

## CAPITOLO III - STUDIO DI UN SISTEMA SCHERMANTE ADATTIVO

### 1. INTRODUZIONE

La luce in architettura ha sempre ricoperto un ruolo di fondamentale importanza nella progettazione, basti pensare agli edifici religiosi come le chiese cristiane che presentano l'orientamento della navata principale lungo l'asse est-ovest in modo tale che colui che vi entri e la percorra verso l'altare, possa camminare verso il punto in cui nasce e sorge il sole, che simbolicamente rappresenta Dio. Un altro esempio può essere preso antipodicamente dall'architettura vernacolare, i cui canoni progettuali si basano meno sulla filosofia rispetto all'architettura d'autore, per rifarsi più a logiche di utilizzo che possono essere sintetizzate dalla formula clima-forma-materia. In questo tipo di architettura sono un classico esempio i cascinali impiegati per l'essiccazione del fieno che presentano un prospetto principale esposto a sud e completamente aperto al fine di permettere alla luce del sole di raggiungere il solaio in cui era depositato il fieno.



Figura 1. Interno della cattedrale gotica di Colonia



Figura 2. Fienile di una cascina lombarda

Dopo che il vetro ha rappresentato nell'esperienza hi-tech dell'architettura dei primi del '900 un materiale di largo impiego come espressione di innovazione e leggerezza, nella seconda metà del secolo scorso tale paradigma si era concentrato principalmente nella realizzazione dei grattacieli, parallelepipedi racchiusi su tutti i lati da facciate vetrate.

Al giorno d'oggi si presta invece molta attenzione all'uso del vetro in relazione principalmente all'orientamento della facciata dove deve essere posizionato in quanto, se in inverno consente sugli affacci sud est ed ovest dei guadagni termici derivanti dall'irraggiamento solare, in estate questi guadagni, in particolare nelle regioni che presentano un clima mediterraneo, devono essere limitati, e nelle ore più calde della giornata anche annullati tramite l'utilizzo di sistemi schermanti idonei. Ovviamente per la scelta della tipologia più adatta di sistema schermante da adottare, deve essere considerata la zona climatica del sito in cui si progetta perché, come nel caso delle zone dell'Europa del centro-nord, le schermature non sono necessarie e può bastare anche un doppio vetro basso emissivo, dato il basso contributo dell'irraggiamento solare.



In relazione alla volontà di adottare un sistema di schermatura ottimizzato per i differenti orientamenti della facciata dell'edificio adibito a residenze, prospiciente la piazza, abbiamo avviato un'attività di ricerca, confrontando con un prodotto esistente sul mercato un prototipo di schermatura solare che si adatta all'orientamento del prospetto, ottimizzando la capacità di ombreggiamento.



Figura 3. Esempio di casa solare, Matteo Thun per Rubner, Casa Heidis

## 2. SCHERMATURE SOLARI

Le schermature solari possono essere distinte in base alla geometria, posizione e modalità di gestione e rispettivamente classificate in orizzontali e verticali, esterne e interne, fisse e mobili. Le schermature orizzontali sono efficaci se di dimensioni opportune e collocate sulla facciata sud dell'edificio, poichè impediscono la penetrazione della radiazione diretta nelle ore centrali delle giornate estive, consentendo alle latitudini medio-alte l'apporto solare invernale. Le schermature verticali invece sono efficaci quando la direzione dei raggi solari non è contenuta in un piano parallelo a quello dello schermo e forma con esso un angolo di incidenza sufficientemente ampio da impedire la penetrazione dei raggi stessi: questa tipologia è quindi più indicata per gli affacci est e ovest.

I sistemi fissi vedono i vantaggi nella loro robustezza e nell'assenza di elementi meccanici, dunque comportano una scarsa manutenzione mentre gli svantaggi consistono nel fatto che non sono adattabili alle variazioni della posizione del sole. I sistemi mobili invece riescono a garantire il controllo, la gradazione, la rifrazione e la diffusione del livello di illuminazione naturale all'interno dell'edificio, in funzione della possibilità di regolarne l'inclinazione secondo l'angolo di incidenza della luce diretta.

Le schermature interne, rispetto a quelle esterne, sono meno efficaci contro il surriscaldamento poichè consentono di schermare la sola componente luminosa della luce, lasciando passare la radiazione termica all'interno del locale. Come



Figura 4. Esempio di schermature orizzontali



Figura 5. Esempio di schermature verticali



strumento di controllo solare le schermature esterne sono molto più efficaci rispetto a quelle interne in quanto impediscono alla radiazione solare di raggiungere la superficie del vetro. Dovendo però resistere all'azione del vento e della pioggia, dovranno possedere una resistenza meccanica ed essendo costituiti da più elementi, richiedono una periodica manutenzione e pulizia. L'efficienza delle schermature solari dipende anche dal tipo di materiale utilizzato, dalla posizione e dalla adattabilità alla variabilità della luce a cui sono esposte durante il corso dell'anno e della singola giornata.

Lo studio e la progettazione della posizione e dimensione di tali sistemi schermanti, esigono pertanto considerazioni di tipo geografico relative al luogo di progetto. I criteri di dimensionamento delle schermature differiscono a seconda dell'orientamento delle aperture vetrate: nel caso in cui queste siano esposte a sud, si procede individuando la retta di piena insolazione e dunque il valore dell'angolo viene generalmente definito in funzione della regione climatica in cui si trova l'edificio e della sua latitudine. Per aperture esposte a est e ad ovest si considerano le richieste e i dati climatici estivi, dunque il periodo compreso tra il 21 Giugno e il 21 settembre ed una certa fascia oraria giornaliera. Nella prima mattina, a est e nel tardo pomeriggio, a ovest, nel suo percorso apparente, il sole varia l'angolo di altezza in maniera considerevole. E' evidente quindi che se si utilizza uno schermo orizzontale ad ovest, si potrà schermare qualche ora del primo pomeriggio, e successivamente il sole abbassandosi sull'orizzonte, penetrerà attraverso le superfici trasparenti, causando surriscaldamento nel periodo estivo. È per questo motivo che per tale orientamento, le schermature dovrebbero essere verticali e poste lateralmente alla finestra.

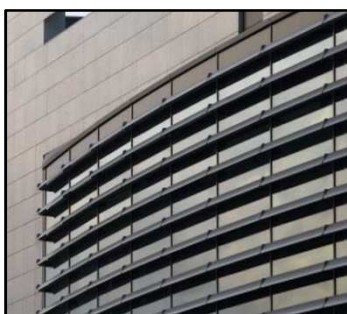


Figura 6. Schermature orizzontali



Figura 7. Schermature verdi



Figura 8. Aggetti

Uno strumento efficace per progettare i sistemi schermanti di un edificio è costituito dalle maschere di ombreggiamento, da abbinare ai diagrammi solari, i quali sono una rappresentazione grafica della posizione del sole nella sfera celeste, per una determinata latitudine e per i diversi giorni dell'anno. Si riesce dunque a conoscere quale sia, per ogni determinata località, la posizione del sole nelle ore della giornata. I diagrammi solari sono una risorsa utile nella gestione del rapporto tra il sole e l'ambiente edificato poiché evidenziano l'accesso al sole di un insediamento, della facciata di un edificio, di una finestra, di un sistema solare attivo o passivo. Le maschere di ombreggiamento devono essere disegnate sopra al diagramma solare e sono utili a dimensionare una schermatura. In figura 9 viene riportato il diagramma solare della città di Como: lungo l'asse delle ascisse viene definito l'angolo azimutale  $\alpha$  mentre l'angolo zenitale  $\beta$ , o la complementare altezza solare  $\theta_z$ , è riportata sull'asse delle ordinate. In questo modo è facile capire che le curve estreme del diagramma si riferiscono alle date del 21 Giugno, quella più esterna, e del 21 Dicembre, quella più interna. Inoltre è stata mappata cromaticamente l'intensità della radiazione solare e non a caso si osserva una maggior radiazione nelle ore centrali della giornata per le date prossime al solstizio estivo.



Riassumendo si può affermare che le schermature solari rivestono un'enorme importanza nell'economia energetica di un edificio: durante il periodo estivo hanno infatti il compito di ostacolare l'entrata della radiazione solare diretta mentre nella stagione fredda, al contrario, devono favorirne la captazione. Inoltre devono provvedere a garantire un'illuminazione naturale ottimale degli ambienti interni per tutto il corso dell'anno, evitando fastidiosi fenomeni di abbagliamento, così da contribuire all'abbattimento dell'utilizzo di fonti luminose artificiali, che determinano non solo un dispendio energetico ma anche un carico termico per l'impianto di raffrescamento.

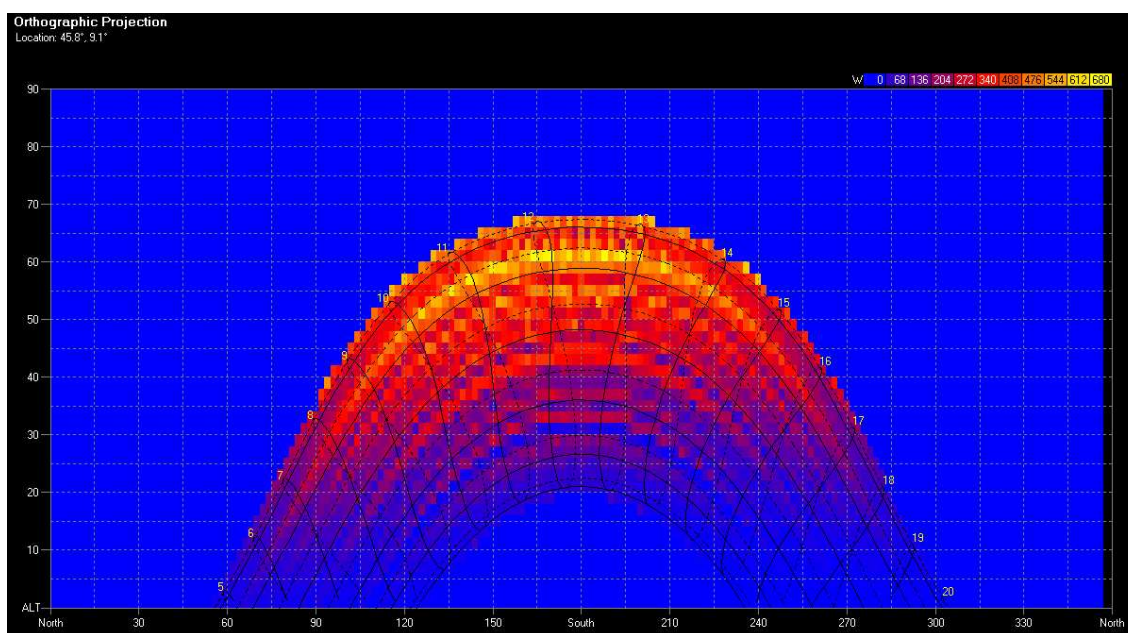


Figura 9. Diagramma solare per la città di Como

Questa attenzione rientra tra i requisiti che il sistema schermante fisso, in analisi nelle prossime pagine, dovrà soddisfare, in quanto dalla sua duplice efficacia, estiva ed invernale, dipenderà l'efficienza energetica dell'involucro vetrato dell'edificio in cui verrà installato. Infatti l'ottimizzazione del comportamento passivo dell'edificio in estate, mediante l'utilizzo di sistemi di controllo della radiazione diretta, quali per l'appunto le schermature fisse, determina una riduzione del carico termico dovuto al surriscaldamento delle strutture trasparenti.



### 3. GEOMETRIA SOLARE

(Tratto da F. M. Butera, Architettura e ambiente. Manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici, Milano 1995)

Il moto di rotazione e quello di rivoluzione della terra si traducono, per un osservatore posto in un punto qualunque di essa, in un moto apparente del sole in cielo. La sua posizione, istante per istante, può calcolarsi facendo uso di alcuni parametri fondamentali. Essi sono la declinazione  $\delta$ , la latitudine  $\Phi$  e l'angolo orario  $\omega$ , che varia nel corso della giornata con una velocità costante di 15 gradi/ora; vale zero a mezzogiorno e aumenta di 15° ogni ora contata a partire da mezzogiorno, con valori positivi la mattina e negativi il pomeriggio. La declinazione in un qualsiasi giorno dell'anno si può calcolare, in gradi, mediante la seguente espressione approssimata, ma sufficientemente accurata:

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (N + 284) \right]$$

dove N è il giorno progressivo dell'anno.

Occorre notare che generalmente l'ora solare non coincide con l'ora civile, infatti un giorno solare è l'intervallo di tempo nel quale il sole sembra avere completato un ciclo intorno ad un osservatore stazionario sulla terra, e ciò non corrisponde esattamente al tempo occorrente per una rotazione completa della terra intorno al suo asse: la lunghezza del giorno varia, sia pure di poco, nel corso dell'anno. La ragione principale di questa differenza è che la terra espone al sole superfici diseguali man mano che percorre l'orbita, per effetto della combinazione della rotazione e della traslazione lungo una linea curva.

Noti declinazione, angolo orario e latitudine, l'altezza solare sull'orizzonte  $\beta$ , o il suo complementare angolo zenitale  $\theta_z$  rappresentato in figura 10, si calcola mediante la relazione:

$$\cos \theta_z = \sin \beta = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

Nel caso in cui si voglia conoscere esclusivamente l'altezza solare a mezzogiorno al solstizio d'estate e al solstizio d'inverno, cioè il valore massimo e quello minimo in tutto l'arco dell'anno, si possono usare le due seguenti relazioni:

$$\beta_{\max} = (90^\circ - \Phi) + 23,50^\circ$$

$$\beta_{\min} = (90^\circ - \Phi) - 23,50^\circ$$

L'azimut  $\alpha$ , angolo formato dalla proiezione sul piano dell'orizzonte della congiungente sole terra con il sud, si ricava mediante la relazione:

$$\cos \alpha = \frac{\sin \beta \sin \phi - \sin \delta}{\cos \beta \cos \phi}$$

dove  $\alpha$  assume valori positivi verso est e negativi verso ovest e tutti gli angoli sono espressi in gradi. Per determinare la posizione del sole rispetto ad una superficie qualunque è necessario definire l'inclinazione, cioè l'angolo  $\psi$  formato con l'orizzontale, e l'orientamento, cioè l'angolo

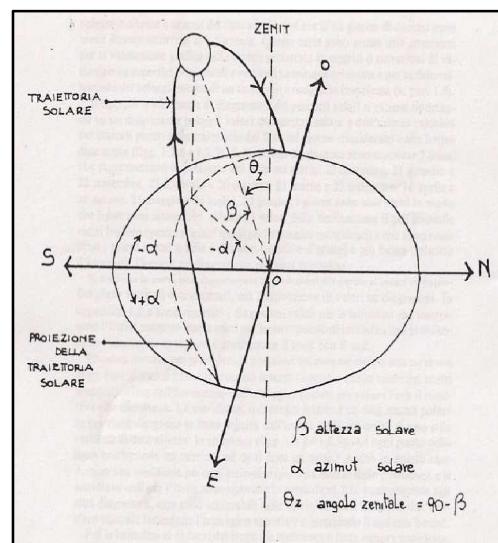


Figura 10. Rappresentazione degli angoli per la determinazione della posizione del sole nella volta celeste



azimutale  $\gamma$  formato fra il piano verticale che contiene la normale alla superficie e la direzione sud, rappresentati in figura 11. Indicando con  $\theta$  l'angolo formato fra la normale alla superficie e la congiungente sole-superficie, si ha:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos (\alpha - \gamma) \sin \psi + \sin \beta \cos \psi$$

con la convenzione che le superfici affacciate verso est hanno angolo azimutale positivo, quelle verso ovest negativo, e per quelle affacciate a sud esatto è pari a zero.

L'angolo  $\theta$  è chiamato angolo di profilo e si può facilmente intuire che il suo valore varia in funzione dell'orario e del giorno per cui viene definito; inoltre, nel caso in cui la superficie in analisi presenti un'inclinazione  $\psi$  pari a  $90^\circ$  e sia esposta perfettamente a sud, nell'istante in cui il sole transita a sud, l'angolo di profilo  $\theta$  coincide con il valore massimo dell'altezza solare  $\beta$  relativa al giorno per cui si esegue l'analisi.

Utilizzando le espressioni per determinare i valori dell'angolo zenitale  $\beta$  e di quello azimutale  $\alpha$ , si possono costruire degli utili strumenti grafici per la determinazione della posizione del sole sulla volta celeste: le carte dei percorsi solari, ovvero dei diagrammi in cui è possibile leggere agevolmente altezza e azimut del sole alle diverse ore di un giorno di ciascun mese senza dovere ricorrere alle formule.

Queste carte sono anche di aiuto per la valutazione grafica delle ombre proiettate da oggetti o ostruzioni di vario tipo su superfici orizzontali e verticali comunque orientate e per la determinazione del soleggiamento di un territorio a orografia complessa.

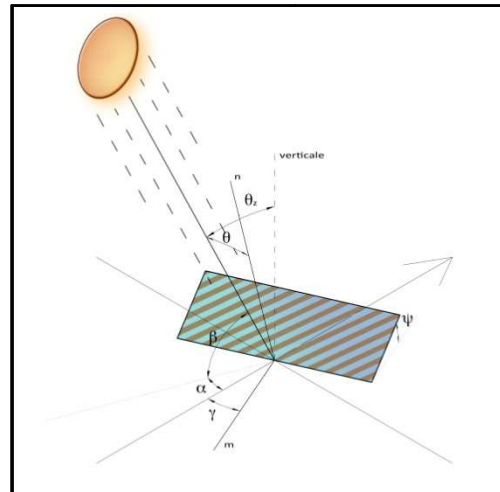


Figura 11. Posizione del sole relativa ad una superficie avente  $\gamma$  e  $\psi$  arbitrari

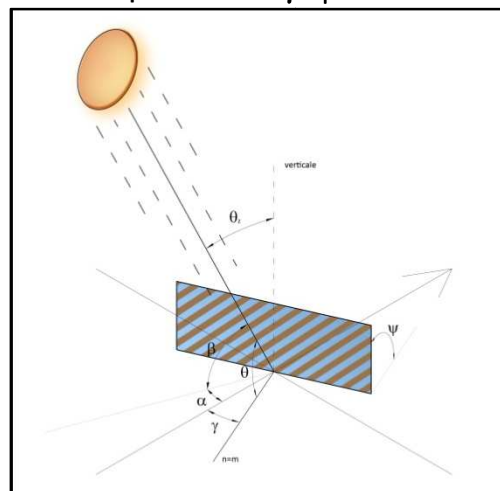


Figura 12. Posizione del sole relativa ad una superficie avente  $\psi=90^\circ$

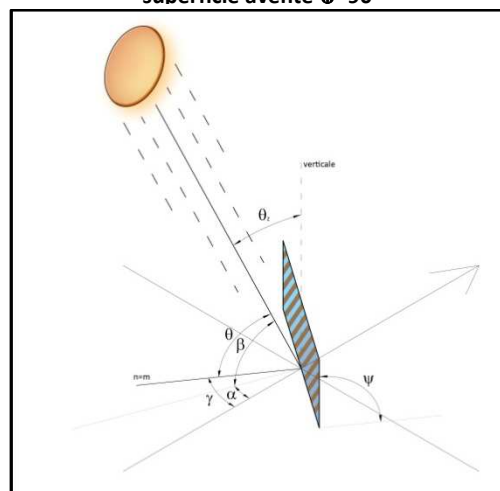


Figura 13. Restituzione grafica di una superficie avente  $\gamma=19^\circ$  e  $\psi=35^\circ$



#### 4. SISTEMA SPERIMENTALE DI SCHERMATURA SUNFLOWER

L'idea che ha mosso il nostro interesse è nata in relazione alla volontà di adottare un sistema di schermatura solare che potesse essere adattato per l'intero prospetto principale dell'edificio a destinazione residenziale. Essendo questo edificio caratterizzato da un andamento planimetrico curvilineo, ne consegue una giacitura continuamente variabile del prospetto, che parte allineato con l'ovest e termina con un'esposizione ruotata in senso orario di  $26^\circ$  rispetto al sud, coprendo tutti gli orientamenti intermedi. Significa quindi predisporre un sistema schermante che possa ottimizzare l'ombreggiamento lungo tutti gli orientamenti, un sistema quindi che si rifà un po' ad un girasole, da cui si prende anche il nome SunFlower, che segue il moto apparente del sole.

Come descritto in precedenza, le schermature solari possono essere distinte a seconda della loro geometria in due diverse tipologie:

- schermatura con orditura orizzontale, efficace per l'esposizione sud
- schermatura con orditura verticale, efficace per le esposizioni est e ovest

Nasce quindi un problema di fondo riguardo l'orientamento che il sistema schermante dovrà avere per le esposizioni intermedie del prospetto, in modo da garantire il maggior ombreggiamento possibile. Per efficienza del sistema schermante non ci si limita a considerare la sola capacità di proiettare ombra sulla superficie vetrata nei periodi dell'anno con alto irraggiamento solare, ma dovendo rientrare l'edificio in un'ottica di sostenibilità ambientale e sensibilità energetica, la schermatura dovrà anche permettere un guadagno energetico derivante dall'irraggiamento della vetrata stessa durante la fase invernale. Inoltre dovrà evitare il fastidioso fenomeno dell'abbagliamento. Quindi il criterio in base al quale dovrà essere progettato il sistema di schermatura dovrà essere un criterio duale che oltre ad assicurare il massimo ombreggiamento estivo, dovrà permettere il maggior apporto energetico possibile nella stagione invernale.

Data l'assenza sul mercato di un prodotto a noi congeniale, abbiamo deciso di avviare un'attività di ricerca circa la possibilità di ombreggiare efficacemente le chiusure verticali trasparenti affacciate sugli orientamenti intermedi tra il sud e l'ovest, e parallelamente quelli tra l'est ed il sud, mediante un sistema schermante in grado di poter essere adattato all'orientamento stesso.

Come mostrato in figura 15, considerando un sistema di riferimento cardinale ruotato di  $90^\circ$ , si può osservare come la direzione ottimale del sistema schermante relativa a ciascuna esposizione, corrisponda con quella dei rispettivi orientamenti ruotati: significa cioè che l'asse sud dopo la rotazione, trovandosi lungo la direzione orizzontale, ha la stessa direzione della schermatura ottimale relativa al suo orientamento. Il medesimo procedimento vale inoltre per gli orientamenti est e ovest.

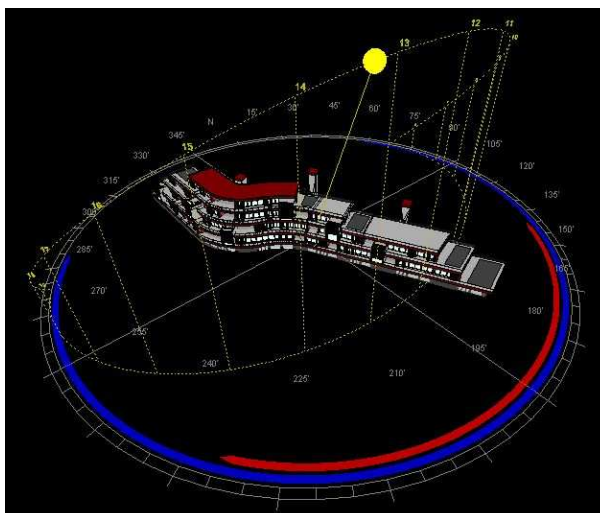


Figura 14. Navigatore tridimensionale dell'edificio inserito nel software Ecotect per lo studio del prospetto

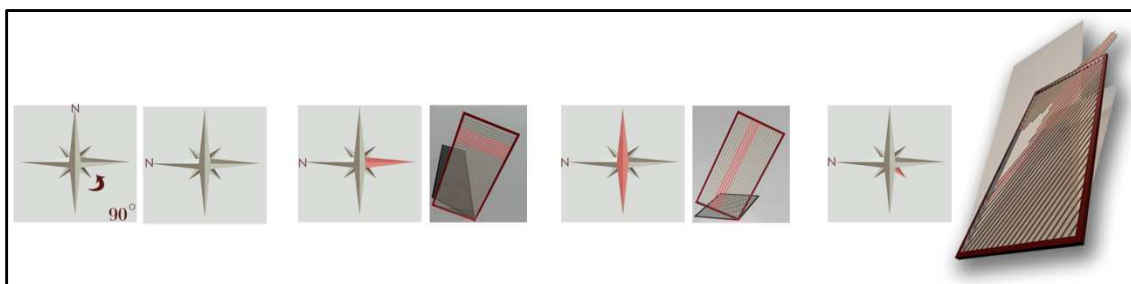


Figura 15. Sequenza logica per la determinazione dell'inclinazione dei listelli

In via del tutto teorica si può determinare quindi l'inclinazione ottimale del sistema schermante per tutti gli orientamenti intermedi: questa intuizione è stata il cardine attorno al quale il nostro lavoro di analisi e verifica si è sviluppato.

Il sistema di schermatura che si intende adottare per il prospetto principale dell'edificio a destinazione residenziale, è un sistema fisso installato all'interno di una chiusura verticale trasparente a triplo vetro, realizzato come successione di listelli in legno fissati lungo il perimetro del serramento.

Dovendo necessariamente disporre di un confronto al fine di convalidare i risultati delle varie analisi condotte, si individua un sistema di schermatura campione già presente in commercio con il quale verranno rapportati i risultati ottenuti: la scelta è ricaduta sul sistema schermante Okawood dell'azienda tedesca Okalux, rappresentato in figura 16.

Okawood presenta uno schermo di listelli in legno meranti rosso, inserito tra due lastre di vetro; i listelli di legno, con sezione visibile di 10x14mm sono supportati ad intervalli di 50cm da barre verticali di sostegno.

I listelli di legno fungono da schermo solare che ha il compito di intercettare la radiazione solare diretta, permettendo alla componente diffusa della luce di diffondersi e garantire nella stanza un corretto confort visivo. Le dimensioni del vetro raggiungono altezze fino a 350 cm e larghezze fino a 170 cm in grado di auto sostenere la griglia di legno. Per larghezze oltre i 170 cm si necessita di un giunto di testa per garantire la stabilità del sistema schermante.

Il limite che presenta questo prodotto è il fatto di essere disponibile solamente nella variante con listelli orizzontali: possiamo quindi affermare che la nostra ricerca possiede un ulteriore obiettivo, rappresentato dall'innovazione incrementale di un sistema schermante già presente sul mercato.

Come già detto, il sistema schermante che si è scelto di adottare è un sistema fisso realizzato mediante una successione di listelli in legno: al fine di introdurre meno variabili possibili con il sistema di confronto si sceglie di utilizzare il medesimo tipo di legno, ossia meranti rosso con sezione di 10x14mm, predisposta all'interno di una particolare chiusura verticale trasparente composta da 3 lastre di vetro, delle quali su quella intermedia è applicato un sottile deposito trasparente composto da un materiale di origine metallica, avente la duplice funzione di bassa emissività e controllo solare mentre quella interna da un vetro chiaro trasparente. L'intercapedine dove è alloggiata la griglia di listelli è riempita

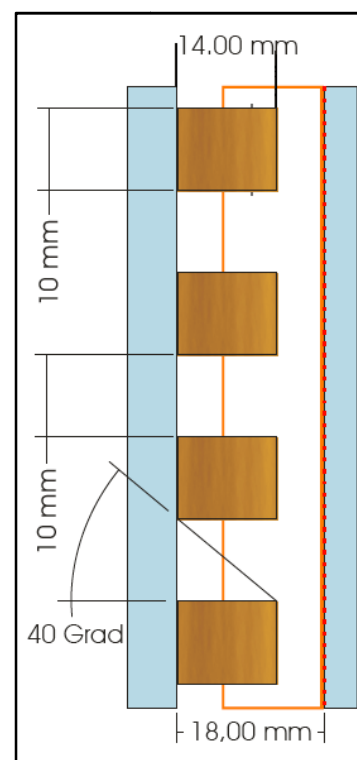


Figura 16. Sezione caratteristica del sistema di confronto Okawood





con gas argon al 90% in modo da realizzare un isolamento termico rinforzato per la chiusura vetrata che altrimenti risulterebbe troppo poco isolante, con un conseguente dispendio energetico sia estivo che invernale. E' però da considerare che accanto all'abbattimento della trasmittanza U del vetro, l'argon riduce la trasmissione diretta e da convezione del vetro; se tale effetto è molto positivo in estate, in inverno riduce i guadagni solari.

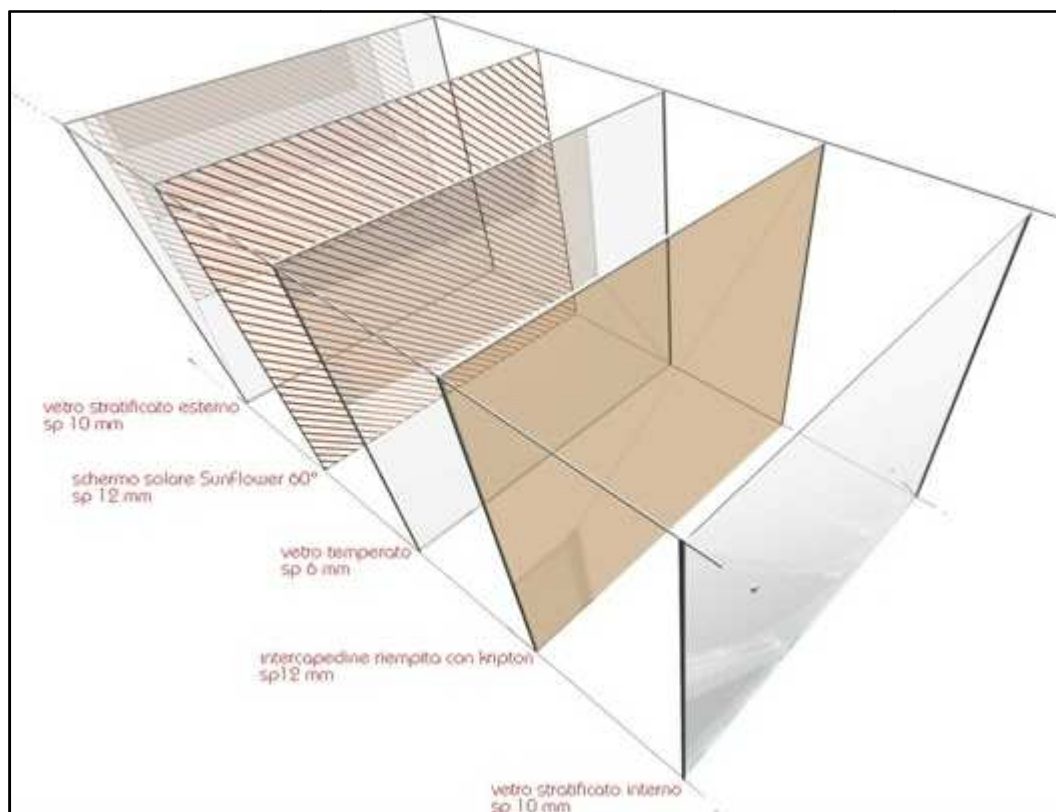


Figura 17. Successione degli strati componenti il sistema schermante in analisi SunFlower

Il SunFlower System è quindi un sistema schermante che adattandosi all'orientamento delle facciate permette l'ottimizzazione dell'ombreggiamento delle superfici vetrate, mediante una progressiva rotazione dei listelli che seguono il moto apparente del sole nella volta celeste, partendo da sud con direzione orizzontale fino ad arrivare a ovest, o est, con direzione verticale.

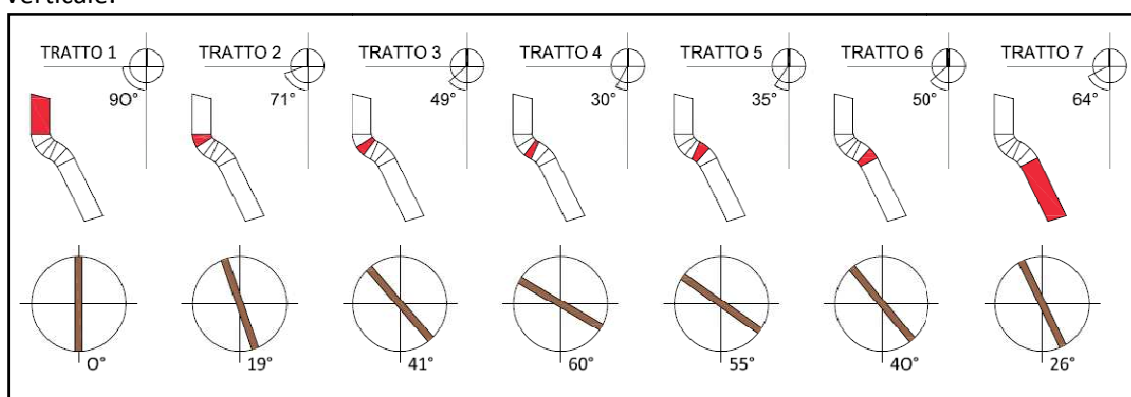


Figura 18. Suddivisione del prospetto in tratti e definizione dell'inclinazione dei listelli

Prima di affrontare il lavoro di analisi, abbiamo suddiviso il prospetto in 7 tratti di diversa ampiezza a seconda del loro orientamento. Per ciascun tratto è stato poi determinato un



orientamento medio, definito dall'inclinazione della normale nel punto medio del tratto stesso e si sono così ottenuti i valori riportati in tabella 1, dove:

$\gamma$  è l'orientamento medio del tratto di prospetto rispetto al sud, in accordo con quanto definito nel paragrafo precedente

$\lambda$  è l'inclinazione del listello rispetto all'orizzontale.

In seguito per ciascun tratto è stata scelta un'inclinazione ottimale dei listelli del sistema SunFlower.

	$\gamma$	$\lambda$
	[°]	[°]
Tratto 1	-90	90
Tratto 2	-71	60
Tratto 3	-49	45
Tratto 4	-30	30
Tratto 5	-35	30
Tratto 6	-50	45
Tratto 7	-64	60

Tabella 1. Orientamento del prospetto ed inclinazione dei listelli riferite a ciascun tratto di prospetto

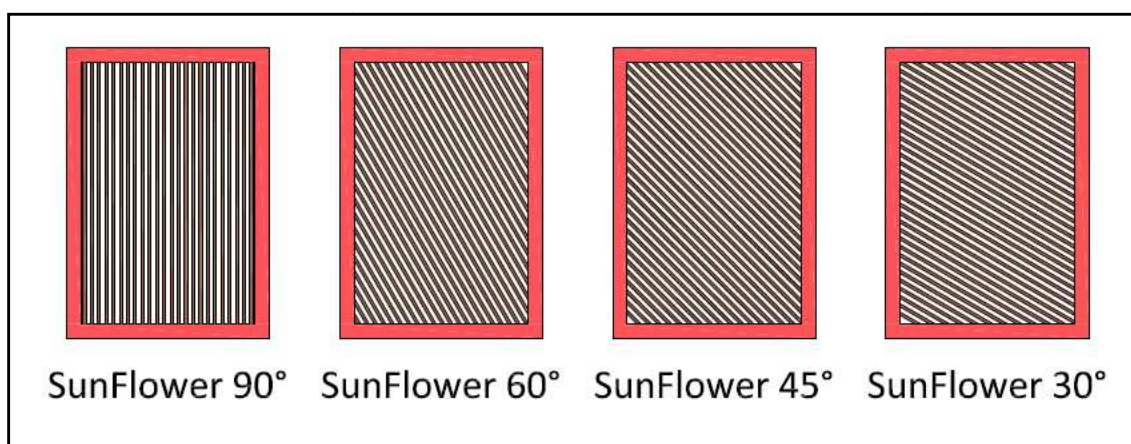


Figura 19. Configurazioni del sistema sperimentale SunFlower

Dato che il valore di  $\gamma$  per i tratti 2 e 7, 3 e 6, 4 e 5 è simile ed il valore finale di  $\lambda$  a cui si approssimano le rotazioni dei listelli è il medesimo, le analisi per questi tratti verranno di fatto accorpate.

Per ciascun tratto si è resa necessaria la determinazione della quantità di ombra prodotta dal singolo listello sul vetro retrostante, valutata come somma dell'ombra propria, che risulta essere pari allo spessore del listello stesso, con l'ombra portata, determinata tramite ray-tracing.

Indipendentemente dall'orientamento del prospetto, la distanza dei listelli deve essere determinata in funzione dell'angolo di profilo  $\theta$  definito in base all'orario fino al quale si desidera garantire alla vetrata un ombreggiamento totale. Si sottolinea il grossolano errore che si commette per l'orientamento sud nel considerare come angolo critico, in funzione del quale si progetta il sistema schermante, l'angolo di altezza solare  $\beta_{max}$ : tale errore impedisce infatti di ottimizzare l'utilizzo del dispositivo schermante in quanto permette di avere un ombreggiamento totale della vetrata esclusivamente nel momento in cui il sole occupa la posizione più alta nella volta celeste, nell'intero corso dell'anno, mentre è buona norma garantire tale condizione anche per gli orari adiacenti a quello di massima altezza solare e non limitatamente al solstizio d'estate. Ne consegue che il ray-tracing da eseguirsi per ciascuna



esposizione, sarà per forza di cose tridimensionale: accanto alla stesura di un algoritmo per il calcolo dell'ombra prodotta dal singolo listello, viene effettuata una verifica grafica tramite utilizzo di un software per il disegno tecnico, in modo da poter convalidare i dati ottenuti.

Inoltre si prevede di eseguire il ray-tracing a diversi orari ai quali corrispondono diversi valori di altezza solare  $\beta$  e azimuth  $\alpha$ , in modo tale da poter monitorare l'andamento dell'ombreggiamento nell'arco del tempo per cui la facciata risulta essere irraggiata dal sole. Si è resa necessaria quindi l'adozione di un foglio di calcolo tramite il quale determinare la quantità di ombra totale prodotta dal singolo listello per diversi orari.

Altra variabile da cui dipende il grado di ombreggiamento della vetrata, è la distanza tra due listelli successivi, in particolare più questi sono ravvicinati e maggiore sarà il valore di ombra prodotta. Dovendo garantire un benessere visivo e un apporto luminoso corretto, gli stessi listelli non dovranno essere troppo vicini l'uno agli altri. Si è quindi scelto di verificare il sistema schermante SunFlower per tre differenti valori di distanza tra i listelli, rispettivamente pari a 3 cm, 2 cm e 1,5 cm. Riducendo il passo si osserva come previsto un incremento di superficie ombreggiata.

Infine come accennato in precedenza, dovendo l'edificio rispondere a requisiti di sostenibilità ambientale e sensibilità energetica, dovrà essere garantito un apporto gratuito di calore derivante dall'irraggiamento del vetro: nella stagione fredda la schermatura dovrà quindi permettere ai raggi solari di filtrare tra i listelli. Per questo motivo oltre all'analisi dell'ombreggiamento condotta per il 21 Giugno, data in cui si registra il valore più elevato altezza solare  $\beta$ , è di grande utilità eseguire la medesima analisi per il 21 Dicembre, data per la quale si dovrà verificare la maggior permeabilità del sistema schermante. I risultati così ottenuti sono confrontati con quelli relativi all'ipotesi di utilizzare come sistema schermante per l'intero prospetto il sistema Okawood, al fine di determinare quale dei due sia il più indicato. Per la valutazione dell'ombreggiamento del sistema sperimentale SunFlower e del sistema Okawood, considerato come riferimento, siamo ricorsi ad una analisi numerica basata sulla geometria solare e sul ray-tracing, alla quale viene affiancata un'analisi illuminotecnica condotta con lo scopo di determinare quale fosse per entrambi i sistemi il livello di illuminazione garantito all'interno del locale.



## 5. METODOLOGIE DI CONFRONTO

In questa sede vengono elencate e descritte le metodologie di analisi mediante le quali è stato possibile determinare la capacità schermante del sistema sperimentale SunFlower e, tramite un confronto con il sistema di riferimento Okawood, convalidare la bontà dei risultati ottenuti. Tali analisi vengono condotte su ciascun tratto in cui si è scelto di suddividere il prospetto, ad esclusione del tratto 1 per il quale si prevede di adottare un sistema schermante verticale che risulta essere già ottimizzato. Per ciascun tratto verrà quindi analizzata l'ipotesi di utilizzare il sistema sperimentale SunFlower per poi rapportare i dati così ottenuti con quelli relativi all'adozione in parallelo del sistema di confronto Okawood.

### A. ANALISI NUMERICA

L'analisi numerica che si conduce è basata sui principi della trigonometria e tramite il ray-tracing permette di conoscere la quantità di ombra prodotta dal singolo listello. Dato che nel nostro caso, come già detto, si vuole analizzare l'andamento dell'ombreggiamento nei giorni del 21 Giugno e 21 Dicembre, dovrà considerarsi che il generico raggio di sole forma con il prospetto un angolo diverso da  $90^\circ$ , quindi il raytracing che ne consegue sarà di tipo tridimensionale in quanto il raggio non sarà ortogonale al prospetto.

Ipotizzando di considerare un'inclinazione generica del raggio di sole, relativa alle ore 15.00 del 21 Giugno si ottiene:

$$\alpha = 67,60^\circ$$

$$\beta = 51,70^\circ$$

dove:

$\alpha$  è l'angolo azimutale, compreso tra il generico raggio di sole e la direzione sud

$\beta$  è l'angolo di altezza solare, compreso tra il generico raggio di sole e l'orizzontale.

Si ipotizza poi di considerare come riferimento per il calcolo, il tratto 2, caratterizzato da:

$$\gamma = -71^\circ$$

$$\lambda = 60^\circ$$

dove:

$\gamma$  è l'orientamento medio del tratto di prospetto rispetto al sud

$\lambda$  è l'inclinazione del listello rispetto all'orizzontale.

Noti così i dati riguardanti il sole ed il sistema schermante, non resta che determinare la proiezione dell'ombra del listello sul vetro. Questo passaggio è stato diviso in 5 step al fine di poter agevolare i calcoli e le proiezioni sono state evidenziate in figura 20.

$$y_1 = d \tan(\alpha - \gamma)$$

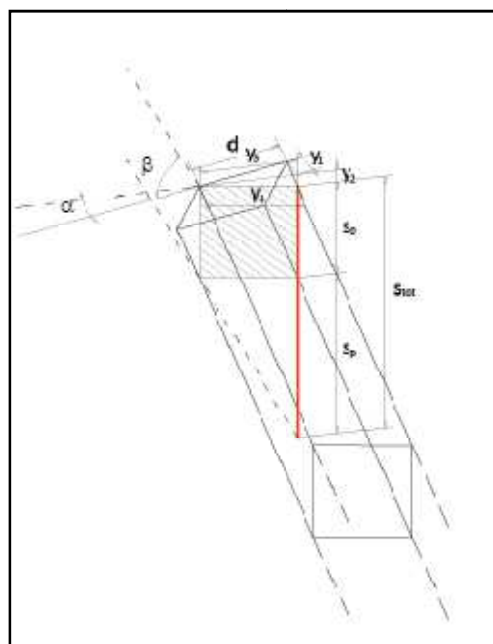


Figura 20. Rappresentazione grafica delle proiezioni del raggio solare e dell'ombra prodotta dal listello



$$y_2 = y_1 \tan \lambda$$

$$y_3 = \frac{d}{\cos(\alpha - \gamma)}$$

$$y_4 = \sqrt{y_2^2 + y_3^2}$$

Con il passaggio successivo si determina il valore dell'ombra portata del listello sul vetro, pari a  $s_p$ :

$$s_p = \frac{y_4}{\sin \theta_z} \sin \delta$$

dove:

$$\delta = 90^\circ - (\omega + \beta) \quad \text{se } \alpha < \gamma$$

$$\delta = 90^\circ - (\theta + \beta) \quad \text{se } \alpha > \gamma$$

Ciò significa che il valore dell'ombra portata  $s_p$  deve essere calcolato in modo differente a seconda che l'angolo azimutale  $\alpha$  sia maggiore o minore dell'angolo di orientamento medio del tratto di prospetto considerato.

$$\omega = 90^\circ - \theta_v$$

$$\theta = 180^\circ - \omega$$

$$\theta_v = \arccos \frac{y_3}{y_4}$$

Il valore dell'ombra propria del listello è invece pari a  $s_0$ , calcolato come:

$$s_0 = \frac{d}{\cos \lambda}$$

Si può facilmente constatare che tale valore rimane costante per l'intero arco dell'anno.

Sommando infine i due valori  $s_p$  e  $s_0$  si ottiene il valore di ombra totale  $s_{tot}$  prodotta dal listello per la data e l'ora voluta, evidenziata in figura 20 e 21 in rosso.

Una volta calcolato il valore di ombra totale prodotta da un singolo listello, rimane da scegliere la distanza  $p$  tra i listelli e valutare, sempre con riferimento al moto apparente del sole nella volta celeste, l'andamento del grado di ombreggiamento della porzione vetrata compresa tra due listelli successivi, confrontando anche in questo caso il risultato ottenuto mediante il sistema sperimentale SunFlower con quello di confronto Okawood.

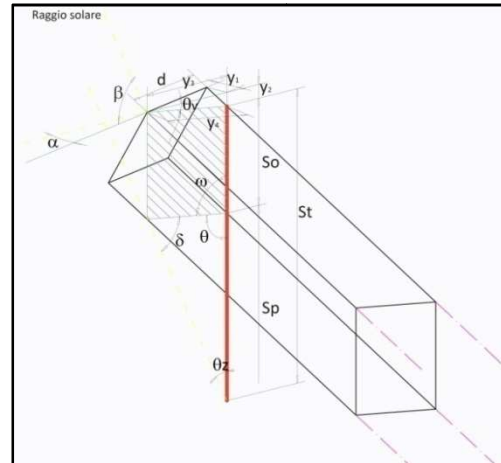


Figura 21. Rappresentazione grafica delle proiezioni del raggio solare e dell'ombra prodotta dal listello

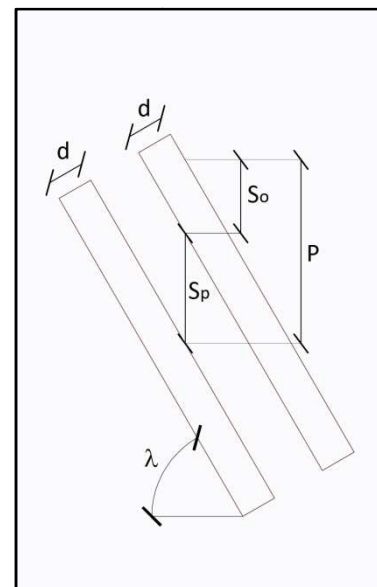


Figura 22. Grandezze caratteristiche del sistema sperimentale SunFlower



La scelta della distanza  $p$  è quindi strettamente legata all'andamento dell'ombreggiamento della porzione vetrata compresa tra due listelli successivi che si vuole garantire: significa poter decidere fino a che ora della giornata assicurare un completo ombreggiamento del vetro. Al fine di inserire nell'analisi meno variabili possibili, si decide di mantenere una distanza verticale tra i listelli pari a quella prevista dal sistema di confronto Okawood, pari a 15mm. Questa volontà si traduce anche nell'assicurare il medesimo comfort visivo interno.

Per determinare l'andamento dell'ombreggiamento del vetro compreso tra due listelli successivi, si ricorre al calcolo della percentuale di vetro coperta dall'ombra prodotta dal singolo listello per differenti orari relativi al 21 Giugno. Si intuisce che il vetro risulta essere ombreggiato completamente quando la percentuale calcolata risulta essere maggiore o uguale al 100%. Tale calcolo può essere facilmente condotto rapportando il valore di ombra portata  $s_p$ , già calcolato, con la distanza tra due listelli successivi, tramite la relazione:

$$O = \frac{s_p}{p}$$

Qualora risultasse che il sistema sperimentale SunFlower assicuri più a lungo una capacità schermante maggiore a quella del sistema di confronto Okawood, significherebbe aver ottimizzato il sistema schermante per il relativo orientamento del prospetto: questa sarebbe la dimostrazione della veridicità dell'ipotesi formulata in precedenza.

L'esattezza del calcolo, effettuato mediante stesura di un algoritmo per il calcolo dell'ombra prodotta da un listello sulla superficie vetrata ed implementato all'interno di un foglio di calcolo, è stata convalidata dalla misurazione dell'ombra stessa, effettuata con un software per il disegno tecnico. Inoltre sono state condotte delle simulazioni illuminotecniche orarie mediante il software Radiance, che ha reso possibile la visualizzazione del comportamento dei due sistemi schermanti in una serie di immagini con le quali è facilmente traducibile il risultato dell'analisi numerica.

### I. RADIANCE

(Tratto da F. Anselmo, Introduzione all'uso di Radiance, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali, Università degli Studi di Palermo; A. Jacobs, Basic Radiance Tutorial, 2008; A. Jacobs, Radiance Cookbook, 2008)

Radiance è costituito da un insieme di programmi sviluppati dal Lighting System Research Group del Lawrence Berkeley Laboratory insieme ad altri gruppi di ricerca. E' progettato per essere uno strumento di ricerca in grado di fornire calcoli accurati e previsioni affidabili degli effetti della luce, utilizzando principalmente tecniche di backward ray-tracing. Piuttosto che fornire semplicemente un motore di rendering fotorealistico, Radiance incorpora una serie di strumenti capaci di restituire risultati numerici, in modo da mettere il ricercatore o il progettista nelle condizioni di misurare, simulare e progettare reali configurazioni di illuminazione.

Il risultato finale non è fuorviante, come può ad esempio accadere con immagini fotorealistiche visivamente accattivanti, ma fisicamente accettabile, ed è infatti stato oggetto di varie ricerche e verifiche in modo da assicurare che i livelli di luminanza e di illuminamento calcolati dal programma siano accurati in relazione all'ambiente reale per condizioni di illuminazione sia naturale che artificiale.

#### Metodo di calcolo

Radiance è basato su di un algoritmo di backward ray-tracing, in base al quale i raggi luminosi sono tracciati nella direzione opposta rispetto a quella che seguono solitamente: a partire dall'occhio dell'osservatore, ossia il punto di vista, i raggi vengono quindi tracciati sino alle



sorgenti luminose rimbalzando tra le superfici presenti nell'ambiente e tenendo conto delle interazioni fisiche e dei fenomeni di riflessione, trasmissione e rifrazione.

La descrizione geometrica dell'ambiente è basata sui limiti esterni degli oggetti, per cui i volumi inclusi all'interno delle superfici sono sempre vuoti e le superfici hanno un orientamento definito dal vettore normale alle superfici stesse. Il sistema di riferimento tridimensionale corrisponde al sistema di coordinate cartesiane, in cui l'asse x punta verso est, l'asse y punta verso nord ed in fine l'asse z punta verso lo zenith.

#### Modelli di cielo

Radiance fornisce un programma di generazione delle distribuzioni fotometriche di cieli standard, gensky, capace di creare sia cieli sereni, sia cieli uniformemente coperti, così come situazioni intermedie. Sebbene le prime due siano facili da comprendere, rappresentano solo una piccola percentuale delle condizioni in cui può essere considerato il cielo reale.

E' importante capire che con qualsiasi strumento di modellazione, la qualità del risultato può essere buona solo quanto lo è la definizione degli input.

Il modello di cielo più semplice da immaginare, e anche il più vecchio, è il cielo uniforme, in cui la luminanza di tutti gli elementi del cielo è la stessa, ossia:

$$L_{\gamma} = L_z$$

dove:

$L_{\gamma}$  è la luminanza di un elemento del cielo

$L_z$  è la luminanza dello zenith.

Il modello di cielo uniforme era utilizzato quando ancora non esistevano i calcolatori ed i calcoli del daylighting venivano eseguiti a mano.

Il primo modello di cielo con distribuzione della luminanza non uniforme, fu introdotto da Moon e Spencer nel 1942, e descriveva un cielo coperto. Dopo qualche piccolo accorgimento, nel 1955 fu definitivamente chiamato come CIE Standard Overcast Sky, ossia condizione standard di cielo coperto. La relazione che lega la luminanza di un elemento del cielo  $L_{\gamma}$  con la luminanza dello zenith  $L_z$ , viene descritta dall'equazione:

$$\frac{L_{\gamma}}{L_z} = \frac{1 + 2\text{sen}\gamma}{3} = \frac{1 + 2\text{cos}Z}{3}$$

dove:

$\gamma$  è l'altezza dell'elemento del cielo sopra l'orizzonte

$Z$  è l'angolo zenitale, calcolato come  $Z = 90^{\circ} - \gamma$

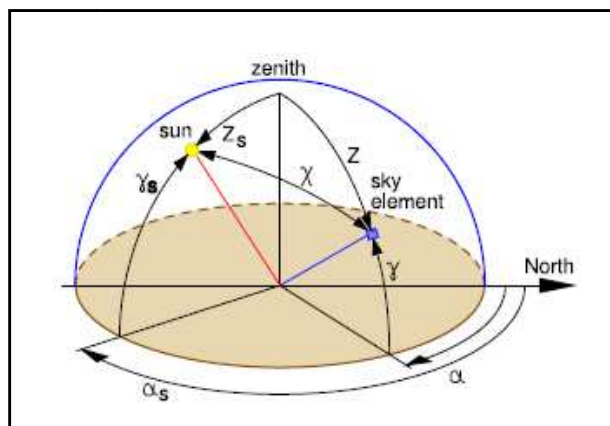


Figura 23. Rappresentazione degli angoli riferiti ai modelli di cielo

La luminanza è quindi radialmente simmetrica e varia con l'altitudine, non con l'azimut  $\alpha$ . Il modello di cielo CIE Standard Overcast Sky è tuttora utilizzato ed è la base di molti procedimenti di calcolo di daylighting.

Un modello per la condizione di cielo sereno fu proposto nel 1967 da Kittler ; in seguito venne corretto fino che nel 1973 fu assunta definitivamente come CIE Standard Clear Sky, ossia condizione standard di cielo sereno. La relazione che lega la luminanza di un elemento del cielo  $L_{\gamma\alpha}$  con la luminanza dello zenith  $L_z$ , viene descritta dall'equazione:

$$\frac{L_{\gamma\alpha}}{L_z} = \frac{\left(1 - e^{\frac{-0,32}{\text{sen}\gamma}}\right) (0,91 + 10e^{-3\chi} + 0,45\cos^2\chi)}{0,274(0,91 + 10e^{-3Z_s} + 0,45\cos^2Z_s)}$$

dove:

$L_{\gamma\alpha}$  è la luminanza del generico elemento di cielo

$Z_s$  è l'angolo zenitale del sole

$\chi$  è la distanza angolare tra il generico elemento di cielo e il sole, calcolato come:

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \text{sen} Z_s \text{sen} Z \cos|\alpha - \alpha_s|)$$

La condizione di cielo sereno definita dal modello CIE Standard Clear Sky non si verifica frequentemente e descrive una situazione estrema. La gran parte delle condizioni reali del cielo avrà quindi una distribuzione di luminanza che è intermedia tra le due estreme qui descritte. Il comando gensky di Radiance, che implementa accuratamente il modello di cielo uniforme, il modello Standard Overcast Sky e il modello Standard Clear Sky, usa una semplice configurazione media degli ultimi due per descrivere la condizione di cieli intermedi.

#### Definizione dei parametri

L'accuratezza con cui si vuole condurre un'analisi tramite Radiance, è definibile tramite l'impostazione di una serie di parametri ambientali, che determinano la qualità del risultato e quindi la sua affidabilità. Tali parametri sono:

ambient bounce (-ab): definisce il numero di riflessioni di cui si tiene conto nel calcolo dell'illuminazione indiretta

ambient accuracy (-aa): definisce l'accuratezza del volume di studio e dei materiali che vengono impostati

ambient resolution (-ar): definisce la risoluzione con cui viene condotto il calcolo





ambient division (-ad): parametro la cui radice quadrata è inversamente proporzionale all'errore commesso dal software per il calcolo dell'illuminazione indiretta  
ambient super-samples (-as): parametri applicati solo al valore (-ad)

#### Immagini false colour

Il comando false colour permette di creare un'immagine irreale che mappa la luminanza o l'illuminamento, quindi l'intensità della luce, in un'immagine a colori. Questo rende possibile un'interpretazione più facile per il sistema visivo umano, con il quale riusciamo a distinguere meglio i colori rispetto alle definizioni della scala di grigi.

## **B. ANALISI ILLUMINOTECNICA**

In parallelo all'analisi numerica è stata effettuata una simulazione del comportamento dei due sistemi schermanti a confronto, condotta mediante il software Radiance, e concentrata per la sola data del 21 Giugno a orari differenti e relativa ai tre diversi valori del passo dei listelli.

Per questo tipo di analisi si è resa necessaria l'adozione di un locale standardizzato avente tre dei quattro lati ciechi ed un lato vetrato, su cui si inserisce il sistema schermante per il quale si conduce l'analisi. In questo modo è possibile condurre la medesima analisi per i due sistemi di schermatura a confronto ed ottenere dei risultati che dipendono solamente dall'inclinazione delle schermature stesse.

### I. INDIVIDUAZIONE DEL LOCALE STANDARDIZZATO

E' stato definito un locale standardizzato per l'elaborazione dell'analisi illuminotecnica avente tre dei quattro lati opachi ed uno realizzato mediante una vetrata a tutta altezza, all'interno della quale verranno predisposti i sistemi schermanti in analisi. Le dimensioni in pianta del locale sono 4,00x5,00m con uno sviluppo interno di 3,00m in altezza. Le pareti all'interno sono considerate ricoperte da pannelli in gesso rivestito mentre la pavimentazione è prevista in parquet. A seconda del tratto per cui si condurranno le analisi, verrà modificato l'orientamento del locale in modo tale che il lato vetrato possa avere la medesima esposizione del tratto considerato.

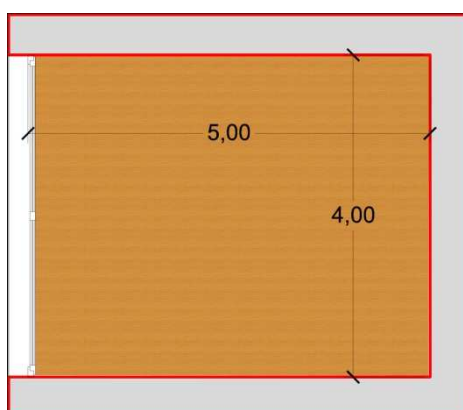


Figura 24. Vista planimetrica del locale standardizzato

### II. DESCRIZIONE DELL'ANALISI ILLUMINOTECNICA

L'analisi è stata condotta con il software Radiance, impostando all'interno del locale standardizzato, una griglia di sensori di maglia 10x10 posta ad 80 cm dal piano di calpestio, distanza che coincide con l'altezza del generico piano di lavoro. In particolare si evidenzia la necessità di considerare la sola porzione di luce diffusa in quanto, dovendo determinare



l'efficacia del sistema sperimentale SunFlower, e confrontarla con il sistema di confronto Okawood, non possono essere ritenuti attendibili i valori di illuminamento relativi ai sensori esposti ad un'illuminazione diretta da parte del sole. L'analisi condotta considera quindi sia la componente diffusa che quella diretta della radiazione solare. In seguito si è quindi resa necessaria la decurtazione della porzione di luce diretta per tutti quei sensori che di volta in volta si trovano esposti ad un'illuminazione diretta. L'analisi viene condotta per la sola data del 21 Giugno a orari differenti in modo da poter meglio comprendere l'andamento del livello di illuminamento interno nell'arco della giornata. Con riferimento al paragrafo precedente, per l'analisi illuminotecnica i valori utilizzati per i parametri ambientali sono:

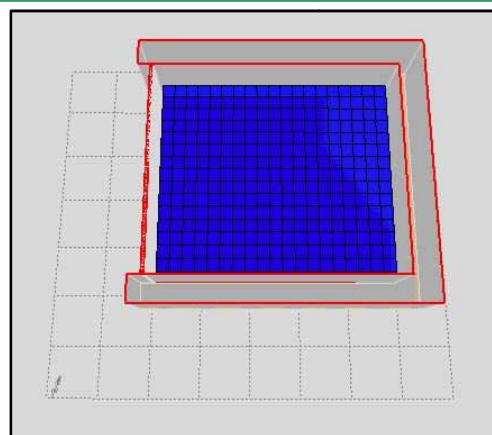


Figura 25. Rappresentazione grafica della griglia utilizzata per l'analisi illuminotecnica

-ab=5  
-aa=0,1  
-ar=256  
-ad=1024  
-as=256

### C. CONFRONTO VISIVO

Sia per l'analisi numerica che per quella illuminotecnica, si è ritenuto opportuno affiancare ai risultati numerici riportati nei grafici, uno strumento di controllo e verifica dell'esattezza degli stessi. Tale strumento è rappresentato da un'immagine cosiddetta false colour, elaborata tramite il software Radiance, che permette di mappare l'illuminamento, quindi l'intensità della luce, in un'immagine a colori. Si è reso possibile quindi effettuare un confronto visivo tra i livelli di illuminamento relativi al locale di standardizzato, ottenuti mediante l'adozione dei due sistemi di schermatura.

Sono state elaborate due tipologie di immagini differenti: per l'analisi numerica si è ritenuto di interesse valutare il passaggio attraverso i sistemi schermanti, della sola componente diretta della luce, così da convalidare i risultati ottenuti con il calcolo dell'ombreggiamento condotto tramite stesura di un algoritmo. Per l'analisi illuminotecnica invece, essendo di interesse valutare la diffusione della luce che i due sistemi schermanti assicurano all'interno del locale standardizzato, si è valutata sia la radiazione diretta sia quella diffusa, dovuta alle riflessioni del raggio sia sul sistema schermante stesso sia sulle pareti del locale.

L'elaborazione di queste immagini ha quindi permesso di convalidare ed in un certo senso certificare la bontà delle analisi condotte in precedenza. Rappresentano inoltre un valido termine di paragone dell'efficacia dei due sistemi a confronto. I parametri ambientali utilizzati per l'analisi rivolta a considerare la sola componente diretta della luce, sono:

-ab=0  
-aa=0,08  
-ar=58  
-ad=1024  
-as=256



I parametri ambientali utilizzati invece per l'analisi che si pone l'obiettivo di analizzare anche la componente diffusa della luce, sono:

- ab=7
- aa=0,08
- ar=58
- ad=1024
- as=256

#### D. ANALISI ANNUALE

Le analisi finora descritte, hanno come limite il fatto di essere condotte per istanti di tempo ben definiti, descrivendo quindi una situazione che si realizza istantaneamente ma non perdura nel tempo. Si ritiene di fondamentale importanza valutare l'efficacia complessiva durante l'intero corso dell'anno dei due sistemi schermanti a confronto, al fine di poter meglio comprendere il loro comportamento nelle condizioni intermedie alle date del 21 gennaio e 21 Giugno che, come già detto, rappresentano rispettivamente la situazione in cui il sole compie il suo moto apparente nella volta celeste raggiungendo la sua altezza minima e massima.

##### I. DAYSIM

(Tratto da M. De Carli, V. De Giuli, A. Di Bella, A. Papparotto, Analisi di risparmio energetico conseguibile con sistemi di building automation, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Padova)

Il software Daysim si basa sulle tecniche di ray-tracing al fine di calcolare i valori di illuminamento all'interno di un ambiente, in funzione dei profili annuali di radiazione solare di un anno tipo, allo scopo di mantenere un certo grado di illuminazione nei punti di controllo.

Definito un modello tridimensionale dell'ambiente oggetto d'indagine, lo stesso utilizzato per l'analisi illuminotecnica condotta tramite software Radiance, impostato il file climatico e le coordinate dei punti di interesse, ad esempio il piano delle scrivanie dei posti di lavoro, il programma tiene conto delle caratteristiche dei componenti vetrati, delle schermature e dei materiali di rivestimento dell'ambiente.

E' possibile in tal modo determinare l'illuminamento nei diversi punti di interesse, verificando che soddisfi le esigenze di benessere visivo. In particolare il software considera, mediante una procedura interna, un livello di affollamento medio dell'ambiente. Oltre ad ipotizzare la presenza di individui, prevede anche come questi usufruiscano dell'illuminazione artificiale e di un'eventuale schermatura solare, a seconda delle proprie esigenze. A tale proposito, permette di valutare due diverse modalità di controllo dei parametri di illuminamento dell'ambiente:

- utenza passiva, in cui la luce rimane accesa durante tutta la giornata lavorativa e la veneziana è parzialmente abbassata nel corso dell'anno, per contrastare l'ingresso della componente di luce diretta, con accensione e spegnimento della luce manuale, come pure manuale è il controllo della schermatura;

- utenza manuale attiva, in cui gli occupanti accendono la luce a seconda della necessità ed abbassano manualmente la veneziana durante il giorno per ostacolare l'entrata della radiazione diretta, nel nostro caso non necessaria in quanto il sistema schermante è fisso.

Il software Daysim restituisce come risultato i valori di illuminamento nei punti oggetto di indagine ed il grado di schermatura dato.



## II. DESCRIZIONE DELL'ANALISI ILLUMINOTECNICA ANNUALE

L'analisi illuminotecnica annuale è stata condotta considerando il medesimo locale standardizzato, definito per l'analisi illuminotecnica, sempre considerando entrambe le schermature, così da poter disporre di un termine di paragone tra il sistema sperimentale SunFlower e quello di confronto Okawood. L'unica differenza è stata l'adozione di una griglia di sensori ridotta ad una maglia 3x4, posizionata anch'essa ad una distanza di 80 cm dal piano di calpestio.

In particolare, per la valutazione globale del livello di illuminamento istantaneo all'interno del locale standardizzato, è stata elaborata un'analisi illuminotecnica che tiene conto sia della radiazione luminosa diretta sia di quella diffusa, condotta ad intervalli regolari di 60 minuti durante l'intero corso dell'anno. Significa che come risultato si avranno 86400 valutazioni del livello di illuminamento istantaneo per ciascuno dei 12 sensori, posti a profondità differenti del locale, per entrambi i sistemi schermanti. Al fine di verificare l'attendibilità dei risultati così ottenuti, è stata condotta un'analisi annuale considerando l'ipotesi di non inserire alcuna schermatura alla vetrata.

I parametri ambientali con i quali è stata effettuata l'analisi illuminotecnica annuale, sono:

- ab=5
- aa=0,1
- ar=256
- ad=1024
- as=256

## III. ANALISI DEL DAYLIGHT AUTONOMY

Inoltre si è ritenuto di rilevante interesse valutare l'autonomia da illuminazione artificiale che il sistema sperimentale SunFlower garantisce durante il corso dell'anno per il medesimo locale standardizzato, e riportare tale risultato a quello che determina invece l'adozione del sistema di confronto Okawood. E' stata quindi condotta un'analisi per valutare il daylight autonomy, ovvero la percentuale di ore in un anno in cui le luci artificiali, all'interno del locale standardizzato relativamente ad un orario prestabilito, compreso tra le 9:00 e le 18:00, possono rimanere spente in quanto l'illuminazione naturale, valutata sempre su un piano posto ad 80cm dal piano di calpestio, garantisce un comfort visivo stabilito dalle normative.

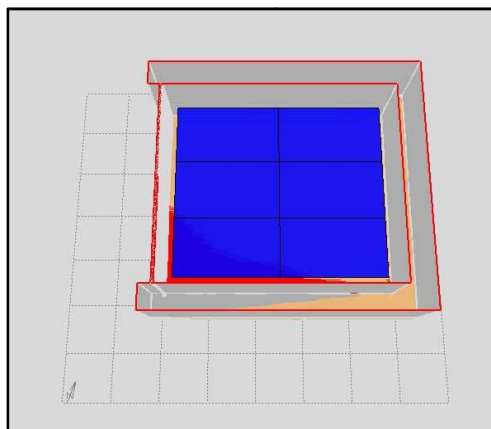


Figura 26. Rappresentazione grafica della griglia utilizzata per l'analisi annuale



## 6. COMPARAZIONE ANALITICA DEI SISTEMI SCHERMANTI

Si riportano in questo paragrafo i risultati ottenuti dalle varie analisi condotte e sopra descritte. Inoltre viene eseguita una comparazione degli stessi in modo tale da relazionare le capacità del sistema sperimentale SunFlower con quelle del sistema di confronto Okawood. Al fine di facilitarne la lettura, le comparazioni vengono riportate suddivise per ciascun tratto per i quali sono state condotte.

### A. TRATTO 2-7

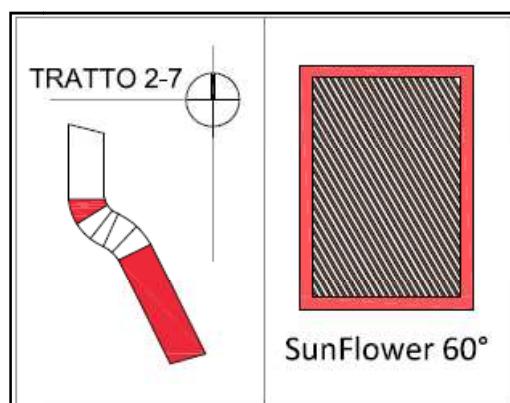


Figura 27. Individuazione del tratto 2-7 e sistema SunFlower adottato

#### Dati caratteristici

	$\gamma$	$\lambda$
	[°]	[°]
SunFlower	-71	60
Okawood	-71	0

Tabella 2. Angoli caratteristici delle schermature per il tratto 2-7



I. ANALISI NUMERICA

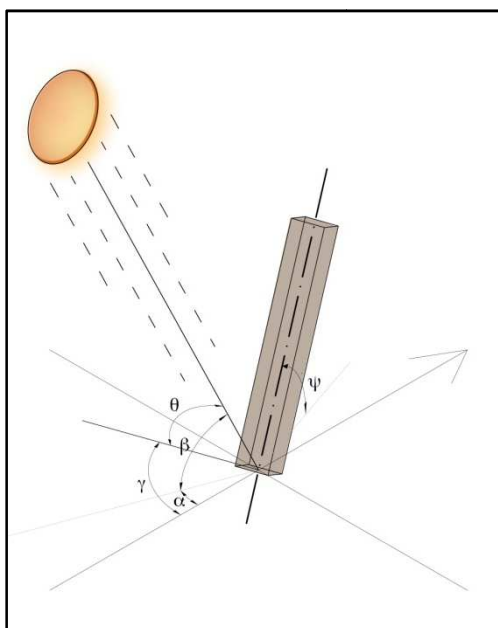


Figura 28. Angoli di riferimento del sistema sperimentale SunFlower del tratto 2-7

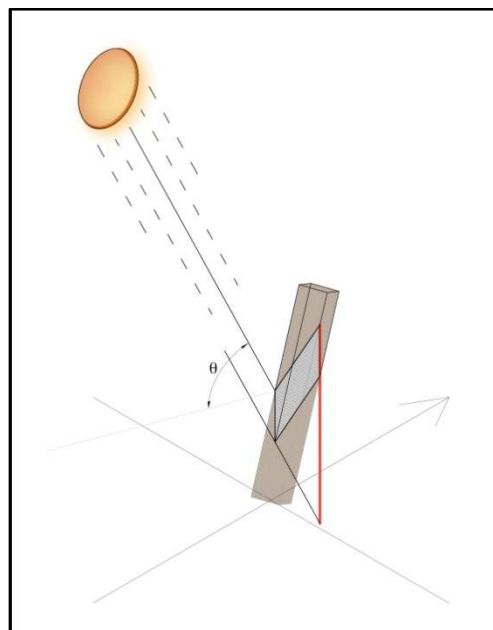


Figura 29. Ombra prodotta dal generico listello del sistema sperimentale SunFlower del tratto 2-7

Vengono di seguito riportati i grafici riassuntivi del calcolo dell'ombra prodotta da un singolo listello del tratto 2-7, sia per il sistema sperimentale SunFlower che per il sistema di confronto Okawood, relativamente alla data del 21 Giugno. Si sottolinea che l'unica grandezza variabile tra i due sistemi è l'inclinazione  $\lambda$  del listello, in quanto in precedenza si è scelto di adottare per il sistema sperimentale SunFlower, il medesimo passo  $p$  del sistema di confronto Okawood: si determina così una dipendenza del risultato ottenuto unicamente dovuta dal parametro in analisi, che per l'appunto è l'inclinazione  $\lambda$  del listello.

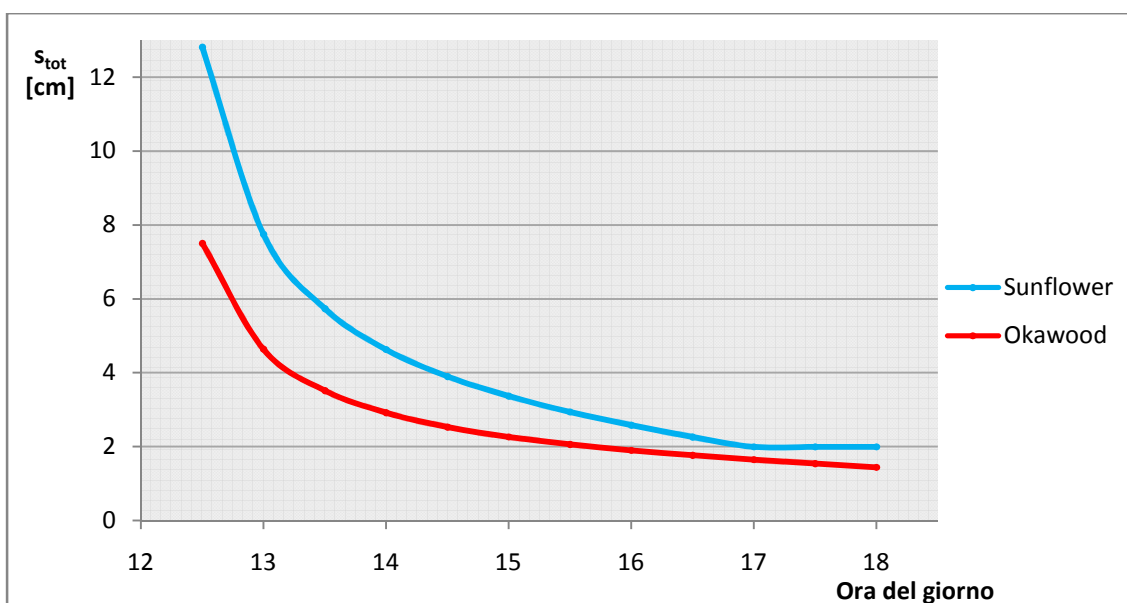


Figura 30. Andamento dell'ombra prodotta  $s_{tot}$  da un singolo listello per il tratto 2-7

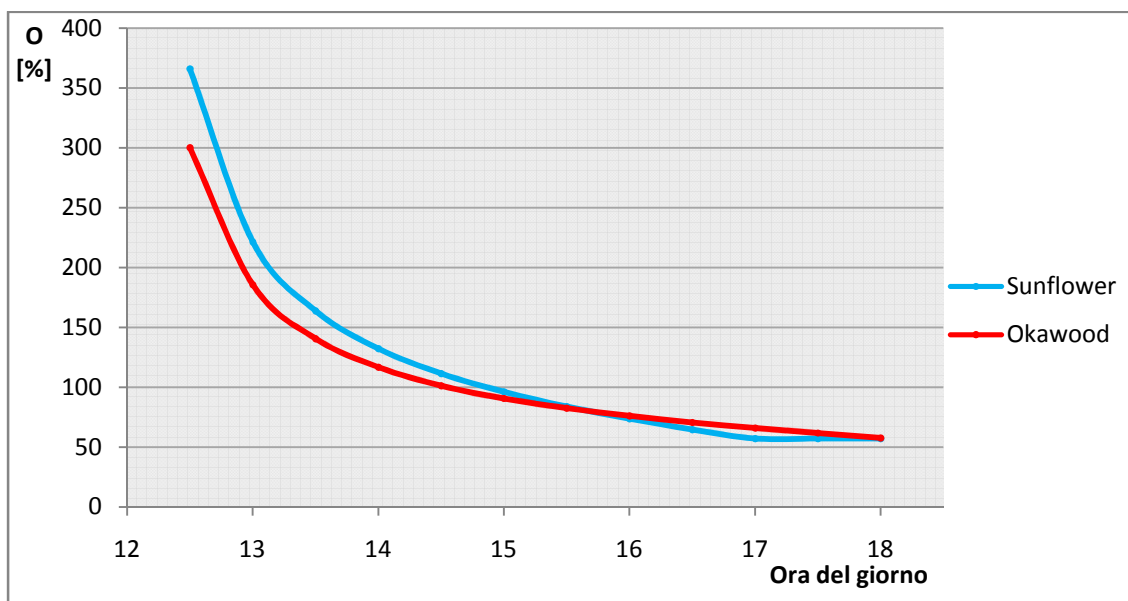


Figura 31. Andamento del grado di ombreggiamento della vetrata per il tratto 2-7

Dai grafici riportati in figura 30 e 31 si deduce la maggior capacità del sistema sperimentale Sunflower di ombreggiare la superficie vetrata retrostante. In particolare si osserva che sia il valore dell'ombra prodotto dal singolo listello, sia il grado di ombreggiamento della porzione vetrata compresa tra due listelli successivi risultano essere maggiori per il sistema sperimentale SunFlower.

#### Confronto visivo per la sola componente di luce diretta

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si considera solamente la porzione diretta della radiazione solare: si può facilmente notare che il sistema sperimentale Sunflower garantisce un ombreggiamento totale della vetrata fino alle ore 15.00, mentre il sistema di confronto Okawood è in grado di schermare completamente la medesima vetrata solamente fino le ore 13.00. Inoltre è osservabile l'assenza dell'effetto di abbagliamento.



Figura 32. Legenda dell'illuminamento all'interno del locale standardizzato

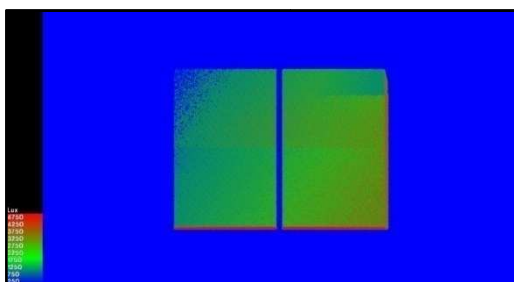


Figura 33. SunFlower System ore 13.00

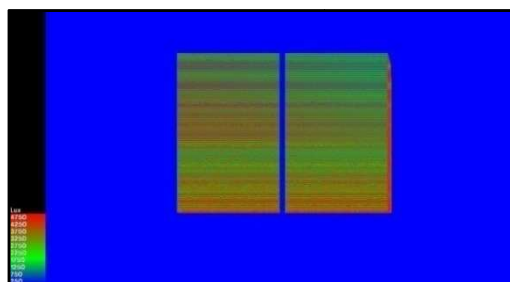


Figura 34. Okawood System ore 13.00

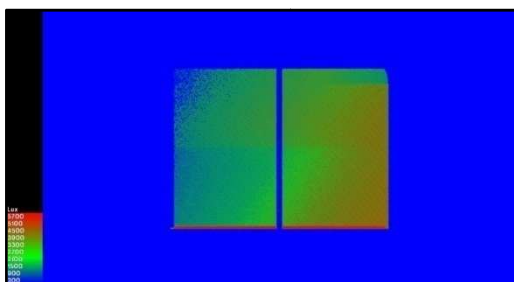


Figura 35. SunFlower System ore 14.00

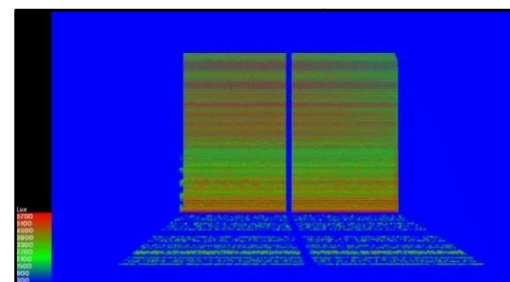


Figura 36. Okawood System ore 14.00

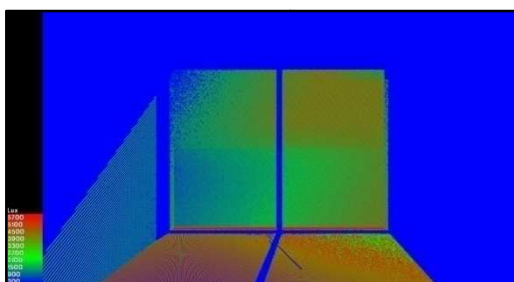


Figura 37. SunFlower System ore 15.00

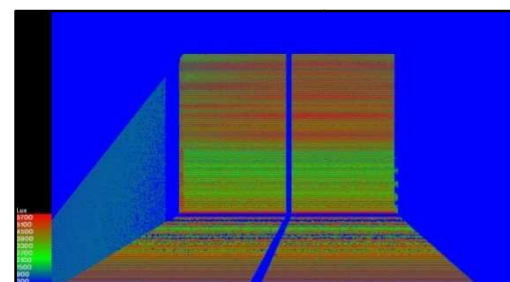


Figura 38. Okawood System ore 15.00

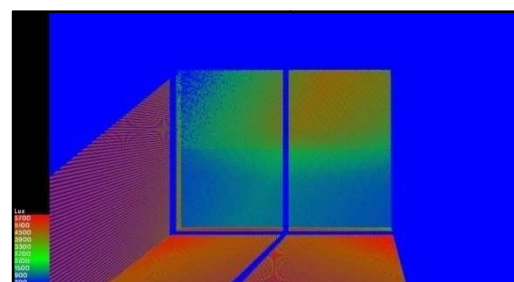


Figura 39. SunFlower System ore 16.00

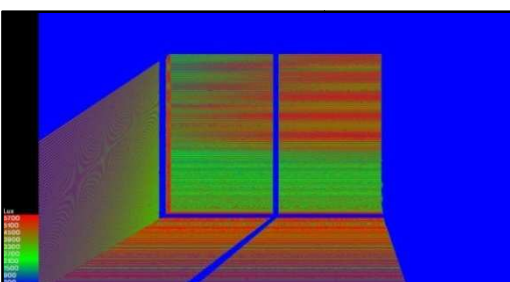


Figura 40. Okawood System ore 16.00

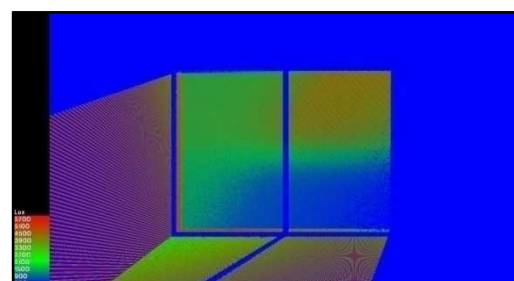


Figura 41. SunFlower System ore 17.00

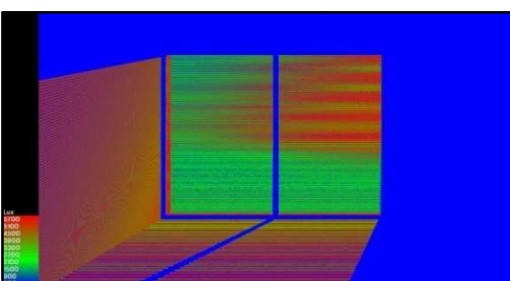


Figura 42. Okawood System ore 17.00



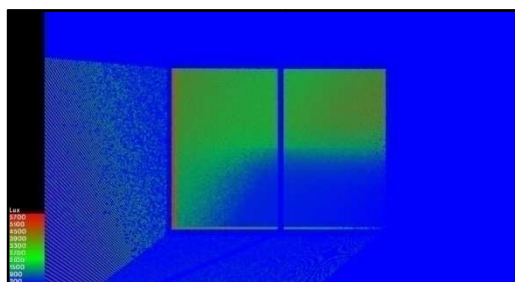


Figura 43. SunFlower System ore 18.00

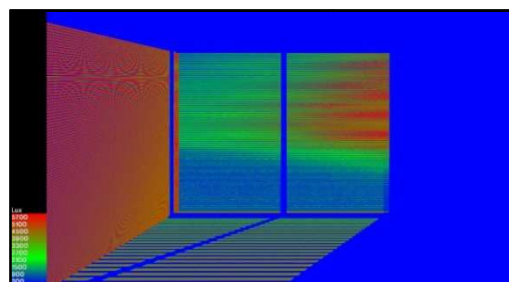


Figura 44. Okawood System ore 18.00

Analisi numerica condotta il 21 Dicembre

Questa analisi, a differenza di quella condotta per la data del 21 Giugno, ha come obiettivo la verifica della quantità di superficie compresa tra due listelli successivi esposta alla radiazione solare. Si intende quindi stimare l'efficacia della schermatura anche nella fase invernale, per la quale si ha la necessità di garantire un apporto solare dovuto dall'irraggiamento diretto della vetrata.

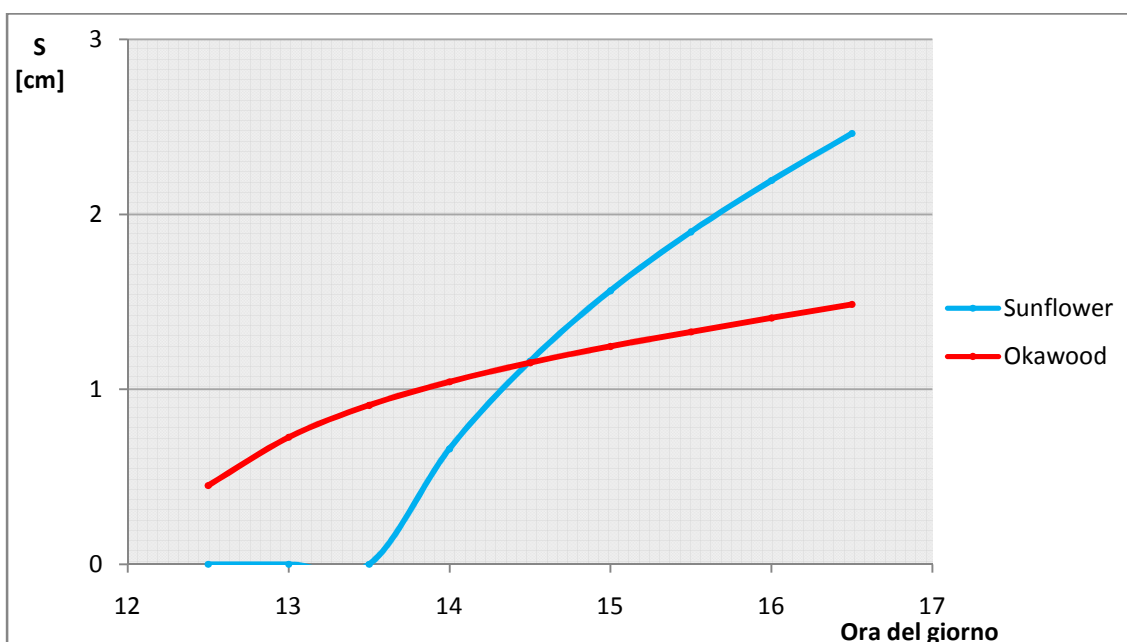


Figura 45. Andamento della quantità di superficie vetrata tra due listelli esposta al sole per il tratto 2-7

Nel grafico riportato in figura 44, al contrario dell'analisi condotta per la data del 21 Giugno, sull'asse delle ordinate viene riportata la quantità di superficie vetrata tra due listelli successivi che rimane esposta alla radiazione diretta da parte del sole.



## II. ANALISI ILLUMINOTECNICA

L'analisi illuminotecnica è stata condotta in riferimento alla volontà di confrontare il livello di illuminamento garantito da entrambi i sistemi con passo dei listelli di 15mm, che risulta essere la misura ottimale con cui questi devono essere distanziati al fine di ottimizzare l'efficacia del sistema schermante, con l'ipotesi di utilizzare un passo di 20mm e 30mm.

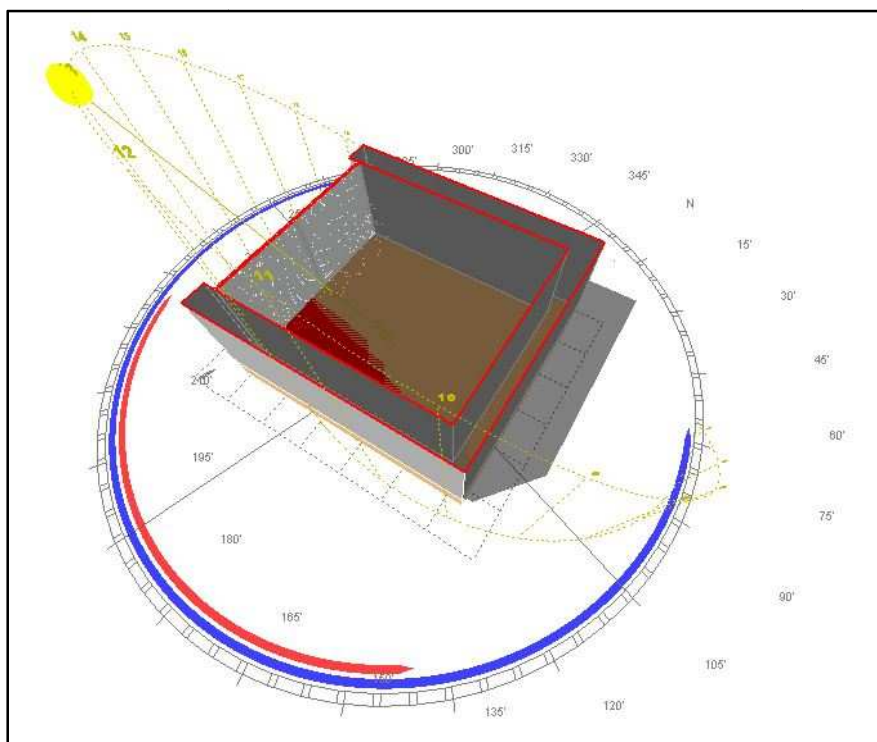


Figura 46. Inserimento del locale standardizzato nel software Ecotect

### Analisi condotta con passo dei listelli di 30mm

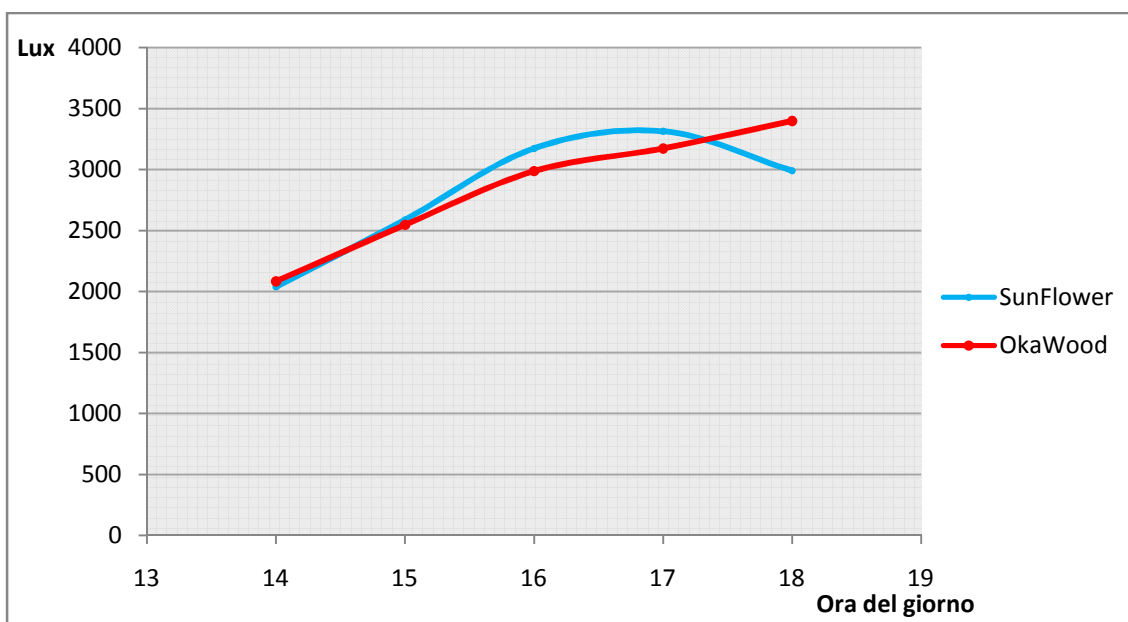


Figura 47. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 2-7 con passo di 30mm



Analisi condotta con passo dei listelli di 20mm

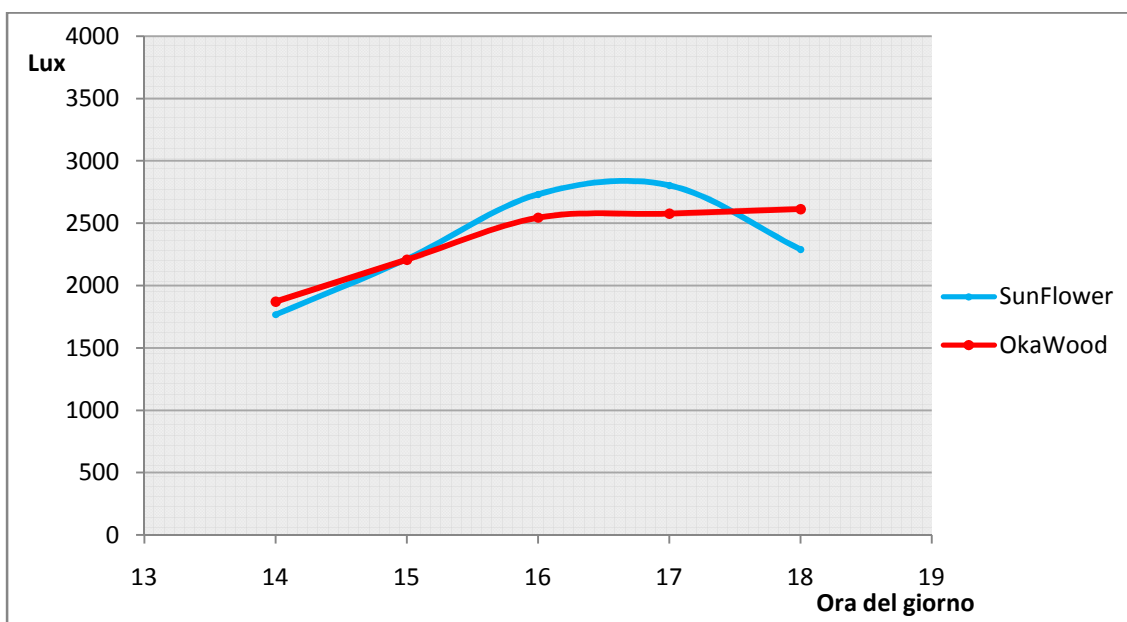


Figura 48. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 2-7 con passo di 20mm

Analisi condotta con passo dei listelli di 15mm

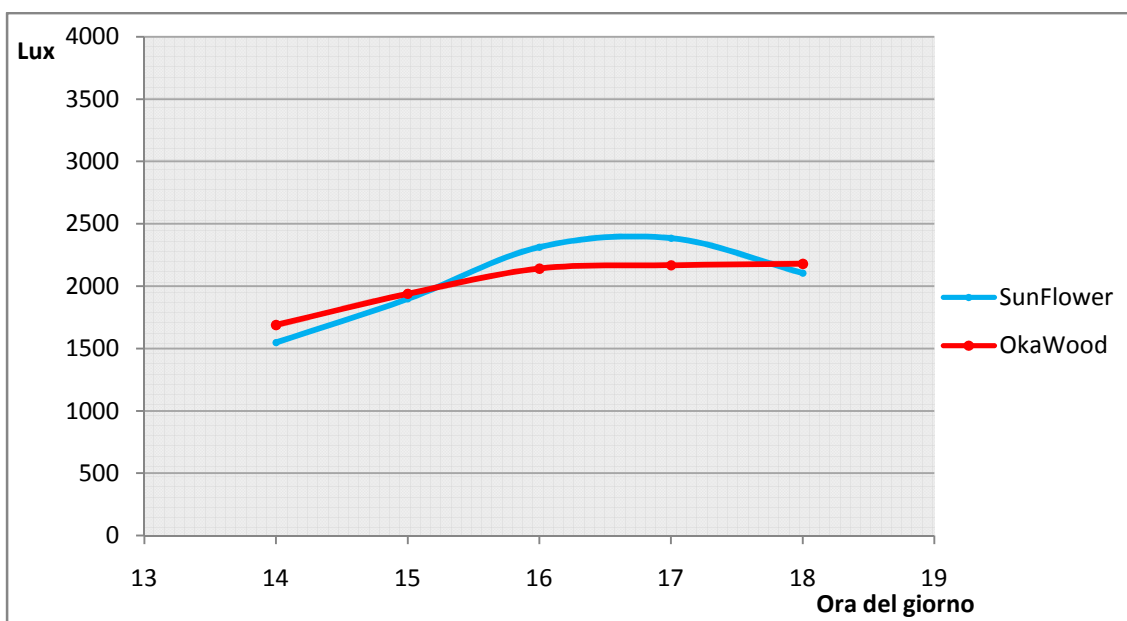


Figura 49. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 2-7 con passo di 15mm

Dal grafico riportato in figura 49, relativo ad un passo dei listelli di 15mm, si può osservare come per il sistema sperimentale SunFlower il grado di illuminamento del locale standardizzato, sul quale viene condotta l'analisi, aumenta sensibilmente nelle ore centrali del pomeriggio per poi subire una diminuzione. Questo andamento rispecchia in pieno la geometria del sistema schermante, definita in funzione della volontà di opporsi con efficacia alla radiazione diretta delle ore centrali della giornata. L'aumento dell'illuminamento naturale del locale standardizzato non a caso avviene quando il sole, nel suo moto apparente, si sposta



in quelle ore verso ovest abbassandosi sull'orizzonte: in questa condizione infatti i raggi del sole assumono un'incidenza sempre più prossima alla normale della vetrata, ruotata sull'orizzontale di un angolo  $\gamma=71^\circ$ , fino a raggiungere la condizione di perpendicolarità. Ed è proprio in corrispondenza di questo istante di tempo che si registra il valore minimo di ombreggiamento per il sistema sperimentale SunFlower. Il successivo decremento del livello di illuminamento naturale, che si registra a partire circa dalle ore 17.00, rispecchia ancora una volta, l'aumento dell'angolo di incidenza formato tra la normale alla superficie vetrata con il raggio solare.

Il sistema di confronto Okawood prevede invece un livello di illuminamento maggiore del sistema sperimentale SunFlower nelle prime ore del pomeriggio per poi aumentare con incrementi progressivamente minori, determinando complessivamente un grado di illuminamento naturale del locale standardizzato inferiore rispetto a quello garantito dal sistema sperimentale Sunflower. Si determina quindi una maggior necessità da parte del sistema di confronto di disporre di un tendaggio interno per evitare l'abbagliamento. Anche in questo caso le ragioni di questo comportamento sono deducibili dall'analisi numerica condotta in precedenza, in particolar modo per le prime ore del pomeriggio.

Considerando invece le analisi effettuate sui medesimi sistemi schermanti, con passo dei listelli maggiorato a 20mm e 30 mm si può osservare come il livello di illuminamento naturale aumenti sensibilmente, a fronte però di un'inefficienza dell'ombreggiamento della schermatura.

#### Confronto visivo del livello di illuminamento naturale

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si viene considerata anche la porzione diffusa della radiazione solare: si può facilmente notare che il sistema sperimentale Sunflower garantisce un livello di illuminamento migliore, che esclude la possibilità che si verifichi abbagliamento. In queste immagini la luce viene mappata secondo una scala di colori, in modo tale da poter rendere visibile per l'occhio umano, la diversa distribuzione dell'illuminamento.

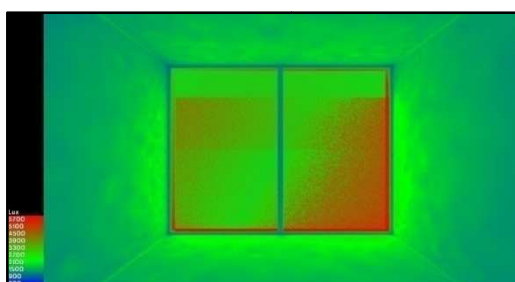


Figura 50. SunFlower System ore 13.00

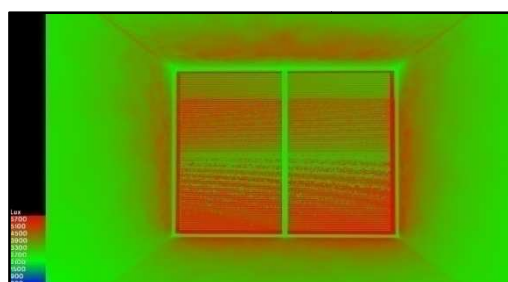


Figura 51. Okawood System ore 13.00

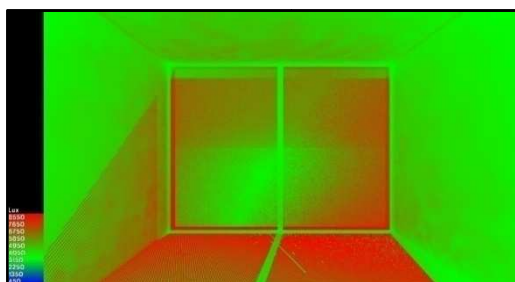


Figura 52. SunFlower System ore 15.00

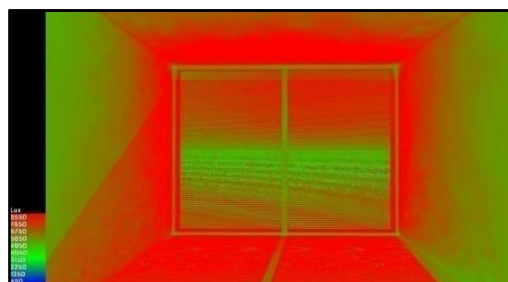


Figura 53. Okawood System ore 15.00

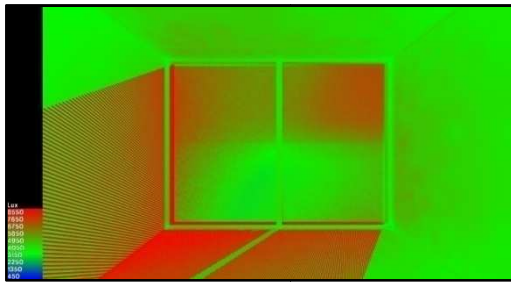


Figura 54. SunFlower System ore 17.00

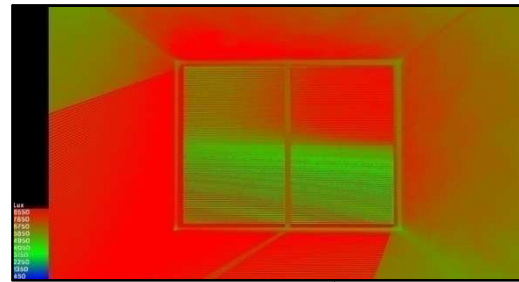


Figura 55. Okawood System ore 17.00



### III. ANALISI ANNUALE

Lo scopo di questa analisi è quella di estendere i risultati dell'analisi illuminotecnica all'intero corso dell'anno: per farlo ci siamo avvalsi dell'uso del software Daysim, il cui funzionamento è riportato nel paragrafo precedente.

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi, rappresentati graficamente, relativi solo ad alcuni sensori.

#### Sensore 1

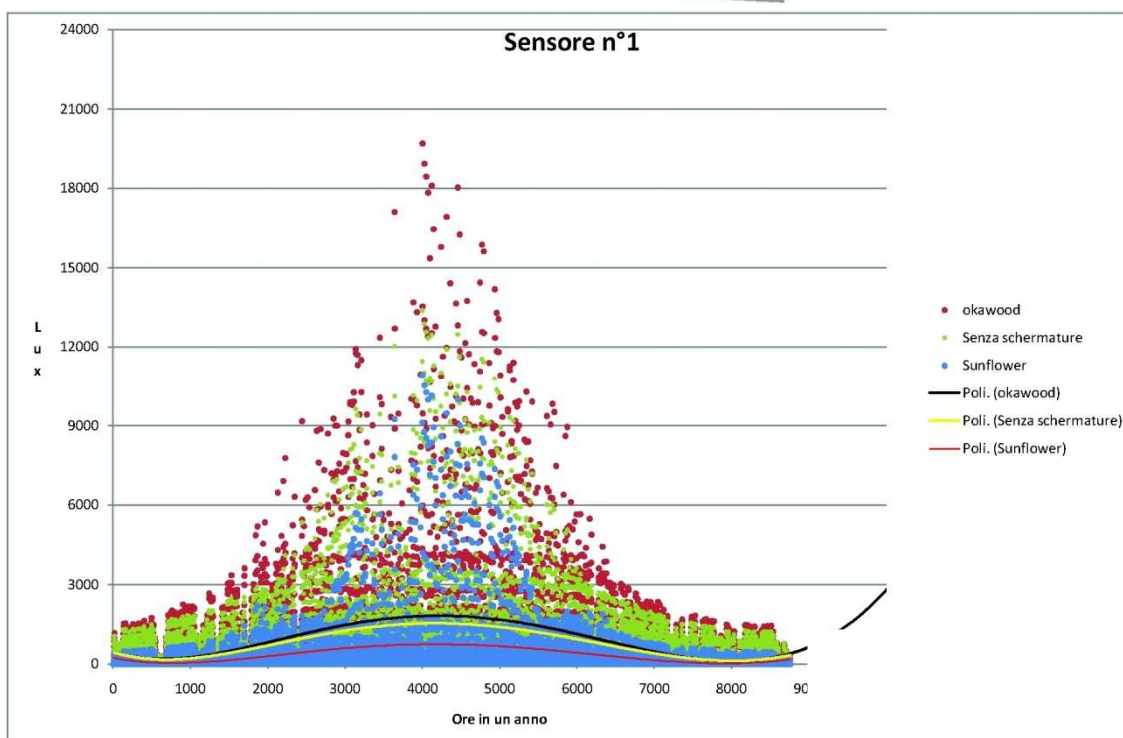
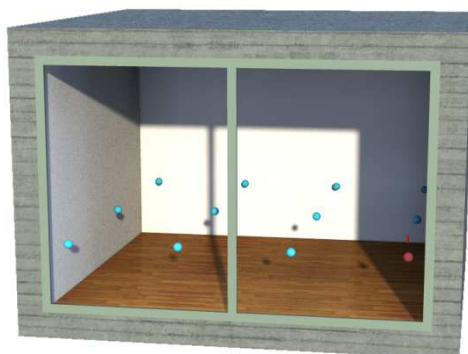


Figura 56. Andamento annuale dell'illuminamento naturale per il sensore 1 del tratto 2-7



Sensore 2

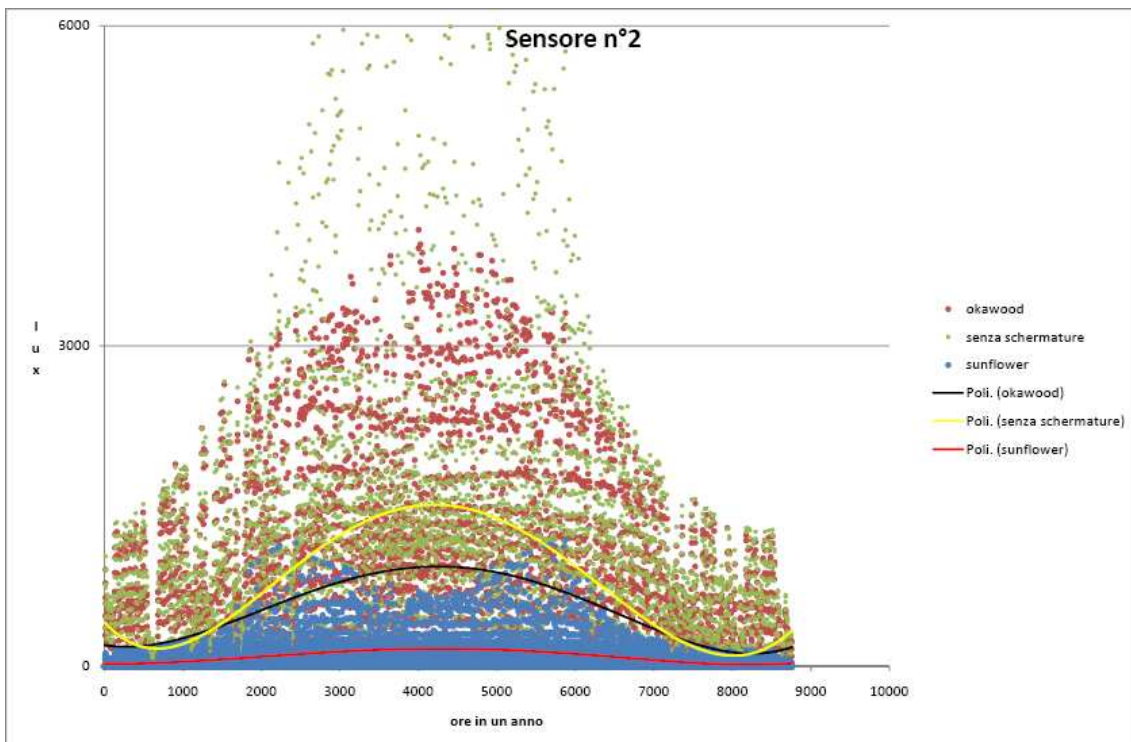
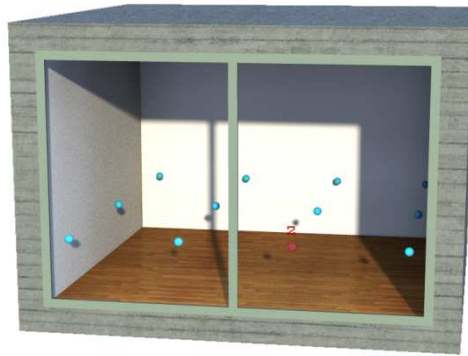


Figura 57. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 2 del tratto 2-7



Sensore 4

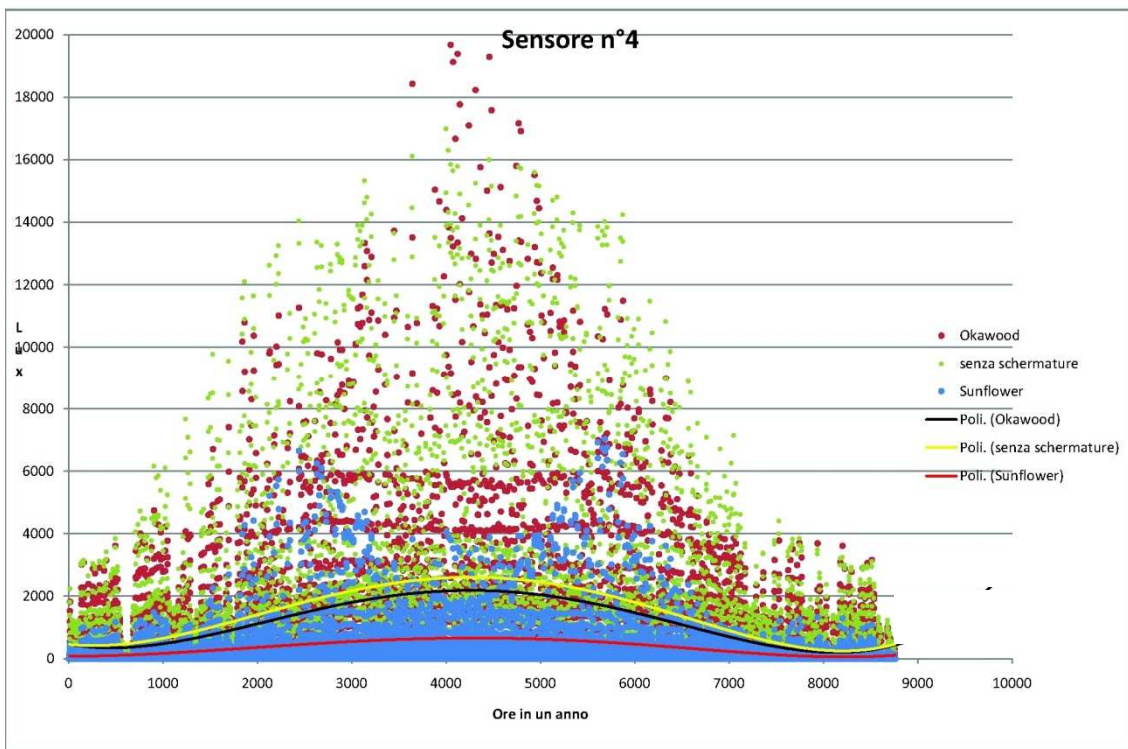
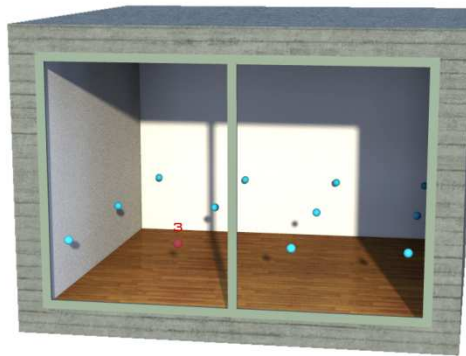


Figura 58. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 4 del tratto 2-7





Sensore 6

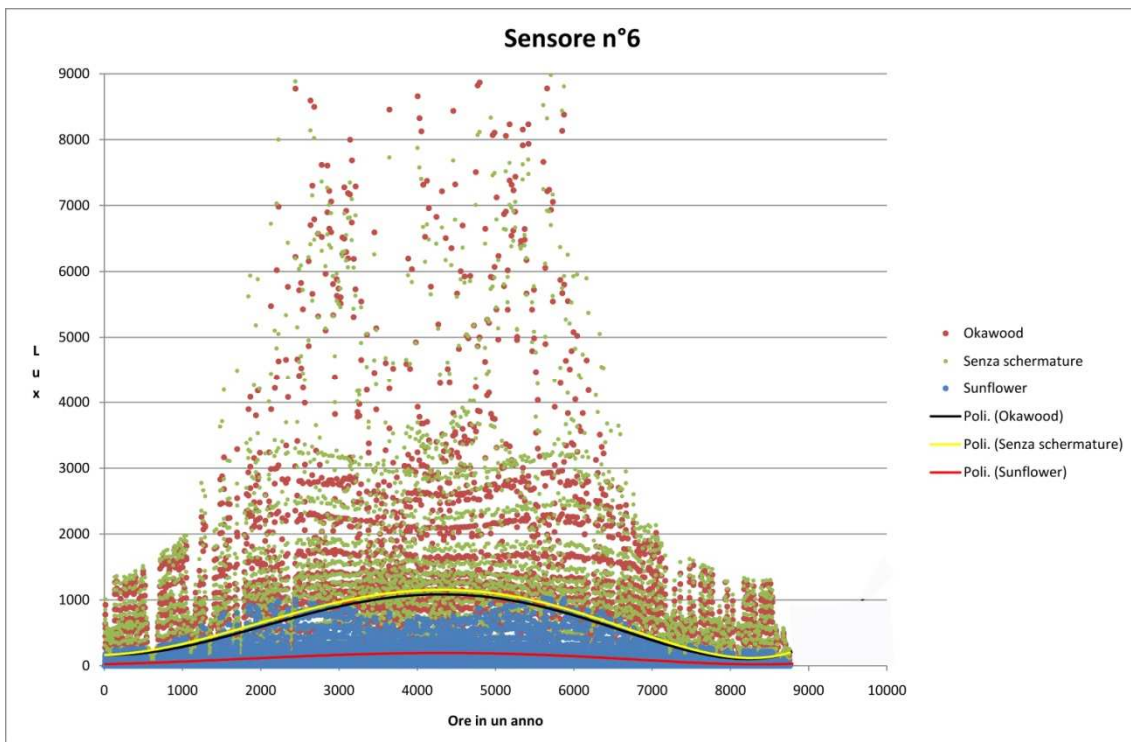
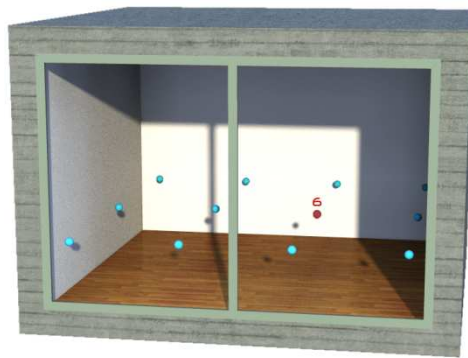


Figura 59. Andamento annuale dell'illuminamento naturale per il sensore 6 del tratto 2-7



Sensore 7

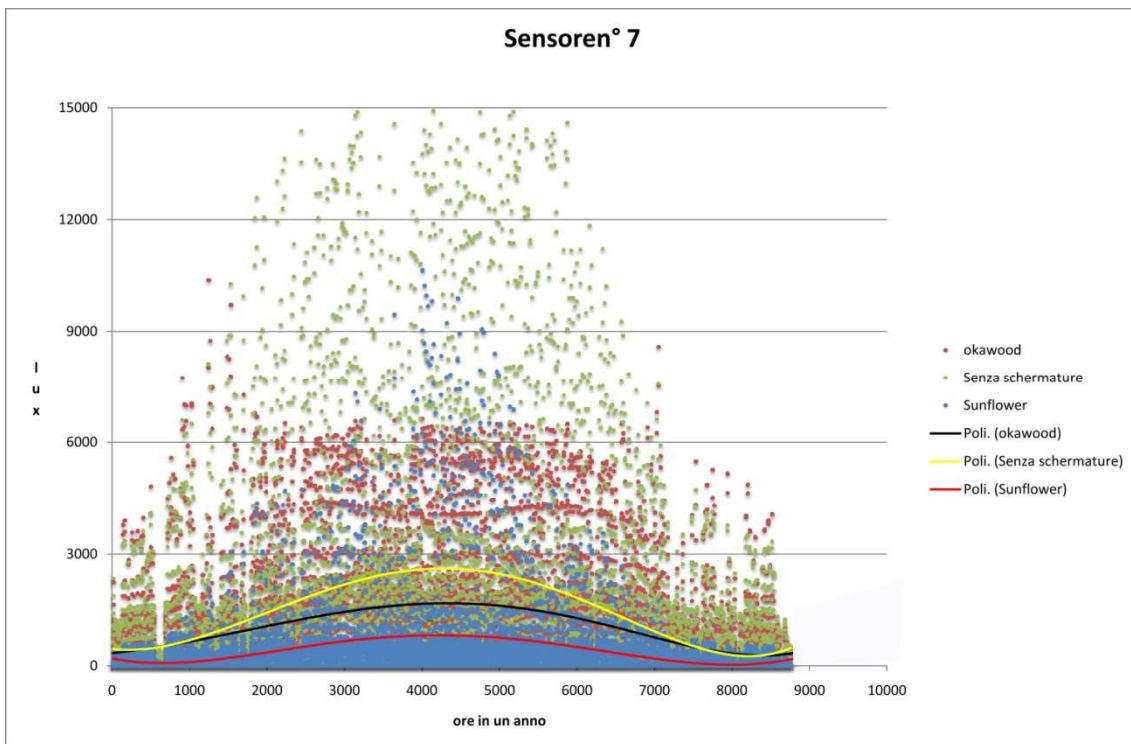
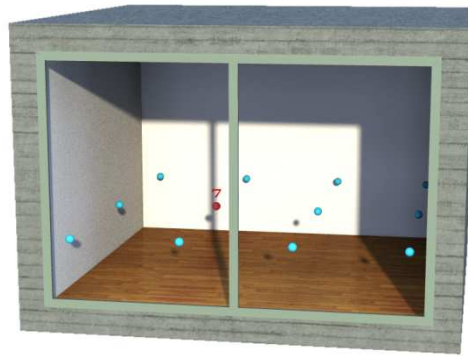


Figura 60. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 7 del tratto 2-7

Sensore 10

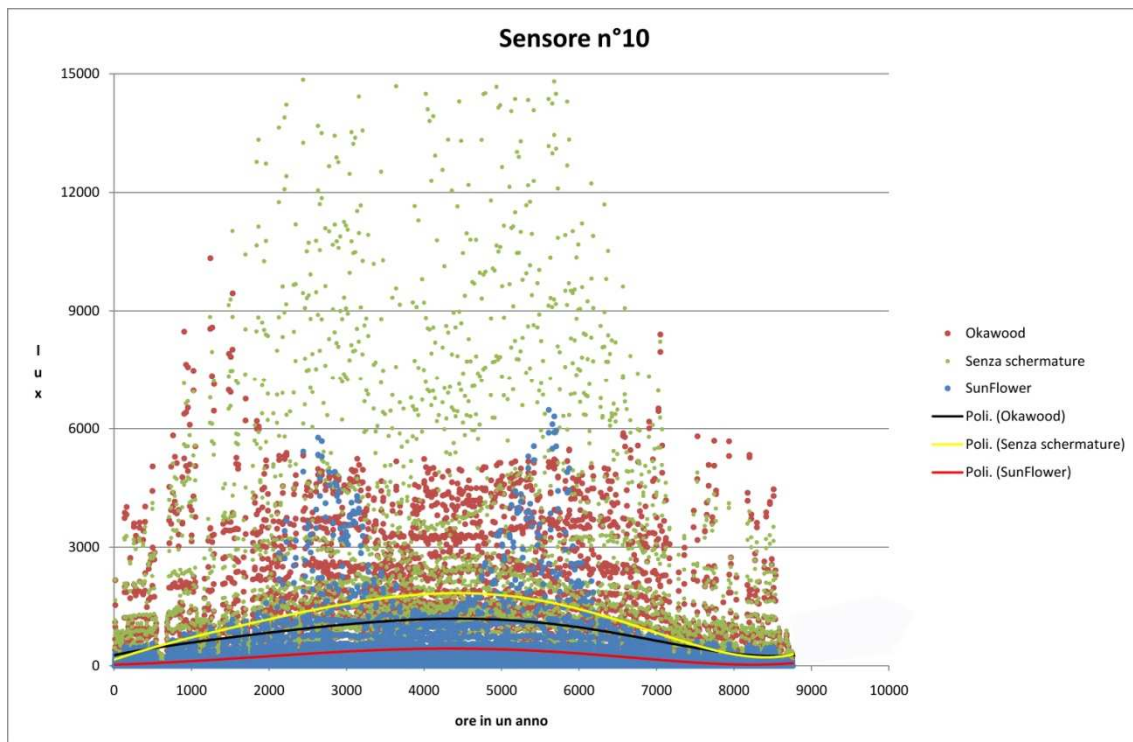
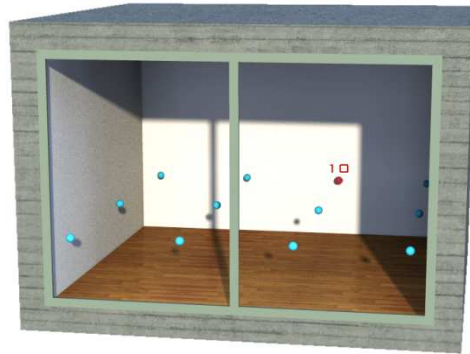


Figura 61. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 10 del tratto 2-7



---

#### IV. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dalle differenti analisi condotte mostrano tutte una maggior efficacia del sistema sperimentale SunFlower. In particolare dalle analisi annuali riportate in precedenza, è facilmente osservabile come la linea di tendenza del sistema SunFlower sia sempre più bassa di quella relativa al sistema di confronto Okawood. Ciò significa che quanto era emerso dalle analisi istantanee condotte per le date del 21 Giugno e del 21 Dicembre, date in cui il sole assume altezza solare rispettivamente massima e minima, si registra anche per l'intero corso dell'anno. Per i restanti giorni dell'anno si assisterà quindi ad una maggior performance di schermatura da parte del sistema sperimentale SunFlower.

Altro importante dato da considerare è quello del Daylight Autonomy: per il sistema SunFlower i valori ottenuti variano tra il 64% e 84%: significa quindi che per le esposizioni aventi un orientamento prossimo ai 70°, misurati da sud in senso orario, garantisce un'elevata autonomia dall'illuminazione artificiale. Risulta quindi adatto anche per essere utilizzato in edifici adibiti ad ufficio, dato che assicura un ottimo illuminamento del piano di lavoro durante l'intero corso dell'anno, determinando così un importante risparmio energetico dovuto ad un minor fabbisogno di fonti luminose, che contribuisce inoltre alla limitazione del carico termico prodotto.

**B. TRATTO 3-6**

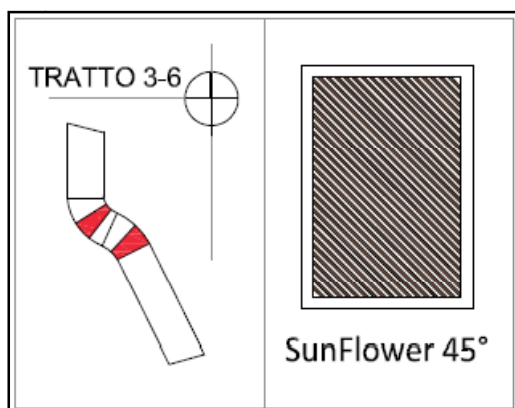


Figura 62. Individuazione del tratto 3-6 e sistema SunFlower adottato

Dati caratteristici

	$\gamma$	$\lambda$
	[°]	[°]
SunFlower	-49	45
Okawood	-49	0

Tabella 3. Angoli caratteristici delle schermature per il tratto 3-6

**I. ANALISI NUMERICA**

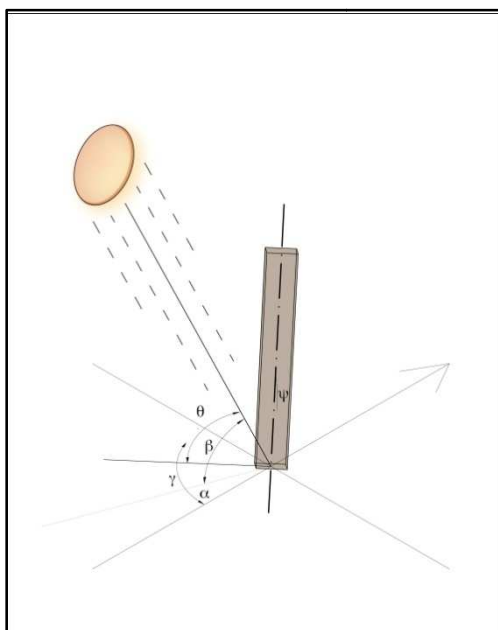


Figura 64. Angoli di riferimento del sistema sperimentale SunFlower del tratto 3-6

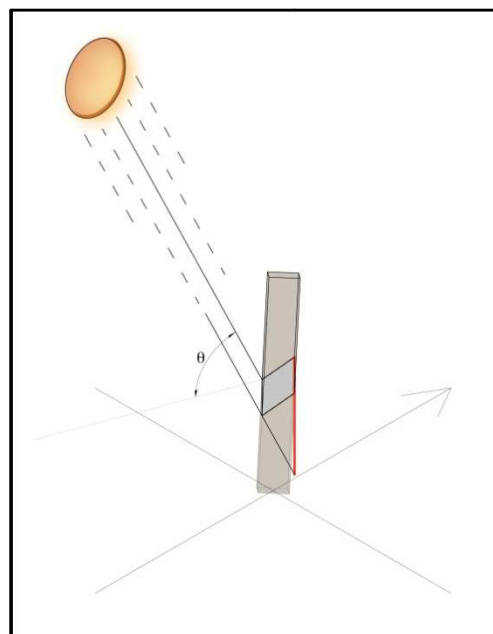


Figura 63. Ombra prodotta dal generico listello del sistema sperimentale SunFlower del tratto 3-6

Vengono di seguito riportati i grafici riassuntivi del calcolo dell'ombra prodotta da un singolo listello del tratto 3-6, sia per il sistema sperimentale SunFlower che per il sistema di confronto Okawood, relativamente alla data del 21 Giugno. Si sottolinea che l'unica grandezza variabile



tra i due sistemi è l'inclinazione  $\lambda$  del listello, in quanto in precedenza si è scelto di adottare per il sistema sperimentale SunFlower, il medesimo passo  $p$  del sistema di confronto Okawood: si determina così una dipendenza del risultato ottenuto unicamente dovuta dal parametro in analisi, che per l'appunto è l'inclinazione  $\lambda$  del listello.

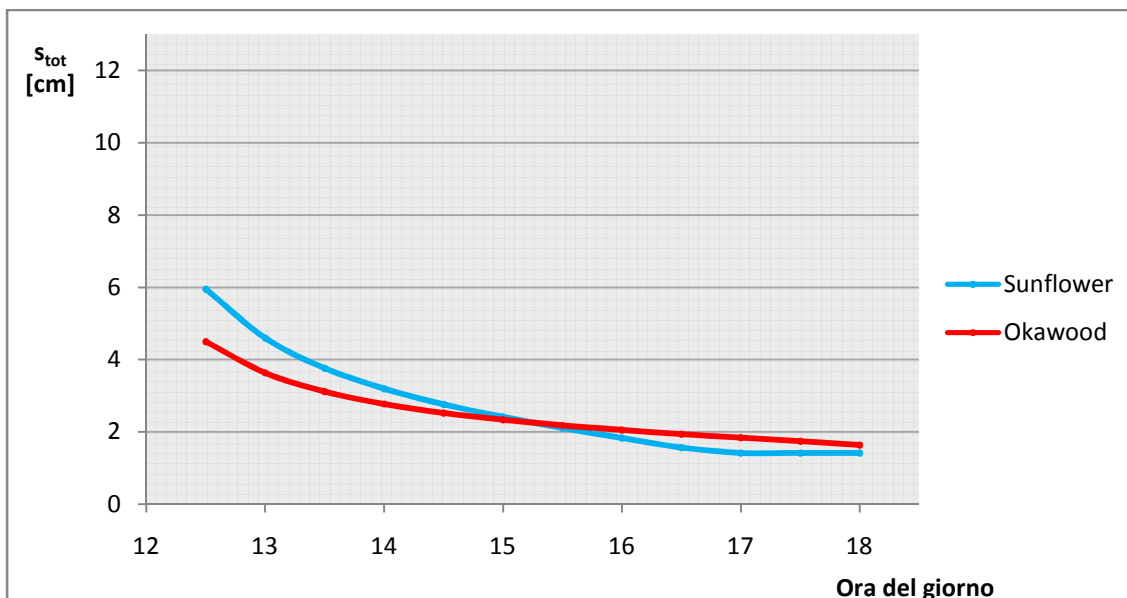


Figura 65. Andamento dell'ombra prodotta  $s_{tot}$  da un singolo listello per il tratto 3-6

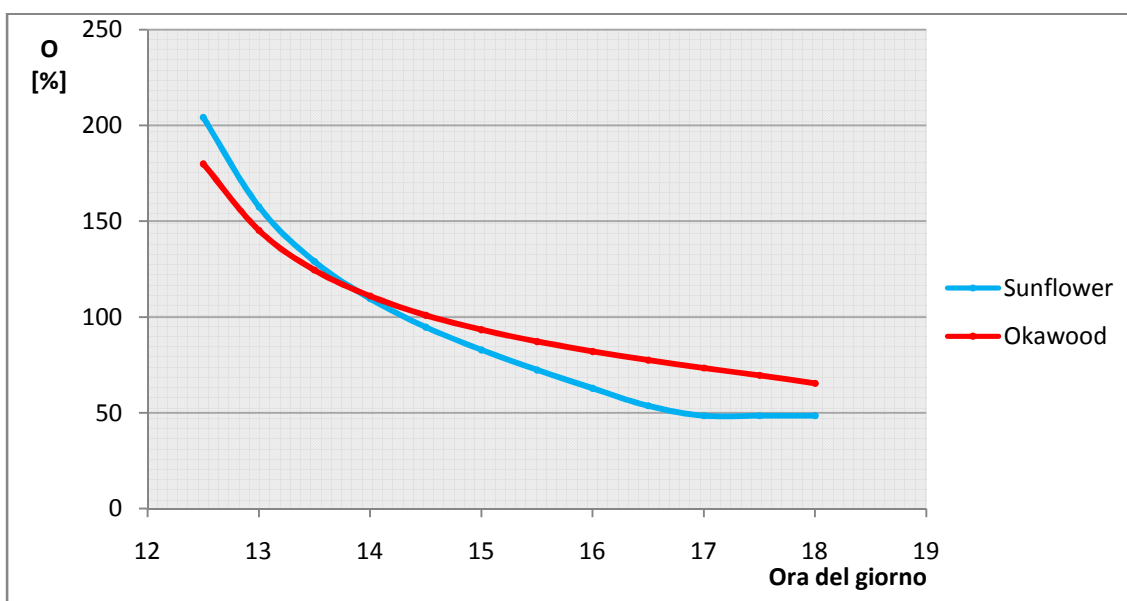


Figura 66. Andamento del grado di ombreggiamento della vetrata per il tratto 3-6

Dai grafici riportati in figura 64 e 65 si deduce la maggior capacità del sistema sperimentale SunFlower di ombreggiare la superficie vetrata retrostante nelle prime ore del pomeriggio, che risultano essere quelle con un irraggiamento maggiore. In particolare si osserva che per quelle ore sia il valore dell'ombra prodotto dal singolo listello, sia il grado di ombreggiamento della porzione vetrata compresa tra due listelli successivi risultano essere maggiori per il sistema sperimentale SunFlower.



Confronto visivo per la sola componente di luce diretta

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si considera solamente la porzione diretta della radiazione solare: si può facilmente notare che entrambi i sistemi garantiscono un ombreggiamento totale della vetrata fino alle ore 14.00. Inoltre per le ore 18.00 il sistema sperimentale SunFlower permette di ottenere un ombreggiamento completo della vetrata.

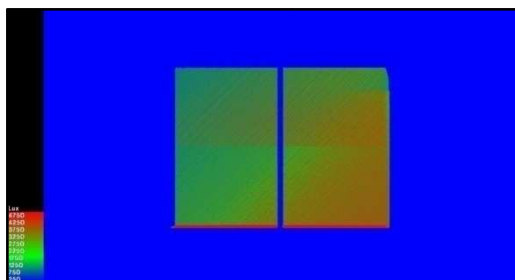


Figura 67. SunFlower System ore 13.00

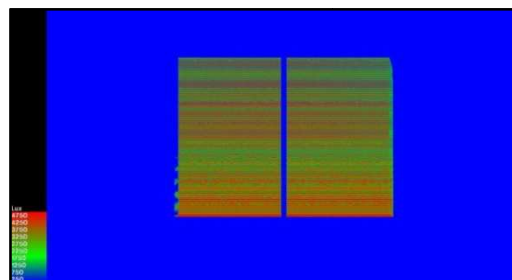


Figura 68. Okawood System ore 13.00

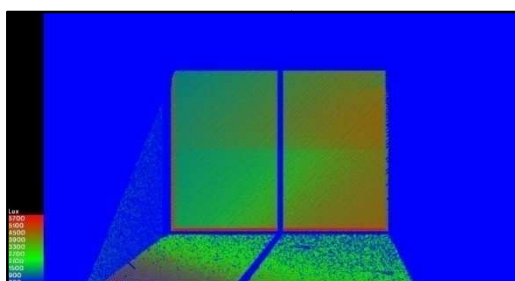


Figura 69. SunFlower System ore 14.00

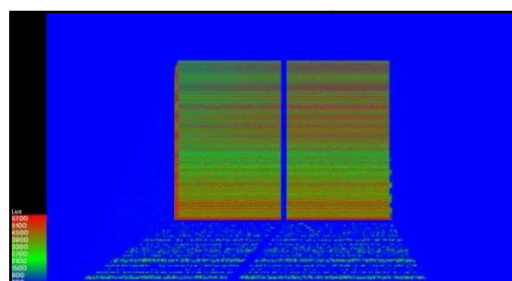


Figura 70. Okawood System ore 14.00

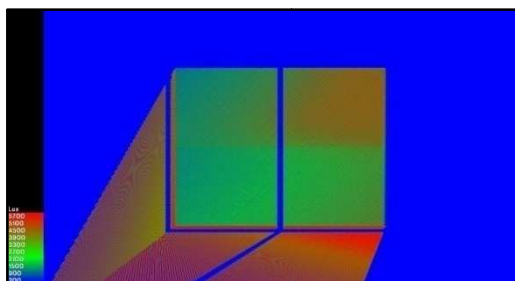


Figura 71. SunFlower System ore 15.00

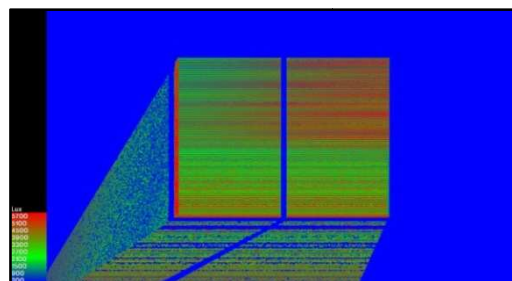


Figura 72. Okawood System ore 15.00

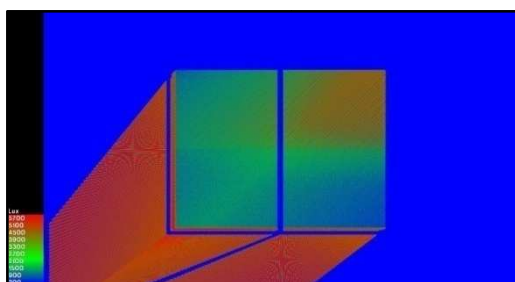


Figura 73. SunFlower System ore 16.00

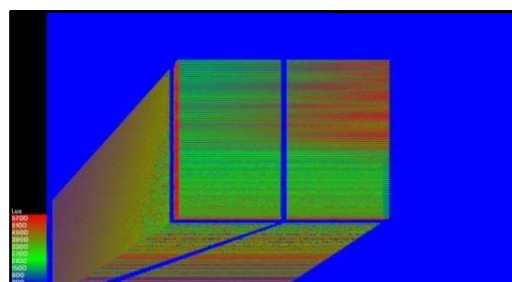


Figura 74. Okawood System ore 16.00

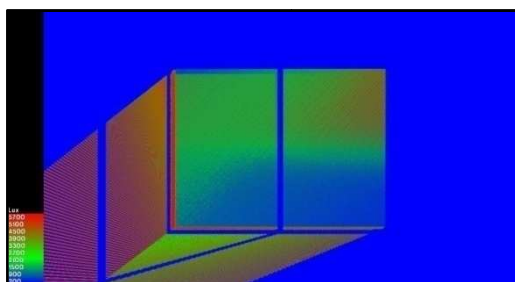


Figura 75. SunFlower System ore 17.00

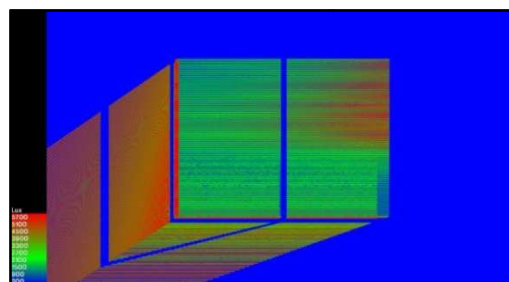


Figura 76. Okawood System ore 17.00

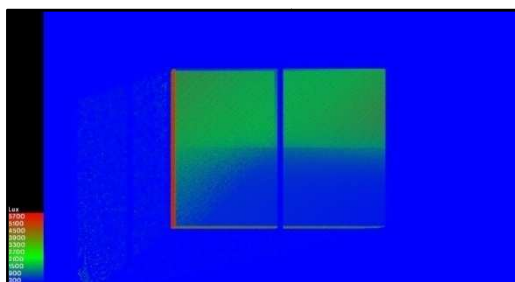


Figura 77. SunFlower System ore 18.00

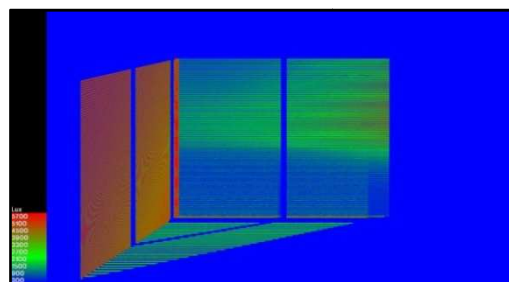


Figura 78. Okawood System ore 18.00

Analisi numerica condotta il 21 Dicembre

Questa analisi, a differenza di quella condotta per la data del 21 Giugno, ha come obiettivo la verifica della quantità di superficie compresa tra due listelli successivi esposta alla radiazione solare. Si intende quindi stimare l'efficacia della schermatura anche nella fase invernale, per la quale si ha la necessità di garantire un apporto solare dovuto dall'irraggiamento diretto della vetrata.

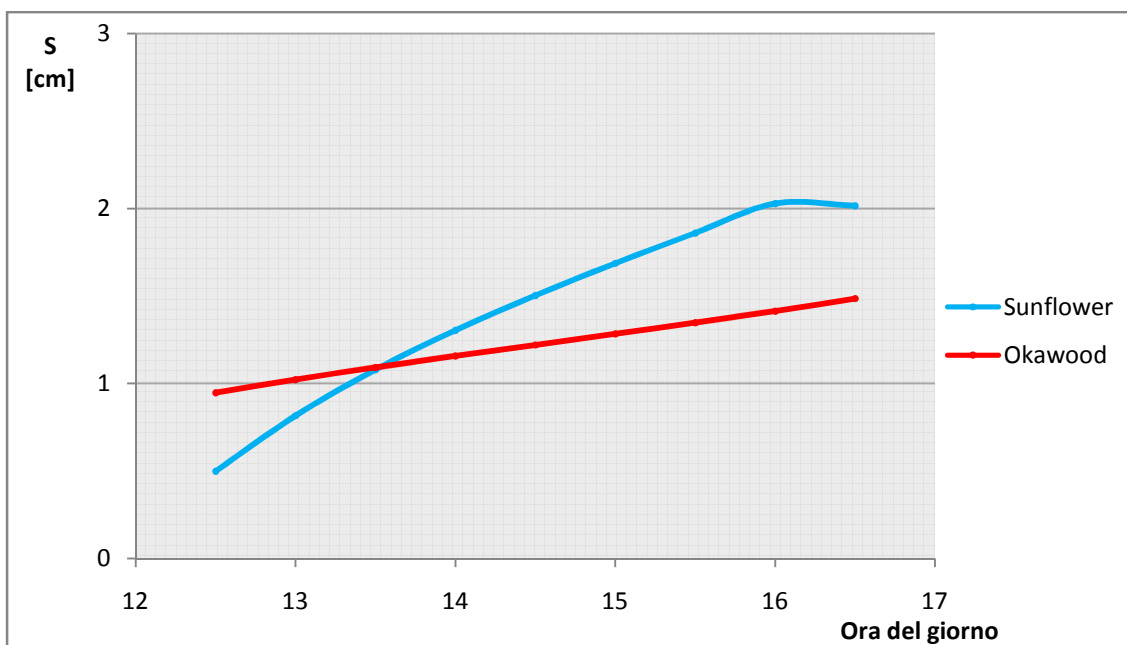


Figura 79. Andamento della quantità di superficie vetrata tra due listelli esposta al sole per il tratto 3-6





## II. ANALISI ILLUMINOTECNICA

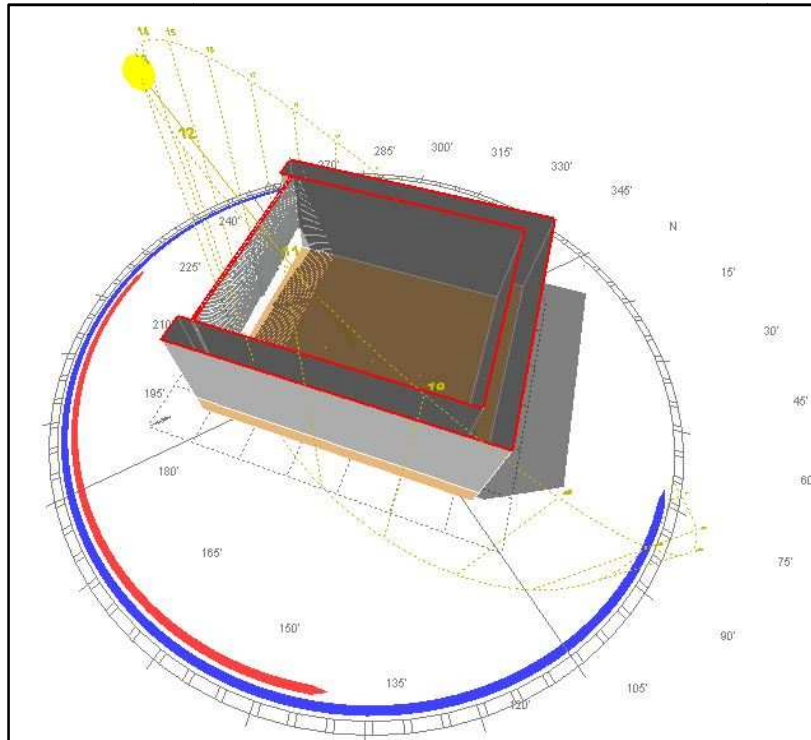


Figura 80. Inserimento del locale standardizzato nel software Ecotect

Analisi condotta con passo dei listelli di 30 mm

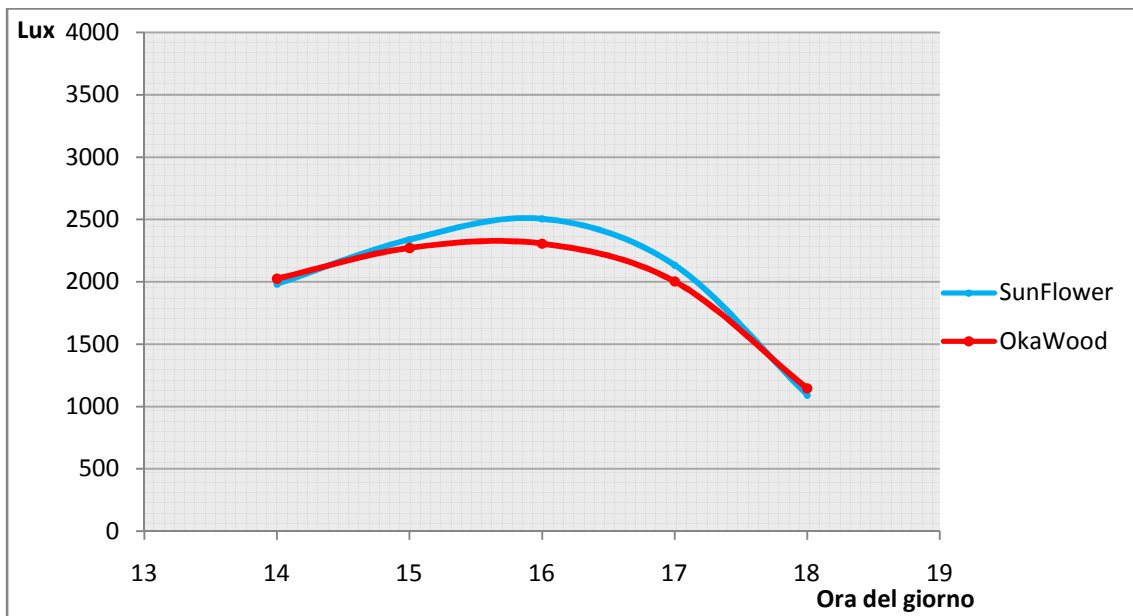


Figura 81. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 3-6 con passo di 30mm



Analisi condotta con distanza dei listelli di 20 mm

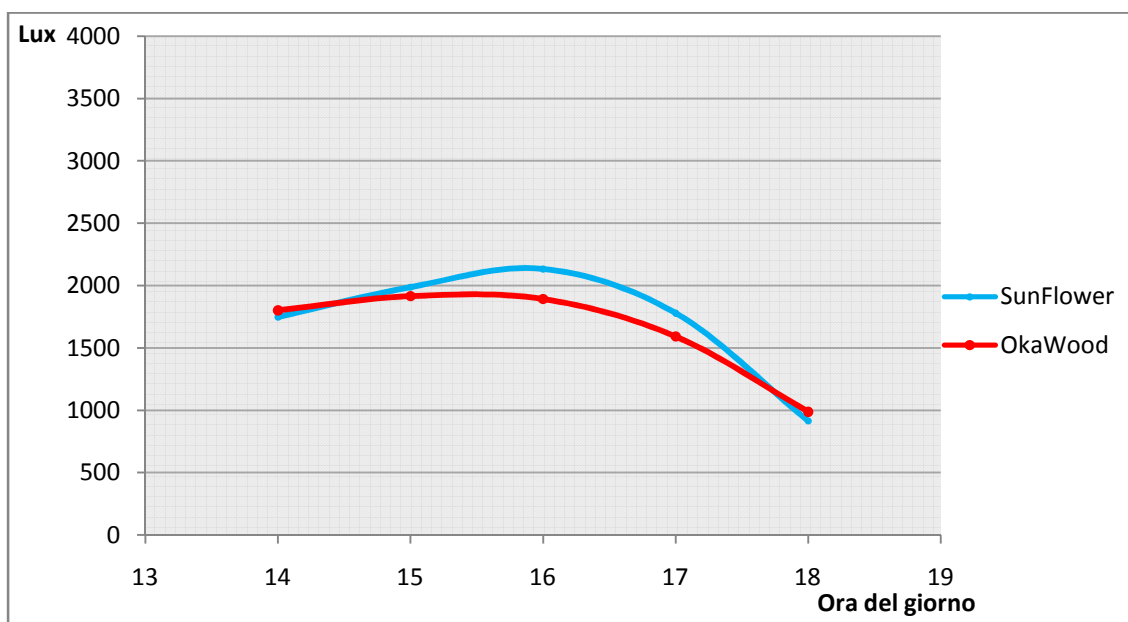


Figura 82. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 3-6 con passo di 20mm

Analisi condotta con distanza dei listelli di 15 mm

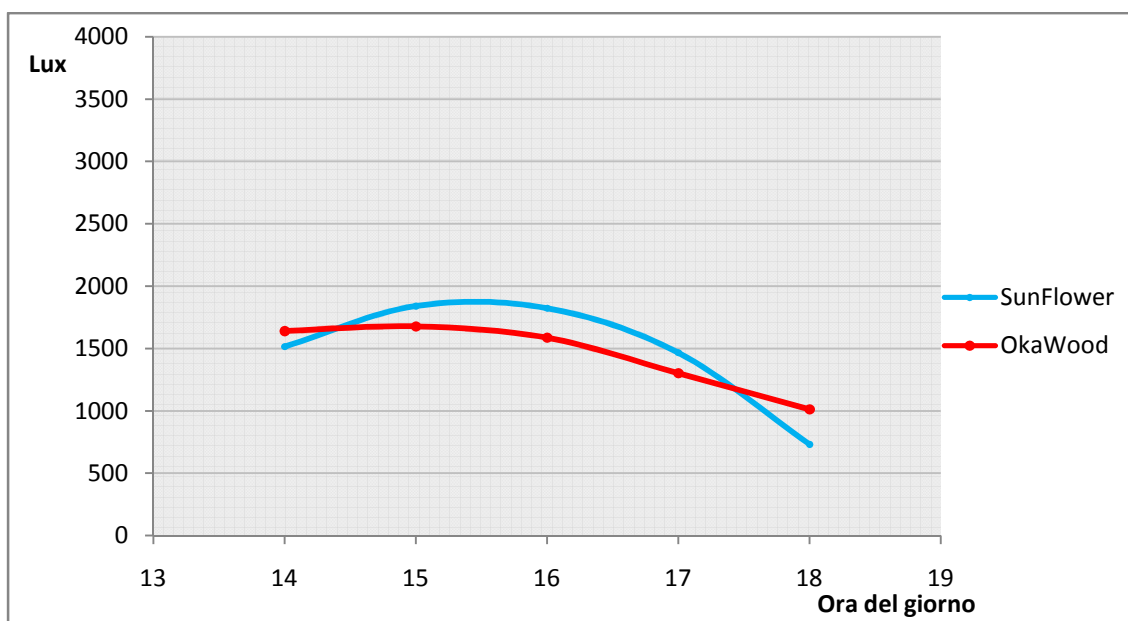


Figura 83. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 3-6 con passo di 15mm

Dal grafico riportato in figura 82, relativo ad un passo dei listelli di 15mm, si può osservare come per il sistema sperimentale SunFlower il grado di illuminamento del locale standardizzato, sul quale viene condotta l'analisi, aumenta sensibilmente nelle prime ore del pomeriggio per poi subire una notevole diminuzione. Questo andamento rispecchia in pieno la geometria del sistema schermante, definita in funzione della volontà di opporsi con efficacia alla radiazione diretta delle ore centrali della giornata. L'aumento dell'illuminamento naturale



del locale standardizzato non a caso avviene quando il sole, nel suo moto apparente, si sposta in quelle ore verso ovest abbassandosi sull'orizzonte: in questa condizione infatti i raggi del sole assumono un'incidenza sempre più prossima alla normale della vetrata, ruotata sull'orizzontale di un angolo  $\gamma=49^\circ$ , fino a raggiungere la condizione di perpendicolarità. Il successivo decremento del livello di illuminamento naturale, che si registra a partire circa dalle ore 16.00, rispecchia ancora una volta, l'aumento dell'angolo di incidenza formato tra la normale alla superficie vetrata con il raggio solare.

Per il sistema di confronto Okawood invece si registra un livello di illuminamento nettamente inferiore del sistema sperimentale SunFlower per tutta la durata del pomeriggio.

Considerando invece le analisi effettuate sui medesimi sistemi schermanti, con passo dei listelli maggiorato a 20mm e 30 mm si può osservare come il livello di illuminamento naturale aumenti sensibilmente, a fronte però di un'inefficienza dell'ombreggiamento della schermatura.

#### Confronto visivo del livello di illuminamento naturale

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si viene considerata anche la porzione diffusa della radiazione solare: si può facilmente notare che entrambi i sistemi garantiscono approssimativamente il medesimo livello di illuminamento, escludendo la possibilità che si verifichi abbagliamento. In queste immagini la luce viene mappata secondo una scala di colori, in modo tale da poter rendere visibile per l'occhio umano, la diversa distribuzione dell'illuminamento.

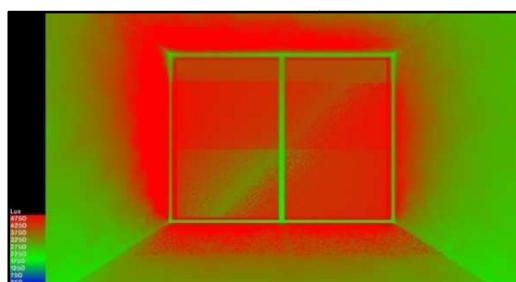


Figura 84. SunFlower System ore 13.00

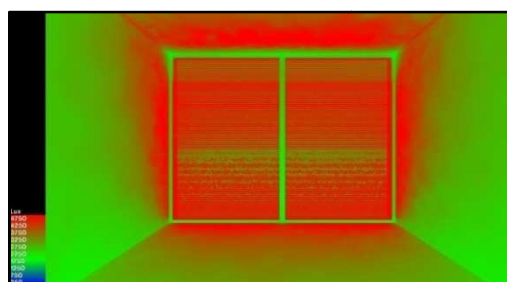


Figura 85. Okawood System ore 13.00

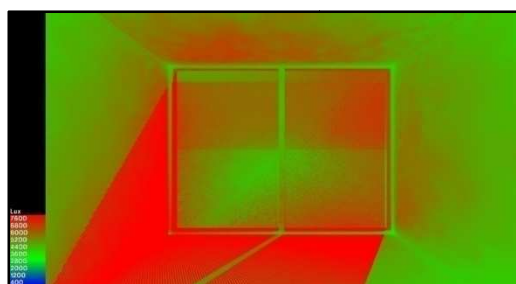


Figura 86. SunFlower System ore 15.00



Figura 87. Okawood System ore 15.00

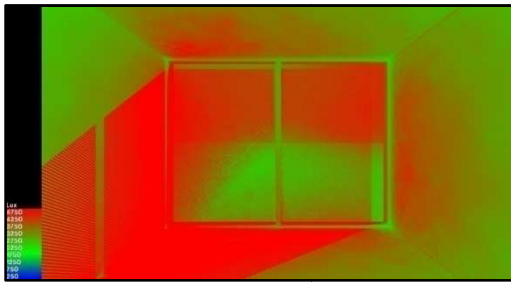


Figura 88. SunFlower System ore 17.00

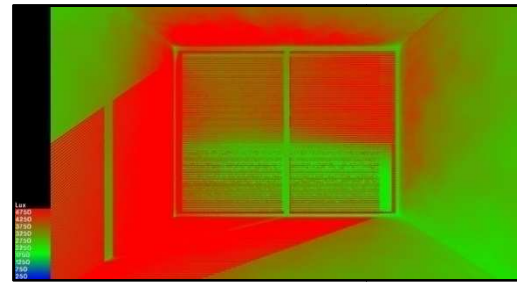


Figura 89. Okawood System ore 17.00



### III. ANALISI ANNUALE

Lo scopo di questa analisi è quella di estendere i risultati dell'analisi illuminotecnica all'intero corso dell'anno: per farlo ci siamo avvalsi dell'uso del software Daysim, il cui funzionamento è riportato nel paragrafo precedente.

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi, rappresentati graficamente, relativi solo ad alcuni sensori.

#### Sensore 1

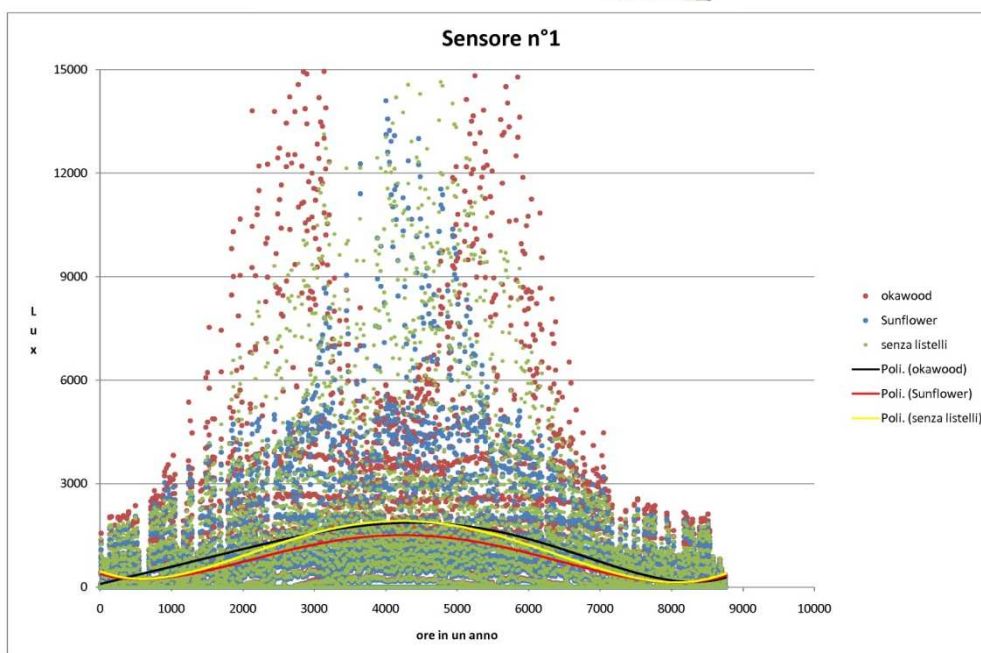
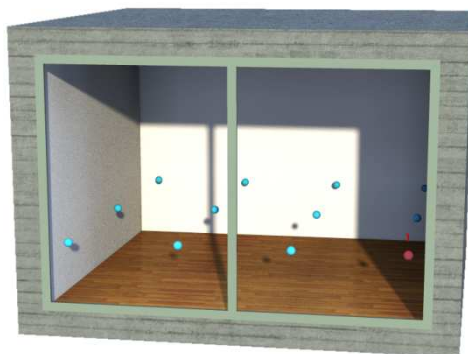


Figura 90. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 1 del tratto 3-6



Sensore 3

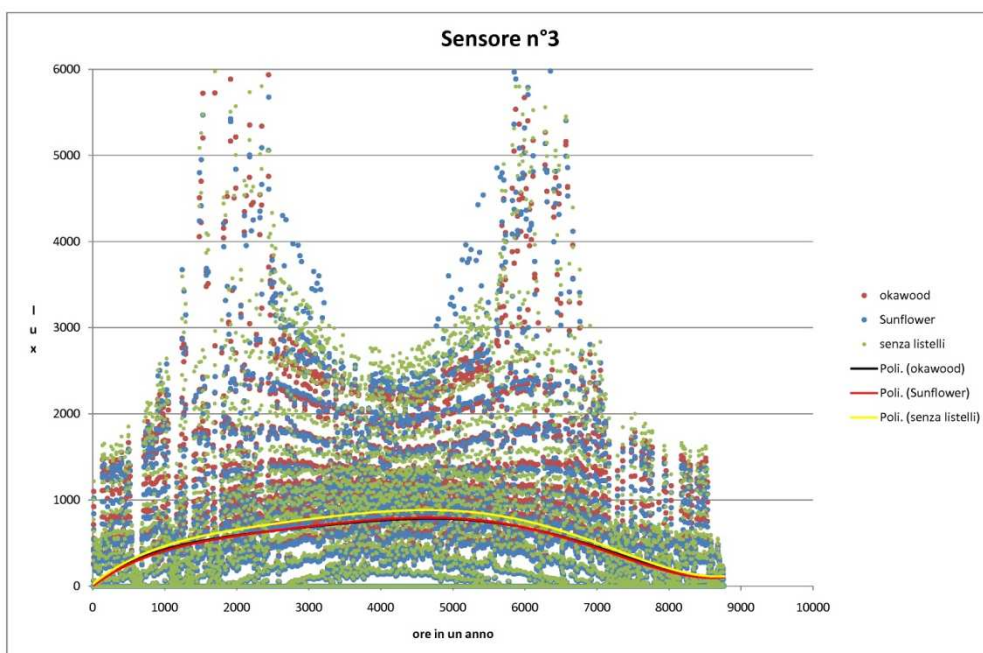
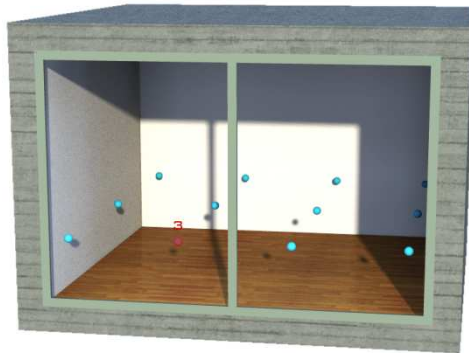


Figura 91. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 3 del tratto 3-6

Sensore 6

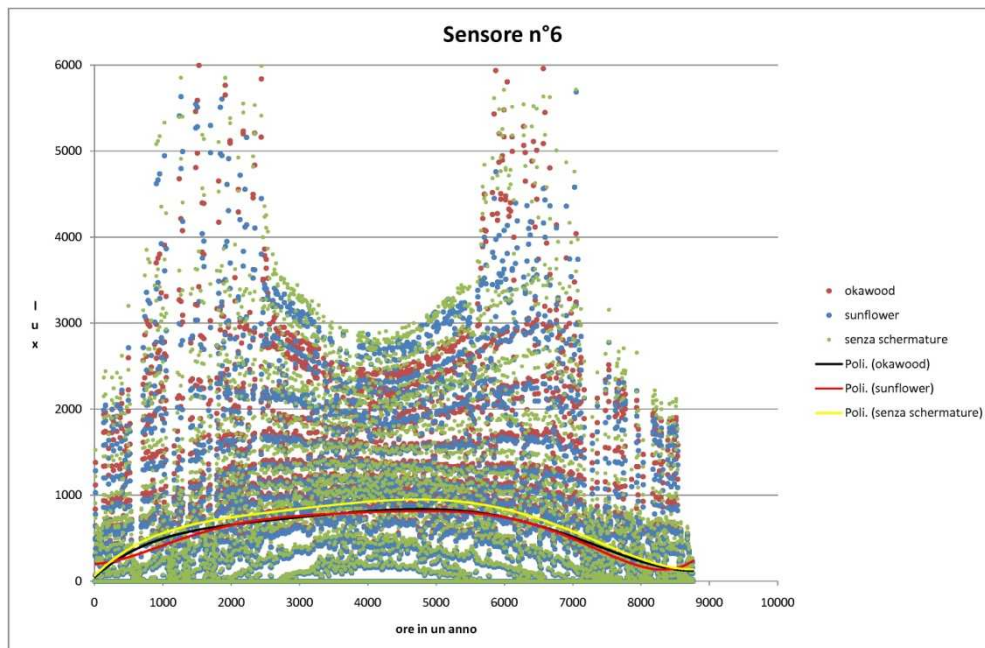
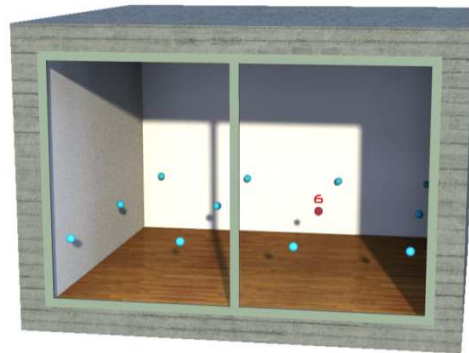


Figura 92. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 6 del tratto 3-6



Sensore 9

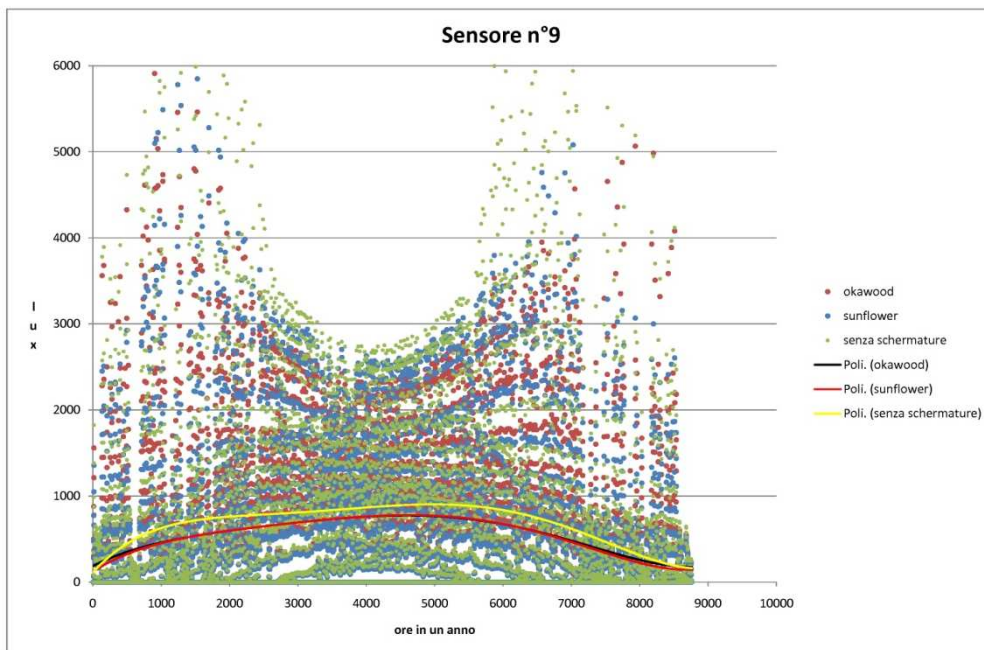
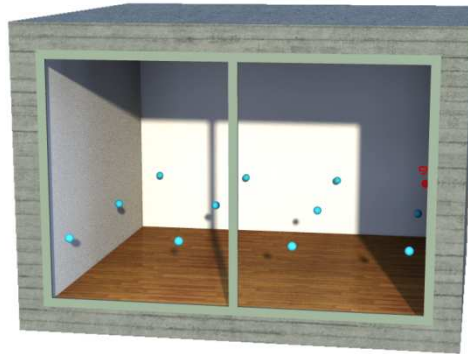


Figura 93. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 9 del tratto 3-6



Sensore 10

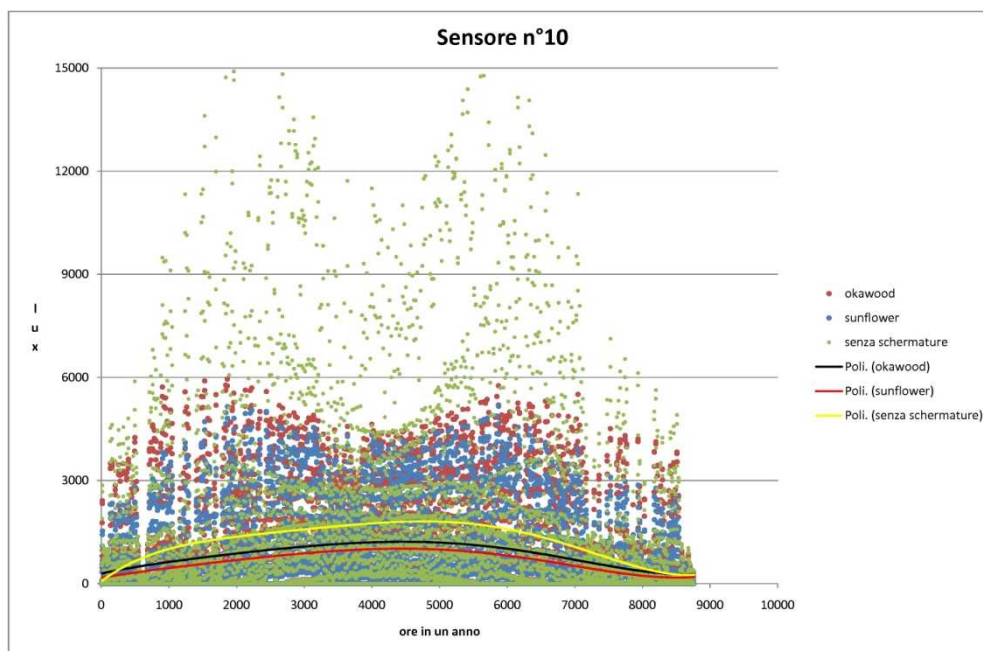
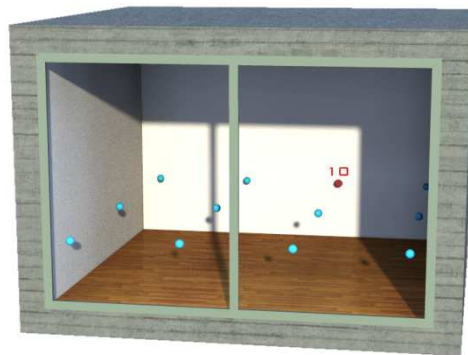


Figura 94. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 10 del tratto 3-6



#### IV. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dalle differenti analisi condotte mostrano tutte un sostanziale pareggio tra l'efficacia dei due sistemi schermanti. In particolare dalle analisi annuali riportate in precedenza, è facilmente osservabile come le linee di tendenza del sistema SunFlower e del sistema di confronto Okawood siano molto vicine o addirittura coincidono. Ciò significa che quanto era emerso dalle analisi istantanee condotte per le date del 21 Giugno e del 21 Dicembre, date in cui il sole assume altezza solare rispettivamente massima e minima, si registra anche per l'intero corso dell'anno. Per i restanti giorni dell'anno si assisterà quindi ad una performance simile di schermatura dei due sistemi.

Altro importante dato da considerare è quello del Daylight Autonomy: per il sistema SunFlower i valori ottenuti variano tra il 63% e 83%: significa quindi che per le esposizioni aventi un orientamento prossimo ai 49°, misurati da sud in senso orario, garantisce un'elevata autonomia dall'illuminazione artificiale. Risulta quindi adatto anche per essere utilizzato in edifici adibiti ad ufficio, dato che assicura un ottimo illuminamento del piano di lavoro durante l'intero corso dell'anno, determinando così un importante risparmio energetico dovuto ad un minor fabbisogno di fonti luminose, che contribuisce inoltre alla limitazione del carico termico prodotto.

**C. TRATTO 4 - 5**

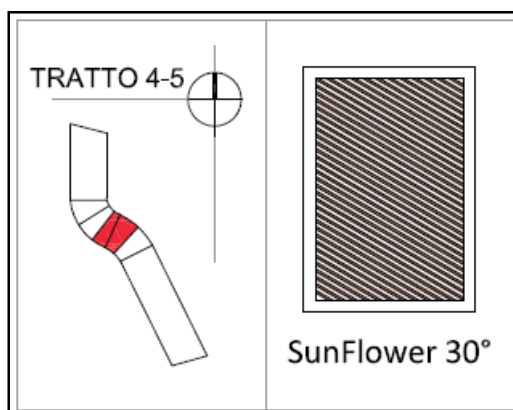


Figura 95. Individuazione del tratto 4-5 e sistema SunFlower adottato

Dati caratteristici

	$\gamma$	$\lambda$
	[°]	[°]
SunFlower	-30	30
Okawood	-30	0

Tabella 4. Angoli caratteristici delle schermature per il tratto 4-5

*I. ANALISI NUMERICA*

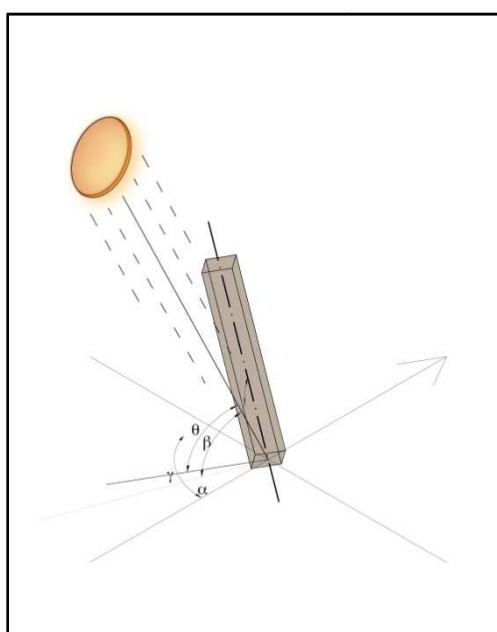


Figura 96. Angoli di riferimento del sistema sperimentale SunFlower del tratto 4-5

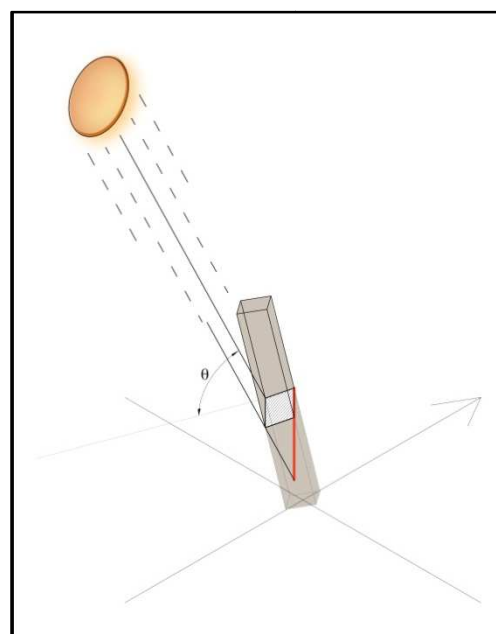


Figura 97. Ombra prodotta dal generico listello del sistema sperimentale SunFlower del tratto 4-5

Vengono di seguito riportati i grafici riassuntivi del calcolo dell'ombra prodotta da un singolo listello del tratto 4-5, sia per il sistema sperimentale SunFlower che per il sistema di confronto Okawood, relativamente alla data del 21 Giugno. Si sottolinea che l'unica grandezza variabile tra i due sistemi è l'inclinazione  $\lambda$  del listello, in quanto in precedenza si è scelto di adottare



per il sistema sperimentale SunFlower, il medesimo passo  $p$  del sistema di confronto Okawood: si determina così una dipendenza del risultato ottenuto unicamente dovuta dal parametro in analisi, che per l'appunto è l'inclinazione  $\lambda$  del listello.

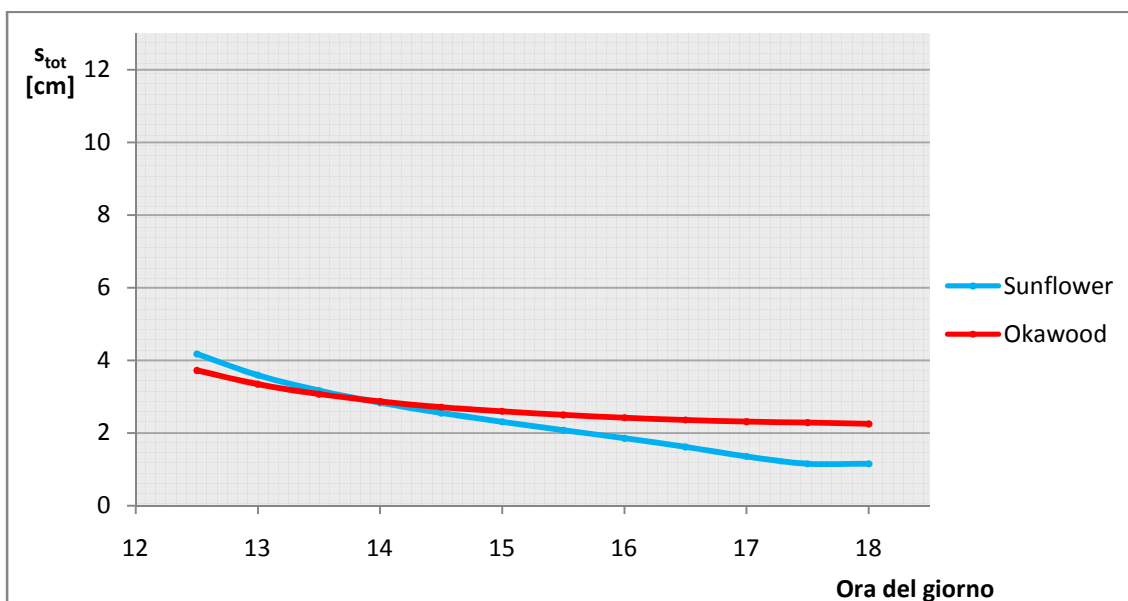


Figura 98. Andamento dell'ombra prodotta  $s_{tot}$  da un singolo listello per il tratto 4-5

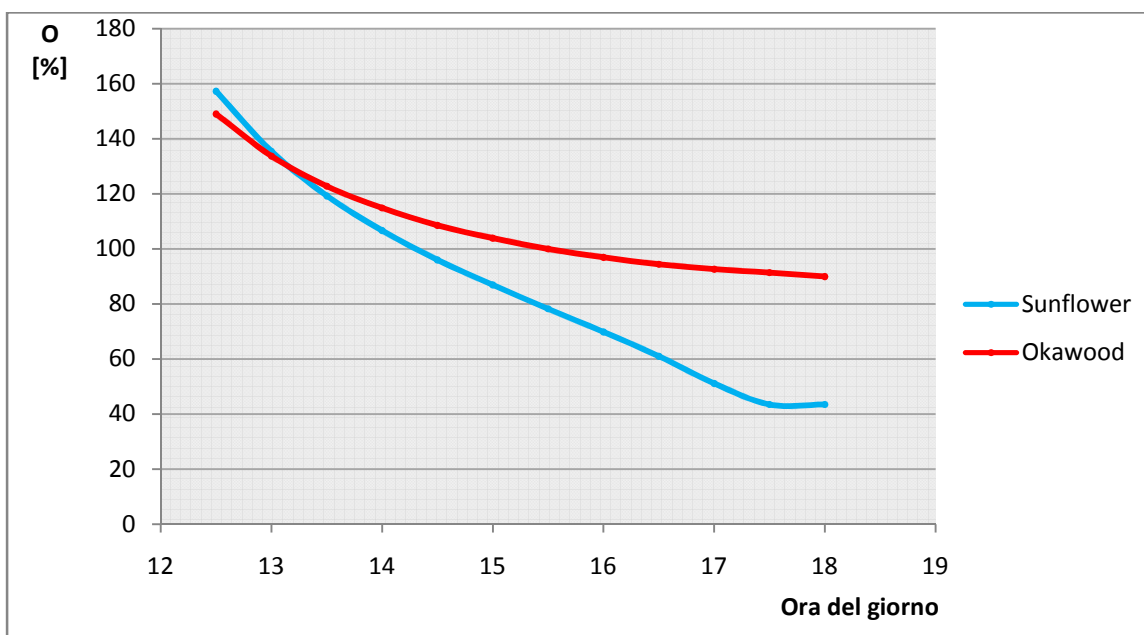


Figura 99. Andamento del grado di ombreggiamento della vetrata per il tratto 4-5

Dai grafici riportati in figura 88 e 89 si deduce una sostanziale parità della capacità di ombreggiare la superficie vetrata retrostante per i due sistemi di schermatura. In particolare si osserva che per questa esposizione il sistema di confronto Okawood assicura per più ore una copertura completa della porzione vetrata compresa tra due listelli successivi.



Confronto visivo per la sola componente di luce diretta

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si considera solamente la porzione diretta della radiazione solare: si può facilmente notare che il sistema di confronto Okawood assicura una schermatura completa della vetrata retrostante per la quasi totalità delle ore del pomeriggio.

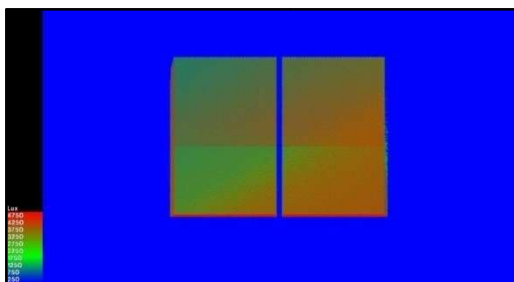


Figura 100. SunFlower System ore 13.00

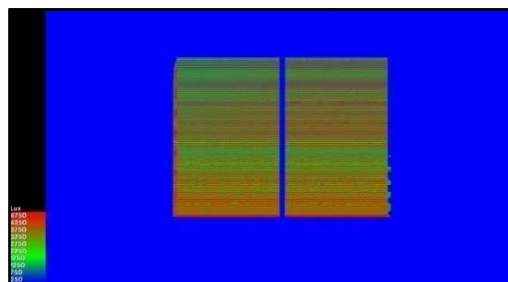


Figura 101. Okawood System ore 13.00

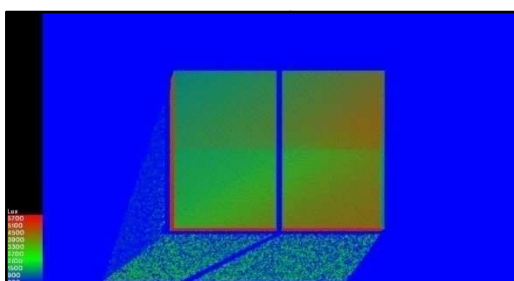


Figura 102. SunFlower System ore 14.00

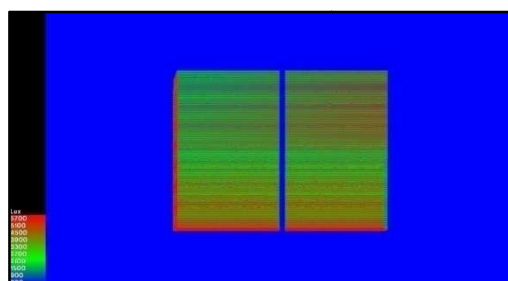


Figura 103. Okawood System ore 14.00

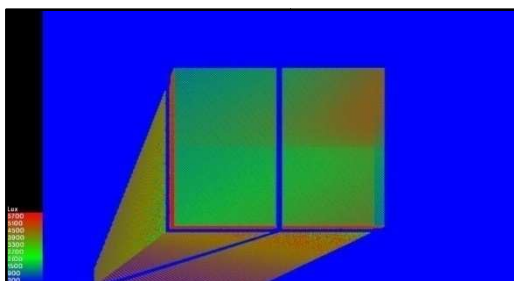


Figura 104. SunFlower System ore 15.00

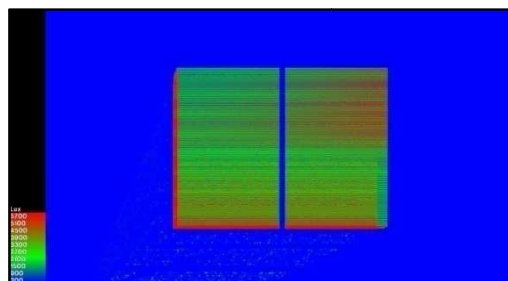


Figura 105. Okawood System ore 15.00

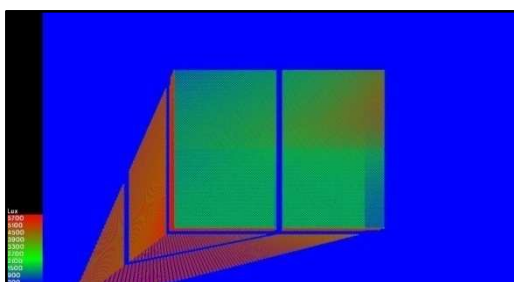


Figura 106. SunFlower System ore 16.00

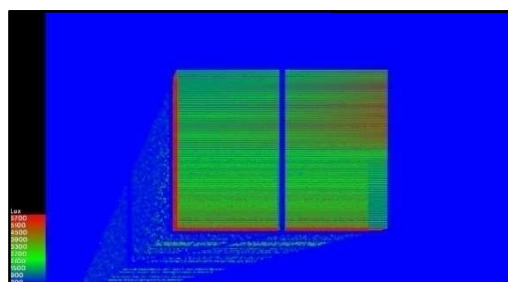


Figura 107. Okawood System ore 16.00

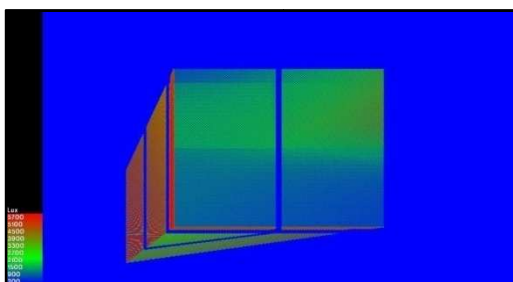


Figura 108. SunFlower System ore 17.00

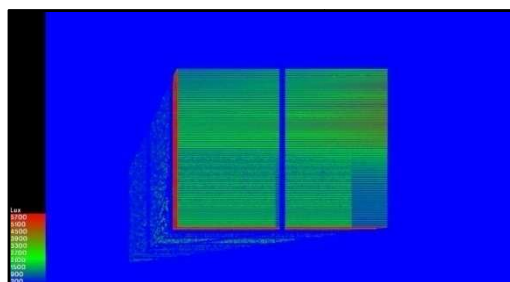


Figura 109. Okawood System ore 17.00

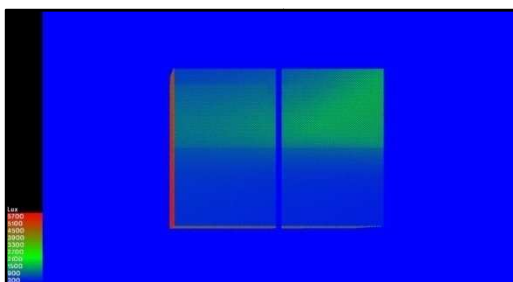


Figura 110. SunFlower System ore 18.00

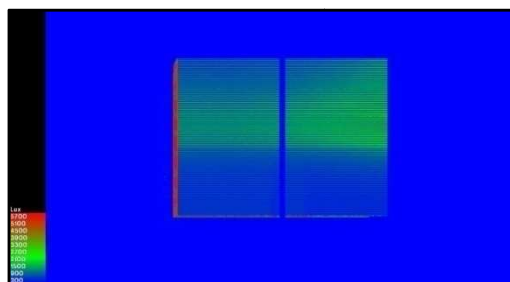


Figura 111. Okawood System ore 18.00

Analisi numerica condotta il 21 Dicembre

Questa analisi, a differenza di quella condotta per la data del 21 Giugno, ha come obiettivo la verifica della quantità di superficie compresa tra due listelli successivi esposta alla radiazione solare. Si intende quindi stimare l'efficacia della schermatura anche nella fase invernale, per la quale si ha la necessità di garantire un apporto solare dovuto dall'irraggiamento diretto della vetrata.

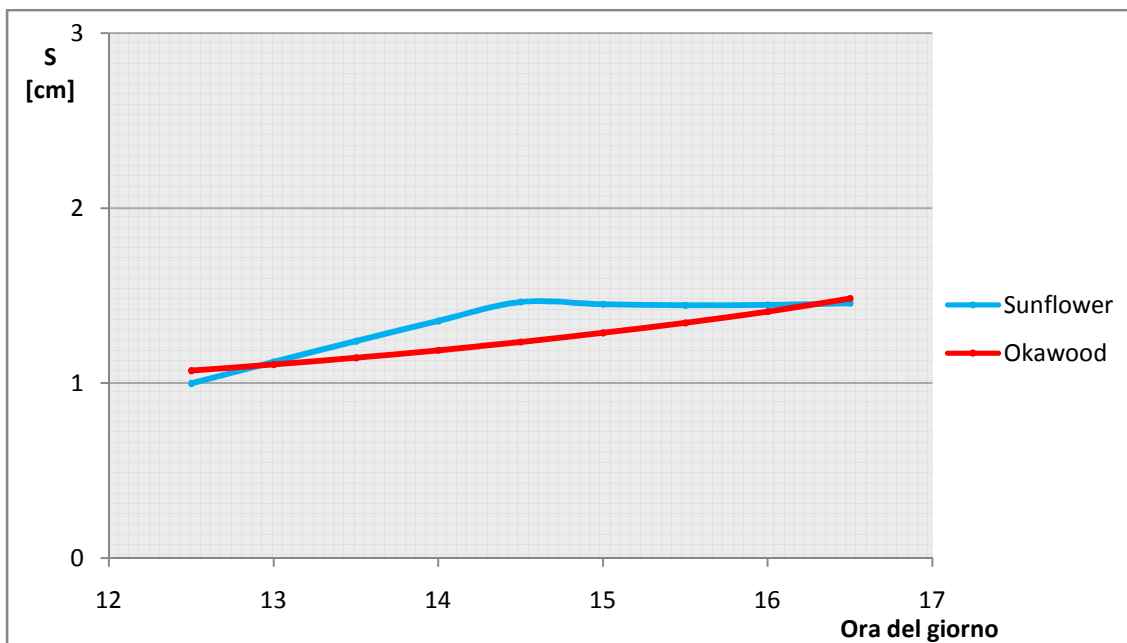


Figura 112. Andamento della quantità di superficie vetrata tra due listelli esposta al sole per il tratto 4-5

## II. ANALISI ILLUMINOTECNICA

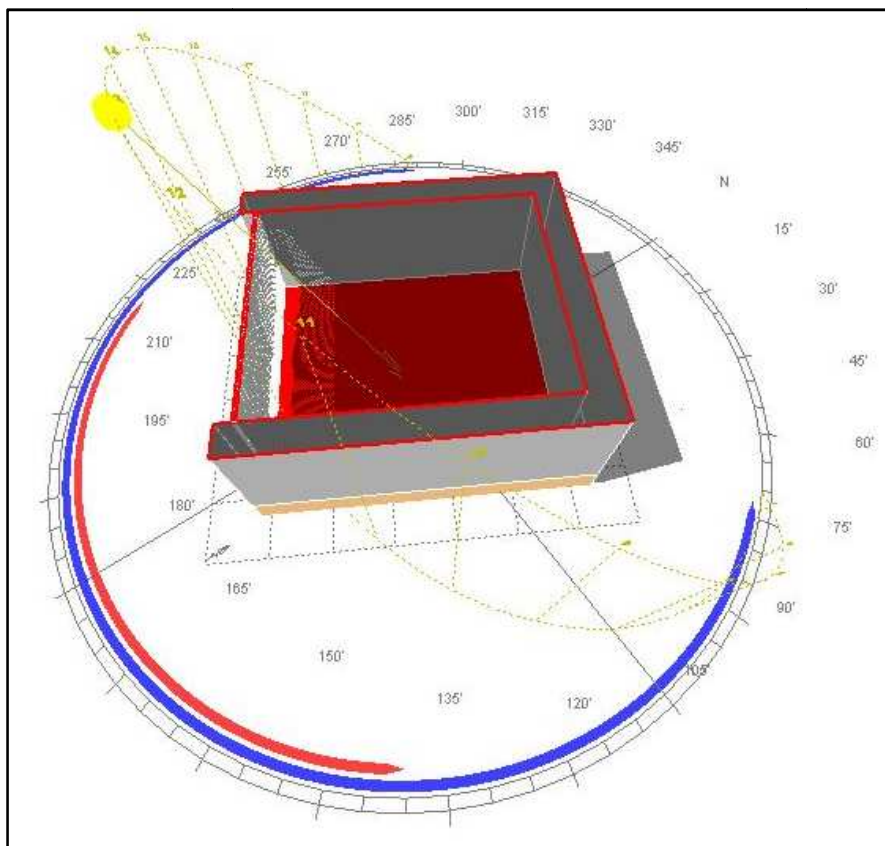


Figura 113. Inserimento del locale standardizzato nel software Ecotect

Analisi condotta con passo dei listelli di 30 mm

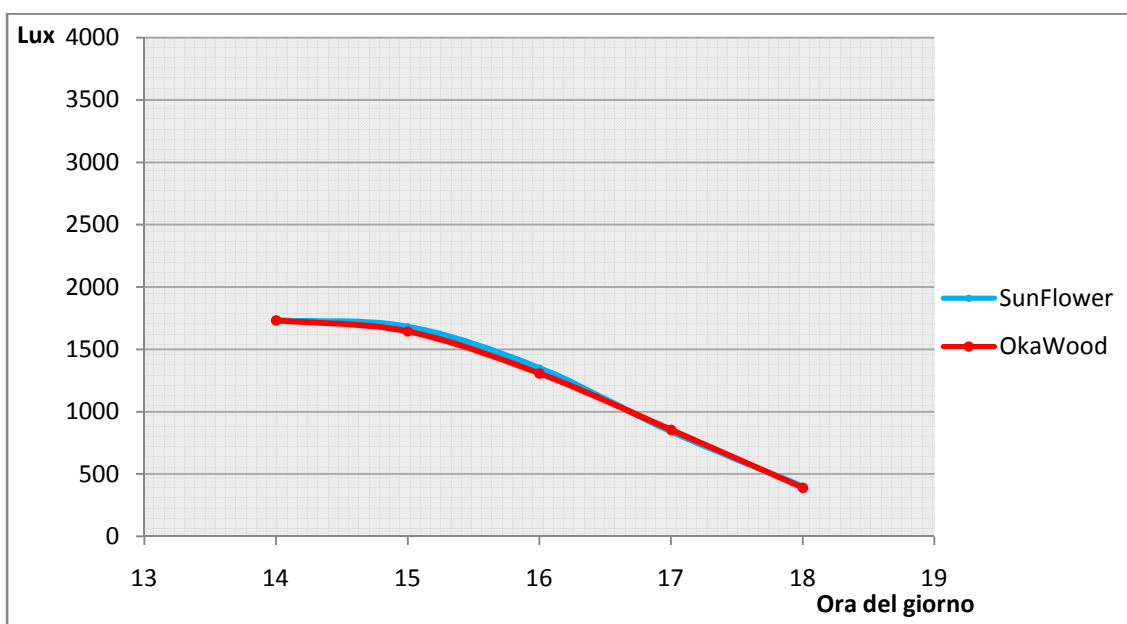


Figura 114. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 4-5 con passo di 30mm



Analisi condotta con passo dei listelli di 20 mm

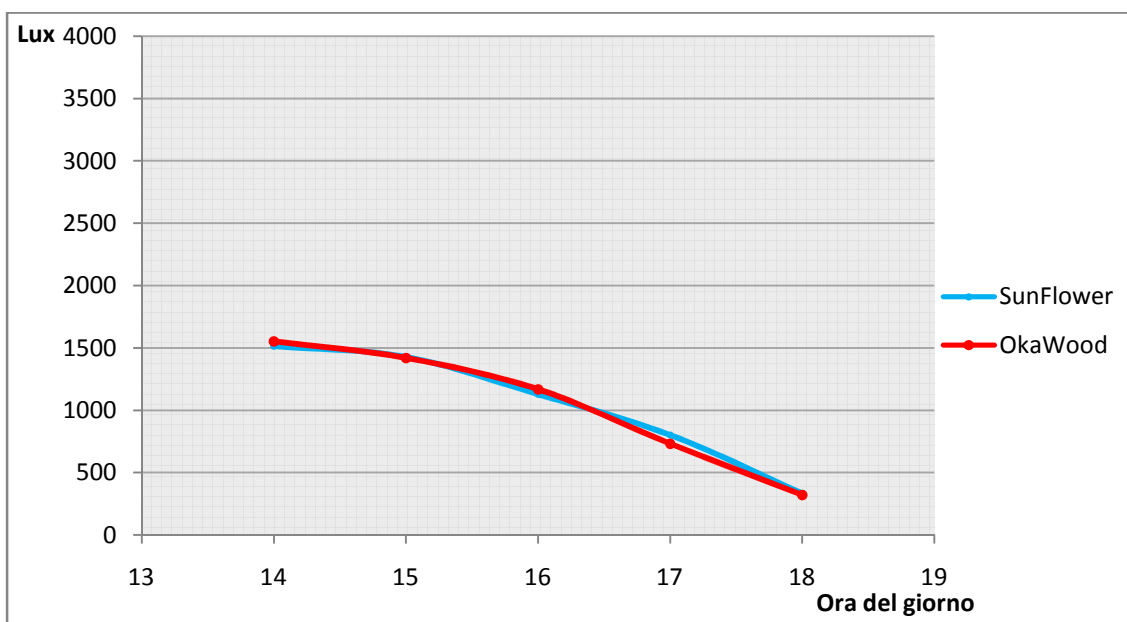


Figura 115. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 4-5 con passo di 20mm

Analisi condotta con passo dei listelli di 15 mm

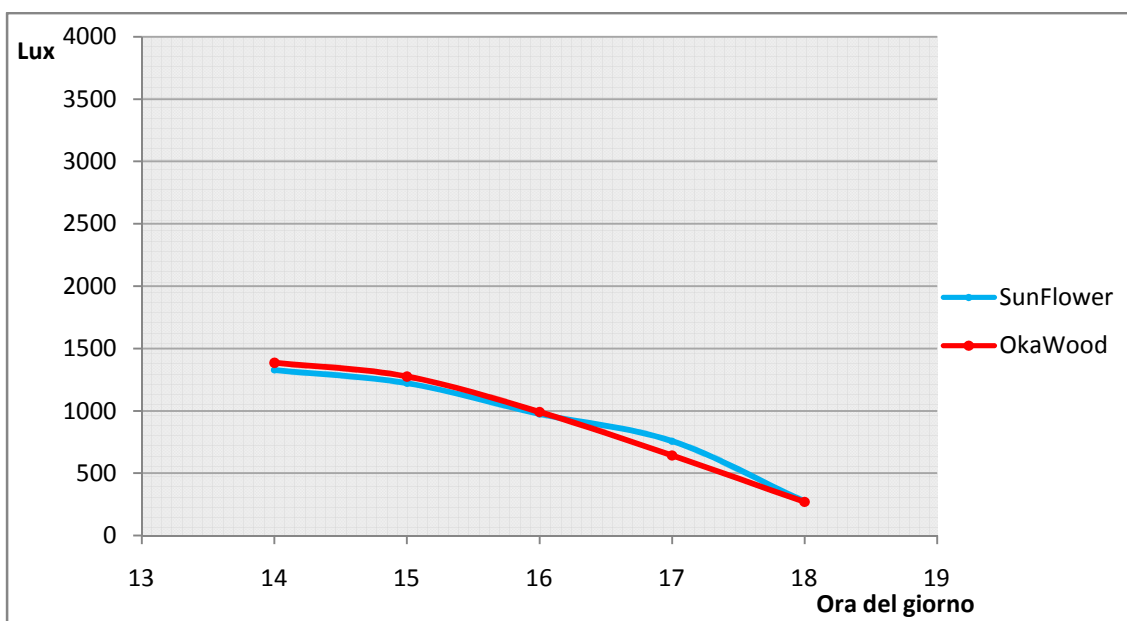


Figura 116. Illuminamento del piano di riferimento del tratto 4-5 con passo di 15mm

Dal grafico riportato in figura 113, relativo ad un passo dei listelli di 15mm, si può osservare come per entrambi i sistemi il grado di illuminamento del locale standardizzato, sul quale viene condotta l'analisi, sia il medesimo e diminuisce costantemente. Questo andamento rispecchia in pieno la geometria del sistema schermante, definita in funzione della volontà di opporsi con efficacia alla radiazione diretta delle ore centrali della giornata. A differenza dei casi analizzati in precedenza, in questo caso si verifica un costante decremento del grado di illuminamento





interno del locale standardizzato, in quanto già alle ore 13.00 il generico raggio di sole ha già passato la condizione di allineamento con la normale della vetrata.

Considerando invece le analisi effettuate sui medesimi sistemi schermanti, con passo dei listelli maggiorato a 20mm e 30 mm si può osservare come il livello di illuminamento naturale aumenti sensibilmente, a fronte però di un'inefficienza dell'ombreggiamento della schermatura.

#### Confronto visivo del livello di illuminamento naturale

Di seguito sono riportate le immagini ottenute tramite comando false colour del software Radiance, per le quali si viene considerata anche la porzione diffusa della radiazione solare: si può facilmente notare che alle ore 15.00 il sistema sperimentale SunFlower determina un maggior illuminamento, con il rischio che si verifichi abbagliamento. In queste immagini la luce viene mappata secondo una scala di colori, in modo tale da poter rendere visibile per l'occhio umano, la diversa distribuzione dell'illuminamento.

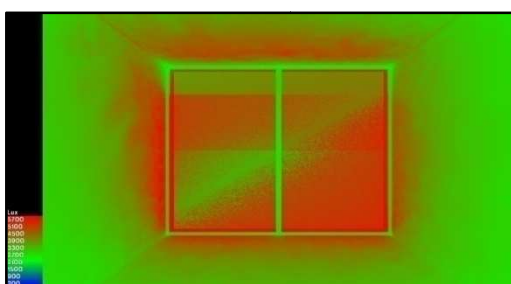


Figura 117. SunFlower System ore 13.00

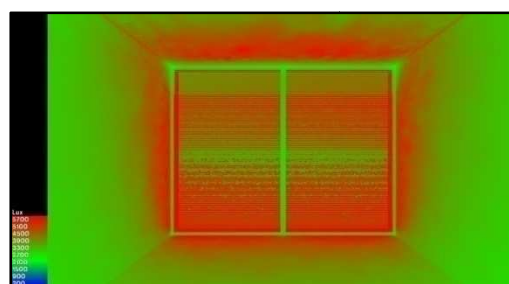


Figura 118. Okawood System ore 13.00

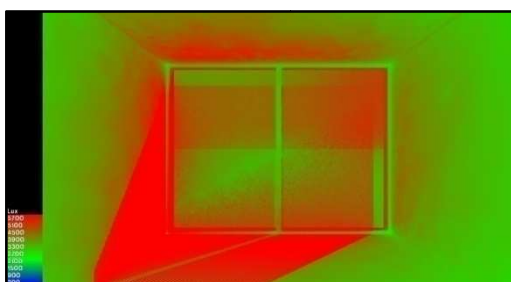


Figura 119. SunFlower System ore 15.00

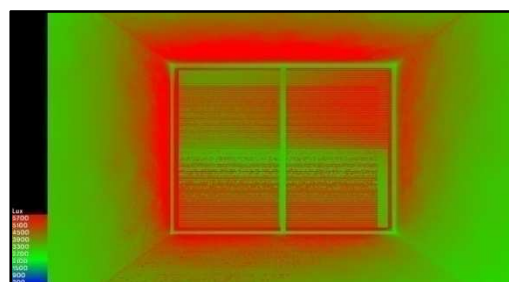


Figura 120. Okawood System ore 15.00

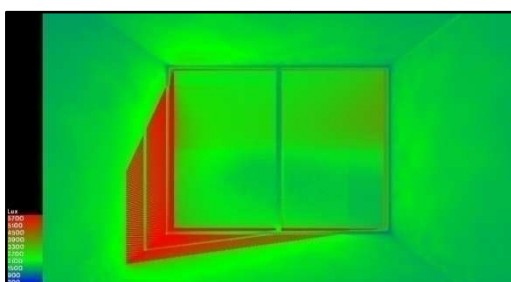


Figura 121. SunFlower System ore 17.00

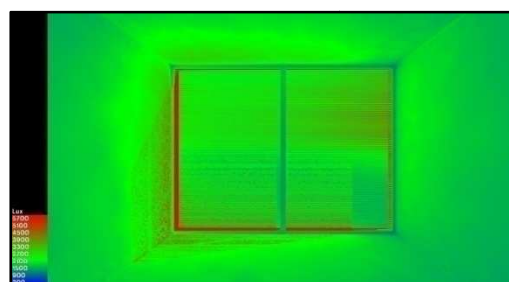


Figura 122. Okawood System ore 17.00

### III. ANALISI ANNUALE

Lo scopo di questa analisi è quella di estendere i risultati dell'analisi illuminotecnica all'intero corso dell'anno: per farlo ci siamo avvalsi dell'uso del software Daysim, il cui funzionamento è riportato nel paragrafo precedente.

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi, rappresentati graficamente, relativi solo ad alcuni sensori.

#### Sensore 1

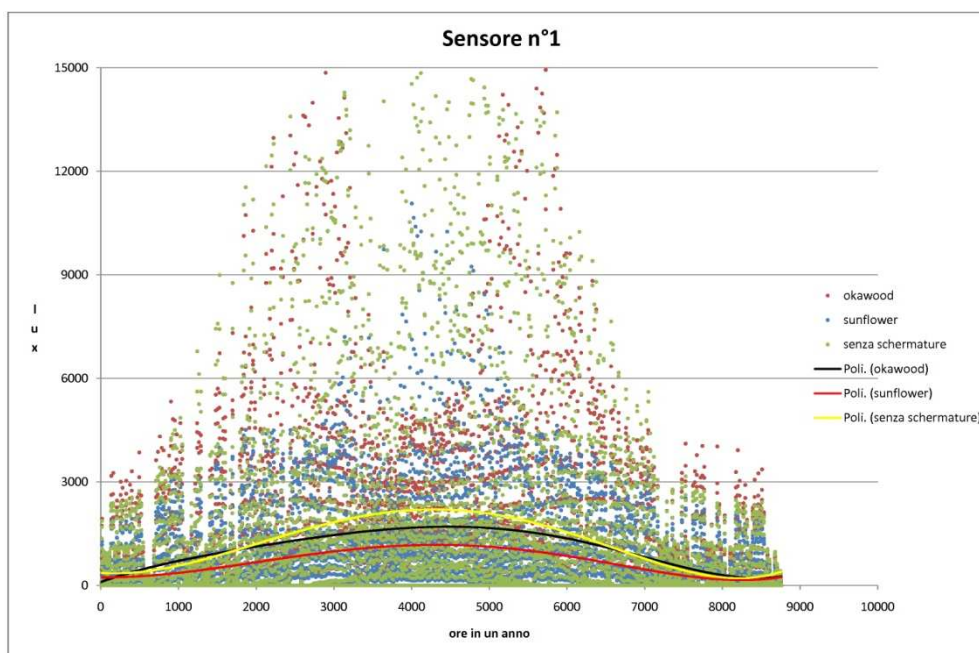
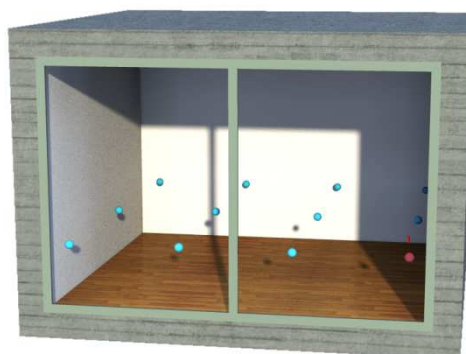


Figura 123. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 1 del tratto 4-5



Sensore 3

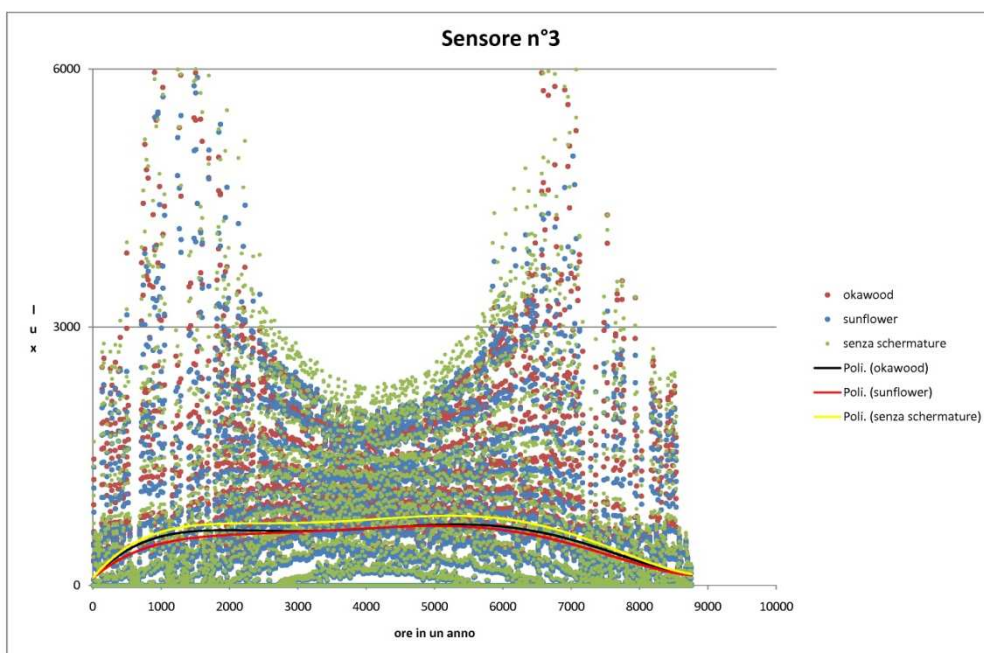
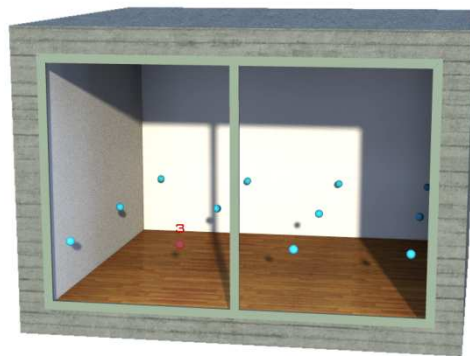


Figura 124. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 3 del tratto 4-5



Sensore 5

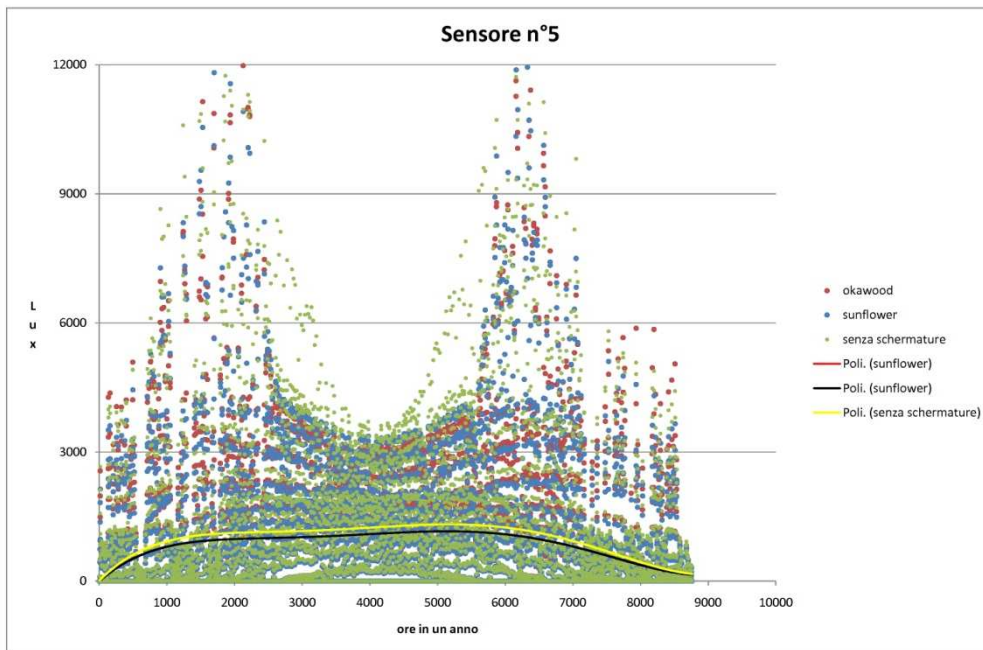
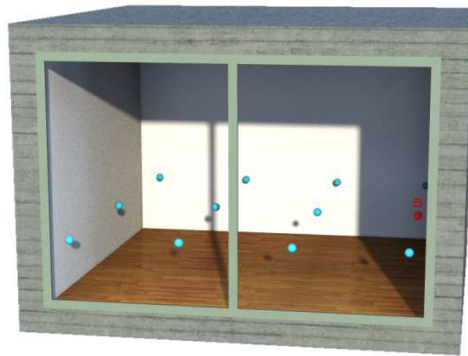


Figura 125. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 5 del tratto 4-5

Sensore 7

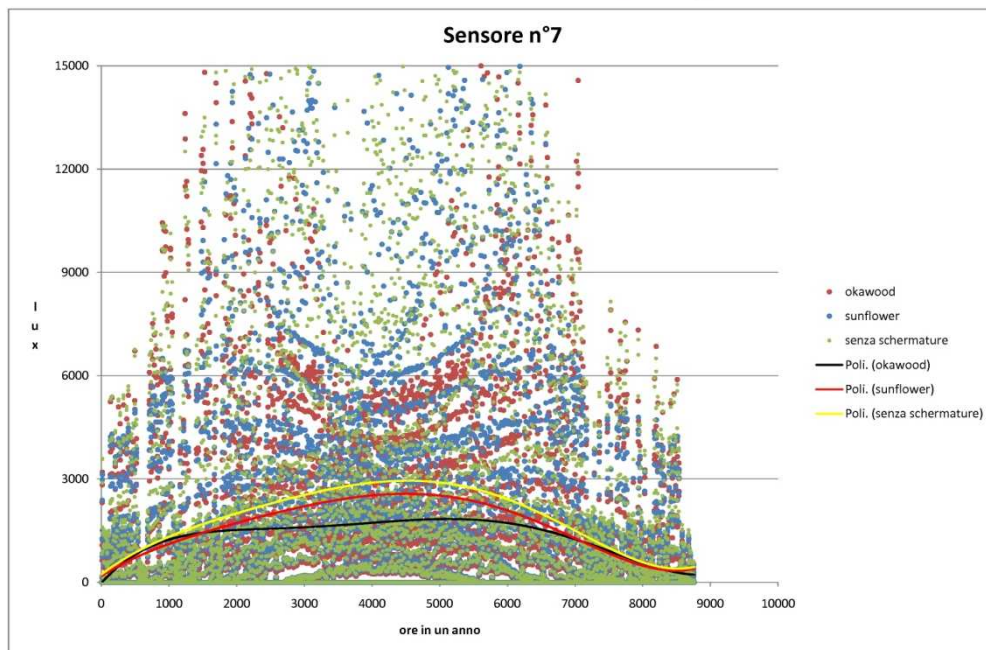
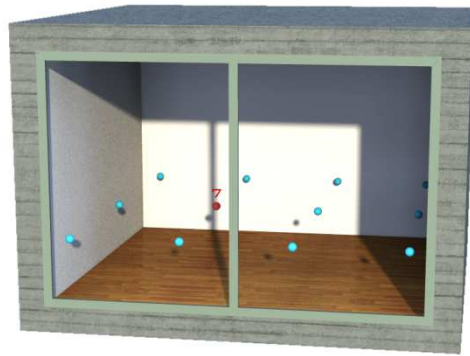


Figura 126. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 7 del tratto 4-5



Sensore 10

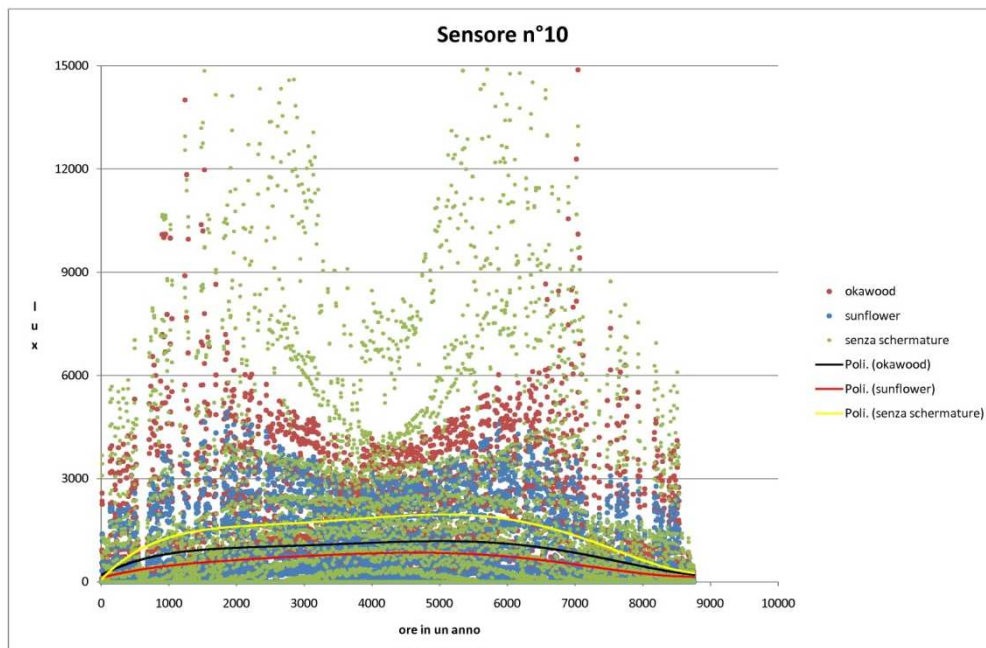
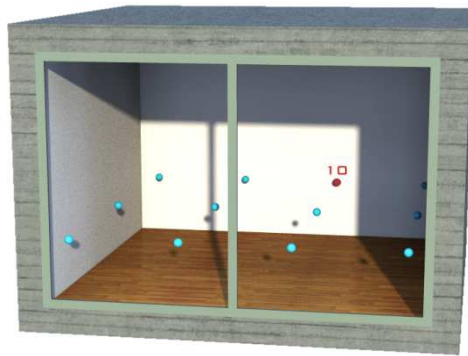


Figura 127. Andamento annuale dell'illuminazione naturale per il sensore 10 del tratto 4-5



---

#### IV. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dalle differenti analisi condotte mostrano tutte un sostanziale pareggio tra l'efficacia dei due sistemi schermanti. In particolare dalle analisi annuali riportate in precedenza, è facilmente osservabile come le linee di tendenza del sistema SunFlower e del sistema di confronto Okawood siano molto vicine o addirittura coincidono. Ciò significa che quanto era emerso dalle analisi istantanee condotte per le date del 21 Giugno e del 21 Dicembre, date in cui il sole assume altezza solare rispettivamente massima e minima, si registra anche per l'intero corso dell'anno. Per i restanti giorni dell'anno si assisterà quindi ad una performance simile di schermatura dei due sistemi.

Altro importante dato da considerare è quello del Daylight Autonomy: per il sistema SunFlower i valori ottenuti variano tra il 65% e 84%: significa quindi che per le esposizioni aventi un orientamento prossimo ai 30°, misurati da sud in senso orario, garantisce un'elevata autonomia dall'illuminazione artificiale. Risulta quindi adatto anche per essere utilizzato in edifici adibiti ad ufficio, dato che assicura un ottimo illuminamento del piano di lavoro durante l'intero corso dell'anno, determinando così un importante risparmio energetico dovuto ad un minor fabbisogno di fonti luminose, che contribuisce inoltre alla limitazione del carico termico prodotto.



## 7. CONCLUSIONI

A conclusione del nostro studio possiamo dimostrare la bontà del sistema sperimentale SunFlower tramite i risultati ottenuti dalle analisi condotte: in particolare si evidenzia la maggior efficacia del sistema SunFlower nella variante con inclinazione dei listelli  $\lambda=60^\circ$ , relativa al tratto 2-7, avente come esposizione media  $\gamma=71^\circ$ . Come è postulato all'inizio del paragrafo, si vuole valutare l'efficienza del sistema schermante sia per la fase estiva che per quella invernale, per le quali si dovranno rispettivamente garantire un alto grado di ombreggiamento della vetrata retrostante ed un basso valore di ombra portata sulla porzione di vetro compresa tra due listelli successivi.

Nonostante la progettazione della schermatura sia ruotata principalmente attorno alla necessità di garantire un ombreggiamento estivo alla chiusura trasparente, i risultati hanno dimostrato che anche nella fase invernale, e questo si verifica soprattutto per le varianti del sistema SunFlower con inclinazioni dei listelli  $\lambda$  pari a  $30^\circ$  e  $45^\circ$ , vengono assicurati dei valori di soleggiamento della vetrata tali da determinare degli apporti solari gratuiti eccellenti.

Si deve inoltre precisare che tutte le analisi effettuate non sono state convalidate da risultati ottenuti da test di laboratorio su prototipi della schermatura stessa. Al fine di certificare definitivamente questi risultati, ci si riserva la possibilità di poter effettuare sperimentalmente delle ulteriori controanalisi tramite apposite apparecchiature.

Ulteriori sviluppi dello studio riguardano la possibilità di prevedere un sistema schermante realizzato da listelli aventi sezione triangolare, in modo tale da assicurarne le medesime prestazioni a vantaggio di un notevole aumento della visibilità verso l'esterno. Si segnala inoltre la possibilità di determinare l'inclinazione  $\lambda$  dei listelli, considerando oltre all'orientamento della chiusura trasparente che sono chiamati ad asservire, la posizione che il sole durante il suo moto apparente occupa nella volta celeste durante l'arco della giornata.