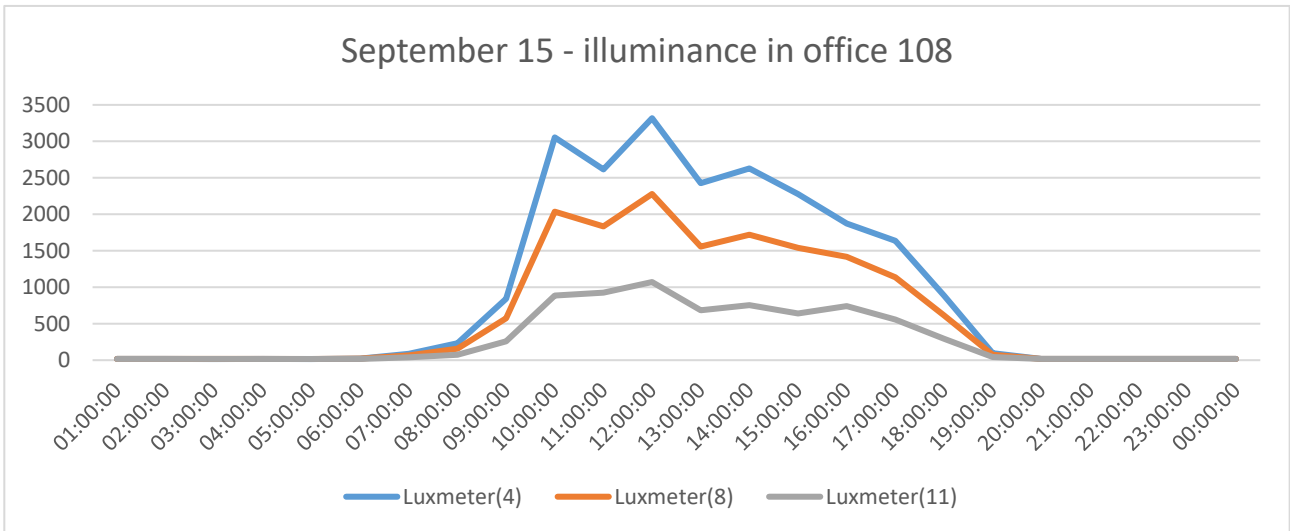


Figura 14 Andamento degli illuminamenti misurato il 15 settembre nell'ufficio 108 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA

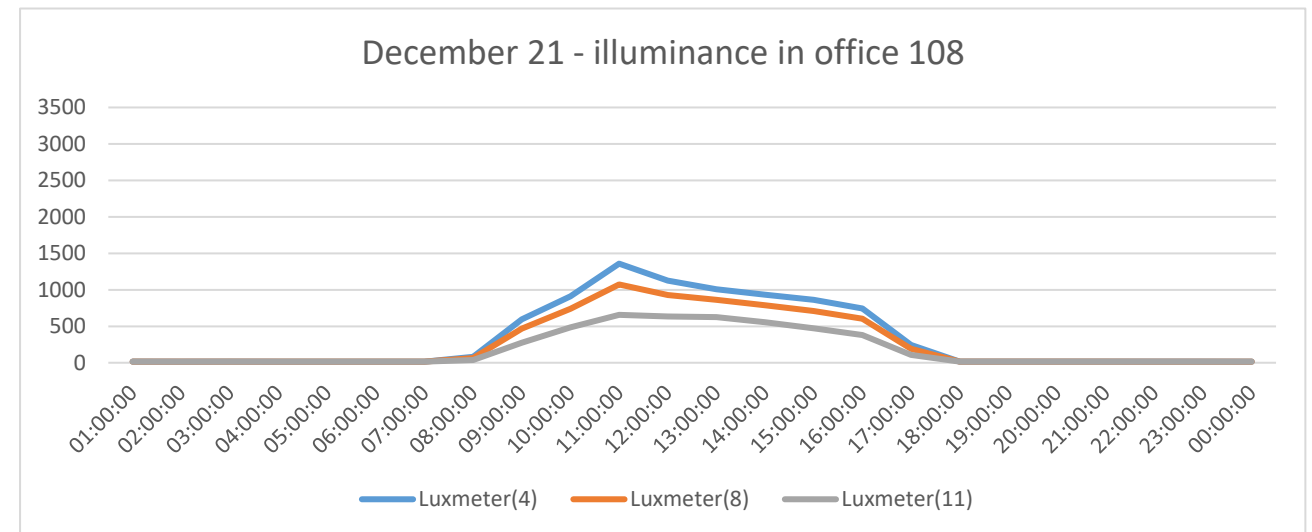


Figura 12 Andamento degli illuminamenti misurato il 21 dicembre nell'ufficio 108 del Centro Ricerche Casaccia di ENEA

8. Bibliografia

- [1] 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] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] *FprEN 17037 - Daylight of buildings*, 2018.
- [19] J. Mardaljevic e J. Christoffersen, «'Climate connectivity' in daylight factor basis of building standards,» *Building and Environment*, vol. 113, pp. 200-209, 2017.

- [20] C. Reinhart e D. Weissman, «The daylit area – Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics,» *Building and Environment*, vol. 50, pp. 155-164, 2012.
- [21] *IES LM-83-12 - Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*, 2012.
- [22] C. Reinhart, «Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds,» *Solar energy*, vol. 7, n. 1, pp. 15-28, 2004.
- [23] *UNI 10840:2007*, 2007.
- [24] Ministero dei Lavori Pubblici, *Circolare Ministeriale n. 13011*, 1975.
- [25] Ministero dei Lavori Pubblici, *Circolare Ministeriale n. 3151*, 1967.
- [26] Ministero della Salute, *Decreto Ministeriale n. 190*, 1975.
- [27] 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.