

RICERCA SISTEMA ELETTRICO**Eco Light Design**

**Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo
piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni
più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza, ecc.
nella progettazione di impianti di illuminazione**

Maurizio Rossi





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Eco Light Design

Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma
per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a
soddisfare parametri di comfort, efficienza, ecc. nella progettazione
di impianti di illuminazione

Maurizio Rossi



ECO LIGHT DESIGN

CONTRIBUTO ALLA DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DI SVILUPPO PIATTAFORMA PER
INDIRIZZARE IL PROGETTISTA VERSO LE SOLUZIONI PIÙ IDONEE A SODDISFARE PARAMETRI
DI COMFORT, EFFICIENZA, ECC. NELLA PROGETTAZIONE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE

Maurizio Rossi (Dipartimento di Industrial Design delle Arti della Comunicazione e della moda –
InDACO – del Politecnico di Milano)

Dicembre 2008

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Sommario

La presente relazione propone una rassegna delle caratteristiche di alcuni pacchetti software con caratteristiche parzialmente attinenti alla piattaforma implementata all'interno dell'attività. Viene inoltre proposto un modello di calcolo per la luce naturale che considera anche gli aspetti spettrali della radiazione. Si pone poi l'attenzione sulla problematica di determinazione delle informazioni utili (ai fini della nostra ricerca) della radiazione solare tramite dati satellitari. Infine si presentano le funzionalità della piattaforma EL-DESIGN a due differenti livelli: un primo livello previsto per la prima fase di sviluppo – implementata nel presente PAR - e un secondo livello più avanzato per eventuali sviluppi futuri.

In particolare sono definite le specifiche per:

- il calcolo della luce naturale, tenuto conto delle condizioni meteorologiche del cielo, della localizzazione geografica del sito, dell'esposizione di finestre e lucernai.
- la determinazione della dinamica temporale della luce naturale all'interno dell'ambiente.
- il modello di calcolo per la valutazione del consumo annuale dell'impianto di illuminazione artificiale, tenuto conto del contributo di luce naturale e di eventuali sensori e sistemi di gestione introdotti a modulare la luce artificiale nell'ambiente.
- l'integrazione delle nuove funzionalità descritte all'interno del programma di calcolo esistente, in modo da rendere chiara e semplice la modellazione di ambienti e soluzioni impiantistiche da parte di un progettista con livello di conoscenze nel settore illuminotecnico medio - basse.

Accordo di Programma MSE-ENEA
Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione

**Accordo di Collaborazione tra ENEA e Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO
per una attività di ricerca dal titolo: “Eco Light Design”**

Relazione in merito al punto A dell'allegato tecnico

**Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma
per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort,
efficienza ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione**

Indice

1. Stato dell'arte dei software per il progetto dell'integrazione tra luce naturale ed artificiale.....	5
1.1 SkyVision.....	5
1.2 Lightswitch Wizard.....	7
1.3 SPOT.....	11
1.4 Dialux.....	12
2. Calcolo della luce naturale	15
2.1 Modello per lo skylight	15
2.2 Posizione del sole.....	20
2.3 Spettro solare	21
3. Le immagini satellitari per la determinazione delle condizioni di irradianza media	23
3.1 I dati satellitari Satel-Light	24
3.2 La stima della copertura nuvolosa	25
3.3 Calcolo dell'irradianza globale orizzontale	27
3.4 Validazione della stima di irradianza.....	29
3.5 Calcolo dell'illuminamento.....	30
4. Utilizzo delle informazioni satellitari nel calcolo	32
5. Funzionalità minime della piattaforma EL-DESIGN	35
6 La norma UNI EN 15193	38
7. Proposta per funzionalità avanzate della piattaforma EL-DESIGN	46

1. Stato dell'arte dei software per il progetto dell'integrazione tra luce naturale ed artificiale

1.1 SkyVision

SkyVision è un programma sviluppato su piattaforma Windows di facile utilizzo, creato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche del Canada in collaborazione con enti di ricerca e governativi del Canada¹. Il software calcola, per un dato giorno assunto come dato di progettazione, le caratteristiche ottiche (di trasmittanza, di assorbimento, di riflessione e il coefficiente di guadagno per il riscaldamento termico solare) di vari tipi di lucernario, indicatori di performance delle interfacce lucernario/ambiente interno (efficienza di estrazione e il coefficiente di utilizzazione), disponibilità di luce interna (fattore di luce diurna e i valori di illuminamento) e risparmio energetico connesso all'illuminazione naturale. Il software è destinato ad essere utilizzato dai produttori di lucernari e sistemi di schermatura, designer di edifici, architetti, ingegneri, e gli istituti di ricerca.

Il programma è scaricabile, gratuitamente, all'indirizzo: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/light/skyvision>.

Le caratteristiche principali del programma sono le seguenti:

- Calcolo dettagliato delle caratteristiche ottiche del lucernaio e degli illuminamenti dell'ambiente interno.
- Modello di calcolo per il vetro ottico, sulla base dello stato dell'arte in questo settore.
- Calcolo delle caratteristiche ottiche dei lucernai e degli illuminamenti interni basato su ray-tracing. Il tracciamento raggi è anche responsabile del calcolo del flusso luminoso diretto a ciascuna superficie; la componente inter-riflessa, all'interno dell'ambiente, è stimata sulla base di un algoritmo chiamato 'zonal model'.
- Collegamento a database con le caratteristiche tecniche dei vetri, per costruire lucernai reali o personalizzati.
- Dati climatici per simulare scenari con condizioni di cielo reali e dinamiche.

Il modello di calcolo è costituito da 4 parti :

- modulo vetri che calcola le caratteristiche ottiche di un pannello di vetro composito (substrato con e senza coating) e il grazing assembly (un set di pannelli separati da un spazio pieno d'aria/gas) per un dato angolo di incidenza;
- modulo ottico lucernaio, che si occupa di calcolare tutte le caratteristiche ottiche del lucernaio;
- il modulo daylight che si occupa di calcolare la distribuzione degli illuminamenti all'interno dell'edificio e le grandezze correlate;
- sky-model che si occupa di calcolare la distribuzione delle luminanze del cielo, alla base dell'intero calcolo.

¹ A. Laouadi, A. Galasiu, M. Atif, and A. Haqqani, "Skyvision: a software tool to calculate the optical characteristics and daylighting performance of skylights", Indoor Environment Research Program, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, 1200 Montreal Road Campus, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0R6

Le grandezze di ingresso sono:

- Localizzazione del sito: l'utente deve specificare la latitudine, la longitudine, e la time zone (è possibile scegliere all'interno di un Database per le principali città del Canada e degli USA), e i valori di riflettenza del terreno e dei dintorni del luogo in cui è situato l'edificio da analizzare.
- Condizioni del cielo; due differenti tipi di condizioni sono previste: Standard skies, che sono indipendenti dalla localizzazione, oppure cieli dinamici (reali), che cambiano durante l'arco della giornata (inizio giornata con cielo sereno, parzialmente nuvoloso nel primo pomeriggio, e nuvoloso verso sera). I tipi di cielo standard includono il cielo uniformemente coperto (uniform overcast) che corrispondono a nuvole scure e dense, cielo coperto CIE (overcast sky) che corrispondono a nubi sottili, CIE average intermediate sky, cielo parzialmente nuvoloso (IESNA partially cloudy sky), cielo sereno per aree industriali, con presenza di elevato inquinamento atmosferico, cielo sereno per aree rurali (con poco inquinamento dell'aria). Le condizioni di cielo dinamiche, fanno uso di dati climatici per determinare le condizioni del cielo.
- Forme di lucernaio e vetri: l'utente può specificare la forma del lucernaio che intende utilizzare nella sua simulazione, tra i molti disponibili sul mercato. Le forme dei lucernai sono classificate in cinque categorie: dome-like, cone-like, light-pipe, flat. Ad esempio per i lucernai del tipo dome-skylight, l'utente può simulare le cupole circolari, le cupole segmentate, a bolla, o in altre forme simili. Un collegamento a un data base per i vetri consente di costruire un lucernaio a partire dai dati certificati del produttore di vetri. L'utilizzatore è anche libero di introdurre nel DB i propri dati relativi ai vetri.
- Controllo dell'illuminazione e dell'ombreggiamento: l'utente può specificare la strategia di controllo (on/off auto, o dimming continuo), il tipo e la posizione dei dispositivi di ombreggiatura (fissi o mobili) e la strategia di ombreggiatura (oraria, on/off auto, adattativo).
- Geometria degli spazi interni e caratteristiche delle superfici: lo spazio interno è composto dal cordolo (curb) (che si estende tra il lucernaio ed il tetto), dal sottotetto (well), cioè lo spazio tra il tetto e il soffitto e dalla stanza. L'utente può scegliere le dimensioni dei tre componenti, la riflettenza delle superfici, l'orientamento dell'edificio e la disposizione dei lucernai.

Le quantità calcolate in uscita sono:

- Tutte le caratteristiche del lucernaio (trasmittanza, assorbimento, riflettenza, coefficiente di guadagno per riscaldamento termico solare).
- Il fattore di luce diurna nella stanza, sul soffitto e sulle superfici delle pareti, considerando una determinata condizione di cielo.
- L'illuminamento totale dovuto alla luce diretta del sole e alla componente diffusa a livello del pavimento, del soffitto e delle pareti.
- Well efficiency (efficienza di estrazione) e coefficiente di utilizzazione.
- Percentuale della superficie del pavimento coperta dalla luce naturale.
- Percentuale annua dell'energia elettrica, destinata all'illuminazione, risparmiata.

1.2 Lightswitch Wizard

Lightswitch Wizard² è un sistema di analisi della luce naturale, rivolto ad utenti non esperti, che è stato sviluppato con l'intenzione di fornire un supporto nelle decisioni relative al lighting di uffici (privati) periferici durante le fasi iniziali di progetto. Il software (DAYSIM³) può essere liberamente scaricato all'indirizzo:

http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ie/lighting/daylight/daysim/daylightform_e.html

Il tool offre una valutazione comparativa, attendibile e veloce della quantità di luce naturale negli uffici (daylight factor e daylight autonomy) e le prestazioni energetiche di un sistema di controllo automatico (sensori di presenza e fotocellule) in riferimento a quelle ottenibili da un sistema di controllo di tipo on/off.

I sistemi di ombreggiatura, possono essere controllati manualmente o automaticamente.

Durante il processo di simulazione, i fattori di daylight precalcolati, attraverso simulazioni con Radiance, relativi a oltre 600 differenti tipi di layout di uffici, sono combinati con i dati meteorologici di oltre 285 siti del Nord America, per ottenere il profilo annuo di luce naturale per l'ambiente e la località considerati.

Il consumo annuo di energia elettrica è successivamente calcolato sulla base di un modello che simula l'occupazione e il controllo manuale dei dispositivi di ombreggiature, all'interno di uffici privati. La simulazione impiega da 30 secondi a 3 minuti e fornisce un report dettagliato della luce naturale annua disponibile e dell'energia elettrica consumata nel caso dell'ufficio esaminato.

I parametri di ingresso della simulazione sono forniti per via grafica attraverso il web, che consente all'utente di personalizzare le dimensioni, le proprietà dei materiali, i sistemi di ombreggiatura, e altre proprietà per un ufficio periferico standard (Figura 1).

Sulla base delle proprietà scelte per l'ufficio, i valori della simulazione sono estratti dal Data Base e successivamente elaborati per calcolare la disponibilità di luce naturale e il consumo di energia elettrica nell'ufficio.

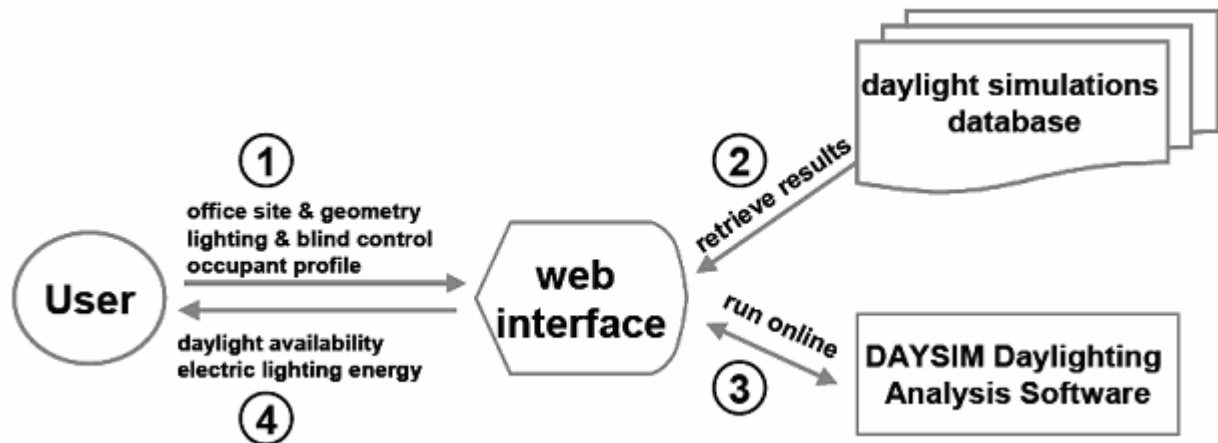


Figura 1 Schema di funzionamento del programma Lightswitch Wizard

Al fine di ridurre il tempo di simulazione, dalle ore ai minuti, senza compromettere l'accuratezza della simulazione, i coefficienti di daylight per molte possibili combinazioni di uffici, sono precalcolate, sfruttando il backward raytracer di RADIANCE (Ward and Shakespeare, 1998)⁴. I

² C. F. Reinhart, M. Morrison, F. Dubrous, "The lightswitch wizard – Reliable daylight simulations for initial design investigation", Proceedings of the Buildings Simulation 2003, Eindhoven, The Netherlands, vol. III, pp.1093-1100, August 11- 14, 2003

³ DAYSIM è una parte del Lightswitch wizard, sulle cui specifiche funzioni si dirà nel seguito.

⁴ Ward G, Shakespeare R, "Rendering with RADIANCE. The Art and Science of Lighting Visualization", Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

coefficienti di daylight offrono un metodo veloce ed affidabile per predire i valori di illuminamento sotto condizioni arbitrarie di cielo⁵.

Lightswitch utilizza il programma validato DAYSIM⁶ per convertire i coefficienti di daylight e irradianza dovuta alle condizioni climatiche o meteorologiche estratte da un file.

La Figura 2 mostra la possibilità del programma di confrontare due diversi scenari (cioè due differenti uffici): in particolare, vengono mostrati i dati di ingresso, divisi in tre gruppi e i due report di uscita ottenuti.

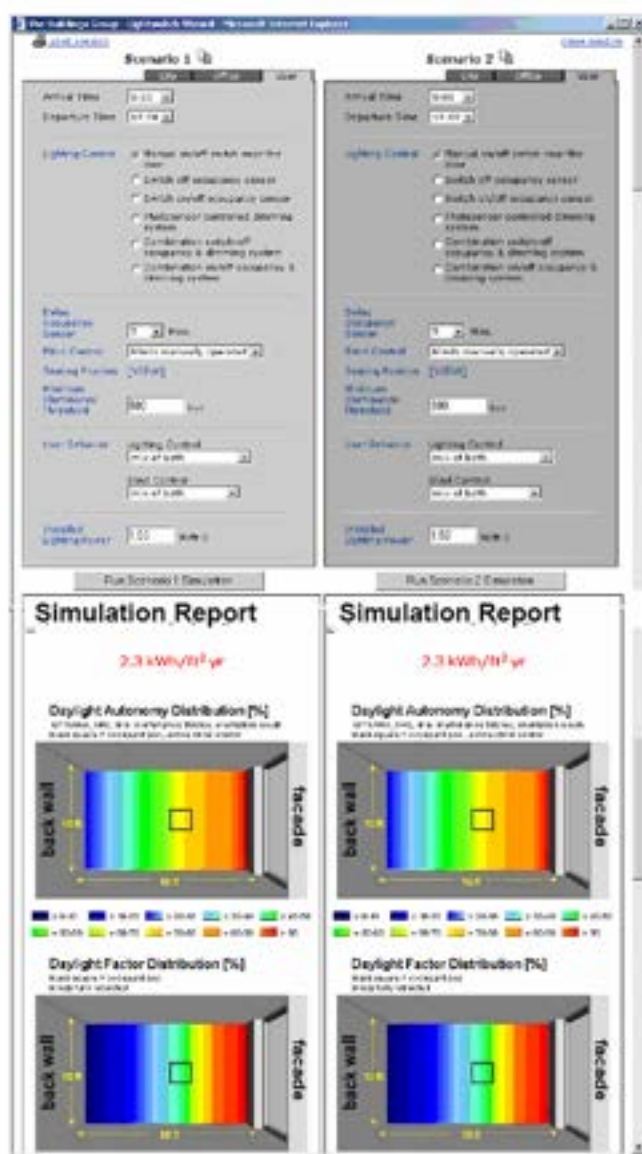


Figura 2 Lightswitch Wizard offre una comparazione passo passo dei consumi elettrici annuali e la disponibilità di daylight di due differenti layout di ufficio: la finestra principale è divisa in due parti, due parti superiori di ingresso e due parti inferiori per il report dei risultati. La colonna di sinistra si riferisce allo scenario 1, mentre quella di destra allo scenario 2. I dati di ingresso sono raggruppati in tre differenti blocchi: Site, Office, User.

L'occupazione degli spazi da parte degli utenti è caratterizzata dal rilevamento dell'ora di ingresso e di uscita dallo spazio analizzato nel corso giorno medio della settimana, i dati sono successivamente

⁵ Tregenza P R, Waters I M , "Daylight Coefficients", Lighting Research & Technology 15(2), 65-71, 1983.

⁶ Christoph F. Reinhart, "Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design", Institute for Research in Construction National Research Council Canada, Ottawa, Ont., K1A 0R6, Canada

processati attraverso un modello stocastico di occupazione, che spezza la durata della giornata lavorativa attraverso le temporanee assenze dal luogo di lavoro⁷. La risultante probabilità di occupazione media in un giorno lavorativo, è mostrata alla Figura 3. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, per un orario di lavoro che si estende dalle 8.00 del mattino, fino alle ore 17.00 del pomeriggio.

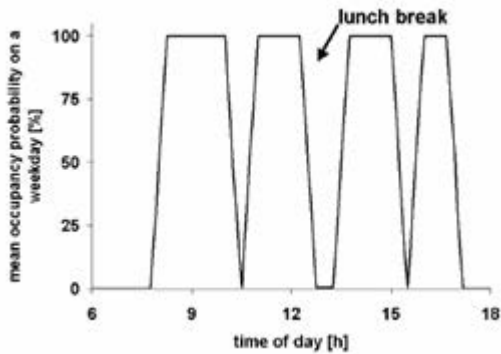


Figura 3 Probabilità media di occupazione in un giorno della settimana con arrivi e partenze degli utenti nello spazio esaminato valutata dalle ore 8.00 alle ore 17.00

Per tenere conto delle differenze specifiche tra gli occupanti, il wizard consente di specificare il comportamento dell'utente degli spazi, in riferimento alla illuminazione e all'uso dei dispositivi di ombreggiamento. Al fine di semplificare le possibili scelte dell'utente del programma, l'impianto di illuminazione e i dispositivi di ombreggiamento possono essere definiti '*attivi*' o '*passivi*' (Figura 4).

⁷ Reinhart C F, Voss K, "Monitoring manual control of electric lighting and blinds", Lighting Research & Technology, **35**:2 16 pp., 2003.

Reinhart C F, "LIGHTSWITCH 2002: A model for manual control of electric lighting and blinds", submitted to Energy & Buildings, 2002.

Reinhart C F "Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings –Simulation Studies and Analysis of Measurements", Ph.D. thesis, Technical University of Karlsruhe, Faculty of Architecture, 2001.

lighting use	
active	User operates the electric lighting in relation to ambient daylight conditions.
passive	User who keeps the electric lighting on throughout the working day.
mix of both	mix of both behaviors for an <i>ensemble</i> of offices
blinds use	
active	User opens the blinds in the morning upon arrival and partly closes them during the day to avoid direct sunlight.
passive	User keeps the blinds partly closed throughout the year to avoid direct sunlight.
mix of both	mix of both behaviors for an <i>ensemble</i> of offices

Figura 4 Parametri di ingresso nel software per definire il comportamento dell'utente dello spazio architettonico in relazione alla gestione dell'impianto di illuminazione e dei dispositivi di ombreggiatura.

Come visibile dalla Figura 2, i risultati di output forniti dal programma, risultano i seguenti:

- Il consumo elettrico annuo, per l'illuminazione, espresso in kWh/ft²; a seconda del comportamento scelto per l'utente, si riferisce a una particolare tipologia di utilizzatore oppure al valore medio di un aggregato di uffici identici.
- La quantità di luce naturale disponibile all'interno dell'edificio è espressa attraverso una mappa a falsi colori che rappresenta la distribuzione del fattore di luce diurna e del fattore di autonomia della luce diurna. Il fattore di autonomia della luce diurna è definito come la percentuale del tempo annuo di occupazione, per cui il livello minimo di illuminamento è mantenuto, all'interno dell'ambiente, per effetto della sola componente di luce naturale. È una misura della performance che considera tutte le condizioni di cielo quando l'ufficio è occupato.

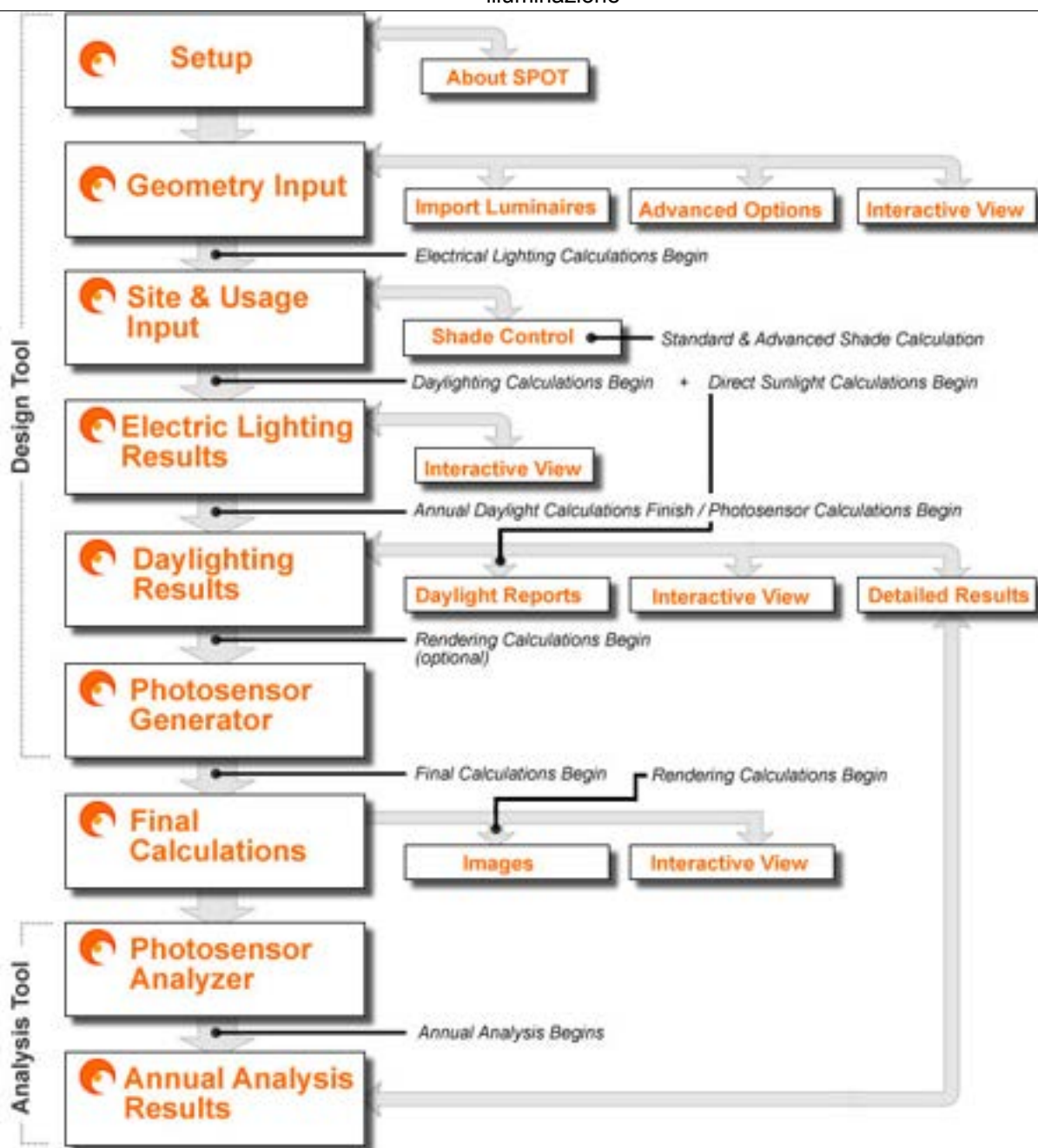


Figura 5 Flow-Chart del programma SPOT

1.3 SPOT

Sensor Placement Optimization Tool (SPOT), è pensato per aiutare i progettisti a quantificare le prestazioni di impianti di illuminazione esistenti o futuri, a valutare le caratteristiche annuali del contributo di luce diurna, ad aiutare a stabilire un posizionamento ottimale dei sensori e a determinarne i settaggi ottimali per un dato spazio e per date performance e a quantificare il risparmio annuale di energia, connessa all'illuminazione.

Il programma è in grado di gestire sorgenti di luce naturale poste sul soffitto o sulle pareti e a modellare qualsiasi tipo di apparecchio di illuminazione che sia caratterizzato da una distribuzione fotometrica espressa secondo un file IES.

Il flow-chart del programma è riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, da cui appare evidente che il programma è diviso in due sezioni principali, la prima Design Tools e la seconda Analysis Tools.

La sezione Design Tools, consiste nella gestione e inserimento di tutte le caratteristiche geometriche e di localizzazione geografica dell'edificio e consente di calcolare le performance della componente artificiale e i risultati e le prestazioni annuali del contributo di luce naturale. Il blocco Design Tool consente la disposizione automatica consigliata dei sensori per lo spazio analizzato; lo schema individuato, costituisce un buon punto di partenza per raffinamenti successivi, non essendo necessariamente la disposizione ottima assoluta. Questo blocco, consente di unire e di adattare la disposizione dei sensori e degli scenari luminosi, con le zone definite per gli apparecchi di illuminazione, analizzarne le correlazioni e, infine, stimarne le performance nel corso di un intero anno.

La seconda schermata sezione, Analysis Tools, parte dalla disposizione dei sensori, e analizza le loro performance nel corso dell'anno attraverso dati meteorologici ora per ora al fine di valutare approfonditamente il sistema sia dal punto di vista qualitativo (livelli di illuminamento) sia da quello quantitativo (risparmi energetici conseguibili).

I calcoli annuali sono basati sui modelli di cielo raccomandati dalla IESNA, che sono applicati al data base dei dati climatici annuali (TMY2⁸). Il metodo di calcolo utilizza l'illuminamento diretto (illuminamento provocato dalla regione solare di ampiezza 5°) e dall'illuminamento indiretto (illuminamento del cielo) per mediare condizioni di cielo sereno e nuvoloso.

Si osserva che mentre la stima del valore medio ottenuta da questo metodo è piuttosto accurata, i valori di illuminamento di un giorno specifico (specialmente in condizioni di cielo parzialmente coperto) sono abbastanza vicini a quelli stimati ma non forniranno mai una previsione accurata su un futuro giorno con cielo parzialmente coperto.

1.4 Dialux

Dialux⁹ è uno tra i più diffusi programmi di progettazione illuminotecnica, utilizzato in tutta Europa da architetti, lighting designer, esperti di illuminazione e arredo-luce. Permette di simulare l'illuminazione dentro e fuori gli ambienti, di calcolare e verificare in modo professionale tutti i parametri per impianti d'illuminazione interni ed esterni, giardini, strade e gallerie, fornendo risultati chiari e precisi secondo le ultime normative internazionali di settore.

Dialux, a partire dalla versione 4, effettua i calcoli di luce naturale, sia in esterni, che in interni quando ovviamente nella stanza è presente una finestra o un lucernaio. I riferimenti normativi sono la norma Tedesca DIN 5034 e la pubblicazione CIE 110¹⁰.

La cupola celeste viene suddivisa in superfici parametrizzabili, a cui viene assegnato un valore di luminanza in base al modello di cielo selezionato, il luogo e l'ora. È anche possibile includere nel calcolo il sole, come sorgente diretta di luce naturale.

⁸ Il data base contiene i dati meteorologici di un anno tipo derivati dal National Solar Radiation Data Base, raccolti dal 1960 al 1990. Dal momento che queste informazioni sono basate sui dati più accurati e recenti disponibili, è possibile utilizzarle per valutazioni economiche e di performance sufficientemente accurate, nell'ambito dell'analisi dei sistemi energetici. I dati rappresentano un set di valori, ora per ora, della radiazione solare e delle condizioni meteorologiche, che si manifestano mediamente nell'arco di un anno. Il loro impiego è quello all'interno di simulazioni al computer per sistemi di conversione dell'energia solare e per il suo utilizzo all'interno degli edifici, al fine di facilitare il confronto delle prestazioni tra differenti sistemi, configurazioni e luoghi negli Stati Uniti. I dati sono scaricabili all'indirizzo internet: http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/tmy2/.

Per maggiori dettagli, si veda il documento: User Manual for TMY2s Typical Meteorologic Year, William Marion and Ken Urbach, NREL (scaricabile all'indirizzo: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/PDFs/tmy2man.pdf>)

⁹ Il programma è scaricabile gratuitamente all'indirizzo internet:

http://www.dial.de/CMS/Italian/Articles/DIALux/Download/Download_d_e_fr_it_es_cn.html

¹⁰ Publication CIE 110-1994 Spatial Distribution of Daylight-Luminous distribution of various Reference Skies.

Tabella 1 Tipi di cielo secondo la raccomandazione CIE 110-1994

Norma	Cielo coperto	Cielo variabile	Cielo sereno
Pubblicazione CIE	Overcast sky	Averaged intermediate sky	Clear sky
Descrizione	Cielo completamente coperto, distribuzione della densità luminosa a rotazione simmetrica	Derivato da un lungo periodo di misurazioni, descrive una condizione atmosferica media	Cielo senza nuvole
Possibilità di sole diretto	No	No	Si
Numero delle densità luminose zenitali	3	1	8
Densità luminose zenitali utilizzate in Dialux	Krochmann		Krochmann

In Dialux è possibile definire delle scene luminose per un singolo progetto, in cui possono essere previste singole lampade, gruppi di comando con prefissati valori di dimmerazione. Tra le possibili scene luminose è possibile anche inserire situazioni in cui è presente il contributo di luce naturale.

La scena di luce naturale è completamente definita quando vengono specificati i seguenti parametri:

- Localizzazione geografica del sito (latitudine, longitudine, fuso orario), oppure scelta all'interno di una lista contenente le principali città di tutti i paesi di tutti i continenti (Figura 6).
- Per ciascun locale/scena esterna è possibile definire il nord, e per semplificare l'orientamento apparirà una freccia nera nelle vicinanze del punto di origine delle coordinate (Figura 7).
- Nella stanza devono essere presenti finestre o lucernai, di cui possono essere impostate a piacimento tutti i parametri (il software automaticamente fornisce i valori di default maggiormente utilizzati).

Figura 6 Posizione geografica della geometria

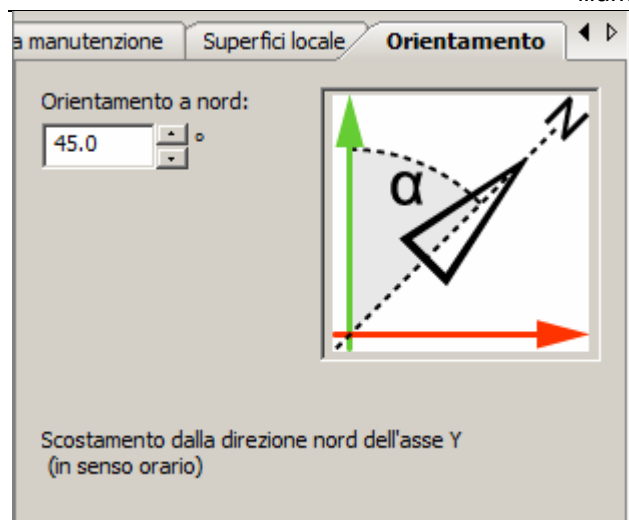


Figura 7 Orientamento del locale

- Per effettuare il calcolo di una scena luminosa con luce naturale, devono essere impostate le opzioni di calcolo necessarie; se si desidera il calcolo dei fattori di luce diurna, occorre spuntare la casella “Calcola fattori di luce diurna”, come indicato nella Figura 8. In modo automatico verrà quindi selezionato il modello di cielo coperto, l’assenza di sole, come sorgente luminosa e verranno escluse dal calcolo gli eventuali apparecchi presenti nella scena. In uscita, l’utente ottiene i valori del fattore di luce diurna per il piano di lavoro (valore medio, minimo, massimo e relative uniformità). L’utente può anche decidere di estendere il calcolo in qualunque altra superficie della geometria, previo l’aggiunta di una idonea superficie di calcolo.

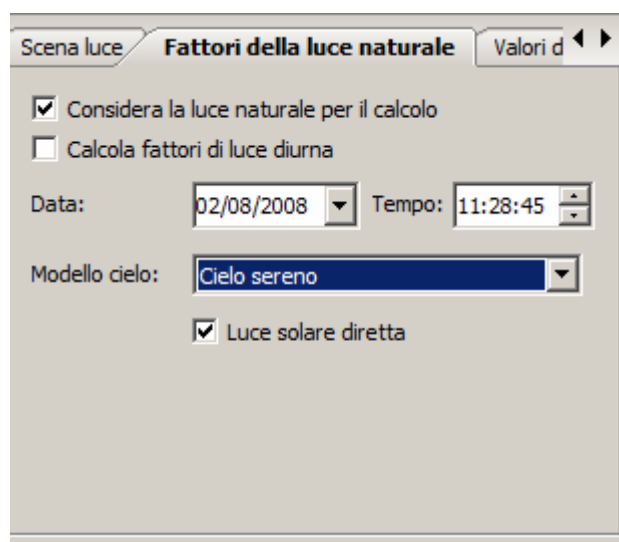


Figura 8 Abilitazione del calcolo della luce naturale e indicazione della data e dell’ora a cui la simulazione si riferisce. Il menù consente all’utente di scegliere il modello di cielo in relazione alla condizione meteorologica desiderata.

2. Calcolo della luce naturale

Il calcolo della luce naturale deve considerare due distinti contributi:

- Il contributo della luce diffusa dalla volta celeste (skylight, particolarmente importante quando la condizione meteorologica è quella di cielo coperto).
- Il contributo della luce proveniente direttamente dal disco solare (assume rilevanza, in condizioni meteorologiche di cielo sereno).

I successivi paragrafi illustrano il modello adottato per ciascuna delle due componenti.

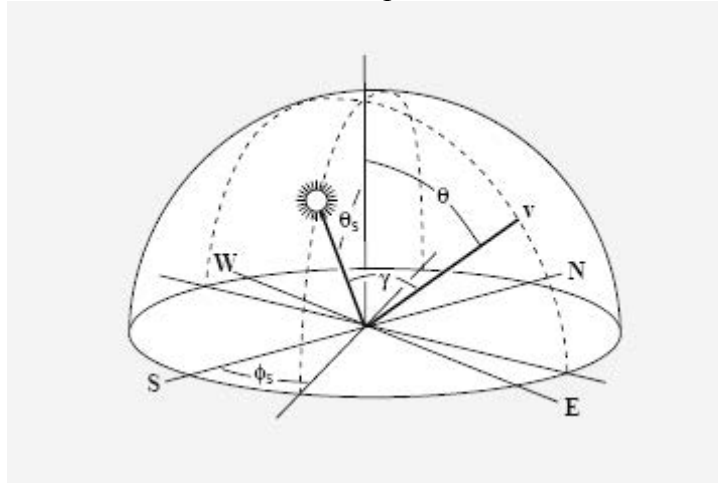


Figura 9 Coordinate per individuare la posizione del sole e la direzione v sulla semisfera celeste

2.1 Modello per lo skylight

L'algoritmo proposto fa uso di un modello parametrico proposto da Perez¹¹, che utilizza 5 parametri per descrivere la distribuzione di luminanza dello skylight. I parametri sono connessi:

- (a) alla chiarezza o scurezza dell'orizzonte
- (b) al gradiente di luminanza vicino all'orizzonte,
- (c) alla intensità relativa della zona intorno al disco solare,
- (d) alla sua estensione,
- (e) alla diffusione della luce solare.

$$\mathcal{F}(\theta, \gamma) = (1 + Ae^{B/\cos \theta})(1 + Ce^{D\gamma} + E \cos^2 \gamma), \quad (1)$$

La luminanza si ottiene dalla precedente equazione attraverso la seguente relazione:

$$Y_P = Y_z \frac{\mathcal{F}(\theta, \gamma)}{\mathcal{F}(0, \theta_s)}. \quad (2)$$

Significato dei parametri nella relazione (1):

θ, γ, θ_s sono gli angoli il cui significato geometrico è riportato alla Figura 9,

¹¹ R. PEREZ, R. SEALS, J. M., AND INEICHEN, P. An all-weather model for sky luminance distribution. *Solar Energy* (1993).

A, B, C, D, E sono coefficienti della distribuzione,
 Y_z è il valore della luminanza zenitale,

I principali vantaggi del modello proposto sono:

- Modello leggero e quindi può dare luogo a implementazioni computazionalmente efficienti.
- Cattura meglio la dinamica dei dati di misura, rispetto al modello CIE (Kittler), se i parametri A, E sono scelti in modo opportuno¹².
- Consente di valutare le variazioni cromatiche della luce

Al fine di valutare l'accuratezza del modello, sono stati riportati i dati che illustrano il confronto tra i valori di luminanza previsti dal modello di Perez e quelli ottenuti da misurazione diretta del cielo (145 misure effettuate con il Krochmann sky scanner).

La distribuzione di luminanze del cielo, basata sul modello di Perez, è stata generata utilizzando il programma **gendaylit**¹³, per tutte le condizioni meteorologiche. La Figura 10 e la Figura 11, illustrano graficamente, per le varie condizioni meteorologiche, il confronto tra i dati della distribuzione di luminanze ottenute da misura e quelle ottenute dall'applicazione del modello.

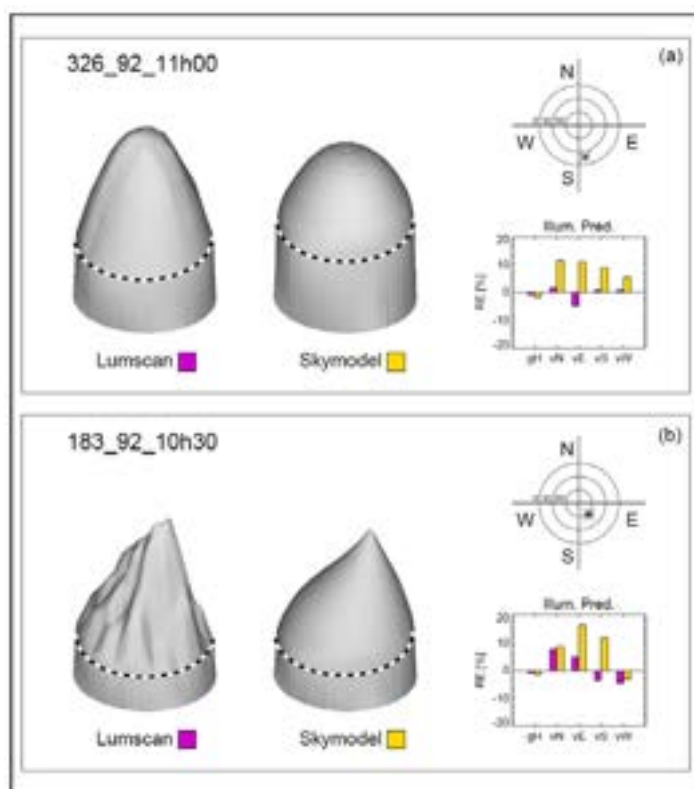


Figure 5-1. Overcast (a) and overcast-intermediate (b) skies

Figura 10 Overcast (a) and Overcast Intermediate (b) skies.

¹²John Mardaljevic, "Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients", A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the De Montfort University for the degree of Doctor of Philosophy, December 1999, Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University Leicester

¹³ Il programma genera una descrizione compatibile con RADIANCE delle sorgenti di luce diurna utilizzando l'algoritmo di Perez per la componente diffusa e diretta del sole

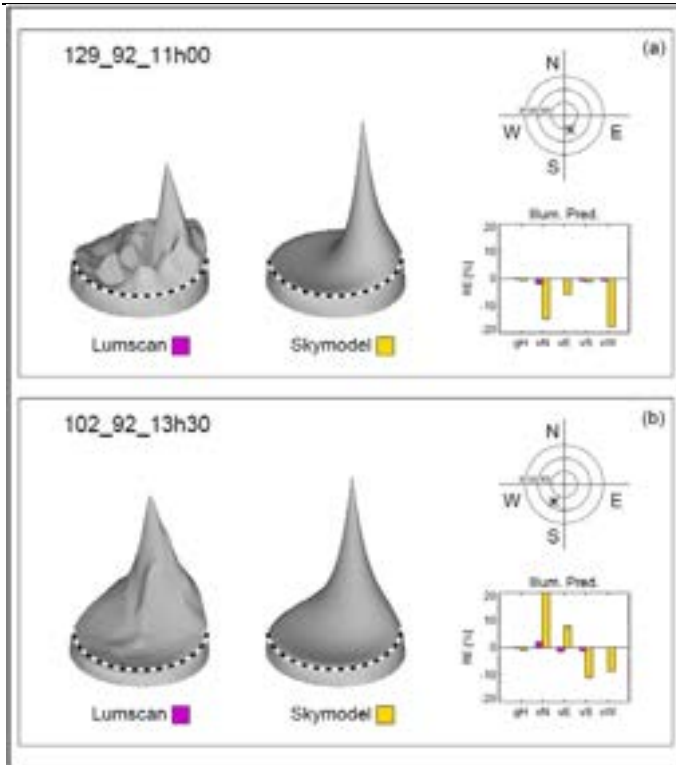


Figure 5-2. Intermediate-clear (a) and clear (b) skies

Figura 11 Intermediate clear (a) and clear (b) skies.

Al fine di tenere conto della cromaticità della luce solare, si è osservato che il modello di Perez ben rappresenta le variazioni delle coordinate cromatiche x, y ¹⁴ relative alla spazio colore CIE xy (1931).

$$x = x_z \frac{\mathcal{F}(\theta, \gamma)}{\mathcal{F}(0, \theta_s)}, \quad y = y_z \frac{\mathcal{F}(\theta, \gamma)}{\mathcal{F}(0, \theta_s)},$$

dove :

$\mathcal{F}$: è data dall'equazione (1), assumendo coefficienti A, B, C, D differenti per la stima di x, y, Y .

La distribuzione dei coefficienti varia in funzione della torbidità (T), e il valore delle grandezze allo zenit è funzione della torbidità e della posizione del sole.

L'indice di torbidità può anche essere stimato sfruttando l'intervallo meteorologico R_m come mostrato nella Figura 12.

L'intervallo meteorologico R_m è la distanza, sotto le condizioni di luce naturale, alla quale il contrasto apparente tra un target nero e lo sfondo (l'orizzonte del cielo) diventa uguale al contrasto di soglia $\varepsilon = 0.02$ di un osservatore e corrisponde all'incirca alla massima distanza alla quale è possibile distinguere una forma geometrica.

¹⁴ A. J. Preetham , Peter Shirley, Brian Smits, A Practical Analytic Model for Daylight, SIGGRAPH 99, Los Angeles, CA USA

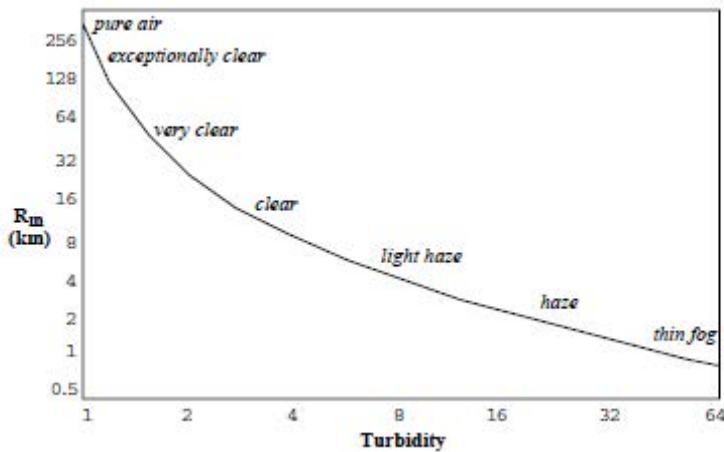


Figura 12 Range Meteorologico Rm valutato in funzione alla torbidità¹⁵.

La Figura 13 mette in relazione i valori del fattore di Torbidità con le condizioni atmosferiche, mostrando che i valori di tale parametro oscillano, per le condizioni di nostro interesse tra 3 e 8.

Atmospheric Properties	Linke Turbidity Factor
Pure Rayleigh atmosphere	1
Extremely clear, cold air (arctic)	2
Clear, warm air	3
Moist, warm air	4-6
Polluted atmosphere	8

Figura 13 Valore del parametro Torbidità in funzione delle condizioni atmosferiche¹⁶.

La distribuzione dei coefficienti per la luminanza Y , è data dalla seguente relazione:

$$\begin{bmatrix} A_Y \\ B_Y \\ C_Y \\ D_Y \\ E_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1787 & -1.4630 \\ -0.3554 & 0.4275 \\ -0.0227 & 5.3251 \\ 0.1206 & -2.5771 \\ -0.0670 & 0.3703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix}$$

La distribuzione dei coefficienti per la coordinata cromatica x , è data dalla seguente relazione:

¹⁵ MCCARTNEY, E. J. *Optics of the Atmosphere*. Wiley publication, 1976.

¹⁶ Scharmer, K., Greif, J. (eds.); *The European Solar Energy Atlas*, vol. 1 & 2, École des Mines de Paris, Paris, 2000.

$$\begin{bmatrix} A_x \\ B_x \\ C_x \\ D_x \\ E_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0193 & -0.2592 \\ -0.0665 & 0.0008 \\ -0.0004 & 0.2125 \\ -0.0641 & -0.8989 \\ -0.0033 & 0.0452 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix}$$

La distribuzione dei coefficienti per la coordinata cromatica y , è data dalla seguente relazione:

$$\begin{bmatrix} A_y \\ B_y \\ C_y \\ D_y \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0167 & -0.2608 \\ -0.0950 & 0.0092 \\ -0.0079 & 0.2102 \\ -0.0441 & -1.6537 \\ -0.0109 & 0.0529 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix}$$

Il valore assoluto della luminanza zenitale, è dato dalla seguente relazione (kcd/m^2):

$$Y_z = (4.0453T - 4.9710) \tan \chi - 0.2155T + 2.4192,$$

Dove

$$\chi = \left(\frac{4}{9} - \frac{T}{120}\right)(\pi - 2\theta_s).$$

La coordinata cromatica x_z , valutata allo zenith, è data dalla seguente relazione:

$$x_z = \begin{bmatrix} T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.00166 & -0.00375 & 0.00209 & 0 \\ -0.02903 & 0.06377 & -0.03202 & 0.00394 \\ 0.11693 & -0.21196 & 0.06052 & 0.25886 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s^3 \\ \theta_s^2 \\ \theta_s \\ 1 \end{bmatrix}$$

La coordinata cromatica y_z , valutata allo zenith, è data dalla seguente relazione:

$$y_z = \begin{bmatrix} T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.00275 & -0.00610 & 0.00317 & 0 \\ -0.04214 & 0.08970 & -0.04153 & 0.00516 \\ 0.15346 & -0.26756 & 0.06670 & 0.26688 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s^3 \\ \theta_s^2 \\ \theta_s \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.2 Posizione del sole

La posizione del sole è individuata dal valore dell'angolo zenitale (θ_s) e da quello azimutale (ϕ_s) e dipende dall'ora della giornata, dalla latitudine e dalla longitudine.

Il tempo solare può essere calcolato attraverso la seguente relazione:

$$t = t_s + 0.170 \sin\left(\frac{4\pi(J - 80)}{373}\right) - 0.129 \sin\left(\frac{2\pi(J - 8)}{355}\right) + \frac{12(SM - L)}{\pi},$$

Dove

t : è il tempo solare in decimi di ore;

t_s : è il tempo standard in decimi di ore;

SM : è il meridiano standard per la time zone, espressa in radianti;

La declinazione solare, può essere approssimata con la seguente relazione:

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi(J - 81)}{368}\right)$$

Dove:

δ è la declinazione solare, espressa in radianti

J : giorno dell'anno, nel campo tra 1=1 Gennaio e 365=31 Dicembre

La posizione solare (θ_s, ϕ_s), può essere calcolata, noti la latitudine, la longitudine e la declinazione solare, tramite:

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\sin l \sin \delta - \cos l \cos \delta \cos \frac{\pi t}{12}\right)$$

$$\phi_s = \arctan\left(\frac{-\cos \delta \sin \frac{\pi t}{12}}{\cos l \sin \delta - \sin l \cos \delta \cos \frac{\pi t}{12}}\right),$$

Dove:

θ_s : angolo solare dallo zenith, in radianti;

ϕ_s : azimut solare, espresso in radianti;

l : latitudine in radianti;

δ : declinazione solare in radianti;

t : tempo solare, in decimi di ore;

Gli angoli che individuano la posizione del sole dallo zenit, sono compresi tra 0 e $\pi/2$, angoli superiori indicano che il sole si trova sotto l'orizzonte. Angoli azimutali positivi, indicano la direzione del sud-ovest.

2.3 Spettro solare

La densità spettrale di potenza di un illuminante della serie D, è data dalla combinazione lineare della potenza radiante media $S_0(\lambda)$ e di due auto vettori, utilizzati nel calcolo degli illuminanti $S_1(\lambda)$ e $S_2(\lambda)$. M_1 ed M_2 sono due valori scalari¹⁷.

$$S_D(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda)$$

M_1 e M_2 sono funzioni delle coordinate cromatiche x, y e sono dati dalle seguenti relazioni:

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x + 5.9114y}{0.0241 + 0.2562x - 0.7341y},$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x + 30.0717y}{0.0241 + 0.2562x - 0.7341y}.$$

Le funzioni $S_i(\lambda)$, con $i=0,1,2$ sono riportate nella tabella seguente a passo 10nm, eventuali valori a lunghezze d'onda intermedie dovranno essere determinati mediante interpolazione lineare.

¹⁷ WYSZECKI, G., AND W.S.STILES. *Color Science*. Wiley-Interscience publication, 1982.

λ (nm)	K	S_0	S_1	S_2	Sum ($Wcm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$)	k_a (cm^{-1})	k_{sea} (cm^{-1})	k_g
380	0.650393	63.4	38.5	3	1655.9	-	-	-
390	0.653435	65.8	35	1.2	1623.37	-	-	-
400	0.656387	94.8	43.4	-1.1	2112.75	-	-	-
410	0.657828	104.8	46.3	-0.5	2588.82	-	-	-
420	0.660644	105.9	43.9	-0.7	2582.91	-	-	-
430	0.662016	96.8	37.1	-1.2	2423.23	-	-	-
440	0.663365	113.9	36.7	-2.6	2676.05	-	-	-
450	0.665996	125.6	35.9	-2.9	2965.83	0.003	-	-
460	0.667276	125.5	32.6	-2.8	3054.54	0.006	-	-
470	0.668532	121.3	27.9	-2.6	3005.75	0.009	-	-
480	0.669765	121.3	24.3	-2.6	3066.37	0.014	-	-
490	0.670974	113.5	20.1	-1.8	2883.04	0.021	-	-
500	0.67216	113.1	16.2	-1.5	2871.21	0.03	-	-
510	0.673323	110.8	13.2	-1.3	2782.5	0.04	-	-
520	0.674462	106.5	8.6	-1.2	2710.06	0.048	-	-
530	0.675578	108.8	6.1	-1	2723.36	0.063	-	-
540	0.67667	105.3	4.2	-0.5	2636.13	0.075	-	-
550	0.677739	104.4	1.9	-0.3	2550.38	0.085	-	-
560	0.678784	100	0	0	2506.02	0.103	-	-
570	0.678781	96	-1.6	0.2	2531.16	0.12	-	-
580	0.679802	95.1	-3.5	0.5	2535.59	0.12	-	-
590	0.6808	89.1	-3.5	2.1	2513.42	0.115	-	-
600	0.681775	90.5	-5.8	3.2	2463.15	0.125	-	-
610	0.681771	90.3	-7.2	4.1	2417.32	0.12	-	-
620	0.682722	88.4	-8.6	4.7	2368.53	0.105	-	-
630	0.683649	84	-9.5	5.1	2321.21	0.09	-	-
640	0.683646	85.1	-10.9	6.7	2282.77	0.079	-	-
650	0.68455	81.9	-10.7	7.3	2233.98	0.067	-	-
660	0.684546	82.6	-12	8.6	2197.02	0.057	-	-
670	0.685426	84.9	-14	9.8	2152.67	0.048	-	-
680	0.686282	81.3	-13.6	10.2	2109.79	0.036	-	-
690	0.686279	71.9	-12	8.3	2072.83	0.028	0.016	-
700	0.687112	74.3	-13.3	9.6	2024.04	0.023	0.024	-
710	0.687108	76.4	-12.9	8.5	1987.08	0.018	0.0125	-
720	0.687917	63.3	-10.6	7	1942.72	0.014	1	-
730	0.687913	71.7	-11.6	7.6	1907.24	0.011	0.87	-
740	0.688699	77	-12.2	8	1862.89	0.01	0.061	-
750	0.688695	65.2	-10.2	6.7	1825.92	0.009	0.001	-
760	0.688691	47.7	-7.8	5.2	-	0.007	1e-05	3.0
770	0.689453	68.6	-11.2	7.4	-	0.004	1e-05	0.21
780	0.689449	65	-10.4	6.8	-	-	0.0006	-

Table 2: Spectral quantities used in the model.

3. Le immagini satellitari per la determinazione delle condizioni di irradianza media

I satelliti geostazionari, come METEOSAT o GOES, forniscono informazioni ad alta risoluzione spaziale e temporale.

Questi satelliti non sono utili solo per le previsioni meteo, ma anche per la stima della irradianza solare, dal momento che la misura della radiazione riflessa dalle nuvole è alla base del calcolo della irradianza trasmessa.

La valutazione delle radiazione solare a partire dai dati misurati dai satelliti geostazionari, costituisce una potente alternativa alle stazioni meteorologiche terrestri sia per la determinazione di dati climatici (legati allo studio delle variazioni climatiche indotte dall'uomo), sia per la progettazione e la gestione di impianti per lo sfruttamento della luce solare¹⁸.

Le mappe di irradianza solare forniscono delle informazioni sulla irradianza delle diverse località, con una elevata risoluzione spaziale e temporale utilizzando le informazioni provenienti dai satelliti meteorologici, come ad esempio METEOSAT e Meteosat Second Generation (MSG).

La maggior parte dei metodi operativi per il calcolo della radiazione solare, utilizzano modelli semiempirici basati su elaborazioni statistiche; si utilizzano, ad esempio, le informazioni sulle nuvole provenienti dai satelliti METEOSAT e aspetti climatologici di alcuni parametri atmosferici, come ad esempio la torbidità, dovuta all'effetto combinato dell'aerosol e del vapor d'acqua¹⁹.

Il metodo Heliosat^{20,21} converte le immagini METEOSAT in mappe di irradianza, con una accuratezza migliore di quella che possono fornire le misure terrestri, opportunamente interpolate²². Questo algoritmo è abitualmente applicato all'Università di Oldenburg, fin dal 1995 e ha consentito l'organizzazione di un server Satel-Light, che fornisce preziose informazioni sul daylight per la progettazione degli edifici ad architetti e ad altri soggetti interessati²³.

Con il lancio della seconda generazione di satelliti meteorologici (MSG), la possibilità di monitorare l'atmosfera terrestre è di molto cresciuta: questa nuova generazione di satelliti, non solo consente di ottenere una maggiore risoluzione spaziale (1km) e temporale (una immagine ogni 15 min), ma offre anche la possibilità di esplorare su 11 canali da 0.6 a 13 μm e consente di ricavare i parametri atmosferici come parametri addizionali per le nuvole, ozono, colonne di vapore acqueo, con vaporizzazione ristrette.

¹⁸ Perez, R., Seals, R., & Zelenka, A. (1998b). Production of site/time-specific hourly irradiances—Satellite remote sensing vs. network interpolation. Production of site/time-specific irradiances from satellite and ground data. Report 98-3. New York State Energy Research and Development Authority, Corporate Plaza West, 286 Washington Avenue Extension, Albany, NY 12203-6399.

¹⁹ Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard, C., Ineichen, P., Littlefair, P., Lund, H., Michalsky, J., Olseth, J., Renne, D., Rymes, M., Skartveit, A., Vignola, F., Zelenka, A. (2001). Solar resource assessment: A review. Solar energy—the state of the art. No. ISBN 1 902916239 in ISES position papers. (pp. 497– 562). London: James and James Science Publishers.

²⁰ Cano, D., Monget, J., Albuisson, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. Solar Energy, 37, 31–39.

²¹ Beyer, H., Costanzo, C., Heinemann, D. (1996). Modifications of the heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. Solar Energy, 56, 207– 212.

²² Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., & Renne, D. (1999). Effective accuracy of satellite derived hourly irradiances. Theoretical and Applied Climatology, 62, 199– 207.

²³ Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J., Skartveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, L., Beyer, H., & Wald, L. (1997). Satel-light: A european programme dedicated to serving daylight data computed from meteosat images. Proceedings Lux Europa 1997. Vol. The 8th European Lighting Conference, Amsterdam. Available at: <http://www.satel-light.com/core.htm>

Tutte queste possibilità, unite con altri tipi di sensori e sistemi di misura (GOME/ATSR-2), consentono di ottenere miglioramenti nella modellazione della radiazione solare.

Queste nuove possibilità potrebbero offrire l'occasione di rivedere il modello di irradianza solare Heliosat, proponendo dei modelli che consentano una migliore previsione delle condizioni di irraggiamento solare in una data località.

Il nuovo sistema di calcolo dovrebbe essere più rapido, accurato, e dovrebbe fornire, al contrario di Heliosat e Heliosat2 (metodi di calcolo di gran lunga più utilizzati), immagini di irradianza solare, risolte in lunghezza d'onda.

La conseguenza di quanto esposto, è che il nuovo modello di calcolo dovrebbe fare uso massiccio di Radiative Transfer Module (RTM), dal momento che le informazioni riguardanti i parametri atmosferici ricavati dai satelliti MSG (nuvole, ozono, vapore d'acqua) e dagli strumenti GOME/ATSR-2 a bordo dei satelliti ERS-2 (aerosol e ozono), saranno utilizzati come dati di ingresso del sistema RTM²⁴.

3.1 I dati satellitari Satel-Light

Dal 1997, sei satelliti Meteosat, sono stati lanciati e operano per conto dell'organizzazione EUMENSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Lo scopo di questa organizzazione è quello di fornire immagini satellitari connesse a dati climatici e meteorologici: queste informazioni sono fornite ai servizi meteorologici nazionali.

I satelliti Meteosat sono satelliti di tipo geostazionario, posti a una distanza dal piano equatoriale terrestre di 36000 km. Vedono solo metà della terra e misurano la radiazione riflessa in tre differenti bande spettrali : visibile (0.5 a 0.9 μm), il vapore d'acqua (tra 5.7 e 7.1 μm) e la banda IR (tra 10.5 and 12.5 μm). Le immagini grezze fornite dai satelliti Meteosat hanno una risoluzione massima di 5000x5000 pixel nel visibile, 2500x2500 negli altri canali.

Occorrono 25 minuti al satellite per catturare l'intera immagine dal polo sud al polo nord, ciascuna immagine è prodotta ogni 30 minuti. Ciò significa che esiste una differenza temporale tra l'istante in cui l'immagine è prodotta dal satellite e l'istante in cui viene registrata la radiazione riflessa dal singolo pixel in cui è divisa la terra. Se una immagine è prodotta alle 10:00 GMT, un pixel puntato su Gibilterra sarà stato visto alle 9.50 GMT, mentre il pixel puntato su San Pietroburgo sarà stato acquisito alle 9.54 GMT.

I dati forniti da Satel-light sono basati sulle immagini Meteosat prodotti dal canale nella banda del visibile, alla risoluzione di 2500x2500 pixel.

Il data processing dell'immagine acquisita si può sintetizzare con nelle tre immagini della Figura 14.

²⁴ R.W. Muellera, , K.F. Dagestadb, P. Ineichenc, M. Schroedter-Homscheidtd, S. Crose, D. Dumortierf, R. Kuhlemanng, J.A. Olsethb, G. Piernaviejah, C. Reisei, L. Walde, D. Heinemanng, Rethinking satellite-based solar irradiance modelling. The SOLIS clear-sky module, Remote Sensing of Environment 91 (2004) 160–174, February 2004

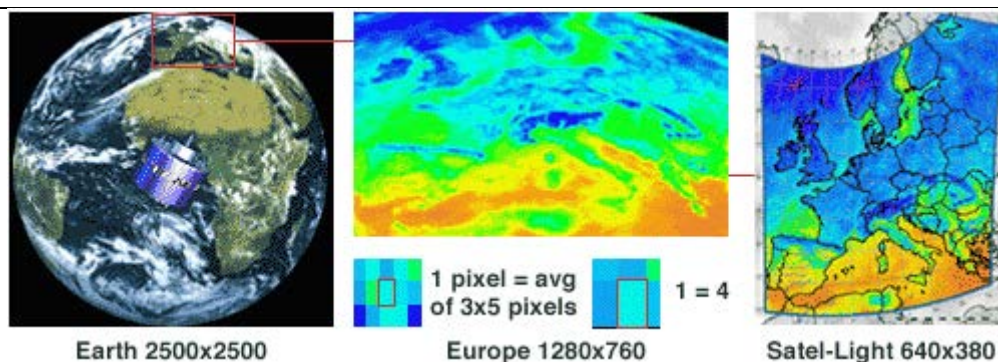


Figura 14 Processo di elaborazione delle immagini satellitari: media dei pixel e decimazione dei campioni (uno ogni due).

Supponiamo che siano processati solo i pixel che coprono l'Europa Centrale ed Occidentale: 1280 pixel in longitudine e 760 pixel in latitudine vengono considerati. Allora ciascun pixel è mediato in un quadrato di 3 pixel per latitudine e 5 pixel per longitudine. Numerosi test hanno mostrato che il miglior accordo tra dati terrestri e satellitari è ottenuto, quando non viene utilizzato il singolo pixel dell'immagine, ma pixel multipli.

Questo processo consente di compensare le situazioni 'instabili' per le quali si ha una notevole variazione della radianza disponibile nell'arco di mezz'ora.

La risoluzione delle immagini è ulteriormente ridotta prendendo un pixel ogni due in latitudine e in longitudine, per un totale di 640 pixel in longitudine e 380 pixel in latitudine.

Una volta che i pixel delle aree esterne sono stati rimossi, ciò porta ad un utilizzo di 241913 pixel per coprire l'Europa Occidentale e Centrale. Ciascun pixel copre un'area da circa 5 km in longitudine e 6 km in latitudine, alla latitudine di 34° N (Nord Africa) fino a 5 km in longitudine per 16 km in latitudine, alla latitudine di 64°N (Scandinavia).

3.2 La stima della copertura nuvolosa

In Satel-Light, l'unico parametro calcolato direttamente dalla immagine satellitare, è l'irradianza orizzontale globale. Tutti gli altri parametri sono calcolati a partire da quest'ultimo.

La radianza globale orizzontale è stimata sulla base dei valori dei pixel dell'immagine, utilizzando l'algoritmo Heliosat, proposto da Cano²⁵ et al.. Il metodo è stato poi successivamente modificato da Bayer et al²⁶. nel 1996 e successivi miglioramenti sono stati introdotti per l'applicazione Satel-Light.

Il metodo Heliosat è basato sull'ipotesi che l'albedo²⁷ di una atmosfera nuvolosa è normalmente maggiore rispetto a quello dell'oceano o della superficie terrestre (non è vero se il terreno è ricoperto da neve). Quindi l'aumento dell'albedo fornisce una stima della copertura nuvolosa.

²⁵ Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N. and Wald L., "A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data." (1986) , Solar Energy, 37, pp 31-39.

²⁶ Beyer H. G., Costanzo C., Heinemann D., "Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite data.", (1996) , Solar Energy, 56, pp 207-212.

Le immagini scattate da satelliti geostazionari possono essere usate per valutare i flussi della radiazione solare incidenti sulla superficie terrestre . Il metodo Heliosat è una procedura ampiamente applicata per questo compito. Essa si basa sull'osservazione della correlazione empirica l'indice di nuvolosità stimato dalle immagini satellitari e il valore di irradianza sulla superficie terrestre. Modifiche a questa procedura sono presentati nell'articolo sopra citato, al fine di ridurre la variabilità temporale della correlazione. Il metodo modificato può aprire la strada per l'utilizzo di un generico rapporto tra indice di nuvolosità e irradianza globale.

²⁷ Si definisce albedo, il rapporto tra flusso radiante riflesso da una superficie e il flusso incidente su di essa (indicato con la lettera ρ)

Consideriamo, ad un certo istante di tempo, l'albedo di una porzione di superficie terrestre vista da un pixel dell'immagine satellitare.

Il valore del pixel (chiamato anche conteggio, essendo un intero tra 0 e 255) dipende dall'energia irradiata dal sole per l'intervallo di tempo in cui il satellite 'osserva' il pixel. Per una corretta stima della variazione di albedo, questa influenza deve essere considerata. Di conseguenza, il valore del pixel C , deve essere normalizzato rispetto all'altezza solare, per ottenere ρ , cioè l'albedo dell'area della terra coperta dal pixel:

$$\rho = \frac{C - C_0}{E_{esno} * \sin(\gamma_s)}$$

Dove C_0 è il registration offset e il suo calcolo è descritto in Hammer, 1998²⁸ ed è approssimativamente uguale all'offset dello strumento (approssimativamente uguale a 5) e al contributo del backscattering della radiazione solare in atmosfera.

Il termine E_{esno} rappresenta la radiazione solare extra-atmosferica normale²⁹, mentre γ_s è l'altezza solare.

Quindi, il valore di albedo è utilizzato per calcolare l'indice di nuvolosità n , sfruttando la seguente normalizzazione:

$$n = \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c - \rho_g}$$

L'indice di nuvolosità n fornisce una misura della copertura nuvolosa del cielo.

ρ_c è l'albedo della copertura nuvolosa compatta, ottenuta dal valore di alto per ρ .

ρ_g è l'albedo del terreno ed è il più frequente, più piccolo valore di albedo, di un pixel, in un mese. Per questo motivo, l'indice di copertura nuvolosa, che normalmente varia tra 0.0 (cielo completamente sereno) a 1.0 (cielo nuvoloso), può talvolta raggiungere valori maggiori o minori rispetto a questi due limiti.

La presenza di neve aumenta significativamente il valore di albedo, rendendo il riconoscimento delle situazioni di assenza di nuvole molto difficile quando sono utilizzate le informazioni provenienti dal canale del visibile.

Ciò significa che il pixel che osserva un'area coperta da neve per una parte della giornata, viene assimilato a un pixel che osserva una zona coperta da nubi durante lo stesso periodo di tempo. La radiazione solare è quindi sottostimata per quel pixel.

Per elevazioni solari superiori a 6°, i radiometri dei satelliti, non possono distinguere in modo affidabile tra pixel con nubi e pixel senza. Quando ciò accade, l'indice di nuvolosità per quel dato momento è sostituito dall'indice più vicino corrispondente da una elevazione solare sopra i 6°. Se nessun altro indice è disponibile durante quel giorno (ciò accade, ad esempio, durante l'inverno alle latitudini più elevate), un valore dell'indice pari a 0.50 viene utilizzato per l'intero arco della giornata.

²⁸ A. Hammer, D.Heinemann, A.Westerhellweg,P. Ineichen,J. A.Olseth, A. Skartveit D.Dumortier, M. Fontoynt L.Wald,H.G. Beyer,Ch.Reise,L.Roche,J.Page , "Derivation of daylight and solar irradiance data from satellite observations", Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Paris May 1998, pp 747-750.

²⁹ Radiazione solare extra-atmosferica: è la radiazione solare incidente al limite esterno dell'atmosfera terrestre. La radiazione extra-atmosferica normale E_{esno} è l'irradianza prodotta dal sole su una superficie perpendicolare alla direzione dei suoi raggi posta ai limiti dell'atmosfera terrestre alla distanza media tra terra e sole nel corso dell'anno (150 milioni di Km). La radiazione extra atmosferica normale è il prodotto tra la costante solare e il fattore di correzione della distanza terra sole, che varia nel corso dell'anno (vedi pubblicazione CIE 85, 1989). $E_{esno} = 1367 \text{ W/m}^2$

3.3 Calcolo dell'irradianza globale orizzontale

L'irradianza globale orizzontale a livello del suolo è ottenuta assumendo una semplice relazione tra l'indice di nuvolosità n (stimato, con la procedura e i limiti accennati al precedente paragrafo) e il clear sky index k_c .

$$\begin{aligned} n \leq -0.2 & \quad k_c = 1.2 \\ -0.2 \leq n \leq 0.8 & \quad k_c = 1 - n \\ 0.8 \leq n \leq 1.1 & \quad k_c = 2.0667 - 3.6667n + 1.6667n^2 \\ n \geq 1.1 & \quad k_c = 0.05 \end{aligned}$$

Il clear sky index è definito come il rapporto tra l'irradianza globale orizzontale, per una data condizione atmosferica, e l'irradianza globale sotto le condizioni di cielo senza nuvole:

$$k_c = \frac{E_{eg}}{E_{eg \text{ cloudless}}}$$

La radiazione globale orizzontale, in condizioni di cielo con assenza di nuvole, è la somma della componente diretta ($E_{es \text{ cloudless}}$) e diffusa ($E_{ed \text{ cloudless}}$):

$$E_{eg \text{ cloudless}} = E_{es \text{ cloudless}} + E_{ed \text{ cloudless}}$$

La componente diretta è data da (Page, 1996)³⁰:

$$E_{es \text{ cloudness}} = E_{esno} * \sin(\gamma_s) * \exp(-0.8662 * T(2) * a_{eR} * m)$$

La componente diffusa dell'irradianza globale è data da Dumotier, 1995³¹

$$E_{ed \text{ cloudness}} = E_{esno} * [0.0065 + (-0.045 + 0.0646 * T_{eL}(2)) * \sin(\gamma_s) - (-0.014 + 0.0327 * T_{eL}(2)) * \sin^2(\gamma_s)]$$

Nelle precedenti formule, m è la massa ottica relativa dell'aria, data da Kasten-Yuon (1989)³²:

$$m = \frac{1 - \frac{h}{10000}}{\sin(\gamma_s) + 0.50572 * (6.07995^\circ + \gamma_s)^{-1.6364}}$$

dove h è l'altezza del sito, espressa in metri, rispetto al livello del mare, γ_s è l'altezza solare espressa in gradi.

a_{eR} è lo spessore ottico dell'atmosfera di Rayleigh³³, data da Kasten (1996)³⁴

³⁰ Page J. "Algorithms for the Satellight programme.", Technical Report for the second SATELLIGHT meeting in Bergen, Norway, June 1996.

³¹ Dumortier D. "Mesure, analyse et modélisation du gisement lumineux. Application à l'évaluation des performances de l'éclairage naturel des bâtiments", PhD Thesis, Université de Savoie, France, 350 pages (1995).

³² Kasten F. and Young A.T., "Revised optical air mass tables and approximation formula.", Applied Optics, 28, pp 4735-4738 (1989)

³³ Atmosfera ideale, contenete soltanto molecole d'aria (nell'atmosfera terrestre vi è anche un aerosol, particelle di ghiaccio, goccioline vaporizzate)

$$a_{eR} = \frac{1}{6.6296 + 1.7513m + 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4}$$

$T_{eL}(2)$ è il fattore di torbidità totale per la massa ottica dell'aria pari a 2. Descrive l'attenuazione della radiazione solare dovuta al vapor d'acqua e agli aerosol³⁵ presenti nell'atmosfera. L'utilizzo di valori mensili del fattore di torbidità totale, nel calcolo dell'irradianza globale orizzontale, in condizioni di cielo privo di nuvole, consente di aumentare l'accuratezza della stima satellitare, rispetto all'utilizzo di un valore costante per l'intero anno.

Il fattore di torbidità totale è maggiore a livello del mare rispetto alle zone montane; aumenta dall'inverno verso l'estate: il maggiore contributo di radiazione solare e la crescita delle piante contribuisce a incrementare il contenuto di vapore d'acqua nell'atmosfera, cristalli di sale e polline. Questo parametro aumenta anche con il crescere dell'attività industriale localizzata in luoghi specifici.

Malgrado il grande interesse per la descrizione di questa grandezza, vi sono disponibili scarse informazioni circa la variazione di questo parametro in Europa. Questo genere di informazioni, che non possono essere dedotte dalle immagini prodotte dalla prima generazione di satelliti meteorologici, saranno presto disponibili con la seconda generazione di satelliti meteorologici (MSG) che utilizzano 12 canali spettrali e che dovrebbero consentire la generazione di mappe per l'intera Europa.

Satel-Ligth, utilizza un modello che descrive la Torbidità per l'Europa Occidentale e Centrale, sviluppato da Dumortier (1998)³⁶; il modello è basato su un data base mensile della torbidità rilevata in 507 siti, che fanno parte di una rete collegata ad un altro progetto Europeo ESRA (The European Solar Radiation Atlas).

Il modello divide l'Europa in 13 zone; all'interno di ciascuna di esse la variazione del livello di torbidità, al livello del mare, è descritto utilizzando la relazione proposta da Burges (1992)³⁷.

Il dato deve essere poi corretto per tenere conto dell'altezza della località sul livello del mare e per la presenza di eventuali attività industriali.

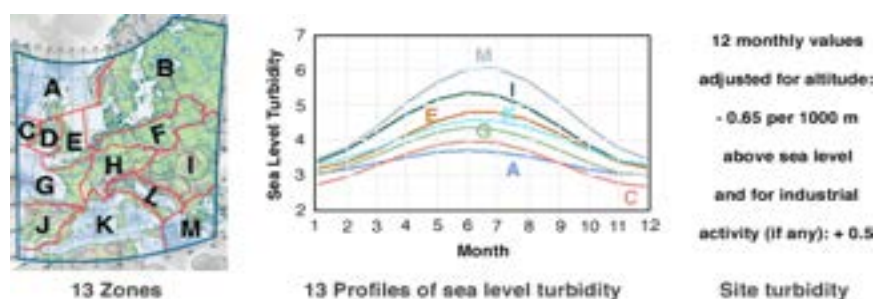


Figura 15 - Zone di suddivisione dell'Europa Centrale ed Occidentale (a sinistra). Al centro andamento della torbidità, per le diverse zone, indicate con le lettere, per i diversi mesi dell'anno. A sinistra correzioni introdotte per tenere conto dell'altezza della località sul livello del mare e per considerare l'eventuale presenza attività industriale.

³⁴ Kasten F., "The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. Solar Energy, 56, 3, pp 239-244 (1996).

³⁵ Aerosol sono particelle in sospensione nell'atmosfera. Queste hanno una gamma di dimensioni che può variare da circa 10-3um a circa 20 micrometri. Esse sono prodotte da processi naturali o dalle attività dell'uomo. Questi comprendono polvere vulcanica, vapori di acqua marina con i relativi particolati, le polveri generate dall'erosione del vento, fumi da incendi boschivi naturali, particelle emesse durante la combustione di combustibili fossili, ecc

³⁶ Dumortier D., "The satellight model of turbidity variations in Europe", Report for the sixth SATELLIGHT meeting in Freiburg, Germany, September 1998.

³⁷ Bourges B., "Climatic data handbook for Europe.", Editor, Kluwer Academic Publishers, 281 pages (1992)

3.4 Validazione della stima di irradianza

La radianza globale orizzontale è stata calcolata ogni 30', a partire dall'indice di nuvolosità per un dato pixel, utilizzando il metodo descritto nei paragrafi precedenti.

I dati così ottenuti, sono poi stati messi a confronto con quelli rilevati a livello terrestre in 25 siti sparsi l'Europa; dato che le misure terrestri sono disponibili ogni minuto, tali rilevazioni sono state mediate su una finestra temporale di 30' centrata sull'istante in cui il satellite stava leggendo il valore del pixel.

Il primo confronto possibile è quello tra la stima della irradianza media ogni 30' ottenuta dalle immagini satellitari e quella rilevata e mediata temporalmente ottenuta dalle stazioni terrestri, per diverse condizioni di cielo (Figura 16).

La deviazione media tra i set di misure oscilla tra 0% e il -6%, facendo sì che le irradianze ottenute dall'elaborazione satellitare risultino sottostimate.

La mancata conoscenza dello spessore e composizione dello strato nuvoloso fa sì che la deviazione quadratica media tra i due set di misure oscilli tra 45% e il 65% a seconda della condizione di cielo considerata.

Se si considerano i valori per un intero anno e tutte le possibili condizioni di cielo che si sono verificate in questo arco temporale, abbiamo che la deviazione media tra i set di misure varia tra -1% e 3%, mentre la deviazione quadratica media oscilla tra il 20% (riferito al sud Europa, dove prevalgono condizioni di cielo soleggiato per la maggior parte dei giorni dell'anno) e il 40% (nelle regioni del nord Europa, dove prevalgono le condizioni di cielo nuvoloso).

Occorre osservare che i valori dell'errore quadratico medio sono ancora elevati, dal momento che vengono comparate valori rilevati ogni 30 minuti (elevata risoluzione temporale), mentre la situazione migliora, se andiamo a mediare i dati su un arco temporale più ampio, come ad esempio un giorno o un mese. Occorre inoltre considerare che spesso non sono disponibili dati di irradianza terrestre per tutte le possibili località di interesse e che quindi le informazioni devono essere ottenute per interpolazione tra i valori delle stazioni di misura disponibili.

Perez (1997)³⁸, ha dimostrato che le stime satellitari cominciano a diventare più accurate delle stime ottenute da interpolazione dei dati terrestri, quando la località di interesse dista più di 34 km dalla stazione. Lo stesso autore ha anche dimostrato come il valore di errore quadratico medio del 15% per dati orari continua a valere per stazioni terrestri distanti tra loro solo 4 km. Questo comportamento è spiegabile con il fatto che la radiazione oraria ha una distribuzione spaziale fortemente discontinua.

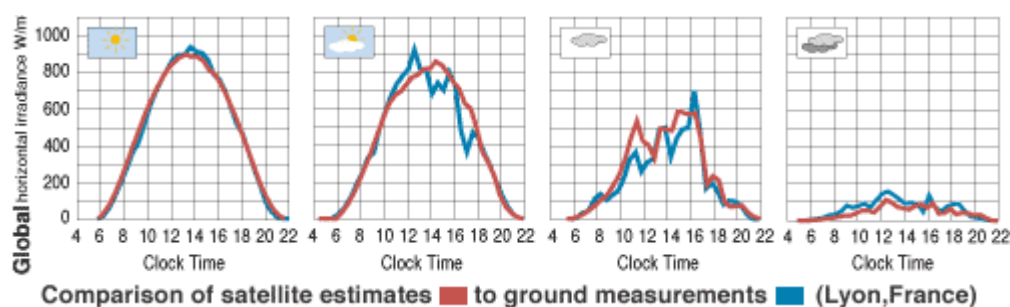


Figura 16 Confronto tra la i dati di irradianza, al variare delle condizioni metereologi che, ottenuti da misure terrestri e da elaborazione di immagini satellitari.

È stato successivamente verificato che le elaborazioni dei dati ottenuti da immagini satellitari fossero in buon accordo con quelle ottenute da misure terrestri (Figura 17). Lo scopo del confronto

³⁸ Perez R., Seals R. and Zelenka A., "Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data.", Solar Energy, 60, N°2, pp 89-96 (1997)

era quello di assicurarsi che alcune caratteristiche statiche della radiazione solare climatica fossero accuratamente riprodotte (utili per tutte le procedure di dimensionamento nelle applicazioni solari).

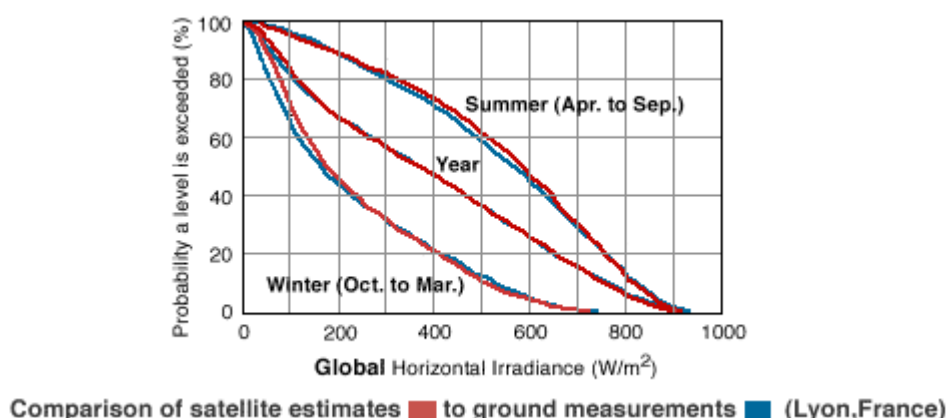


Figura 17 Confronto tra le elaborazioni tra i due set di dati, relativi all'irradianza.

3.5 Calcolo dell'illuminamento

L'illuminamento orizzontale è calcolato dall'irradianza orizzontale, utilizzando il modello di efficienza luminosa proposto da Olseth³⁹ (1989). La scelta si giustifica con la capacità dell'algoritmo di adattarsi alle variazioni nell'aerosol e nel contenuto di vapore d'acqua dell'atmosfera e rispetto ai cambiamenti nella profondità della copertura nuvolosa.

È stato dimostrato che l'applicazione di questo modello conduce a risultati migliori rispetto ad altri, in riferimento ai dati da Glave (Norvegia), Geneva (Svizzera), Lione (Francia), Lisbona (Portogallo)⁴⁰.

Il modello si basa sui valori dell'efficienza spettrale definiti dalla CIE per la visione fotopica e sulla radianza spettrale ottenuta per interpolazione dei modelli di trasmittanza per il cielo privo di nuvole (Bird, 1986)⁴¹ e quello relativo alla copertura nuvolosa completa (Stephens, 1984)⁴².

Per la valutazione dell'accuratezza del metodo, sono state comparate le misure prese ogni 30 minuti a livello del suolo con le stime ottenute dalle immagini satellitari. Inoltre sono state confrontate le elaborazioni ottenute dalle stime satellitari con quelle ottenute dall'impiego delle misure terrestri.

La Figura 18, illustra il primo tipo di confronto effettuato, mentre la Figura 19, riporta il confronto tra le elaborazioni ottenute con le due differenti sorgenti di dati.

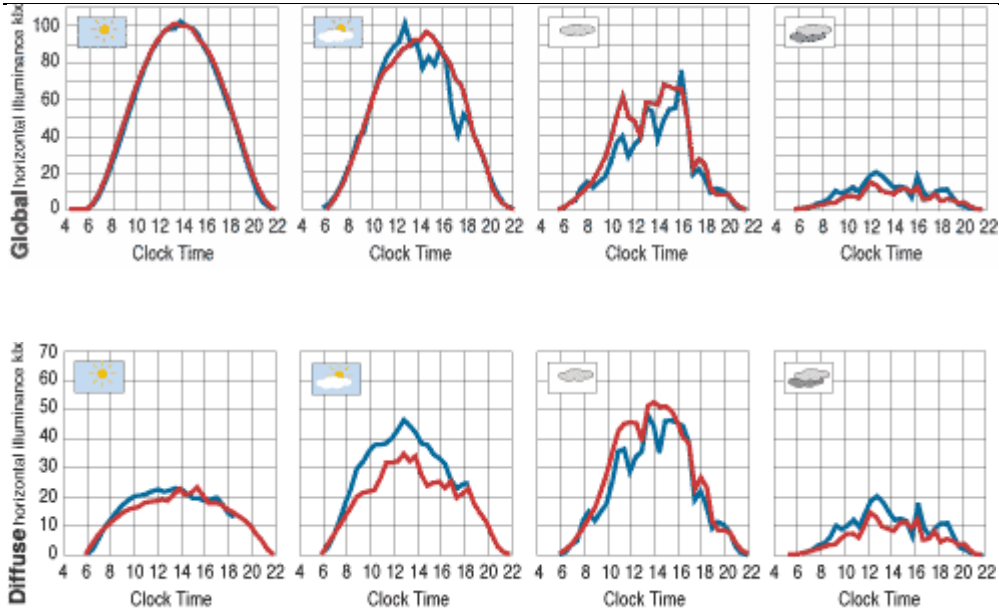
³⁹ Olseth J.A. and Skartveit A., "Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness.", Solar Energy, 42, pp 221-233 (1989).

⁴⁰ Olseth J.A. and Skartveit A., "Horizontal and vertical illuminance / irradiance from 4 IDMP stations" First draft, June 1997. Report for the fourth SATELLIGHT meeting, Oldenburg June 1997.

⁴¹ Bird R.E. and Riordan C., J., "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres.", Climate Appl. Meteor., 25, 87 (1986).

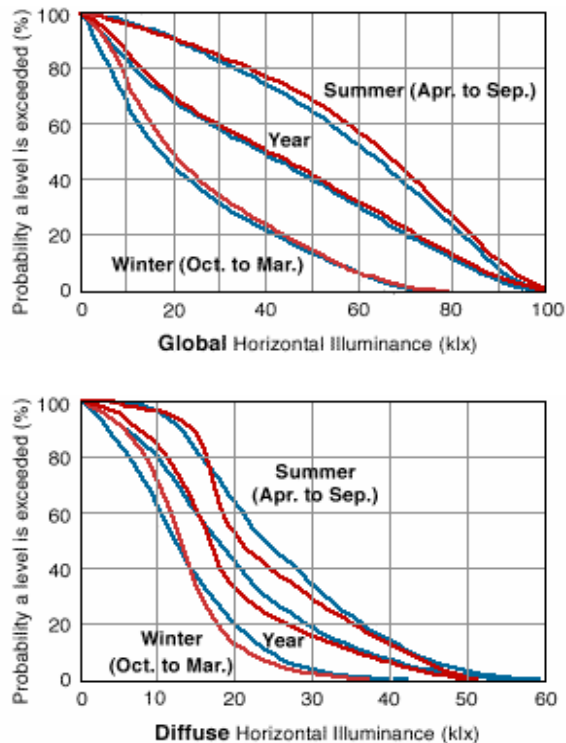
⁴² Stephens G.L., Ackerman S. and E.A. Smith "A short-wave parameterization revised to improve cloud absorption", J. Atmos. Sci., 41, 687 (1984).

Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione



Comparison of satellite estimates ■ to ground measurements ■ (Lyon, France)

Figura 18 Confronto tra illuminamento globale (klx) e diffuso ottenuti da misure terrestri (in colore blu) con i valori stimati attraverso l'elaborazione di immagini satellitari (colore rosso). Da sinistra a destra variano le condizioni del cielo, da sereno a cielo coperto.



Comparison of satellite estimates ■ to ground measurements ■ (Lyon, France)

Figura 19 Confronto tra le elaborazioni dei dati ottenuti a partire dalle misure terrestri e quelli ricavati a partire dalle immagini satellitari, per quanto riguarda l'illuminamento globale e quello diffuso, relativamente alla città di Lione. Il confronto avviene per la stagione invernale e quella estiva e per l'intero corso dell'anno.

4. Utilizzo delle informazioni satellitari nel calcolo

Il modello di calcolo adottato, richiede la definizione della localizzazione geografica del luogo (latitudine, longitudine, altezza sul mare) che possono essere facilmente ottenuti da cartografia GIS, le informazioni temporali a cui il calcolo di luce naturale è riferito, e la definizione del **parametro di torbidità**, che descrive in modo sintetico la condizione meteorologica di riferimento.

Il principale problema che si trova ad affrontare l'utente, è quello di definire il valore di tale parametro; a tale fine si propone di utilizzare il servizio on-line offerto da Satel-Light al fine di ottenere le seguenti informazioni:

- Global Horizontal Illuminance (Klx) su una superficie orizzontale posta nel luogo indicato
- Diffuse Horizontal illuminante (Klx) su una superficie orizzontale posta nel luogo indicato
- Direct normal irradiance (W/m^2)
- Horizontal diffuse irradiance (W/m^2)
- Frequency of Night, Sunny, Intermediate and Cloudy skies (%), dall'alba al tramonto

Il servizio è completamente gratuito, per accedervi è necessaria una registrazione che fornirà una userID, con la quale sarà possibile eseguire le interrogazioni al DataBase del sito.

Dopo l'autenticazione, l'utente può collegarsi alla pagina <http://www.satel-light.com/indexs.htm>, dove è possibile scegliere il luogo geografico di interesse e il tipo di elaborazione delle immagini satellitari desiderato.

Esempi di possibili output di interesse forniti dal sito, relativamente alla città di Milano, assunta come esempio, sono riportati alla Figura 20 e alla Figura 21 e alla Tabella 2.

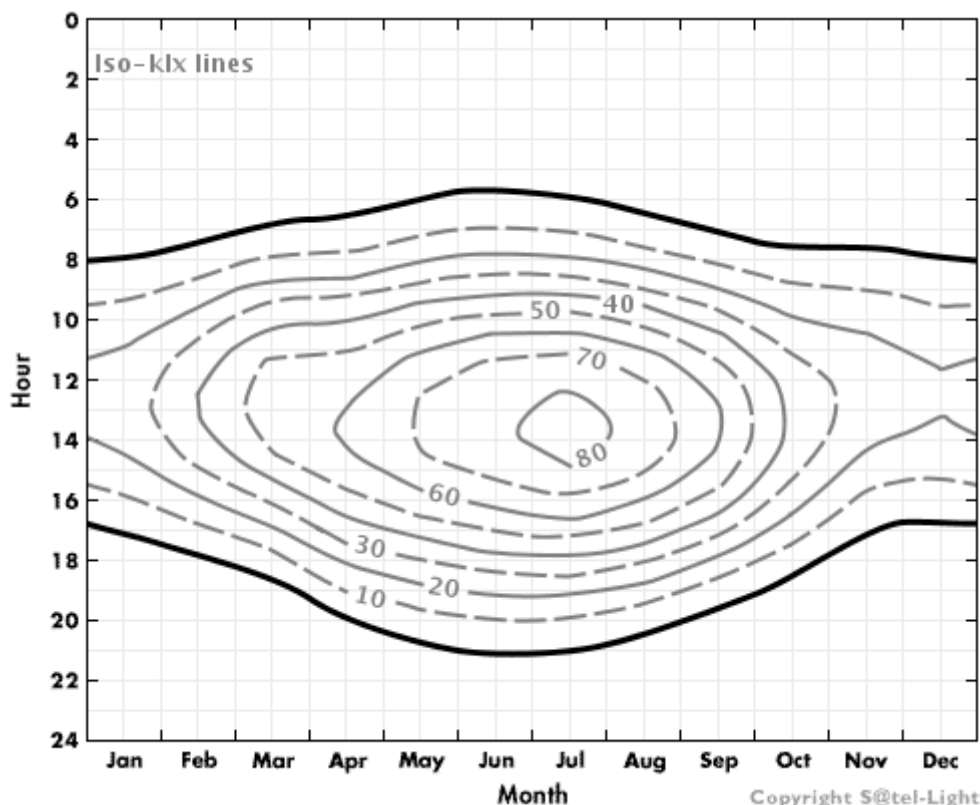


Figura 20 Global Horizontal Illuminance (iso-Klx) per la città di Milano, sulle ascisse sono riportati i mesi dell'anno, mentre sulle ordinate sono riportati le ore della giornata

Tabella 2 Valori di illuminamento medi orari, nei diversi mesi dell'anno, dall'alba al tramonto (si riferiscono all'elaborazioni delle immagini satellitari dal 1996 al 2000)

Time	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
5-6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
6-7	0.0	0.0	0.7	0.6	4.2	6.6	4.7	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
7-8	0.0	1.4	7.5	6.5	13.9	17.5	15.3	9.4	3.7	0.7	1.2	0.1	6.5
8-9	3.4	9.2	19.9	18.2	27.3	31.1	29.9	23.4	14.5	6.8	7.1	3.1	16.2
9-10	10.7	19.9	33.1	32.4	42.2	46.1	46.9	39.6	28.4	16.1	14.7	9.6	28.4
10-11	17.4	29.7	44.4	44.4	55.5	60.9	62.5	55.0	42.0	24.9	20.4	15.6	39.4
11-12	22.7	37.0	53.0	53.1	64.6	72.9	74.4	67.4	52.3	32.2	24.8	19.8	47.9
12-13	24.9	40.4	56.6	58.8	70.5	76.6	81.5	74.0	60.2	37.5	26.3	21.0	52.4
13-14	23.9	39.4	55.4	61.7	71.5	79.4	84.9	77.5	61.8	38.0	23.9	19.2	53.1
14-15	19.6	33.7	49.5	59.4	69.8	76.6	82.4	75.1	58.9	35.2	18.2	14.4	49.5
15-16	12.1	24.0	37.9	51.6	61.4	68.2	74.5	66.1	51.1	28.4	10.3	7.4	41.2
16-17	4.2	12.5	24.5	40.9	50.4	57.0	62.5	53.5	39.3	19.4	2.7	1.3	30.8
17-18	0.2	2.9	11.1	28.9	36.8	43.5	47.0	39.4	25.0	9.1	0.0	0.0	20.4
18-19	0.0	0.0	2.2	15.7	23.2	29.1	30.0	23.9	10.8	1.7	0.0	0.0	11.4
19-20	0.0	0.0	0.2	5.0	10.9	15.3	15.1	9.3	1.7	0.0	0.0	0.0	4.8
20-21	0.0	0.0	0.0	0.1	2.2	5.0	4.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
21-22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

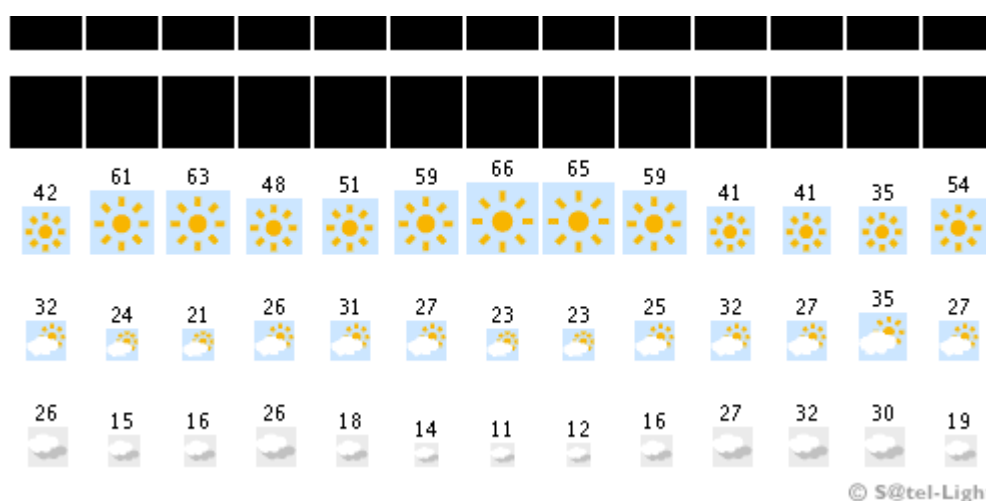


Figura 21 Frequenza delle condizioni di cielo sereno, variabile (sole e nuvole) e nuvoloso per i diversi mesi dall'anno per orari che vanno dall'alba al tramonto.

Dalla pagina internet, contenente le risposte alle richieste, risulta possibile scaricare un file di testo (milano.tsv) in cui sono raccolti i dati numerici "grezzi", utilizzati per la creazione delle rappresentazioni grafiche sopra riportate.

SOURCE: Satel-Light, The European daylight and solar radiation database
(<http://www.satel-light.com>, e-mail: webmaster@satel-light.com).
SITE: Milano, Italy, 45°28'N 9°12'E, Alt: 122 m.

Accordo di Programma MSE-ENEA

Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione

CLOCK TIME: GMT+1. Summer time shift (GMT+2), from last Sunday in March, to Saturday before last Sunday in October.
 MONTHLY PERIOD: 1996, 1997, 1998, 1999 and 2000 (All Year).
 DAILY SCHEDULE: From sunrise to sunset, using CLOCK time.
 SURFACE: Horizontal.
 INFORMATION: Flag N indicates night values.
 Flag S indicates values derived from the Satellite image at the same time.
 Flag H indicates values derived from the closest Satellite image available.
 Flag L indicates values derived at sun altitudes below 6° and no satellite images available during the day.
 Flag M indicates that no satellite image was available during the day.
 SKY 1:Sunny, 2:Intermediate, 3:Cloudy.

DATE	TIME	XCLTime	FLAG	ALTS	AZIS	EEG	EVG	SKY
mm/dd/yyyy	hh:mm	01/01/1900	n/a	dg	dgN->E		W/m2	klx
01/01/1996	00:22	35065.0153	N	-9.0	-9.0	0	0.000	0
01/01/1996	00:52	35065.0361	N	-9.0	-9.0	0	0.000	0
01/01/1996	01:22	35065.0569	N	-9.0	-9.0	0	0.000	0
01/01/1996	01:52	35065.0778	N	-9.0	-9.0	0	0.000	0

.....

A partire dai dati di illuminamento diffuso medio orario (klx) relativi a ciascun mese, e sulla base del valore di irradianza orizzontale (W/m^2) diffusa e diretta, da cui si ricavano due dei cinque parametri del modello (sky's brightness and sky's clearness) è possibile ricavare la distribuzione di luminanza del cielo⁴³.

I valori di torbidità così determinati potranno essere confrontati con quelli assunti da Satel-Light per eseguire il calcolo e che sono proposti all'utente nelle fasi iniziali dell'interrogazione del Data Base. Per la città di Milano, ad esempio, considerando che si tratta di una atmosfera con forti presenze di inquinanti industriali, i valori di torbidità mensile proposti sono indicati alla Tabella 3.

Tabella 3 Valori della torbidità mensili proposti dal sito Satel Light per la città di Milano

<u>Turbidity</u> indicates the amount of water vapor and <u>aerosols</u> at your site. When turbidity increases, the total amount of solar radiation decreases.	In this site, the following turbidity values will be used to generate irradiances and illuminances:			
	Modify these values, if you do not agree with them.			
	Jan. 4.1	Feb. 4.7	Mar. 4.4	Apr. 4.7
	May 5.5	Jun. 5.8	Jul. 5.4	Aug. 4.7
	Sep. 4.5	Oct. 4.5	Nov. 4.0	Dec. 3.7

Per la città di Siena (che non può certo essere considerata una città industriale), i valori di torbidità mensile forniti, sono riportati alla

Tabella 4.

⁴³ Si veda il metodo proposto nel seguente articolo :Ernesto Betman,"Daylight calculations using constant luminance curves", Renewable Energy 30 (2005) 241–257

Tabella 4 Valori della torbidità mensili proposti dal sito Satel-Light per la città di Siena

Turbidity indicates the amount of water vapor and aerosols at your site. When turbidity increases, the total amount of solar radiation decreases.

In this site, the following turbidity values will be used to generate irradiances and illuminances:

Modify these values, if you do not agree with them.

Jan.	3.0	Feb.	3.1	Mar.	4.3	Apr.	3.8
May	3.9	Jun.	4.3	Jul.	4.1	Aug.	3.5
Sep.	3.9	Oct.	3.4	Nov.	3.3	Dec.	3.0

Questa funzionalità del software (stimare i parametri del modello a partire dai valori di illuminamento diffuso orizzontale e di irradianza diretta e diffusa), può anche essere utilizzata anche nel caso in cui si disponesse di una serie di misure a livello del suolo, rilevate nel corso di almeno un anno, relative al sito di interesse.

5. Funzionalità minime della piattaforma EL-DESIGN

Il software da sviluppare per la piattaforma EL-Design, dovrà garantire le seguenti funzionalità minime:

- Calcolo della luce naturale secondo il modello spettrale proposto, sommariamente descritto nella presente relazione. Per i dettagli si rimanda alle informazioni bibliografiche riportate al paragrafo “Calcolo della luce Naturale”.
- Possibilità di definire una condizione istantanea, basata su un valore del parametro di torbidità (T), la localizzazione geografica del luogo, il giorno e il mese dell'anno.
- Per il calcolo della potenza impiegata per l'illuminazione nel corso dell'anno, tenuto conto del contributo del daylight, si procederà a iterare il calcolo precedente secondo le seguenti modalità:
 - ✓ Annuale: considero il giorno medio (15 di ogni mese) per ciascun mese e per questo giorno eseguo una serie di simulazioni della luce naturale, a intervallo di 2h, limitatamente alle ore di luce (dall'alba al tramonto) per quella data località geografica e periodo dell'anno (questa informazione può essere richiesta come grandezza di output dal sito Satel-Light). Il valore del parametro T sarà, in mancanza di informazioni più dettagliate (non seguendo la procedura descritta nel paragrafo “Utilizzo delle informazioni satellitari nel calcolo”), inserito dall'utente sulla base delle condizioni meteorologiche prevalenti nella località geografica di interesse (è possibile fare riferimento alle informazioni dell'archivio meteorologico, limitatamente alle località italiane, consultabile al sito <http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/>).
 - ✓ Mensile: considero i mesi di 4 settimane e considero il giorno medio di ciascuna delle 4 settimane; per ciascun giorno della settimana, effettuo una simulazione a passo 2h nelle ore di luce per quella data località e periodo dell'anno. Il valore del

parametro T sarà, in mancanza di informazioni più dettagliate, inserito dall'utente sulla base delle condizioni meteorologiche prevalenti nella località geografica di interesse (è possibile fare riferimento alle informazioni dell'archivio meteorologico, limitatamente alle località italiane, consultabile al sito <http://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/>).

- d) Sensori fotoelettrici : sono caratterizzati da un angolo di apertura del fascio, due soglie e un valore di pendenza; risultano pertanto esclusi i sensori di tipo on/off (Figura 22). Per ciascuno di essi deve essere indicato uno o più apparecchi da comandare. In una implementazione più sofisticata è possibile introdurre anche la descrizione della risposta direzionale del sensore, che può essere assimilata alla descrizione dell'emissione fotometrica di un apparecchio o sorgente: in questo caso la risposta direzionale del sensore sarà un numero compreso tra 0 e 1 che servirà a pesare il contributo delle luminanze presenti nel suo campo di vista (Figura 23).

Per maggiori dettagli sull'argomento, si rimanda alla relazione sullo stato dell'arte dei sensori fotoelettrici della presente attività di ricerca⁴⁴.

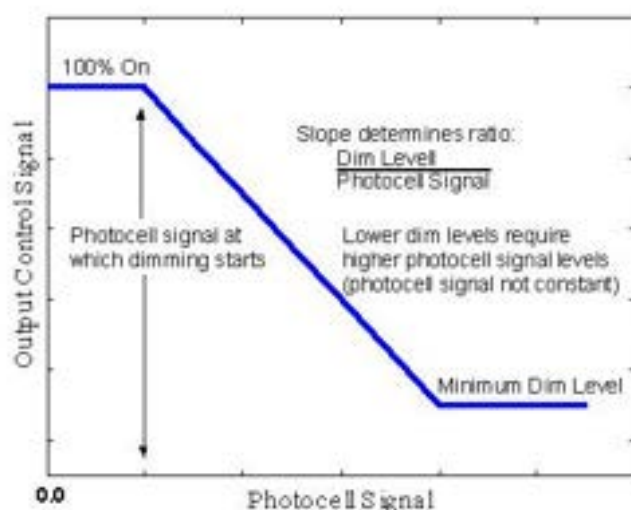


Figura 22 Parametri di un controllo ad anello chiuso proporzionale⁴⁵.

⁴⁴ Relazione in merito al punto C dell'allegato tecnico "Analisi della problematica dei controlli e della gestione dell'impianto di illuminazione in interni, indirizzata verso l'identificazione di soluzioni semplici e la definizione eventuale di dispositivi ad hoc"

⁴⁵ Immagine tratta dal sito internet <http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/tutorials/photosensors/controlE.asp>

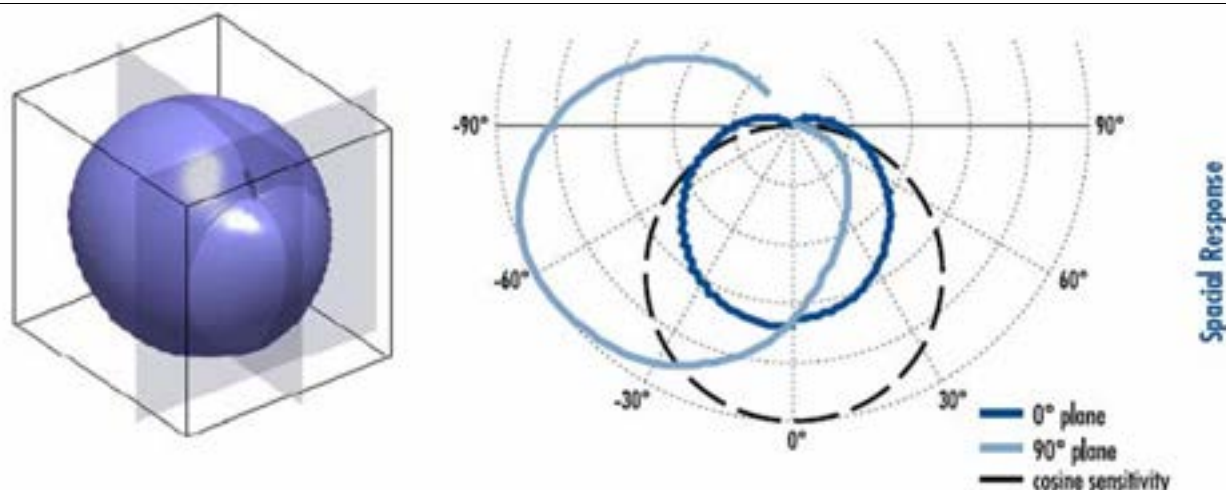


Figura 23 Esempio di rappresentazione della risposta spaziale di un sensore fotoelettrico

- e) Gestione dei sensori: il programma effettua una valutazione del contributo della luce diurna, successivamente vengono calcolati i parametri illuminotecnici, per il solo contributo diretto e quello dovuto almeno alla prima inter-riflessione⁴⁶, con apparecchi al 100%.

I sensori misurano il valore di illuminamento nella loro zona di vista e ciascuno di essi modula il flusso degli apparecchi ad essi collegati per cercare di ottenere il set-point prefissato. Ciascun gruppo di apparecchi agisce in maniera indipendente l'uno dall'altro. Viene lanciato il nuovo calcolo e valutati i valori ottenuti dal set di sensori e confrontato i valori così ottenuti con quelli dell'iterazione precedente. Se per un dato sensore non c'è variazione allora escludo quel sensore dal prossimo computo (impossibile raggiungere il suo obiettivo, perché dove misuro non è correlato a dove vario il flusso), se il sensore è saturato o interdetto lo escludo dalla iterazione successiva (saturato: tutti gli apparecchi collegati sono al 100%, ma il valore obiettivo risulta ancora troppo alto; interdetto: tutti gli apparecchi collegati sono settati al valore minimo del flusso emesso, ma il loro contributo risulta ancora eccessivo rispetto al valore di set-point). Nel caso di saturazione o interdizione dovrò segnalare, all'interno degli output di calcolo, il verificarsi dell'una o dell'altra situazione. Ripeto poi la correzione del flusso emesso da ciascun gruppo di apparecchi sulla base della differenza tra due iterazioni consecutive e itero nuovamente il processo.

Occorre definire delle condizioni di uscita che potrebbero essere quelle che si verificano quando non ci sono più sensori attivi o massimo numero di iterazioni raggiunto (parametro fissato dall'utente), oppure tutti i sensori hanno raggiunto il set-point prefissato (entro una certa tolleranza, espressa in termini percentuali). Viene esclusa una pre-analisi per stabilire la correttezza dell'associazione tra gruppo di apparecchi e sensore, almeno nella fase iniziale dello sviluppo del software: questa funzionalità dovrebbe evitare il caso in cui un sensore misuri la luminanza in una zona in cui non vi è contributo a tale parametro da parte del gruppo di apparecchi controllati.

- f) Gli output (stampa cartacea-elettronica) previsti per il programma sono i seguenti:
- ✓ report dell'andamento temporale del fattore di dimming (numero intero compreso tra 0 e 255) di ciascun apparecchio dell'impianto;
 - ✓ lista sensori e associazione apparecchio;

⁴⁶ Occorre considerare anche il caso in cui l'illuminazione artificiale dell'ambiente sia effettuata con luce indiretta: in questo caso, dal momento che i sensori osservano porzioni significative del piano di lavoro, l'aver considerato la sola componente diretta porta a una sottostima del valore di illuminamento rilevato dal sensore. Occorre quindi considerare almeno la prima inter-riflessione per avere un risultato logicamente coerente (anche se molto approssimato)

- ✓ posizionamento su file dxf di sensori e apparecchi;
- ✓ lista apparecchi (completa di tutte le caratteristiche di lampada) e puntamento;
- ✓ normali report illuminotecnici (reticolo illuminamenti, luminanze, ecc) che normalmente accompagnano un progetto tradizionale;
- ✓ report daylight factor su piano di lavoro o superficie dell'ambiente, scelta dall'utente;
- ✓ file di testo contenete tutte le informazioni precedentemente elencate (meglio un file in formato XML).

g) Il software, nella sua forma iniziale, non prevederà alcuna gestione relativamente al sensore di presenza negli ambienti.

Questa funzionalità potrà costituire un miglioramento futuro per il programma.

6 La norma UNI EN 15193

Il programma non eseguirà una valutazione dell'indice in essa descritto, ma insieme ad altri software (ad esempio foglio Excel), che saranno sviluppati da altri soggetti del gruppo, potrà fornire alcuni dei dati necessari a tale calcolo (in particolare consentirà un calcolo della componente di luce diurna più accurato rispetto al metodo tabellare presentato nella norma).

Il file di testo (o XML) in uscita dal software dovrà essere processato e integrato con altre informazioni al fine di ottenere gli indici presentati nella norma (ad esempio la curva caratteristica dei reattori elettronici, che faccia passare da un valore di dimming a un valore di potenza elettrica, l'occupazione dei diversi locali nel corso dell'anno, le perdite dei dispositivi di controllo, ecc).

La norma UNI EN 15193, introduce un indicatore numerico complessivo dell'utilizzo dell'energia per l'illuminazione, definito LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) pari all'energia annuale per unità di superficie consumata dall'impianto di illuminazione:

$$\text{LENI} = W/A \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Dove

W Energia totale annuale per l'illuminazione [kWh/anno]

A Area totale dell'edificio [m²]

Per semplicità, si farà riferimento ad un solo ambiente o zona, per illustrare a grandi linee, il metodo proposto dalla norma; come semplificazione di calcolo, si farà riferimento ad un edificio con finestrature sulle facciate verticali (assenza di lucernai).

L'energia totale annua W viene calcolata come somma annuale dell'energia luminosa e di quella parassita.

$$W = W_L + W_P = \sum_{\text{tutti i periodi dell'anno}} W_{L,t} + W_{P,t} \text{ [kWh/anno]}$$

Dove

$W_{L,t}$ Energia per illuminazione consumata nel tempo t di esercizio (comprese le perdite degli alimentatori)

$W_{P,t}$ Energia parassita dissipata nel tempo t dai dispositivi di controllo dei sistemi di regolazione e per il caricamento delle batterie dell'illuminazione di emergenza.

Per ciascun ambiente o gruppi di ambienti di caratteristiche illuminotecniche e di destinazione d'uso omogenee, l'energia spesa per l'illuminazione $W_{L,t}$, viene calcolata secondo la seguente relazione:

$$W_{L,t} = \sum_{\text{sotto-periodi}} \frac{P_n F_c (t_D F_o F_D + t_N F_o)}{1000} \quad [\text{kWh/anno}]$$

Dove

P_n Potenza installata di tutti di apparecchi illuminanti della zona comprese le perdite degli alimentatori [W]

F_c Fattore di illuminamento costante; si tiene conto dell'azione di un sistema di controllo del flusso luminoso che riduce la potenza di lampada durante le prime ore di funzionamento in modo da mantenere costante il valore di illuminamento sul compito visivo al valore prefissato (le lampade durante il loro funzionamento, riducono la quantità di flusso emesso; di conseguenza per mantenere costante il valore di illuminamento sul compito visivo è necessario sovradimensionare l'impianto, attraverso l'applicazione di un fattore di manutenzione, in modo tale che all'atto del ricambio lampade sia abbia ancora il valore di illuminamento prescritto).

Normalmente il fattore di manutenzione in un interno è assunto pari a 0.8, per maggiori dettagli sul suo calcolo a seconda dell'applicazione, si rimanda alla pubblicazione CIE 97⁴⁷.

t_D periodo di funzionamento diurno: ore di funzionamento dell'impianto in presenza di luce diurna [h] (Tabella 5).

Tabella 5 Ore notturne e diurne di riferimento in funzione del tipo di edificio

Building types	Default annual operating hours		
	t_D	t_N	t_O
Offices	2 250	250	2 500
Education buildings	1 800	200	2 000
Hospitals	3 000	2 000	5 000
Hotels	3 000	2 000	5 000
Restaurants	1 250	1 250	2 500
Sports facilities	2 000	2 000	4 000
Wholesale and retail services	3 000	2 000	5 000
Manufacturing factories	2 500	1 500	4 000

F_O Fattore di dipendenza dell'occupazione, che tiene conto di un sistema di controllo sensibile all'occupazione dei locali (sensore di presenza, si veda quanto scritto per i sistemi di controllo).

Il fattore di occupazione F_O , dipende dal fattore di controllo F_{OC} (Tabella 6), che tiene conto del tipo di controllo adottato e da un fattore di assenza F_A (ore di assenza di persone all'interno del locale rispetto alle ore di esercizio).

Il valore F_A a seconda del tipo di edificio o del tipo di ambiente all'interno dell'edificio, è riportato alla Tabella 7.

La Tabella 8 riporta le espressioni per il calcolo di F_O in funzione di F_{OC} ed F_A ; la Tabella 9 è riassuntiva del calcolo di F_O in funzione dei parametri F_{OC} ed F_A .

⁴⁷ Publication CIE 97, "Maintenance of indoor Electric Lighting System", 1992

Tabella 6 Valore del fattore F_{OC} a seconda della presenza/assenza di un fattore di controllo di presenza

Systems without automatic presence or absence detection	F_{OC}
Manual On/Off Switch	1.00
Manual On/Off Switch + additional automatic sweeping extinction signal	0.95
Systems with automatic presence and/or absence detection	F_{OC}
Auto On / Dimmed	0.95
Auto On / Auto Off	0.90
Manual On / Dimmed	0.90
Manual On / Auto Off	0.80

Tabella 7 Valore del fattore F_A a seconda del tipo di edificio o dettaglio a seconda dell'ambiente all'interno di esso.

Overall building calculation		Room by room calculation		
Building type	F_A	Building type	Room type	F_A
Offices	0.20	Offices	Cellular office 1 person.	0,4
			Cellular office 2-6 persons.	0,3
			Open plan office >6persons sensing/30m ²	0
			Open plan office >6persons sensing/10m ²	0,2
			Corridor (dimmed)	0,4
			Entrance hall	0
			Showroom/Expo	0,6
			Bathroom	0,9
			Rest room	0,5
			Storage room/Cloakroom	0,9
			Technical plant room	0,98
			Copying/Server room	0,5
			Conference room	0,5
			Archives	0,98

Tabella 8 Calcolo del fattore F_0 in funzione del fattore F_A .

$F_0=1$	Se l'illuminazione è controllata centralmente o per gruppi di apparecchi su aree maggiori di 30 m ²
$F_0 = 1 - F_A * \frac{1 - F_{OC}}{0.2}$	$0.0 < F_A < 0.2$
$F_0 = F_{OC} + 0.2 + F_A$	$0.2 < F_A < 0.9$
$F_0 = (7 - 10F_{OC}) * (F_A - 1)$	$0.9 < F_A < 1.0$

Tabella 9 Tabella riassuntiva per la determinazione del fattore F_O , in funzione del fattore F_A e del tipo di controllo F_{Oc}

F_A	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Manual On/Off switch	1.000	1.000	1.000	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.000
Manual On/Off Switch + additional automatic sweeping extinction signal	1.000	0.975	0.950	0.850	0.750	0.550	0.650	0.450	0.350	0.250	0.000
Auto on/Dimmed	1.000	0.975	0.950	0.850	0.750	0.550	0.650	0.450	0.350	0.250	0.000
Auto on/Auto off	1.000	0.950	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.200	0.000
Manual on/Dimmed	1.000	0.950	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.200	0.000
Manual on/Auto Off	1.000	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400	0.300	0.200	0.100	0.000

F_D Fattore di dipendenza dalla luce diurna, che tiene conto dell'azione di un sistema di controllo sensibile alla luce diurna (sulle modalità di funzionamento dei sistemi di controllo, si veda quando riportato nella precedente relazione)

t_N Periodo di funzionamento notturno: ore di accensione dell'impianto in assenza di luce diurna [h] (Tabella 5).

Il fattore di dipendenza dalla luce diurna F_D è diverso da 1 solo se sono presenti sistemi di regolazione dell'illuminazione, in relazione alla disponibilità di luce diurna.

Esso vale:

$$F_D = 1 - (F_{D,S} * F_{D,C})$$

dove, per la zona in esame:

$F_{D,S}$ è il fattore di disponibilità di luce diurna;

$F_{D,C}$ è il fattore di controllo della luce diurna (Tabella 10).

Tabella 10 Fattore di controllo della luce diurna in funzione del tipo di controllo manuale o automatico e della disponibilità di luce weak debole, medium, media e strong forte.

Control of artificial lighting system	$F_{D,C,n}$ as function of daylight penetration		
	weak	medium	strong
Manual	0,20	0,30	0,40
Automatic, daylight dependent	0,75	0,77	0,85

Il fattore di disponibilità di luce diurna vale:

$$F_{D,S} = a + b\gamma_{sito}$$

Dove a e b sono riportati alla Tabella 11 in funzione della disponibilità di luce che potremmo quantificare come weak/debole, medium/media e strong/forte e sulla base della latitudine γ_{sito} del sito dell'edificio.

Tabella 11 Valori di a e b in funzione del valore di illuminamento e della disponibilità della luce diurna per il calcolo di $F_{D,S}$.

Maintained illuminance	Daylight penetration	a	b
[lux]			
300	weak	1.2425	-0.0117
	medium	1.3097	-0.0106
	strong	1.2904	-0.0088
500	weak	0.9432	-0.0094
	medium	1.2425	-0.0117
	strong	1.3220	-0.0110
750	weak	0.6692	-0.0067
	medium	1.0054	-0.0098
	strong	1.2812	-0.0121

Per valutare la disponibilità della luce diurna (attribuire cioè una delle tre categorie al caso in esame), la norma propone un metodo che si basa sulla Tabella 12.

Tabella 12 Disponibilità di luce diurna

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

Dove:

D_c è il fattore di luce diurna, cioè la stima della predisposizione del locale a recepire luce diurna;

D è il fattore di classificazione per luce diurna, che tiene conto della finestratura e degli infissi.

Il fattore di luce diurna D_c è calcolabile con la seguente espressione:

$$D_c = (4,13 + 20 \cdot I_T - 1,36 \cdot I_{DE}) \cdot I_0$$

Dove:

- I_T è l'indice di trasparenza = A_C/A_D , cioè il rapporto tra l'area lorda delle aperture nella facciata A_C e l'area del piano di lavoro orizzontale che beneficia di luce diurna $A_D = a_D b_D$.
Con il simbolo a_D si indica la lunghezza della zona investita dalla luce naturale [m], mentre con b_D , si indica la larghezza [m] della zona in cui si ha contributo di luce naturale e in genere corrisponde alla larghezza interna della facciata o del settore di calcolo (normalmente, in situazioni complesse l'ambiente interno viene suddiviso in zone che beneficiano della luce diurna e zone che non sono raggiunte da tale contributo).

Rimangono da valutare le due grandezze a_D e b_D .

Con $a_{D,max} = 2.5 \cdot (h_{Li} - h_{Ta})$, espresso in metri, si indica la massima possibile profondità del daylight attraverso una facciata; e si porrà $a = 1,25 a_{D,max}$ e $b_D =$ alla larghezza della finestra più $a_D/2$ (come mostrato nel disegno della Figura 24). Se la profondità del locale è inferiore al valore $a_{D,max}$, allora a_D sarà posto uguale ad alla profondità del locale o della zona.

- I_{DE} è l'indice di profondità = $a_D/(h_{Li}-h_{Ta})$, cioè pari al rapporto tra la profondità della zona investita da luce diurna e la altezza della sommità della finestra rispetto al piano di lavoro;
- I_0 esprime l'effetto di ostruzione che limitano l'ingresso di luce diurna, in assenza di ostruzioni $I_0=1$.

Questo parametro può essere visto come:

$$I_0 = I_{0,0B} \cdot I_{0,0V} \cdot I_{0,0VF} \cdot I_{0,0CA} \cdot I_{0,0GDF}$$

dove:

- $I_{0,0B}$ = fattore per ostruzioni lineari pari a $\cos(1,5\gamma_{0,0B})$ per $\gamma_{0,0B} < 60^\circ$ e 0 per $\gamma_{0,0B} > 60^\circ$, con $\gamma_{0,0B}$ angolo di ostruzione (vedi disegno della Figura 24);
- $I_{0,0V}$ = fattore per sporgenze pari a $\cos(1,33\gamma_{0,0V})$ per $\gamma_{0,0V} < 67,5^\circ$ e 0 per $\gamma_{0,0V} > 67,5^\circ$, con $\gamma_{0,0V}$ angolo di ostruzione (vedi disegno della Figura 24);
- $I_{0,0VF}$ = fattore per alette verticali, si rimanda a quanto previsto nella norma UNI EN 15193 (ANNEX C) per la sua corretta valutazione;
- $I_{0,0CA}$ = fattore per cortili ed atri, si rimanda a quanto previsto nella norma UNI EN 15193 (ANNEX C) per la sua corretta valutazione;
- $I_{0,0GDF}$ = fattore per doppie facciate vetrate, si rimanda a quanto previsto nella norma UNI EN 15193 (ANNEX C) per la sua corretta valutazione.

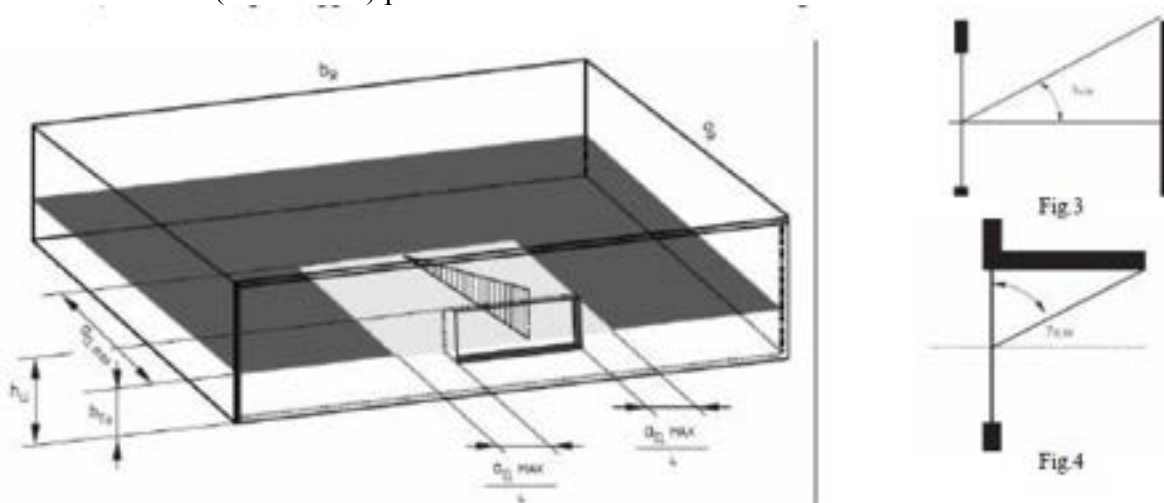


Figura 24 Valutazione dell'area del piano di lavoro orizzontale che beneficia di luce diurna A_D

Il fattore di classificazione per luce diurna tiene conto anche delle finestrature e dei serramenti ed è calcolabile con la seguente espressione:

$$D = D_C \cdot \tau \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$$

dove:

- τ è il coefficiente emisferico di trasmissione diretta del sistema vetrato, tabulato alla Tabella 13;
- k_1 è il fattore di telaio della finestra, tipico = 0,7
- k_2 è il fattore di pulizia del vetro, tipico = 0,8;
- k_3 è il fattore di incidenza della luce, tipico = 0,85.

Tabella 13 Coefficiente emisferico di trasmissione diretta del sistema vetrato

Type	U	$g_{\perp}$	τ_v	$\tau_{D65,SNA}$
Single glazing	5,8	0,87	0,85	0,90
Double glazing	2,9	0,78	0,73	0,82
Triple glazing	2,0	0,70	0,63	0,75
low-e glazing, double glazed	1,7	0,72	0,60	0,74
low-e glazing, double glazed	1,4	0,67	0,58	0,78
low-e glazing, double glazed	1,2	0,65	0,54	0,78
low-e glazing, triple glazed	0,8	0,50	0,39	0,69
low-e glazing, triple glazed	0,6	0,50	0,39	0,69
Solar protection glazing, double	1,3	0,48	0,44	0,59
Solar protection glazing, double	1,2	0,37	0,34	0,67
Solar protection glazing, double	1,2	0,25	0,21	0,40

L'energia parassita $W_{P,t}$ è calcolata come segue:

$$W_{P,t} = \sum_{\text{sotto-periodi}} \frac{P_{PC} |t_y - (t_D + t_N)| + P_{em} t_{em}}{1000} \quad [\text{kWh/anno}]$$

Dove

P_{pc} Potenza parassita dei controlli, potenza parassita installata e dovuta a sistemi di controllo dell'illuminazione, calcolata durante il periodo di funzionamento [W]

t_y numero di ore presenti in un anno (8760) [h]

P_{em} :potenza parassita installata e dovuta ai sistemi di ricarica della luce di emergenza [W]

t_{em} :periodo di ricarica accumulatori, è il periodo di tempo per cui le batterie di emergenza si ricaricano [h].

Come già accennato in precedenza, la valutazione del parametro LENI, può essere fatta ricorrendo a un foglio Excel appositamente preparato, sul modello di quello proposto alla Figura 25⁴⁸.

La piattaforma EL-DESIGN può certamente fornire delle stime maggiormente accurate del fattore F_D , su base mensile o annuale; i miglioramenti riguarderebbero certamente l'accuratezza di calcolo, sia per quanto concerne la disponibilità di luce naturale nell'ambiente (basate sull'elaborazione di serie statistiche di rilevazioni sull'illuminamento naturale), sia per la determinazione dell'effetto di finestrature e lucernai (maggiore aderenza alla realtà di del modello geometrico ed ottico reale del lucernaio o della finestratura, rispetto ai casi standard previsti dalla norma).

Le elaborazioni possibili, possono riguardare il risparmio energetico derivante dall'adozione di dispositivi di controllo del flusso luminoso (manuali o automatici), come illustrato alla Figura 26⁴⁹, o dall'impiego di sensori di presenza che riducano i consumi energetici per illuminazione in assenza di personale all'interno degli ambienti. La Figura 27⁵⁰, illustra graficamente i risparmi conseguibili dalla gestione della presenza e dei vantaggi/svantaggi ottenibili dalla gestione manuale o automatica di questo genere di controllo.

⁴⁸Ing. Luigi Martirano, "L'impatto della domotica e della building automazione nella prestazione energetica degli edifici.", Seminario AEIT del 23 aprile 2008 Facoltà di Ingegneria San Pietro In Vincoli Via Eudossiana 18 Roma

⁴⁹ Ing. Luigi Martirano, "L'impatto della domotica e della building automazione nella prestazione energetica degli edifici.", Seminario AEIT del 23 aprile 2008 Facoltà di Ingegneria San Pietro In Vincoli Via Eudossiana 18 Roma

⁵⁰ Ing. Luigi Martirano, "L'impatto della domotica e della building automazione nella prestazione energetica degli edifici.", Seminario AEIT del 23 aprile 2008 Facoltà di Ingegneria San Pietro In Vincoli Via Eudossiana 18 Roma

Contributo alla definizione delle specifiche di sviluppo piattaforma per indirizzare il progettista verso le soluzioni più idonee a soddisfare parametri di comfort, efficienza ecc., nella progettazione di impianti di illuminazione

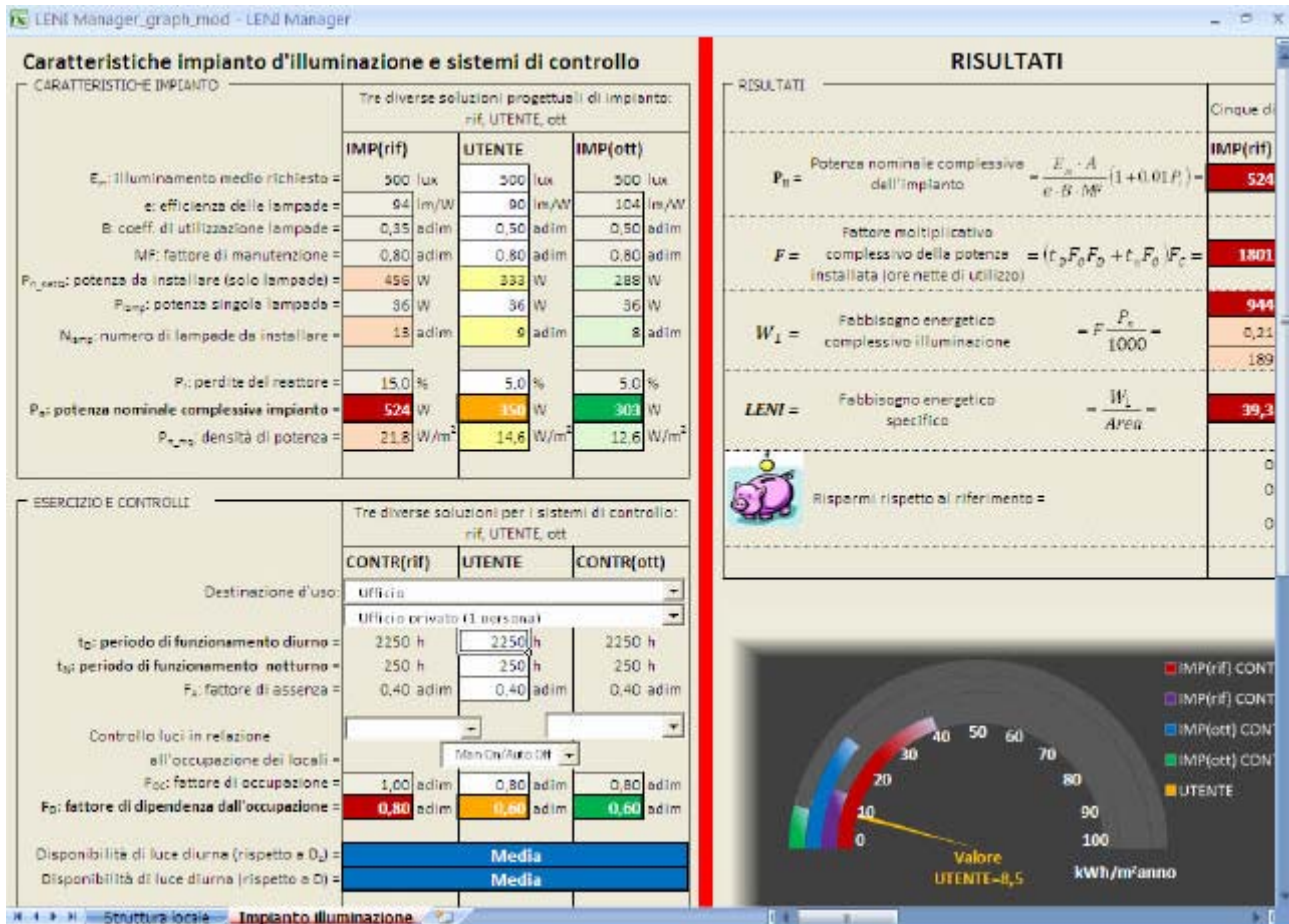


Figura 25 Schermata del software LM Leni Manager in ambiente excel™ per la valutazione dell'indice LENI.

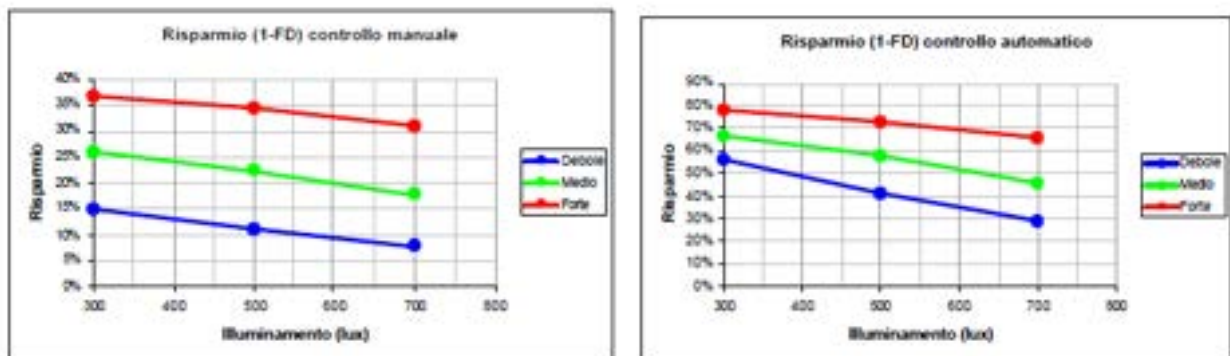


Figura 26 Risparmio derivante dal controllo della luce diurna

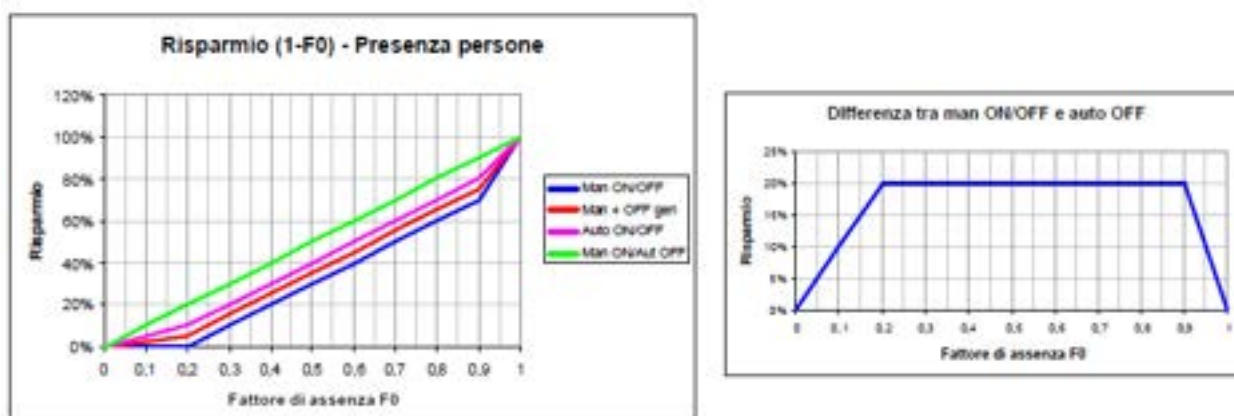


Figura 27 Risparmio derivante dalla gestione del controllo di presenza in un ambiente.

7. Proposta per funzionalità avanzate della piattaforma EL-DESIGN

Alla luce dello stato dell'arte dei software visti nel primo paragrafo, la piattaforma, nella sua fase di sviluppo matura, potrebbe comprendere funzionalità più avanzate di quelle descritte nel paragrafo precedente quali:

- Gestione delle proprietà ottiche degli apparati di ombreggiatura⁵¹. Uno dei problemi più importanti da affrontare nella progettazione degli edifici nei climi caldi, è la gestione dei carichi energetici per il condizionamento. L'applicazione di dispositivi in grado di ombreggiare la facciata (shading device), può risultare una strategia vincente per contenere i consumi del condizionamento, consentendo di contenere entro limiti accettabili i consumi della potenza elettrica. Questa soluzione sembra essere particolarmente indicata per edifici commerciali e uffici, caratterizzati in molti casi da ampie superfici vetrate che fanno lievitare i costi per il rinfrescamento.

Il mercato offre diversi prodotti che differiscono tra loro per tipologia di ombreggiatura (veneziane, tende a pacchetto, pannelli, scuri, ecc), posizionamento rispetto alla finestra (posizionate all'esterno, all'interno dell'edificio, all'interno tra due lastre di vetro, vetrocamere), proprietà ottiche degli elementi trasparenti (aggiunta di uno o più film alla lastra di vetro per ottenere effetti filtranti in particolari bande della spettro elettromagnetico, con particolare riferimento alla radiazione UV e IR), per la strategia di controllo degli elementi mobili.

L'utilizzo di tutti questi dispositivi porta alla riduzione della luce naturale all'interno dell'ambiente con la conseguente necessità di sopperire al minore contributo di luce naturale attraverso un sistema di illuminazione artificiale. Per questo motivo è di fondamentale importanza che i dispositivi di ombreggiatura siano correttamente progettati al fine di meglio bilanciare le prestazioni termiche e luminose dell'edificio. Risulta quindi di fondamentale importanza determinare come il sistema riflette/trasmette la radiazione solare incidente; la descrizione delle proprietà ottiche di diffusione, riflessione speculare e trasmissione della luce di materiali semitrasparenti sono di fondamentale importanza per il progetto. La gestione di queste proprietà all'interno del software potrebbe essere gestita

⁵¹ M. Zinzi, G. Rossi, P. Iacomussi, A. Daneo, S. Agnoli, "Influenza delle proprietà ottiche degli apparati per ombreggiare gli edifici sulla distribuzione di luce naturale in interni", LUCE (Organo ufficiale dell'associazione italiana di illuminazione AIDI), Anno XDVII, Aprile 2008, N.1

tramite la costruzione di un data base che contenga le caratteristiche ottiche dei materiali e delle componenti di ombreggiatura.

La particolare applicazione rende necessario conoscere il fattore di trasmissione delle componenti ottiche al variare della direzione di incidenza e di osservazione: una simile descrizione si può effettuare ricorrendo alla Bidirectional Transmission Distribution Function (BTDF) e alla Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)⁵².

Si tratta della descrizione della distribuzione nello spazio della luce trasmessa o riflessa dal componente ottico per ogni possibile direzione di incidenza; la sua rappresentazione dal punto di vista grafico, può essere fatta andando a disegnare in un sistema di riferimento polare i fattori di trasmissione o riflessione in tutte le possibili direzioni di osservazione per una data direzione di incidenza.

La Figura 28 illustra un esempio di rappresentazione grafica di BRDF e BTDF.

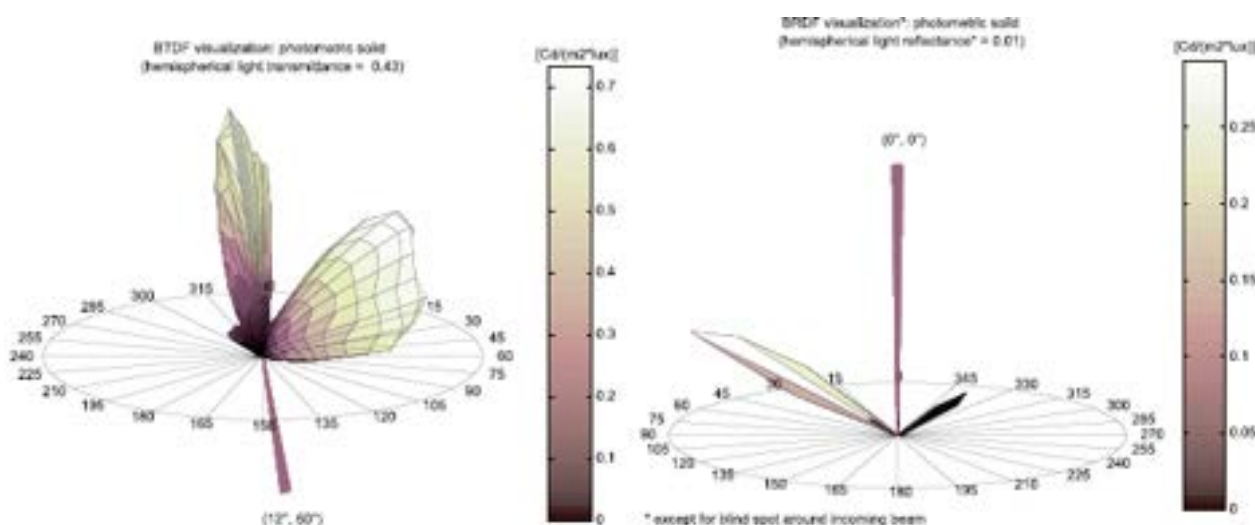


Figura 28 A sinistra BTDF, riferita ad una radiazione incidente (12°,60°). A destra un esempio di BRDF con direzione della luce incidente (0°,0°).

Anche in assenza di informazioni specifiche come la BRDF e la BTDF (forniscono una informazione completa sui mezzi ottici trasparenti, utile ad esempio quando vengono installati dei pannelli prismatici), occorre prevedere un piccolo data base che raccolga le informazioni di fattore di trasmissione dei tipi più comuni di vetro utilizzati in edilizia.

Dal momento che vengono sempre più frequentemente utilizzate pellicole ed elementi filtranti per bloccare alcune bande spettrali della radiazione elettromagnetica solare incidente sulla facciata degli edifici, la descrizione del fattore di trasmissione dovrebbe essere di tipo spettrale, prevedendo almeno tra distinti valori del fattore di trasmissione:

- ✓ Nella banda UV;
- ✓ Nella banda del visibile;
- ✓ Nella banda IR.

- Il programma dovrebbe consentire l'inserimento di lucernai e finestre da un database di oggetti predefiniti. L'inserimento di una finestra da libreria in una parete dovrebbe avvenire senza complicazioni di modellazione, quali ad esempio la creazione di una apertura sulla parete del locale e così di seguito. Analogo comportamento sarebbe desiderabile anche per l'inserimento di un lucernaio all'interno dell'ambiente. L'utente dovrebbe essere poi in

⁵² M. Andersen, J de Boer, "Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems", International Energy Agency (IEA), Solar Heating and Cooling Programme Task 31, DAYLIGHTING BUILDINGS IN THE 21ST CENTURY

grado di poter spostare liberamente la finestratura e/o il lucernaio sulla superficie della parete o del tetto.

Per i lucernai maggiormente utilizzati in edilizia, dovrebbe poter essere possibile variarne le dimensioni geometriche in maniera semplice editando le proprietà dell'oggetto (si veda esempio della Figura 29).

L'utente deve poi avere la possibilità di modellare un lucernaio o pozzo di luce personalizzato, che deve poter essere poi salvato all'interno della libreria per essere riutilizzato in progetti successivi; tale modello deve poi essere trattato all'interno del progetto con le stesse modalità previste per gli elementi predefiniti.

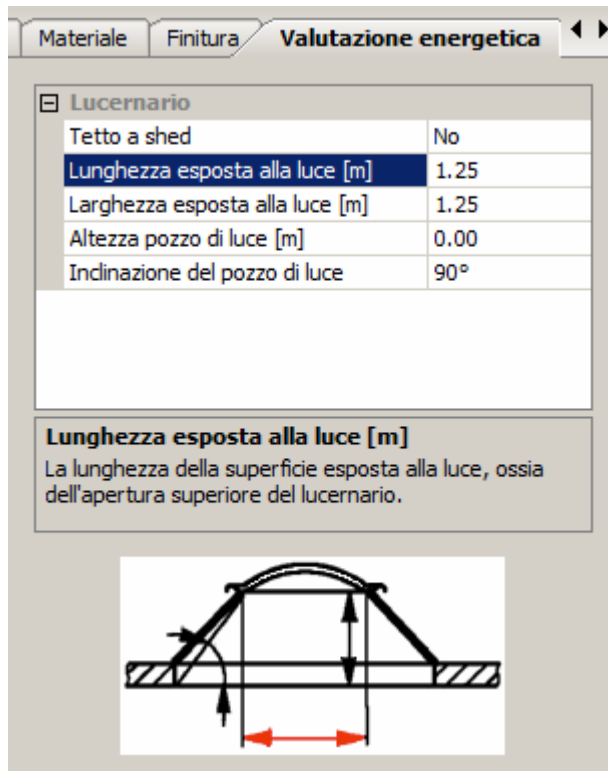


Figura 29 Esempio di modifica delle proprietà geometriche del lucernaio

- Integrazione della valutazione energetica degli edifici (UNI EN 15193) all'interno del software, attraverso una procedura guidata che renda il calcolo semplice ed immediato anche ad utenti che non conoscono nel dettaglio il contenuto della normativa.
A tale scopo sarà necessario integrare all'interno della piattaforma ogni informazione riguardante i consumi energetici parassiti di alimentatori e dispositivi di emergenza, nonché qualche semplice algoritmo che serva a tenere conto della presenza o assenza di personale sul luogo di lavoro, in funzione dei compiti svolti e della tipologia di ambiente.
- Implementazione di un algoritmo che consenta una dislocazione ottimizzata dei sensori fotoelettrici, che non sia basata su un meccanismo 'forza bruta', come quello suggerito per la prima implementazione software.

Milano 29.12.08

Il responsabile scientifico
Prof. Maurizio Rossi
Dip. Indaco. Politecnico di Milano