

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA E
TELECOMUNICAZIONI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE

**VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI
BARRIERE FRANGISOLE MEDIANTE
SIMULAZIONI RAY-TRACING DI
INTENSITÀ SOLARE**

Elaborato in
PROPAGAZIONE E PIANIFICAZIONE NEI SISTEMI D'AREA LM

Relatore
Prof. Ing. VITTORIO DEGLI ESPOSTI

Presentata da
DARIO ESPOSITO

Correlatore
Dott. ENRICO MARIA VITUCCI

Sessione seconda
Anno Accademico 2011/2012

INDICE

<i>Indice</i>	3
1. Introduzione	5
2. La radiazione solare e le sue interazioni con i manufatti	6
2.1 La radiazione solare	6
2.2 Interazioni della radiazione solare con i manufatti	8
2.2.1 Riflessione speculare	8
2.2.2 Riflessione diffusa	9
2.2.3 Albedo	10
2.2.4 Assorbimento	11
2.3 Fenomeni dovuti all'interazione della radiazione solare con i manufatti urbani	11
2.3.1 Effetto isola di calore urbana.....	11
2.3.2 Effetto energy sink nelle finestre.....	12
3. Barriere frangisole	14
3.1 Tipologie di barriere disponibili in commercio	14
3.1.1 Dimensione e forma delle lamelle	15
3.1.2 Angolo d'inclinazione delle lamelle.....	15
3.1.2 Disposizione delle barriere	16
3.2 Criteri di controllo	16
4. Ray Tracing	18
4.1 Generalità sul ray tracing	18
4.2 L'algoritmo impiegato: 3dscat	19

4.2 Un'applicazione di 3DSCAT: lo studio dell'isola di calore urbana.....	20
5. Descrizione del comportamento di una barriera frangisole tramite look-up table	22
5.1 Descrizione dello scenario	23
5.2 Parametri della simulazione	24
5.3 Esecuzione della simulazione.....	25
5.4 I risultati	25
6. Valutazione dell'efficacia delle barriere frangisole	28
6.1 Descrizione dello scenario.....	28
6.2 Descrizione della simulazione.....	29
6.3 Risultati energetici della simulazione	31
6.4 Risultati economici della simulazione.....	34
7. Misure sperimentali del comportamento di una barriera frangisole.....	38
7.1 Descrizione del set-up delle misure.....	38
7.2 Caratterizzazione della fotoresistenza.....	40
8. Conclusioni	42
Bibliografia e Ringraziamenti.....	43

1. INTRODUZIONE

La necessità di contenere il continuo aumento dei consumi energetici è sempre più sentita nella società odierna. Il problema della scarsità delle risorse e delle conseguenze sull'ambiente dei sempre maggiori consumi rende necessaria l'adozione di accorgimenti per favorire il risparmio energetico.

Negli ultimi anni il consumo di energia per il condizionamento degli edifici nei mesi estivi è diventato una delle voci più rilevanti nell'uso globale dell'energia, tanto è vero che, al contrario di ciò che avveniva in passato, negli ultimi anni il picco di consumo energetico a livello nazionale non si ha più nei mesi invernali ma in quelli estivi. Si intuisce quindi come l'adozione di accorgimenti per limitare i consumi per condizionamento possa contribuire decisamente all'abbattimento dei consumi energetici.

Questo studio prende in esame una delle possibili strategie volte a ridurre la necessità d'uso dei climatizzatori, ossia l'impiego di barriere frangisole alle finestre per limitare il flusso di potenza entrante all'interno degli edifici dovuto alla radiazione solare, consentendo quindi una riduzione delle temperature interne.

Nel seguito verranno analizzate le caratteristiche della radiazione solare e le sue interazioni con i manufatti. Verranno esaminate le diverse tipologie di barriere frangisole disponibili sul mercato, distinguendo in particolare i casi di barriere frangisole fisse e a inclinazione variabile. Si valuteranno poi le proprietà di attenuazione della radiazione solare delle diverse barriere. Infine si valuteranno i benefici ottenibili dalle diverse tipologie di barriere in termini riduzione della potenza entrante dalle finestre, tenendo anche conto degli effetti negativi dovuti alla riduzione della potenza entrante anche nei mesi invernali, durante i quali il contributo di riscaldamento dovuto alla radiazione solare è altresì benvenuto.

2. LA RADIAZIONE SOLARE E LE SUE INTERAZIONI CON I MANUFATTI

2.1 LA RADIAZIONE SOLARE

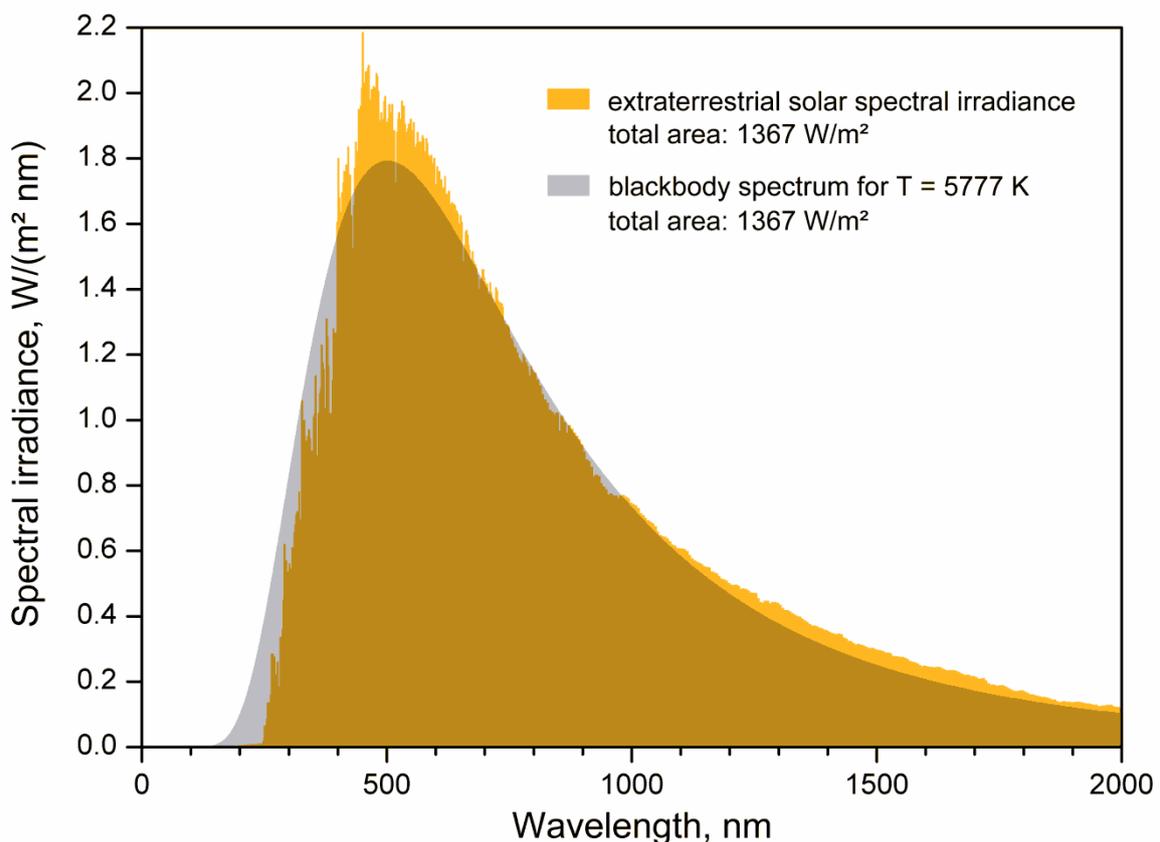


Figura 2. 1 Confronto fra lo spettro della radiazione solare al appena fuori dell'atmosfera e lo spettro di corpo nero a 5777 K [Wikipedia].

Il sole emette radiazione elettromagnetica in accordo con la legge di Stefan-Boltzmann, con andamento spettrale dato dalla legge della radiazione di corpo nero di Planck.

In realtà sole è solo approssimativamente rappresentabile come un corpo nero, in quanto in tutti i corpi reali l'andamento spettrale della radiazione emessa si discosta da quello del corpo nero, che rappresenta un caso teorico. La radiazione solare all'esterno dell'atmosfera terrestre comunque è ben modellata dallo spettro di un corpo nero a una temperatura di 5777 K.

Nell'alta atmosfera la radiazione solare, rispetto a una superficie ortogonale alla direzione di arrivo dei raggi, possiede una densità di potenza variabile fra i 1366 W/m² all'inizio di luglio e i 1412 W/m² all'inizio di gennaio [NASA] a causa della diversa distanza Terra-Sole che si ha in questi due diversi periodi dell'anno. La radiazione solare che giunge al suolo ha una densità di potenza minore (alle latitudini italiane d'estate in condizioni di cielo limpido il valore tipico è di circa 1000 W/m² [ARPA Friuli]) poiché essa, in generale, non giunge ortogonale al suolo. Inoltre essa subisce diverse interazioni nell'attraversamento dell'atmosfera terrestre. Tali interazioni oltretutto ne variano la composizione spettrale.

Tra le interazioni più rilevanti vi sono:

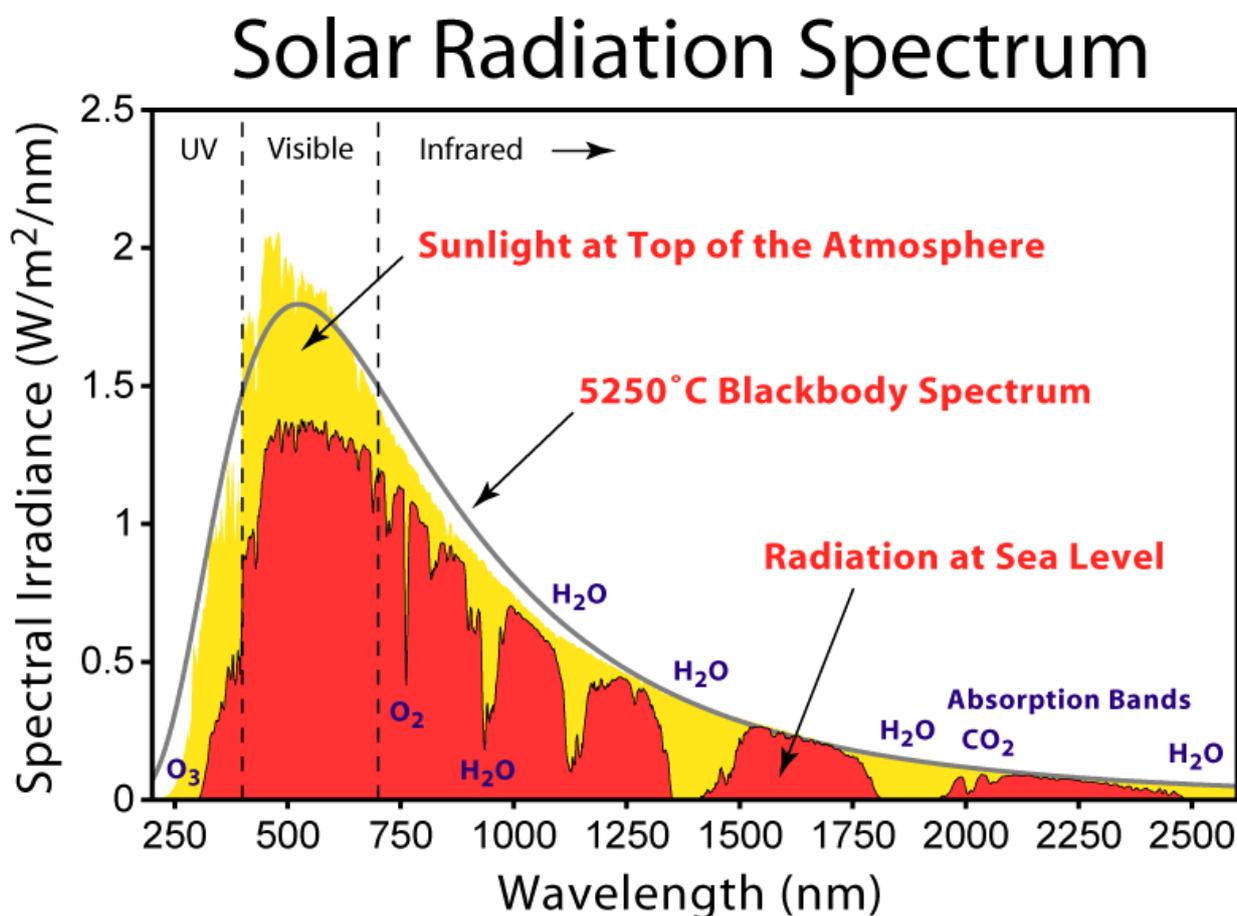
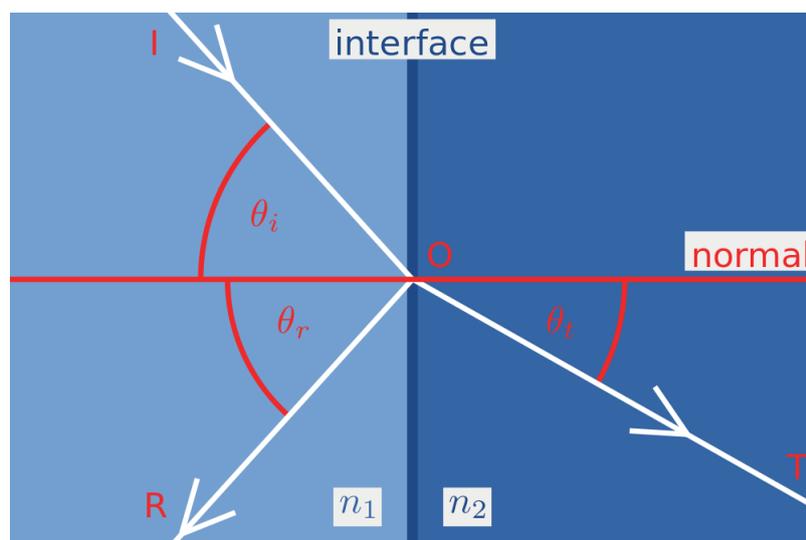


Figura 2.2 - Confronto tra la radiazione solare all'esterno dell'atmosfera e a livello del suolo

- La riflessione operata dall'atmosfera terrestre, che in condizioni di cielo limpido è pari al 3% della potenza incidente [Hu & White, 1983];
- L'assorbimento da parte dei gas costituenti l'atmosfera terrestre (in particolare ossigeno, ozono, anidride carbonica, vapore acqueo, ...) di alcune porzioni dello spettro, che assorbono il 18% della potenza [Hu & White, 1983];
- Lo scattering, o diffusione, operato dall'atmosfera terrestre, che, in condizioni di cielo limpido, riguarda il 7% della potenza incidente [Hu & White, 1983] ed è responsabile del colore azzurro del cielo.

2.2 INTERAZIONI DELLA RADIAZIONE SOLARE CON I MANUFATTI

2.2.1 RIFLESSIONE SPECULARE



$$\Theta_I = \Theta_R$$

$$n_1 \sin(\Theta_I) = n_2 \sin(\Theta_T)$$

Legge di Snell

Figura 2.3 - Riflessione e rifrazione a un'interfaccia [Wikipedia].

In presenza di un'interfaccia perfettamente piana fra due materiali, con un diverso valore dell'indice di rifrazione, un'onda, supposta piana, incidente all'interfaccia fra i due materiali viene in parte riflessa specularmente secondo la legge di Snell [Ulaby et al., 1981] e continua a propagarsi nel mezzo d'origine, mentre la rimanente frazione si propaga nel secondo mezzo (si parla di potenza trasmessa o rifratta).

La frazione di potenza riflessa e trasmessa, così come l'angolo di rifrazione, dipende dai valori dell'indice di rifrazione nei due diversi materiali, dall'angolo d'incidenza della radiazione all'interfaccia oltre che dalla polarizzazione dell'onda rispetto al piano dell'interfaccia. I parametri che quantificano tale fenomeno sono i coefficienti di

riflettività e di trasmittività, che rappresentano rispettivamente la frazione di potenza riflessa e trasmessa rispetto a quella incidente.

Questi parametri dipendono fondamentalmente dalla polarizzazione dell'onda incidente. Tale polarizzazione può essere scissa in due componenti: polarizzazione TE (trasverso elettrico) nella quale il campo elettrico è ortogonale al piano d'incidenza (individuato dalla direzione di propagazione e dalla normale all'interfaccia), e polarizzazione TM (trasverso magnetico) nella quale il campo elettrico è parallelo al piano d'incidenza.

$$R_{TM} = \frac{P_{RIFTM}}{P_{INCTM}} = \frac{\tan^2(\Theta_I - \Theta_T)}{\tan^2(\Theta_I + \Theta_T)} \quad R_{TE} = \frac{P_{RIFTE}}{P_{INCTE}} = \frac{\sin^2(\Theta_I - \Theta_T)}{\sin^2(\Theta_I + \Theta_T)}$$

$$T_{TM} = \frac{P_{TRTM}}{P_{INCTM}} = \frac{\sin(2\Theta_I)\sin(2\Theta_T)}{\sin^2(\Theta_I + \Theta_T)\cos^2(\Theta_I - \Theta_T)} \quad T_{TE} = \frac{P_{TRTE}}{P_{INCTE}} = \frac{\sin(2\Theta_I)\sin(2\Theta_T)}{\sin^2(\Theta_I + \Theta_T)}$$

Conservazione dell'energia Conservazione dell'energia

$$R_{TM} + T_{TM} = 1 \quad R_{TE} + T_{TE} = 1$$

Studiando l'andamento dei coefficienti di riflessione si può osservare che per angoli d'incidenza molto radenti si ha il fenomeno della riflessione totale, ossia la potenza incidente all'interfaccia è interamente riflessa e non c'è onda trasmessa.

2.2.2 RIFLESSIONE DIFFUSA

La riflessione diffusa, o scattering superficiale, si verifica quando l'interfaccia fra i due materiali non è perfettamente piana, ma presenta delle irregolarità. Dato che tutti gli oggetti, anche quelli che appaiono perfettamente lisci, presentano delle irregolarità a livello macroscopico o microscopico, a rigore lo scattering è sempre presente. Tuttavia la sua entità rispetto alla riflessione diffusa dipende dal rapporto fra la lunghezza d'onda della radiazione incidente e l'ampiezza delle irregolarità della superficie. Quando le irregolarità sono molto minori della lunghezza d'onda (all'incirca un decimo o meno) [Ulaby et al., 1981], allora lo scattering è poco rilevante, e il fenomeno prevalente è la riflessione speculare (alle lunghezze d'onda del visibile è il caso delle finestre e degli specchi). Quando invece le irregolarità sono comparabili o più grandi della lunghezza d'onda è lo scattering a prevalere, è la riflessione speculare è praticamente assente (è il caso della maggior parte degli oggetti opachi alle lunghezze d'onda del visibile). Vi sono

poi situazioni intermedie, in cui entrambi i fenomeni sono rilevanti (ad esempio superfici metalliche non eccessivamente levigate).

A differenza della riflessione speculare, in quella diffusa la radiazione non viene riflessa solo nella direzione speculare rispetto a quella d'incidenza, ma in tutte le direzioni, con un pattern che dipende dalle caratteristiche delle irregolarità superficiali. Il modello maggiormente impiegato nella modellazione dello scattering superficiale è quello lambertiano, in cui l'intensità della radiazione diffusa varia proporzionalmente col coseno dell'angolo compreso tra la normale alla superficie e la direzione considerata.

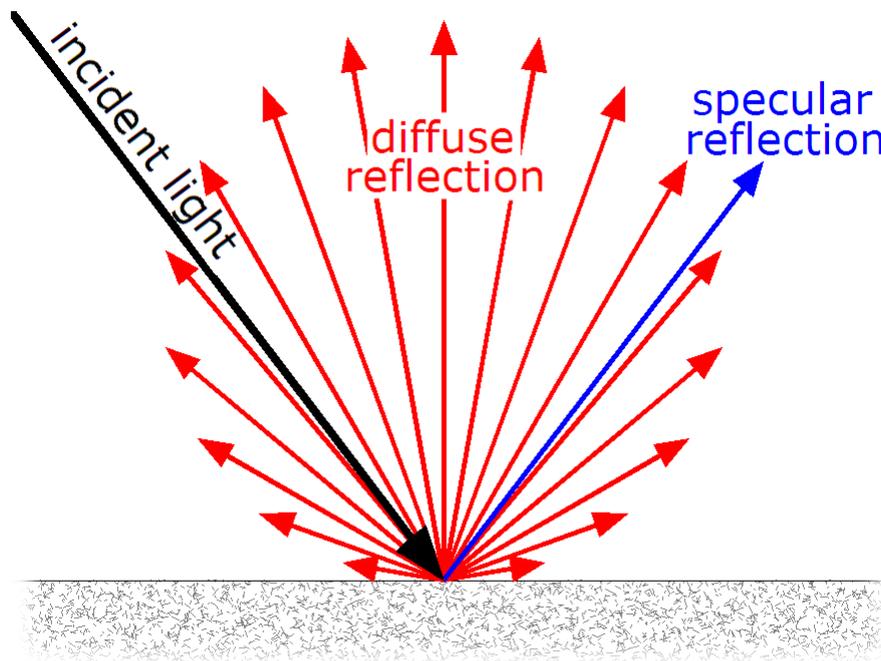


Figura 2. 4 - Diagramma polare dello scattering lambertiano [Wikipedia].

2.2.3 ALBEDO

L'albedo di una superficie è definito come il rapporto tra la densità di potenza elettromagnetica riflessa e la densità di potenza incidente sulla superficie. Si tratta di un coefficiente globale di riflessione, che tiene conto in se sia della radiazione riflessa specularmente che di quella riflessa in maniera diffusa. Se la superficie in esame presenta uno scattering molto ridotto, esso deve ricondursi a una media dei coefficienti di riflessione speculare visti in precedenza.

2.2.4 ASSORBIMENTO

In generale nell'attraversamento di un oggetto la radiazione elettromagnetica è soggetta ad assorbimento. L'entità di tale fenomeno dipende dalle proprietà del materiale alle lunghezze d'onda della radiazione, oltre che dallo spessore dello strato attraversato. Nel caso dell'interazione della radiazione solare con i manufatti urbani, si può fare una suddivisione in due casi limite: nel primo, in cui rientra la maggior parte dei manufatti, la radiazione solare è completamente assorbita, determinando un

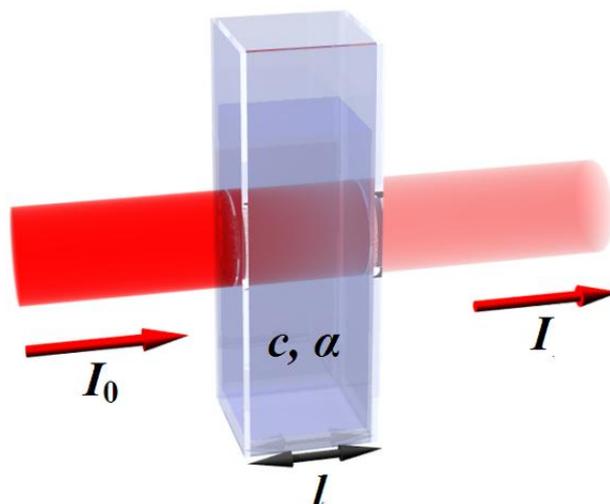


Figura 2. 5 - Assorbimento nell'attraversamento di un oggetto [Wikipedia].

riscaldamento dei manufatti stessi; nel secondo caso la radiazione solare è assorbita in minima parte, riuscendo ad attraversare quasi indenne l'oggetto in esame. Quest'ultimo è il caso del vetro, che, come noto, appare trasparente alle lunghezze d'onda della luce visibile, facendo passare circa il 90% della radiazione trasmessa nelle lunghezze d'onda del visibile. Il parametro che caratterizza questo fenomeno è la trasmittanza, definita come rapporto tra la potenza elettromagnetica uscente dall'oggetto e quella entrante (al netto della potenza persa per riflessione all'interfaccia d'ingresso della radiazione).

$$\tau = \frac{I}{I_0}$$

2.3 FENOMENI DOVUTI ALL'INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE CON I MANUFATTI URBANI

2.3.1 EFFETTO ISOLA DI CALORE URBANA

L'effetto isola di calore urbana (Urban Heat Island [Oke, 1987]) è un fenomeno presente nelle aree urbane, consistente in una maggiore temperatura dell'aria in queste ultime rispetto alle aree rurali circostanti.

Esso è dovuto alle diverse proprietà d'interazione con la radiazione solare dei materiali di cui sono costituiti i manufatti urbani rispetto alle proprietà della vegetazione e del suolo. Ciò determina un maggiore assorbimento della radiazione solare nelle aree urbane e di conseguenza un maggiore riscaldamento nelle stesse, che, soprattutto nella stagione estiva, comporta disagi alla popolazione e porta

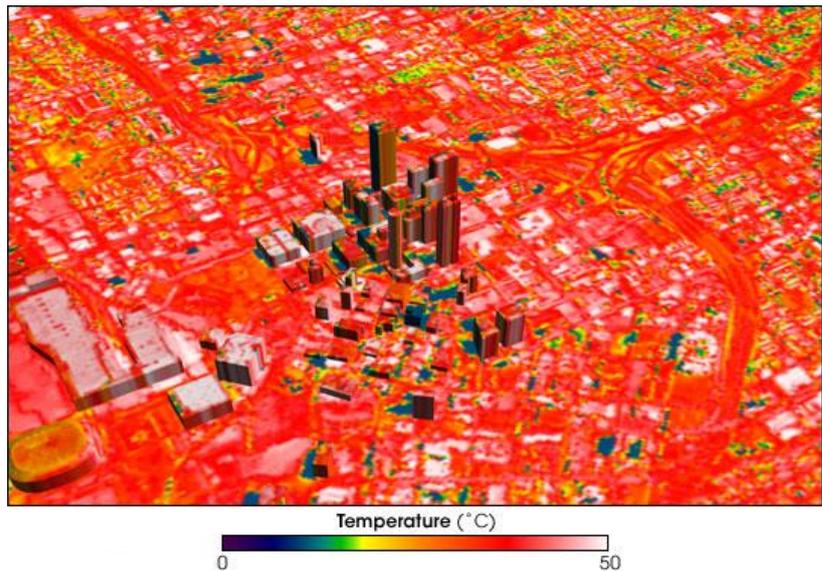


Figura 2.6 – Aumento delle temperature superficiali dei manufatti urbani causa dell'effetto isola di calore [fonte: NASA].

a un maggiore uso del condizionamento per rinfrescare l'interno degli edifici (il quale a sua volta comporta un ulteriore innalzamento della temperatura esterna, poiché i climatizzatori si limitano a spostare il calore dall'interno degli edifici all'esterno) determinando un maggior consumo energetico. Nelle aree rurali, invece, la presenza di vegetazione fa sì che le temperature siano più basse, in particolare grazie al fenomeno dell'evapotraspirazione.

Diversi studi hanno evidenziato come l'uso di materiali a elevato albedo nella realizzazione dei manufatti urbani [Akbari, 1995], al fine di ridurre l'assorbimento della radiazione solare, e la piantumazione di vegetazione, in modo da creare ombreggiamento e ridurre l'innalzamento delle temperature grazie all'evapotraspirazione, possano mitigare questo fenomeno.

2.3.2 EFFETTO ENERGY SINK NELLE FINESTRE

Le finestre sono una parte integrante di tutti gli edifici, consentendo di illuminare naturalmente gli ambienti e di permettere il ricambio d'aria, oltre che ad avere una grande valenza estetica.

Tuttavia, nei mesi estivi, esse sono anche causa di riscaldamento degli ambienti interni: l'elevata trasmittanza del vetro fa sì che la radiazione solare venga quasi interamente trasmessa all'interno dell'edificio. La potenza entrante dalla finestra viene in massima

parte assorbita dall'ambiente indoor, causandone un riscaldamento. Nei mesi invernali questo fenomeno contribuisce al necessario riscaldamento dell'edificio, consentendo un risparmio energetico, ed è quindi benvenuto, ma nei mesi estivi contribuisce ad aumentare le già elevate temperature presenti, causando disagio alle persone e portando a un maggiore uso degli impianti di condizionamento. Oltretutto questo fenomeno contribuisce all'effetto isola di calore urbana, in quanto, come detto prima, la potenza entrante dalle finestre viene quasi completamente assorbita e convertita in calore (da questo punto di vista le finestre si comportano come dei corpi neri).

Questo fenomeno può essere contrastato grazie all'uso di strumenti che permettano di controllare la radiazione entrante dalle finestre. Fra questi vi sono le barriere frangisole.

3. BARRIERE FRANGISOLE

Le barriere frangisole sono uno degli strumenti più diffusi nel controllo della luce solare. Esse consentono di ridurre la radiazione entrante attraverso le finestre, riflettendone una parte all'esterno.

Agendo sull'angolo d'inclinazione delle lamelle è possibile variare la quantità di luce entrante in funzione dell'illuminazione desiderata. In particolare, nei mesi estivi è possibile attenuare notevolmente la potenza

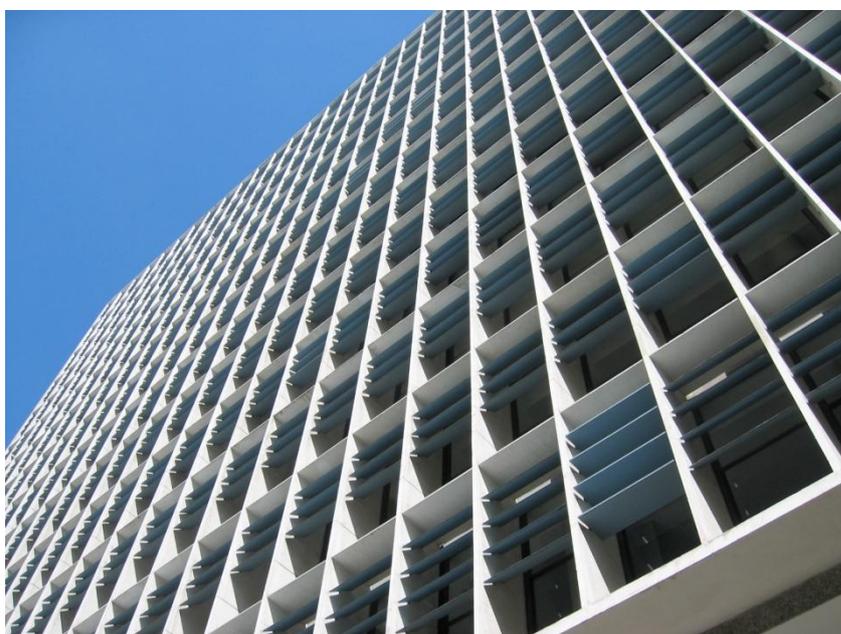


Figura 3.1 – Esempio di edificio con barriere frangisole piane alle finestre [fonte: Wikipedia].

entrante dai vetri, riducendo il riscaldamento dell'ambiente indoor. Oltretutto, considerando che la risposta dell'occhio umano nei confronti della densità di potenza della radiazione luminosa è di tipo logaritmico, se ne deduce che al fine di garantire un'adeguata illuminazione degli ambienti interni è sufficiente far passare una piccola frazione della radiazione solare, permettendo quindi di bloccarne la maggior parte.

3.1 TIPOLOGIE DI BARRIERE DISPONIBILI IN COMMERCIO

Esistono differenti tipologie di barriere frangisole, dato che vi sono diversi parametri costruttivi su cui si può agire al fine di ottenere la barriera frangisole più rispondente alle esigenze del caso.

3.1.1 DIMENSIONE E FORMA DELLE LAMELLE

Una delle caratteristiche principali di una barriera frangisole è la forma della sezione e l'altezza delle lamelle.

Tipicamente si utilizzano lamelle a sezione piana o curvilinea. Le lamelle piane dovrebbero garantire una maggiore riflessione della radiazione solare verso l'esterno, in quanto la sezione piana fa sì che nella maggior parte dei casi la traiettoria di riflessione, sia in caso di riflessione speculare che diffusa, sia diretta verso l'esterno dell'edificio. Al contrario



Figura 3.2 – Esempio di barriera frangisole di forma atipica [fonte: Wikipedia].

la sezione delle lamelle curve fa sì che in determinate situazioni siano presenti traiettorie della radiazione riflessa verso l'interno dell'edificio. In compenso la forma curva garantisce una maggior rigidità della lamella, consentendo di usare spessori minori del materiale e di avere una maggiore leggerezza. Si possono inoltre trovare anche barriere con sezioni diverse, ad esempio di forma tubolare.

La dimensione tipica della sezione delle lamelle sono 35 e 50 mm, ma sono disponibili in commercio anche barriere di dimensioni maggiori, fino anche a 360 mm.

3.1.2 ANGOLO D'INCLINAZIONE DELLE LAMELLE

Le barriere frangisole possono avere lamelle a inclinazione fissa o variabile.

Le barriere con lamelle fisse sono costruttivamente più semplici e meno costose, tuttavia in generale meno efficaci, poiché non è possibile variare l'effetto di ombreggiatura nelle diverse condizioni climatiche. In questo caso l'angolo d'inclinazione delle lamelle deve essere scelto in modo da garantire un adeguato passaggio della radiazione solare nei mesi invernali, quando l'elevazione del sole è minore, e un'adeguata attenuazione nei mesi estivi, quando l'elevazione è maggiore. Nel caso di barriere frangisole fisse è possibile anche usare diversi valori della distanza fra le singole lamelle.

Le barriere con lamelle a inclinazione variabile consentono un controllo più efficace della luce, permettendo di massimizzarne il passaggio nei mesi invernali e di minimizzarlo in quelli estivi. La necessità di permettere la rotazione delle lamelle fino a potersi chiudere

non permette di variare la distanza fra queste ultime, che è determinata dalle dimensioni delle lamelle. L'inclinazione può essere determinata in maniera manuale dall'utente oppure da un sistema di controllo automatico che, in base alle informazioni raccolte tramite dei sensori (ad esempio temperatura interna ed esterna, luminosità degli ambienti, ecc) determina l'inclinazione da adottare. Ovviamente ciò determina un maggior costo a fronte della maggior complessità del sistema.

3.1.2 DISPOSIZIONE DELLE BARRIERE

Nel caso più semplice le barriere sono disposte di fronte alle finestre a poca distanza dal vetro, con le lamelle allineate verticalmente. Esistono tuttavia anche le cosiddette pensiline frangisole, che presentano il vantaggio di non ostruire la vista dell'ambiente esterno, bloccando comunque la luce diretta del sole. In questo caso è possibile usare anche la distanza della pensilina dalla sommità della finestra e la sua sporgenza al fine di massimizzare il passaggio della radiazione solare nei mesi invernali e di minimizzarlo in quelli estivi.



Figura 3.3 – Esempio di pensilina frangisole
[fonte: Wikipedia]

3.2 CRITERI DI CONTROLLO

Al fine di massimizzare il passaggio della radiazione solare nei mesi invernali e di minimizzarlo in quelli estivi le barriere frangisole vanno orientate in maniera opportuna. Nel caso in cui le barriere abbiano la possibilità di variare la propria inclinazione si ha la massima flessibilità d'impiego: per massimizzare la trasmissione della radiazione solare si devono orientare le barriere in modo che esse siano parallele alla direzione di arrivo dei raggi solari (in pratica si minimizza la radar cross section attraverso cui sono viste dal sole). Viceversa, per ottenere il massimo effetto di ombreggiamento bisogna porle in modo che siano ortogonali alla direzione d'arrivo dei raggi solari (si massimizza la radar cross section).

Si potrebbe obiettare riguardo al bloccare quasi interamente la luce solare affermando che questo comporterebbe una scarsa luminosità degli ambienti, portando a un maggior uso dell'illuminazione artificiale; tuttavia solitamente la radiazione solare che comunque entra dalla finestra, in particolare grazie allo scattering, unita alla grande capacità di adattamento dell'occhio umano fa sì che la radiazione entrante sia solitamente sufficiente a garantire un'adeguata illuminazione degli ambienti. Inoltre è sempre possibile regolare le barriere frangisole in modo da lasciar passare una frazione leggermente maggiore della radiazione solare e ottenere così una migliore illuminazione.

Nel caso delle barriere frangisole fisse invece bisogna scegliere un angolo d'inclinazione che consenta un buon compromesso tra riduzione della radiazione nei mesi estivi (che deve essere massima) e quella dei mesi invernali (che deve essere minima). Questo viene fatto valutando l'angolo di elevazione massimo raggiunto dal sole nei mesi estivi e in quelli invernali nel luogo considerato. Se la scelta è fatta in maniera opportuna, in inverno, quando il sole è basso, le lamelle sono quasi parallele alla direzione d'arrivo dei raggi solari e quindi l'attenuazione introdotta è bassa, mentre d'estate, dato che il sole è più alto, le barriere ostruiscono il cammino dei raggi solari, causando una forte attenuazione. Alle latitudini italiane valori tipici sono fra i 15° e i 30° .

4. RAY TRACING

Nello studio della propagazione delle onde elettromagnetiche in presenza di ostacoli (ossia in condizioni diverse dalla propagazione in spazio libero), si usano diverse categorie di modelli di previsione al fine di valutare il campo all'antenna ricevente, a seconda dell'accuratezza e delle incognite che si vogliono valutare.

Nel caso in questione, ossia valutare quale sia l'effetto dell'introduzione di barriere frangisole sulla radiazione elettromagnetica entrante da una finestra, è necessario l'uso di un modello di propagazione deterministico, che, tenendo conto delle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche dello scenario, consenta di ottenere una stima accurata del campo in prossimità del ricevitore in tutti i punti d'interesse. Questi modelli sono in generali molto complessi, e per questo vengono solitamente usati in algoritmi eseguiti al computer.

Fra i modelli deterministici più accurati e sofisticati vi sono i modelli ray tracing.

4.1 GENERALITÀ SUL RAY TRACING

I modelli di ray tracing consentono di avere, potenzialmente, previsioni molto accurate sulla propagazione del campo elettromagnetico. Essi sfruttano la teoria geometrica della propagazione e il concetto di raggio.

Lo scenario viene suddiviso in oggetti, trasmettitori e ricevitori. La parte principale, che richiede il maggior consumo di risorse computazionali, è la compilazione del cosiddetto albero di visibilità (view tree), ossia una struttura dati contenente i possibili percorsi propagativi dal trasmettitore al ricevitore. La sua compilazione prevede di eseguire una scansione degli oggetti visibili dal trasmettitore: una volta individuati, questi a loro diventano dei trasmettitori virtuali che, con la medesima procedura di scansione, individuano altri oggetti in visibilità, tramite un procedimento iterativo. Per ciascun cammino o raggio il procedimento si conclude quando viene raggiunto il ricevitore.

Ciascun ramo del view tree possiede un numero di nodi pari alle interazioni subite lungo il percorso. Determinato il view tree, tramite la procedura di backtracking si calcola il campo complessivo al ricevitore, tenendo conto delle diverse interazioni subite dal raggio (queste comprendono riflessioni, trasmissioni, diffrazioni e diffusioni).

Il vantaggio dei modelli di ray tracing è nella loro grande accuratezza potenziale (quella effettiva dipende dalla precisione nella descrizione dello scenario). Il loro difetto sta nella loro complessità, che spesso richiede lunghe simulazioni numeriche.

Solitamente i modelli di ray tracing sono suddivisi in due categorie: modelli outdoor e modelli indoor.

I modelli outdoor sono usati tipicamente nello studio della propagazione delle onde elettromagnetiche in ambienti urbani. Tipicamente in ingresso viene data una mappa bidimensionale degli edifici, un file contenente le loro altezze e un file con i loro parametri elettromagnetici. In questo caso non si adotta un approccio tridimensionale, ma uno 2D+2D: si valuta la propagazione su due piani bidimensionali, quello verticale e quello orizzontale. Questo approccio non è rigoroso, ma consente di semplificare i calcoli. Vengono valutate le diverse interazioni che ciascun raggio subisce lungo il suo cammino, ad eccezione della trasmissione attraverso gli ostacoli, che ai fini dello studio della propagazione outdoor non è rilevante. Per ciò che riguarda la riflessione diffusa solitamente si pone un punto di scattering in corrispondenza del baricentro di ciascuna parete presente nello scenario (a rigore ogni punto di una parete è sorgente di scattering ma questo approccio sarebbe troppo complicato dal punto di vista computazionale).

Nel caso dello studio della propagazione in ambienti indoor la maggior complessità dello scenario richiede l'adozione di un approccio completamente 3D, per cui ciascun ostacolo dello scenario richiede una sua descrizione tridimensionale (oltre che dei suoi parametri elettromagnetici). In questo caso devono anche essere valutate le trasmissioni attraverso i muri e la modellazione dello scattering è diversa, solitamente viene attuata una discretizzazione spaziale che colloca punti di scattering sugli ostacoli con una certa risoluzione.

4.2 L'ALGORITMO IMPIEGATO: 3DSCAT

Nella valutazione dell'efficacia delle barriere frangisole si è utilizzato il programma di ray tracing 3DSCAT, sviluppato internamente all'università di Bologna.

Si tratta di un algoritmo con un approccio 3D pensato per lo studio della propagazione indoor. Lo si è scelto in virtù della complessità dello scenario in esame, costituito da una

finestra con davanti una barriera frangisole, che non sarebbe simulata correttamente adottando un approccio 2D+2D. Le diverse interazioni come riflessioni, trasmissioni, diffrazioni sono trattate in maniera classica. Per ciò che riguarda lo scattering viene adottato un approccio diverso: a partire dai trasmettitori e/o dai ricevitori viene eseguita una discretizzazione spaziale suddividendo nelle coordinate sferiche theta e phi l'angolo solido attraverso cui viene visto lo scenario dal trasmettitore/ricevitore. I punti così ottenuti sono considerati sorgenti di scattering.

Il programma prevede che gli siano forniti in ingresso diversi dati. Innanzitutto bisogna fornire un file che contenga la posizione e la dimensione di tutte le pareti costituenti lo scenario, un file che indichi per ciascuna parete le sue proprietà elettromagnetiche, un file contenente la posizione dei ricevitori e uno contenente la posizione dei trasmettitori (per questi ultimi si può anche specificare il tipo di antenna impiegato).

Esiste inoltre un file contenente i flag che controllano le diverse opzioni del programma, come ad esempio il numero massimo d'interazioni complessive che un raggio può subire (è possibile anche specificare il numero massimo di riflessioni, trasmissioni, diffrazioni, ecc), i parametri di scattering (risoluzione con cui vengono posti i punti di scattering, modello di scattering, ecc). La necessità di definire il numero massimo d'interazioni e la risoluzione dei punti di scattering è necessaria al fine di limitare la complessità computazionale, che altrimenti sarebbe eccessiva (è necessario un compromesso tra accuratezza e tempi di simulazione).

4.2 UN'APPLICAZIONE DI 3DSCAT: LO STUDIO DELL'ISOLA DI CALORE URBANA

Il programma 3DSCAT ha anche trovato un'applicazione diversa dallo studio della propagazione delle onde radio in ambiente indoor: i ricercatori dell'università di Bologna sono stati in grado di impiegarlo nello studio dell'effetto isola di calore urbana. Infatti il suo approccio full 3D e la presenza al suo interno di un modello per la previsione dello scattering di superficie permette di descrivere con grande accuratezza la propagazione della radiazione solare nell'ambiente urbano.

Tramite 3DSCAT è possibile simulare la radiazione solare con una serie di trasmettitori radio disposti sulla cupola celeste: per simulare la radiazione solare diretta si utilizza una serie di trasmettitori disposti lungo l'arco solare; per simulare quella diffusa dall'atmosfera s'impiegano dei trasmettitori disposti su di una superficie a cupola nel cielo. Dei ricevitori sono invece disposti sulle superfici dei manufatti e degli edifici al fine valutare l'energia assorbita giornalmente dalle stesse.

La conoscenza dell'energia assorbita dai manufatti e della temperatura media dell'aria nelle diverse ore del giorno consente di determinare la temperatura superficiale raggiunta dai manufatti.

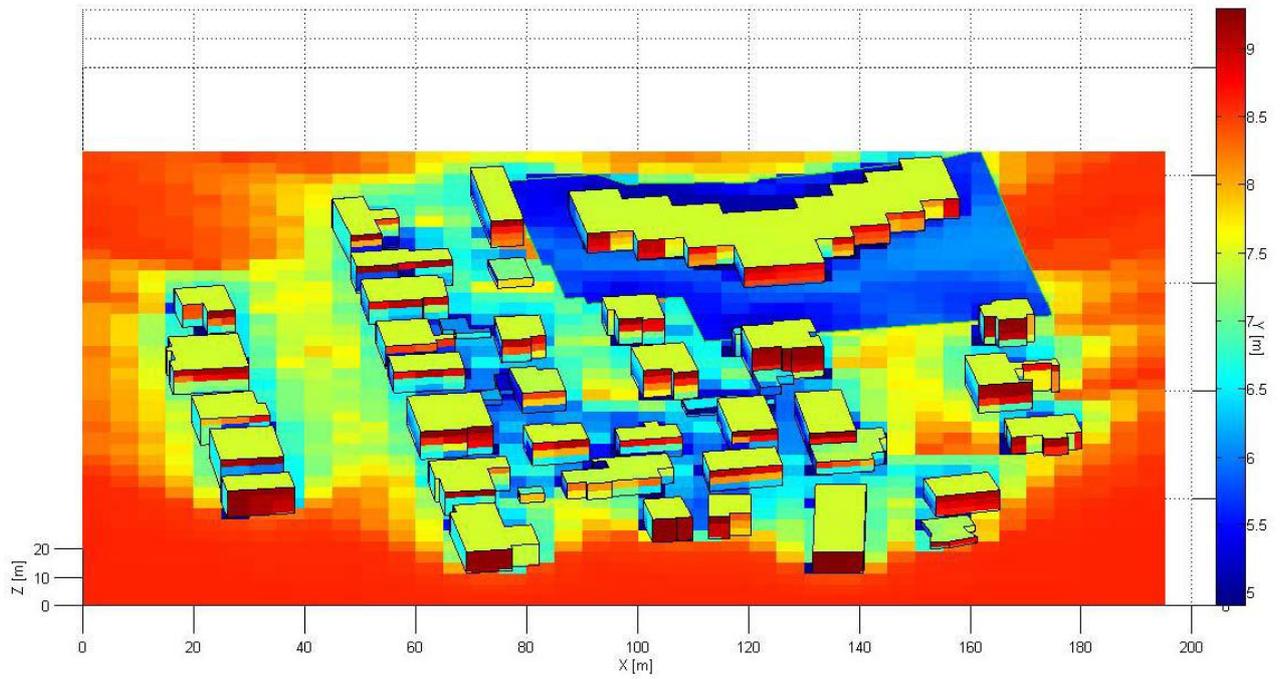


Figura 4.1- Studio dell'effetto isola di calore nell'area urbana di Cesena tramite simulazione ray tracing [fonte: Università di Bologna].

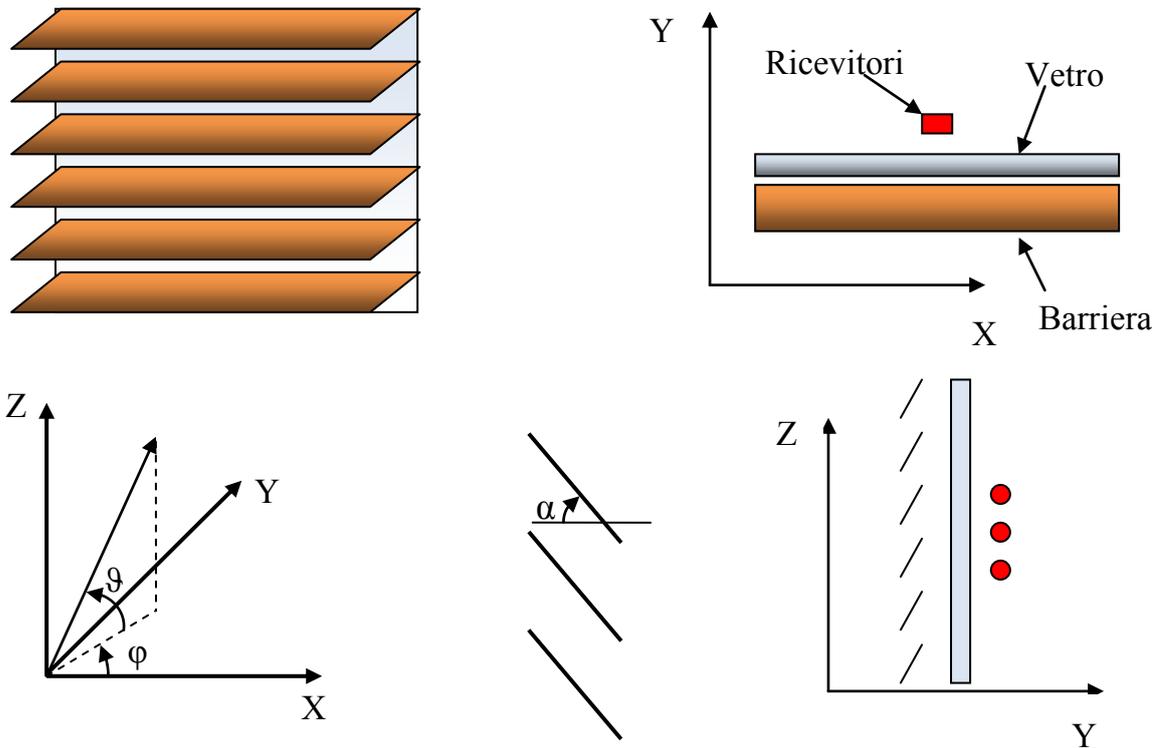
5. DESCRIZIONE DEL COMPORTAMENTO DI UNA BARRIERA FRANGISOLE TRAMITE LOOK-UP TABLE

Al fine di eseguire una valutazione dell'efficacia delle barriere frangisole si dovrebbe eseguire una simulazione ray tracing dello scenario costituito dalla barriera frangisole e dalla finestra e confrontarla con un'altra simulazione seguita nelle medesime condizioni ma in assenza della barriera frangisole.

Quest'approccio tuttavia richiede tempi di calcolo lunghi in quanto ogni volta che si deve eseguire una valutazione bisogna fare una simulazione dell'interazione della radiazione solare con la barriera frangisole, che in generale è molto complessa a causa della presenza di numerose interazioni di scattering e di riflessione. Inoltre tale approccio non permette di simulare barriere frangisole in grado di variare dinamicamente l'angolo d'inclinazione delle lamelle secondo la posizione del sole, poiché in una simulazione ray tracing l'angolo d'inclinazione non può essere variato.

Si è pertanto adottato un diverso approccio: si è cercato di determinare quale sia l'impatto in termini di attenuazione della radiazione solare che le barriere frangisole introducono a seconda delle diverse direzioni di provenienza della luce e delle diverse inclinazioni assunte dalle lamelle che costituiscono la barriera frangisole stessa. Questa informazione viene riassunta in una look-up table, che una volta calcolata permette di effettuare le valutazioni sull'efficacia delle barriere tramite delle simulazioni molto più semplici, nelle quali viene simulata la radiazione solare entrante dalla finestra in assenza di barriera frangisole, il cui effetto viene introdotto in un post processing successivo nel quale si consulta la look-up table.

5.1 DESCRIZIONE DELLO SCENARIO



Lo scenario è composto da una barriera frangisole, da un vetro, dai trasmettitori e dai ricevitori.

La barriera frangisole è composta da dieci lamelle e misura 35x35 cm nel caso in cui le lamelle siano piane e 34,2x34,2 cm se sono curve. L'inclinazione delle lamelle varia tra -25° e $+90^\circ$ con passo di 5° . La spaziatura fra le lamelle è pari alla larghezza della loro sezione trasversale (35 mm per le lamelle piane e 34,2 mm per quelle curve) in modo che blocchino completamente il passaggio della radiazione solare quando sono inclinate verticalmente a 90° . Le lamelle possiedono un albedo del 90%.

Posteriormente alla barriera frangisole, a una distanza di circa 1 mm, vi è un vetro spesso 8 mm e avente le stesse dimensioni della barriera frangisole. Il vetro possiede un indice di rifrazione pari a 1,5, che fa sì che il coefficiente di riflessione in potenza per incidenza ortogonale sia pari a 0,04 (4%), valore tipico dei normali vetri impiegati nell'edilizia.

I trasmettitori sono posti su di una superficie corrispondente a uno spicchio pari a $\frac{1}{4}$ della cupola celeste, con un passo di 10° negli angoli ϑ (elevazione) e φ (azimuth). A rigore i trasmettitori andrebbero posti sull'intera metà della volta celeste che si affaccia sulla barriera frangisole, ossia bisogna far variare ϑ fra 0° e 90° e φ tra 0° e -180° . Tuttavia si può osservare che il sistema presenta una simmetria pari rispetto alla coordinata cartesiana x : il comportamento della barriera rispetto a un raggio proveniente da un trasmettitore posto alle coordinate (x,y,z) è identico a quello che si avrebbe con un trasmettitore posto in

(-x,y,z). Pertanto è sufficiente collocare i trasmettitori con φ che varia tra 0° e -90° per ottenere anche i valori corrispondenti all'intervallo $-180^\circ \div -90^\circ$.

Per campionare rigorosamente la radiazione attraversante il vetro andrebbe collocata una schiera planare che copra l'intera superficie del vetro. Tuttavia si possono fare due osservazioni:

- Nella direzione verticale la presenza della barriera frangisole fa sì che l'andamento della densità di potenza incidente su di una superficie verticale posta parallelamente dietro al vetro presenti un andamento periodico in z, con periodo pari alla spaziatura fra le lamelle della barriera; pertanto, nella direzione verticale, è sufficiente che i ricevitori siano disposti su di una lunghezza pari alla spaziatura fra le lamelle o a un suo multiplo intero.
- La forma delle lamelle fa sì che nella direzione orizzontale, ponendosi a un valore fisso della coordinata z, la densità di potenza incidente assuma lo stesso valore indipendentemente dalla coordinata x. Pertanto è sufficiente campionare il valore della densità di potenza incidente a unico valore della coordinata x.

Da queste considerazioni ne deriva che per campionare la densità di potenza incidente dietro il vetro è sufficiente disporre i ricevitori su di un segmento verticale di lunghezza pari a un multiplo intero della spaziatura fra le lamelle della barriera. Pertanto l'array dei ricevitori posto dietro il vetro è costituito da una schiera lineare disposta verticalmente e collocata in modo che il suo baricentro sia allineato al centro geometrico del vetro. La lunghezza della schiera è pari a tre volte la distanza di spaziatura tra le lamelle. La spaziatura di 0,1 mm tra i trasmettitori è dettata dalla necessità di avere una sufficiente risoluzione spaziale nel campionamento della radiazione incidente ed è stata determinata con una serie di simulazioni.

5.2 PARAMETRI DELLA SIMULAZIONE

Per stabilire quali fossero i parametri ottimali che garantissero un buon compromesso tra tempo di calcolo e accuratezza dei risultati si sono svolte delle simulazioni di taratura dello scenario in presenza di un solo trasmettitore e con una determinata inclinazione delle barriere, andando a vedere come cambiasse la potenza ricevuta al variare dei parametri del ray-tracing. Questi parametri comprendono il numero massimo complessivo di interazioni, riflessioni, riflessioni a seguito di scattering e risoluzione con cui sono collocati i punti di scattering.

Dopo una serie di simulazioni eseguite con un singolo trasmettitore in varie posizioni campione e con alcune posizioni assunte dalla barriera frangisole, si è giunti alla si è deciso di impostare il numero massimo di riflessioni pari a cinque e di usare una risoluzione nel porre i punti di scattering pari a venti valori della coordinata sferica ϑ e di dieci valori nella coordinata φ , per un totale di 200 punti di scattering.

5.3 ESECUZIONE DELLA SIMULAZIONE

Ciascun elemento della look-up table è il rapporto tra il valore medio della densità di potenza incidente su di una superficie verticale posta dietro il vetro in presenza della barriera frangisole e il valore che si ha in assenza di barriera frangisole con la stessa posizione del trasmettitore. In pratica quindi la look-up table contiene al suo interno i valori assunti da quella che potrebbe essere definita la funzione di trasferimento della barriera frangisole. Ogni elemento della look-up table è identificato dalla posizione del trasmettitore tramite le coordinate ϑ e φ e dall'inclinazione α assunta dalle lamelle della barriera frangisole. Data la dipendenza da tre diverse variabili si è ritenuto opportuno organizzare la look-up table come una matrice tridimensionale.

Per calcolare la look-up table si è innanzitutto eseguita una simulazione in assenza della barriera frangisole, per determinare il valore della densità di potenza incidente in assenza della barriera per ciascuna posizione dei trasmettitori che simulano il sole. In seguito si sono eseguite una serie di simulazioni per determinare quali fossero i valori della densità di potenza incidente in presenza della barriera frangisole. In particolare, in ciascuna simulazione, si sono calcolati i valori di potenza incidente dai diversi trasmettitori con un preciso valore d'inclinazione delle lamelle delle barriere (in ogni simulazione si è usata una diversa inclinazione). Infine si è eseguito il rapporto elemento per elemento fra la densità di potenza in presenza di barriera frangisole e la densità di potenza in assenza della barriera frangisole con la stessa posizione dei trasmettitori, ottenendo la look-up table.

Si sono ricavate due look-up table: una per le barriere frangisole di sezione curva e una per quelle di sezione piana.

5.4 I RISULTATI

In figura 5.1 si può vedere un plot dei raggi che attraversano la barriera per andare a colpire i ricevitori. I raggi blu subiscono fra le interazioni una riflessione diffusa, mentre i raggi rossi non subiscono alcuna interazione di scattering. Da notare come i raggi

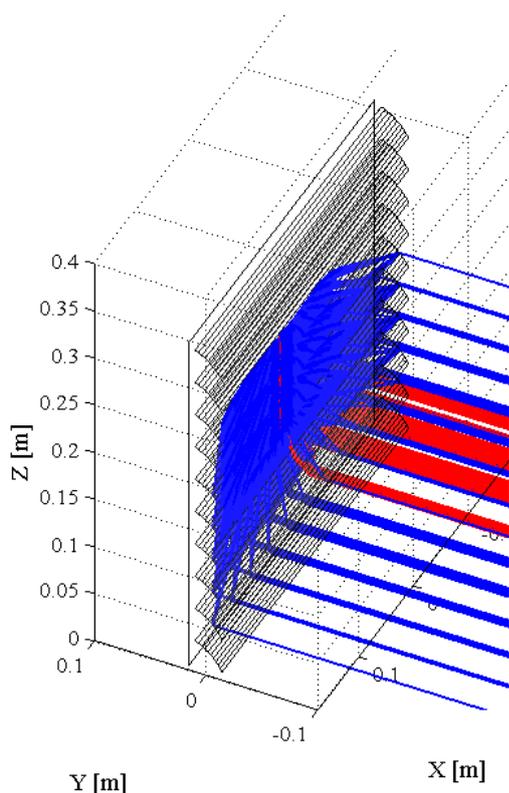


Figura 5.1 – Esempio di plot dei raggi.

di scattering siano distribuiti lungo tutta la lunghezza delle lamelle, coerentemente col fatto che l'intera superficie delle lamelle è una sorgente di scattering, mentre i raggi che subiscono solo riflessioni speculari sono concentrati su di un piano individuato dalla sorgente e dai ricevitori.

Di sotto si può osservare un grafico in figura 5.2 che rappresenta un estratto della look-up table. In particolare tale grafico rappresenta i valori assunti dalla tabella per le diverse posizioni dei trasmettitori per un certo valore dell'inclinazione delle lamelle (in questo caso 0°).

Si possono fare delle osservazioni:

- Per valori bassi dell'elevazione, in particolare per il valore 0° , la barriera frangisole lascia passare quasi interamente la radiazione solare. Questo è coerente con la posizione assunta dalle lamelle, che essendo orientate a 0° sono parallele alla direzione di arrivo dei raggi e quindi offrono la minima ostruzione al passaggio della radiazione solare, permettendo a essa di illuminare direttamente i ricevitori.
- Per valori alti dell'elevazione si hanno valori bassi della funzione di trasferimento. Ciò è coerente con i valori assunti dalla posizione dei trasmettitori e dall'inclinazione delle lamelle: infatti in questa condizione la barriera ostruisce il passaggio della radiazione solare, che arriva ai ricevitori per mezzo di una serie d'interazioni, quali riflessioni e diffusioni, che ne attenuano la densità di potenza.
- Il picco presente in corrispondenza dei valori $\vartheta=80^\circ$ e $\varphi=10^\circ$ è dovuto alla presenza di uno spiraglio che permette alla radiazione di raggiungere i ricevitori senza passare attraverso la barriera, ed è quindi privo di significato.

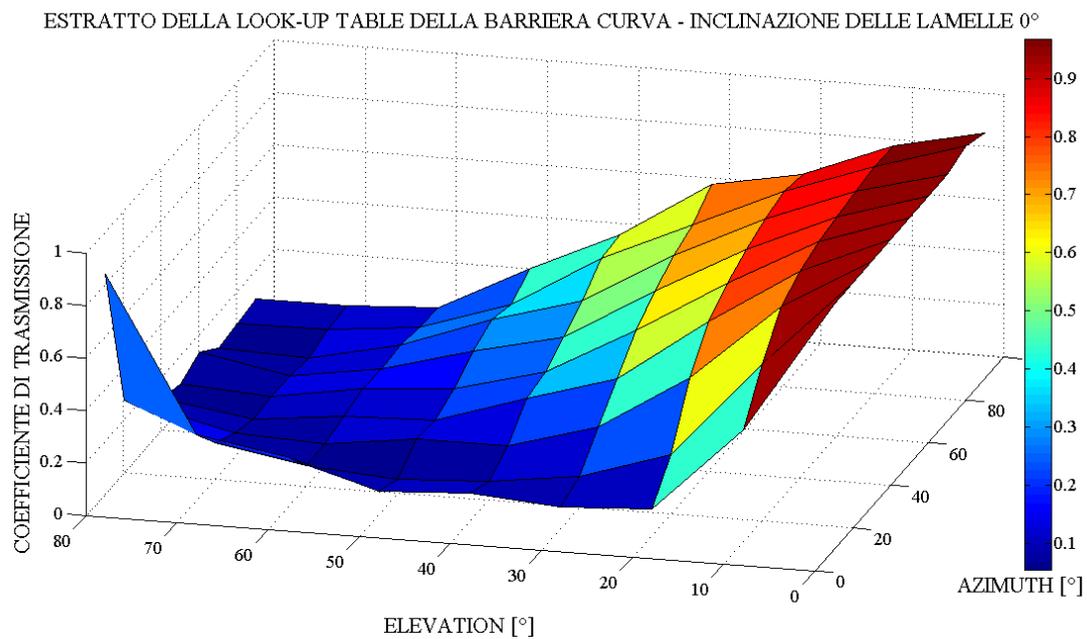


Figura 5.1 – Estratto della look-up table riferita alla barriera curva con riferimento ad un'inclinazione delle lamelle di 0°.

6. VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DELLE BARRIERE FRANGISOLE

Per mezzo della look-up table, che descrive l'effetto della barriera frangisole sulla radiazione solare, è possibile fare delle valutazioni sull'efficacia delle barriere frangisole mediante l'algoritmo MATLAB sviluppato all'interno dell'università di Bologna per lo studio dell'effetto isola di calore urbana.

Nel seguito s'illustrerà lo scenario in esame e si analizzeranno i risultati ottenuti.

6.1 DESCRIZIONE DELLO SCENARIO

Lo scenario in esame è molto simile a quello usato nella determinazione della look-up table. Esso è composto da un vetro simulante una finestra, da trasmettitori simulanti la radiazione solare e da ricevitori che permettono di valutare la radiazione entrante dalla finestra.

Il vetro misura 35x35 cm ed è identico a quello usato in precedenza, con un indice di rifrazione pari a 1,5.

Il sole è simulato da due insiemi di trasmettitori, che simulano rispettivamente la radiazione solare diretta e quella diffusa.

I trasmettitori che simulano la radiazione solare diretta sono disposti su un arco corrispondente a quello solare sul quale il sole apparentemente si sposta durante il giorno. Il percorso che compie l'arco dipende dal giorno dell'anno in cui viene eseguita la simulazione. La posizione di ciascun trasmettitore rappresenta la posizione assunta dal Sole a una determinata ora, con una risoluzione di quindici minuti.

I trasmettitori che simulano la radiazione diffusa invece sono disposti sull'intera volta celeste, in modo da simulare il più fedelmente possibile la diffusione operata dall'atmosfera terrestre.

I valori di potenza dei trasmettitori, sia quelli che simulano la radiazione diretta che quelli che simulano la radiazione diffusa, sono funzione del luogo e del periodo dell'anno preso in esame. In particolare vi sono due parametri che permettono di definire quale potenza attribuire ai trasmettitori simulanti la radiazione diretta e quale potenza attribuire invece a quelli simulanti la radiazione diffusa: l'indice di chiarezza e l'indice di diffusione.

L'indice di chiarezza è il rapporto tra la densità di potenza della radiazione solare incidente al suolo e la stessa densità di potenza calcolata fuori dall'atmosfera terrestre. Esso misura quanto l'atmosfera lascia passare la radiazione solare. L'altro parametro, l'indice di diffusione, è il rapporto tra la componente diffusa della radiazione incidente al suolo e la radiazione totale incidente al suolo. Misura quanto è forte la componente diffusa rispetto alla radiazione totale. Questi due parametri rappresentano dei valori medi giornalieri e sono noti con cadenza mensile.

I ricevitori posti dietro al vetro misurano la radiazione entrante dalla finestra. In particolare misurano la densità di potenza incidente su una superficie verticale posta dietro al vetro. In teoria sarebbe sufficiente un singolo trasmettitore, tuttavia si è preferito mantenere la schiera verticale lunga 10,5 cm già usata nella determinazione della look-up table.

Il luogo scelto per l'esecuzione della simulazione corrisponde alla città di Cesena.

La finestra costituente lo scenario può essere orientata verso est e verso sud.

6.2 DESCRIZIONE DELLA SIMULAZIONE

Nella simulazione si è andato a indagare quale sia l'effetto dell'introduzione delle barriere frangisole sull'energia consumata per il riscaldamento (nei mesi invernali) e per il condizionamento (nei mesi estivi) nei diversi periodi dell'anno. Per farlo si è eseguita una simulazione nel giorno 15 di ciascun mese, considerato indicativo del comportamento medio dell'intero mese, per poi moltiplicarlo per la durata del mese in esame.

Per quanto riguarda il tipo di barriera frangisole simulata, si sono presi in considerazione diversi casi: per ciascuna delle due tipologie di sezione delle barriere frangisole (piana e curva) si sono considerate tre diverse modalità di controllo, ossia inclinazione fissa a 15°, inclinazione fissa a 30° e barriera frangisole intelligente.

La scelta delle inclinazioni fisse a 15° e 30° è dettata dal fatto che si tratta delle inclinazioni maggiormente impiegate nelle barriere frangisole fisse alle latitudini italiane.

Le cosiddette barriere frangisole intelligenti sono in grado di variare dinamicamente la loro posizione in funzione di quella Sole in modo da massimizzare l'ostruzione della radiazione solare nei mesi estivi (quando è necessario limitare il riscaldamento degli ambienti interni)

e di minimizzarla nei mesi invernali (quando invece il contributo della radiazione solare al riscaldamento degli ambienti è benvenuto). In particolare si è simulato un prototipo di barriera frangisole basato su una tenda veneziana realizzato dalla Techno GF S.r.l. in collaborazione con l'università di Bologna. Questo prototipo è in grado di variare l'inclinazione delle lamelle in modo da ridurre al minimo la radiazione solare entrante in estate garantendo al contempo un'adeguata luminosità degli ambienti, mentre nei mesi invernali può sollevare le lamelle in modo da massimizzare il passaggio della luce. Per simulare correttamente questo tipo di barriera si è imposto che le lamelle si collocassero in posizione ortogonale rispetto alla direzione d'arrivo dei raggi nei mesi estivi e che le lamelle fossero sollevate nei mesi invernali.

Nello svolgere la simulazione si è indagato su quale sia l'impatto delle barriere frangisole sui consumi energetici per riscaldamento e per condizionamento. Per valutare tale impatto si è calcolata la differenza tra l'energia entrante dalla finestra per effetto della radiazione solare in presenza e in assenza della barriera frangisole. Nei mesi invernali la minore energia entrante dalla finestra significa un maggior consumo da parte dell'impianto di riscaldamento che deve compensare l'energia mancante, mentre nei mesi estivi la minore energia entrante significa un minor consumo da parte dell'impianto di condizionamento, che deve compensare una minore energia.

Si è fatto riferimento, per quanto riguarda l'impianto di riscaldamento, a un impianto a caldaia alimentata a gas naturale con un rendimento del 90%, mentre per quanto riguarda l'impianto di condizionamento si sono presi in considerazione tre diversi valori dell'EER, l'indice di efficienza elettrica dell'impianto di climatizzazione: 2, 3 e 4.

Per quanto riguarda il costo dell'energia si è fatto riferimento ai prezzi medi riportati dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas. Il prezzo dell'energia elettrica è riferito all'anno 2011, quello del gas all'anno 2010. Si considera che il gas abbia un potere calorifero di 10.6 kWh/m^3 [HERA].

Nella simulazione si sono considerati estivi (ossia mesi in cui si ricorre al condizionamento) i mesi che vanno da maggio a settembre e invernali (ossia mesi in cui si ricorre al riscaldamento) i mesi che vanno da novembre a marzo. Nei mesi restanti (aprile e ottobre) si considerano non operativi sia l'impianto di riscaldamento che quello di condizionamento. Tali considerazioni sono dettate dalle temperature medie mensili che si hanno a Cesena nei diversi mesi dell'anno [Wikipedia].

6.3 RISULTATI ENERGETICI DELLA SIMULAZIONE

I primi risultati che si andranno ad analizzare riguardano l'impatto delle barriere frangisole sui consumi energetici per riscaldamento e condizionamento.

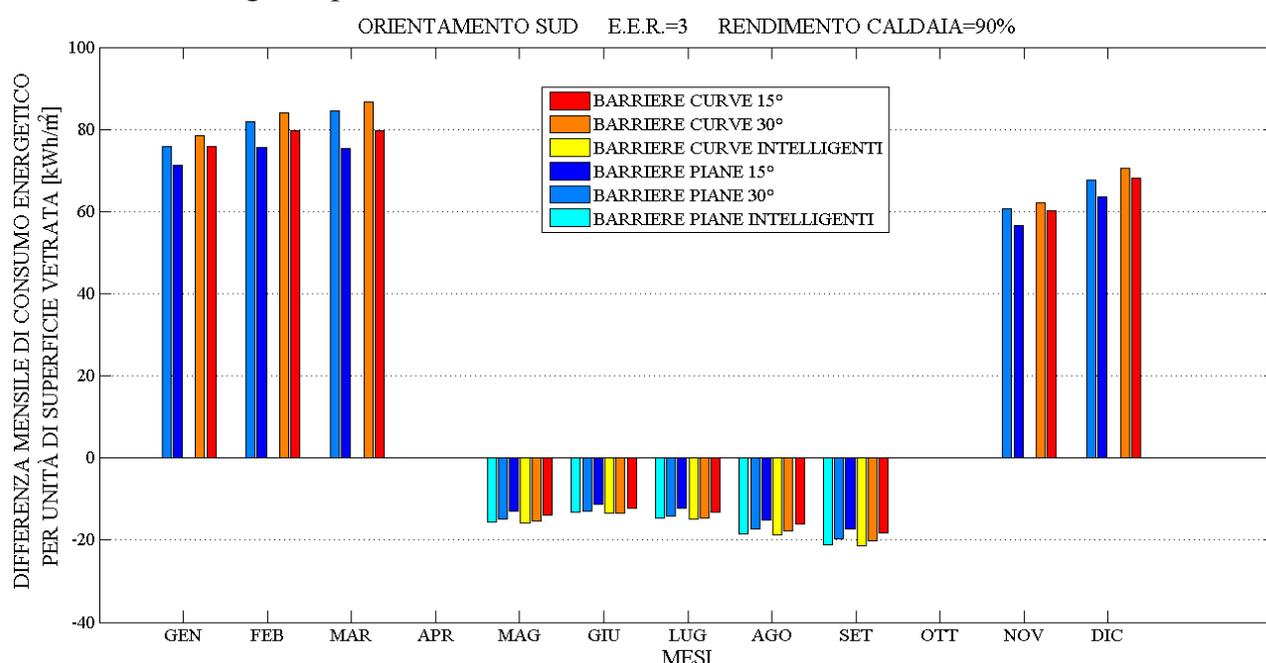


Figura 6.1 – Differenze mensili di consumo energetico per una finestra rivolta a sud.

La figura 6.1 mostra le differenze mensili di consumo energetico nei diversi mesi dell'anno per tutte le tipologie di barriere nel caso che l'orientazione sia a sud e l'EER dell'impianto di condizionamento sia pari a 3. Una prima cosa che si può osservare, per quanto riguarda le barriere fisse, è come l'aumento di consumo energetico per il riscaldamento nei mesi invernali sia significativamente maggiore della riduzione dei consumi per il condizionamento nei mesi estivi. Si può osservare come i comportamenti delle barriere piane e di quelle curve a parità d'inclinazione (sia essa fissa o variabile) siano sostanzialmente simili, con una piccola differenza tra le fisse e le curve: le barriere curve bloccano leggermente di più la radiazione solare rispetto a quelle fisse; ciò può essere imputato al fatto che le barriere curve presentano, con riferimento alla loro sezione trasversale, uno spessore maggiore di quelle piane a causa della loro curvatura, il che determina una, seppur lieve, maggiore ostruzione alla luce solare. Per quanto riguarda le barriere intelligenti, sia piane che curve, esse hanno il vantaggio non bloccare la radiazione solare nei mesi invernali grazie alla loro capacità di sollevarsi, pertanto determinano esclusivamente una riduzione dei consumi per condizionamento, presentando quindi

esclusivamente benefici; si può inoltre notare come la loro capacità di bloccare la radiazione solare sia superiore a quella delle barriere fisse, seppur di poco.

Il grafico in figura 6.2 è analogo al precedente, con la differenza che l'orientazione è a est invece che a sud.

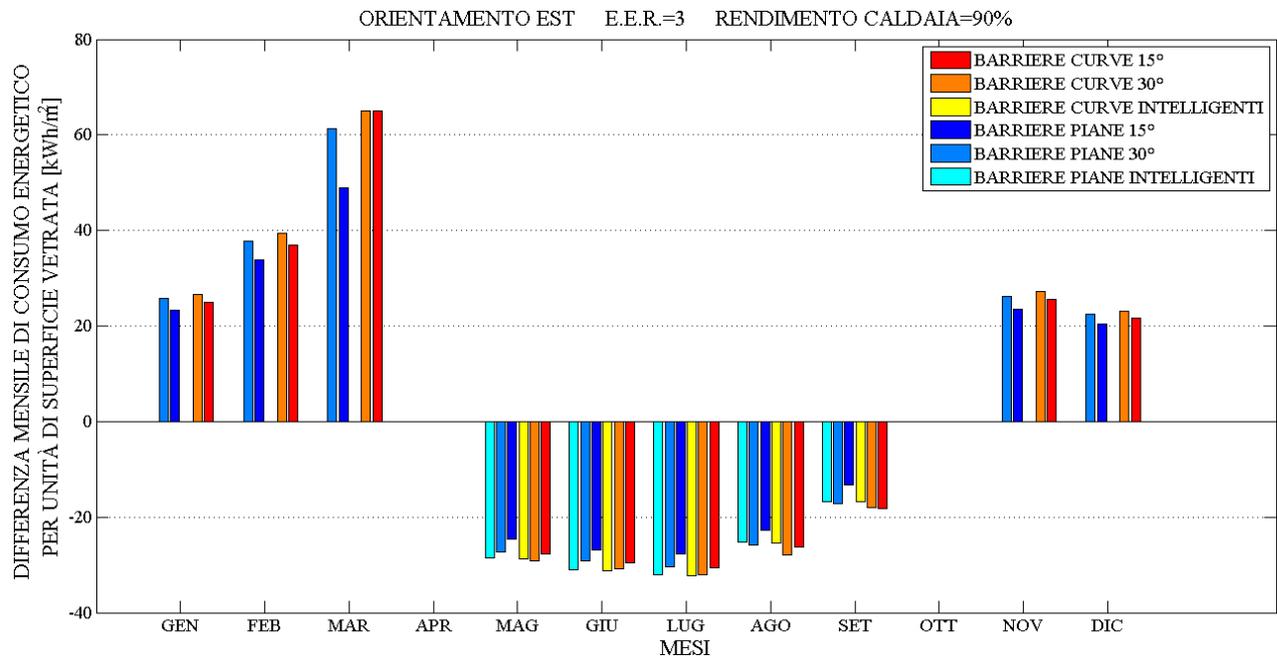


Figura 6.2 - Differenze mensili di consumo energetico per una finestra rivolta a est.

Rispetto al caso dell'orientazione a sud si può osservare come gli aumenti del consumo energetico per riscaldamento siano inferiori, mentre le riduzioni dei consumi per condizionamento siano maggiori; ciò è in linea col fatto che l'insolazione giornaliera di una parete verticale esposta a est rispetto a una esposta a sud è maggiore nei mesi estivi e minore in quelli invernali. Anche in questo caso i comportamenti delle barriere a parità d'inclinazione sono simili, con una lieve differenza fra quelle piane e curve imputabile a considerazioni analoghe alle precedenti. Per quanto riguarda le barriere intelligenti si può osservare come in questo caso la loro capacità di bloccare la radiazione solare nei mesi estivi sia a volte inferiore, ma di poco, a quella delle barriere fisse, avendo comunque il vantaggio di non bloccare la radiazione solare nei mesi invernali.

Il grafico in figura 6.3 permette di fare un confronto diretto fra l'orientazione a sud e quella a est con riferimento alle barriere curve. Da esso si ha conferma di come gli aumenti di consumo per riscaldamento siano maggiori per le barriere rivolte a sud, mentre le riduzioni di consumo per condizionamento siano maggiori per le barriere rivolte a est.

Infine il grafico in figura 6.4 mostra le differenze di consumo energetico annuali complessive per le diverse tipologie di barriere e per le diverse orientazioni con diversi valori dell'EER.

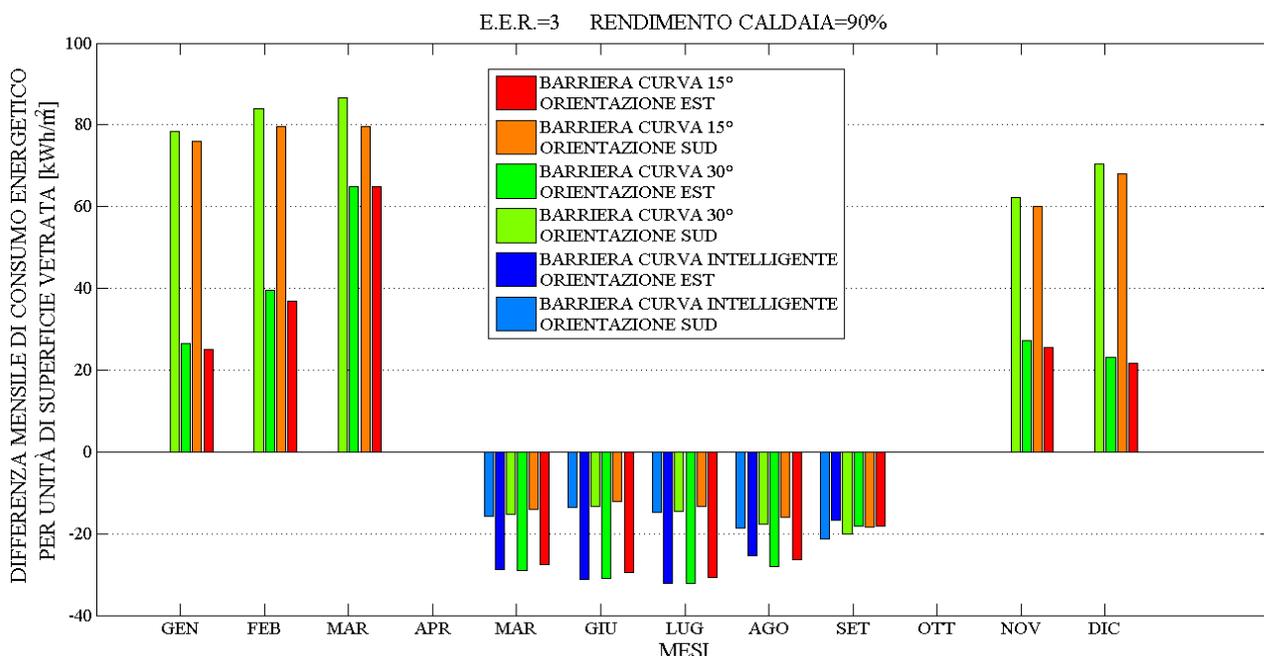


Figura 6.3 – Confronto orientazione est-sud

La prima cosa che si può osservare è come, nella maggioranza dei casi, le barriere fisse comportino complessivamente un aumento dei consumi energetici annuali, tranne che nel caso in cui l'impianto di condizionamento presenti un EER basso e quindi i risparmi ottenuti nei mesi estivi siano maggiori delle perdite nei mesi invernali. Si può osservare come le perdite ottenute nel caso in cui l'orientazione sia sud siano molto maggiori di quelle ottenute per orientazione a est. Pertanto nel caso in cui l'orientazione sia est le perdite sono relativamente piccole, mentre nel caso in cui l'orientazione sia sud le perdite sono notevoli. Di nuovo si osserva come i comportamenti delle barriere piane e di quelle

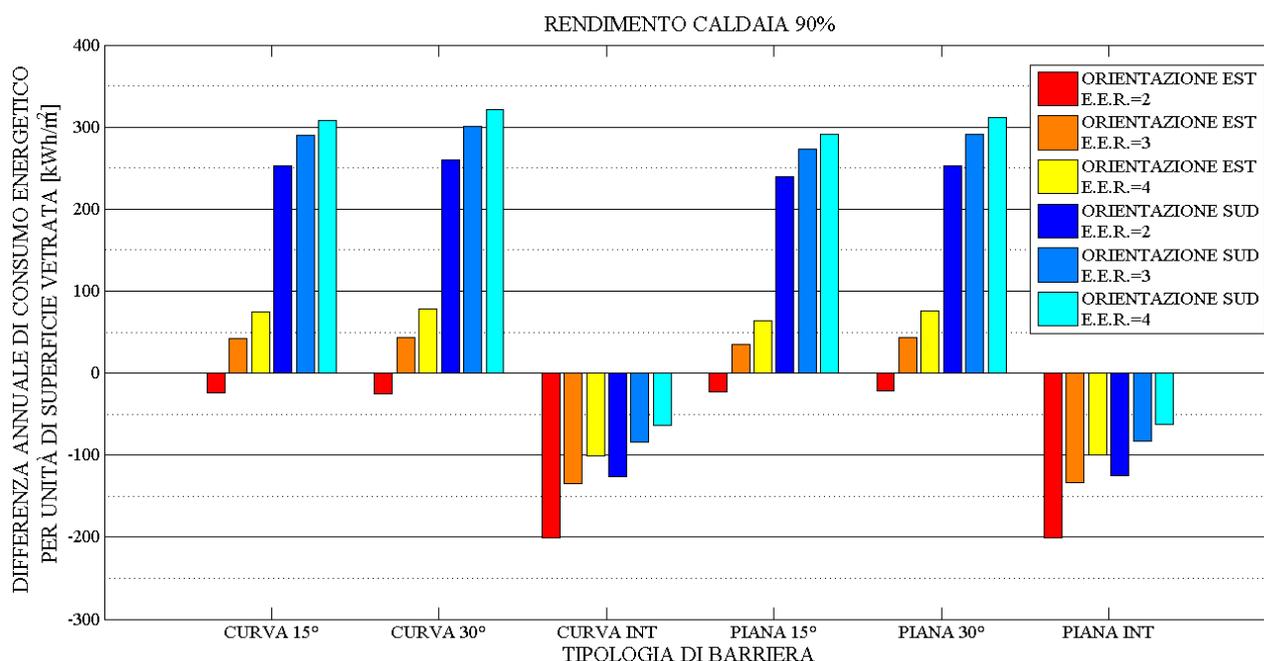


Figura 6.4 – Differenze annuali di consumo energetico per le diverse tipologie di barriere.

curve siano molto simili.

Per quanto riguarda le barriere intelligenti esse consentono di avere solo i vantaggi della riduzione dei consumi estivi, e pertanto consentono di avere a livello annuale una notevole riduzione dei consumi energetici per condizionamento.

Infine si osserva come gli aumenti di consumo energetico siano tanto più alti quanto più sia alto l'EER dell'impianto di condizionamento. Infatti tanto più l'EER è alto tanto più l'impianto di condizionamento è efficiente e i suoi consumi ridotti; tanto più questi consumi sono ridotti tanto minore è la riduzione di consumo energetico ottenuta nei mesi estivi grazie alle barriere frangisole. Più questa riduzione è piccola più la differenza tra l'aumento dei consumi per il riscaldamento e la riduzione dei consumi per condizionamento è sbilanciata verso l'aumento dei consumi. Per lo stesso motivo, quando sia ha una riduzione dei consumi a livello annuale (come con le barriere intelligenti), questa è tanto più piccola tanto più è alto l'EER dell'impianto di condizionamento.

6.4 RISULTATI ECONOMICI DELLA SIMULAZIONE

Adesso si valuterà quale sia l'impatto delle barriere frangisole sui costi per il riscaldamento e il condizionamento.

Il grafico in figura 6.5 mostra le differenze mensili dei costi per riscaldamento/condizionamento per tutte le tipologie di barriere con orientazione sud e

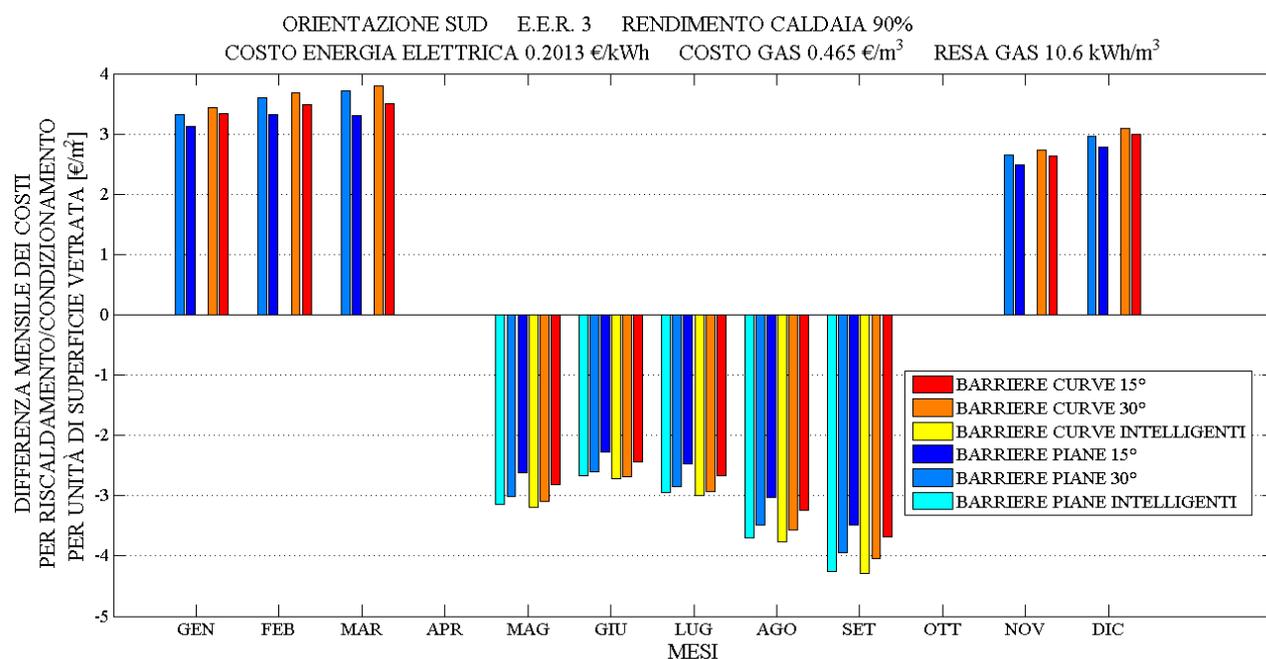


Figura 6.5 – Differenze mensili dei costi per riscaldamento-condizionamento per una finestra rivolta a sud.

EER pari a 3.

Una prima cosa che si può osservare è che, mentre nei risultati energetici l'aumento dei consumi nei mesi invernali era maggiore della riduzione dei consumi nei mesi estivi, adesso la riduzione di costi per condizionamento e l'aumento dei costi per riscaldamento sono circa dello stesso ordine di grandezza. Ciò è dovuto al diverso costo al kWh del gas e dell'energia elettrica, con il prezzo del gas pari a circa $\frac{1}{4}$ di quello dell'energia elettrica. Ciò determina una maggiore incidenza dei costi per il condizionamento rispetto a quelli per il riscaldamento. Si ottiene nuovamente un comportamento simile a parità d'inclinazione fra le barriere piane e quelle curve.

Il grafico in figura 6.6 mostra le stesse differenze di costo ma con riferimento all'orientazione est.

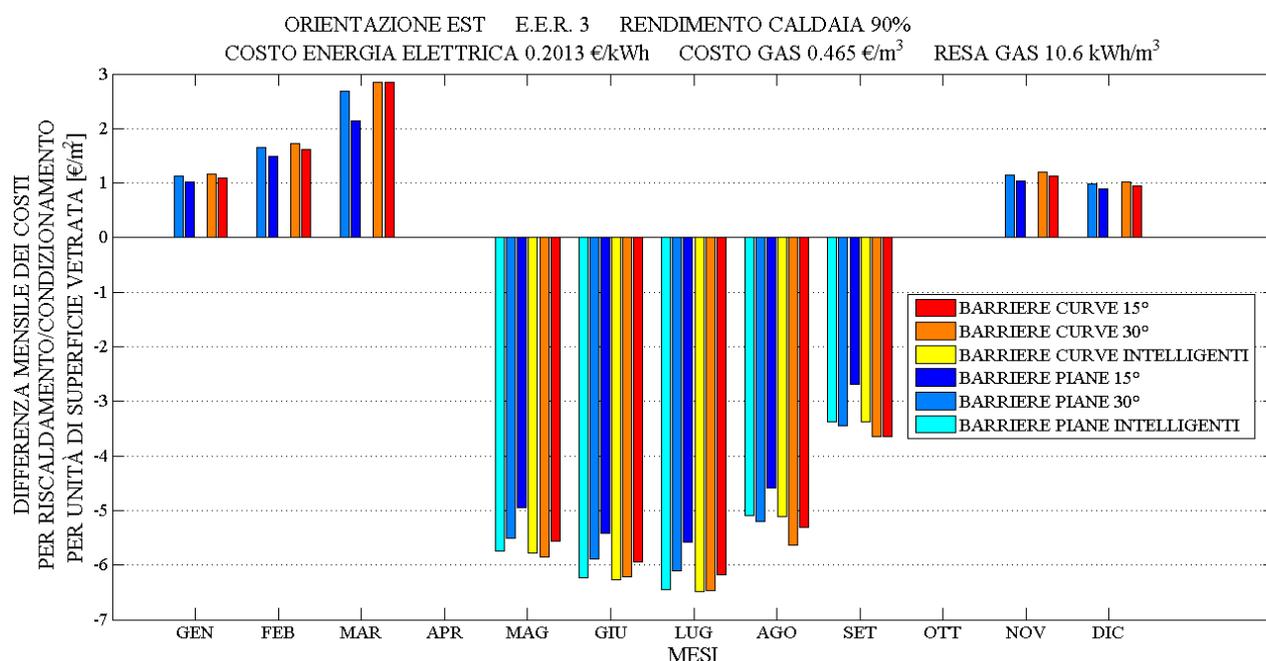


Figura 6.6 - Differenze mensili dei costi per riscaldamento-condizionamento per una finestra rivolta a est.

Si può osservare come stavolta i maggiori costi per riscaldamento nei mesi invernali siano notevolmente inferiori ai minori costi per condizionamento nei mesi estivi. Anche in questo caso, la minore insolazione nei mesi invernali e la maggiore insolazione nei mesi estivi rispetto all'orientazione a sud contribuiscono a tale risultato, oltre al differente costo del gas e dell'energia elettrica di cui si è già parlato. Anche in questo caso il comportamento delle barriere piane e di quelle curve sono simili a parità d'inclinazione.

Il grafico in figura 6.7 permette di confrontare l'orientazione a est con l'orientazione a sud per quanto concerne le barriere curve. Da questo abbiamo una conferma di come l'aumento dei costi per riscaldamento nei mesi invernali sia maggiore per l'orientazione a

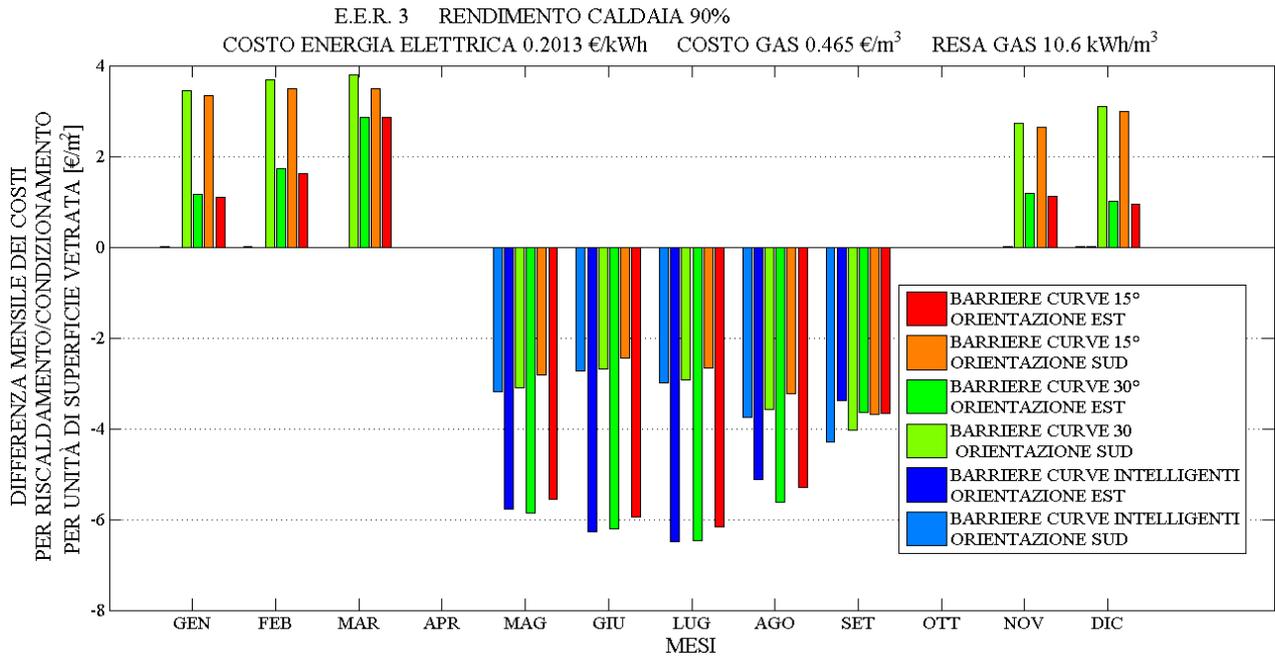


Figura 6.7 – Confronto orientazione est-sud

sud e la riduzione dei costi per condizionamento sia invece maggiore per l'orientazione a est.

Infine il grafico in figura 6.8 mostra un riepilogo delle differenze annuali di costo per le differenti tipologie di barriere, le diverse orientazioni e i diversi valori di EER.

Si può osservare come nella maggioranza dei casi si abbia una riduzione complessiva dei costi per riscaldamento e condizionamento. Gli unici casi in cui si ha un aumento dei costi riguardano le barriere fisse orientate a sud in presenza di impianti di condizionamento con

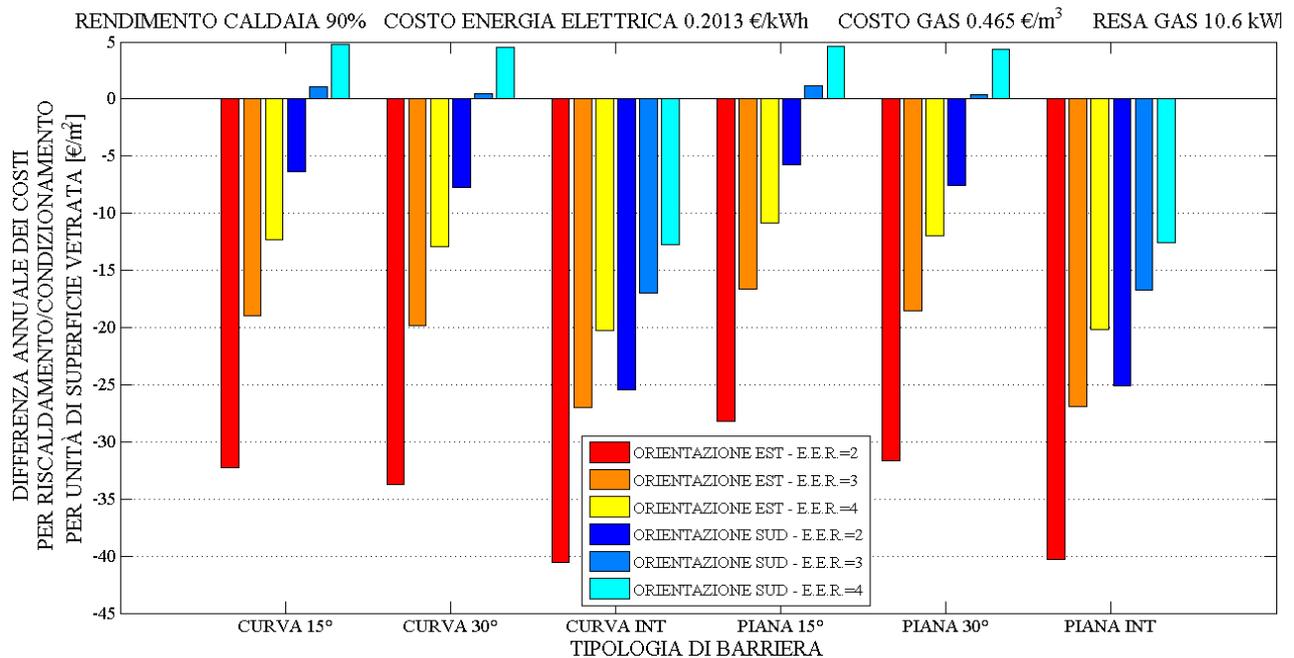


Figura 6.8 – Differenze annuali dei costi per riscaldamento-condizionamento per le diverse tipologie di barriere.

un elevato valore dell'EER, nei quali le riduzioni dei costi per condizionamento sono inferiori all'aumento dei costi per riscaldamento. Infatti più è elevato l'EER e maggiore è l'efficienza del climatizzatore, e quindi minori sono i risparmi ottenuti grazie alle barriere frangisole. Questo è anche il motivo per cui, a parità di barriera e di orientazione, maggiore è l'EER e minori sono i risparmi economici.

I valori dei risultati sono inoltre in buon accordo con quelli dello studio [Degli Esposti et al., 2012] "Ray tracing to predict insolation in urban environment" realizzato da personale dell'università di Bologna e pubblicato all'IGARSS 2012. Tuttavia in tale studio si ipotizza un comportamento ideale delle barriere frangisole (si ipotizza che le barriere siano in grado di bloccare completamente la radiazione solare) e non si tiene conto dei maggiori costi per riscaldamento nei mesi invernali.

7. MISURE SPERIMENTALI DEL COMPORTAMENTO DI UNA BARRIERA FRANGISOLE

In questo capitolo si illustra come si è pensato di eseguire delle misure per valutare la capacità delle barriere frangisole di bloccare la radiazione solare, al fine di compiere una validazione sperimentale della look-up table. L'esecuzione effettiva di tali misure non è stata possibile per motivi di tempo oltre che per il danneggiamento della scheda Arduino necessaria alle misure.

7.1 DESCRIZIONE DEL SET-UP DELLE MISURE



Si è deciso di effettuare le misure su di un prototipo di barriera frangisole intelligente sviluppato dalla Techno GF S.r.l. in collaborazione con l'università di Bologna illustrato in figura 7.1. Tale prototipo presenta lamelle di sezione curva che si possono orientare sia verso l'alto che verso il basso. Le lamelle inoltre possono anche essere sollevate per lasciar passare interamente la radiazione solare.

Il controllo del posizionamento delle lamelle e l'acquisizione delle misure avviene per mezzo di una scheda Arduino collegata a un computer.

Per valutare quale sia la caratteristica di trasferimento della barriera frangisole si è deciso di

Figura 7.1 – Il prototipo di barriera frangisole impiegati

misurare l'intensità luminosa con la barriera alzata e poi con la barriera abbassata, per poi fare il rapporto fra questi due valori.

Il sensore impiegato nelle misure è una fotoresistenza, ossia un resistore il cui valore di resistenza varia al variare dell'intensità della luce che lo illumina (in particolare la resistenza cala all'aumentare dell'intensità luminosa). La caratteristica resistenza-intensità luminosa ha un andamento non lineare, per cui si è resa necessaria una caratterizzazione della fotoresistenza, di cui si parlerà in seguito.

Per evitare che raggi solari provenienti da direzioni esterne a quelle della barriera frangisole andassero a incidere sul sensore, si è installata sul retro della barriera una struttura scatolare che ricopre interamente il retro della barriera, e al cui interno è alloggiato il sensore su di un supporto mobile. La struttura è rivestita internamente di cartone nero, per minimizzare le eventuali riflessioni che influirebbero sulle misure, impedendo di misurare esclusivamente la radiazione proveniente direttamente dalla barriera. Per misurare l'intensità luminosa quando la barriera è sollevata è sufficiente acquisire una sola misura con il sensore in una sola posizione, poiché in questa condizione

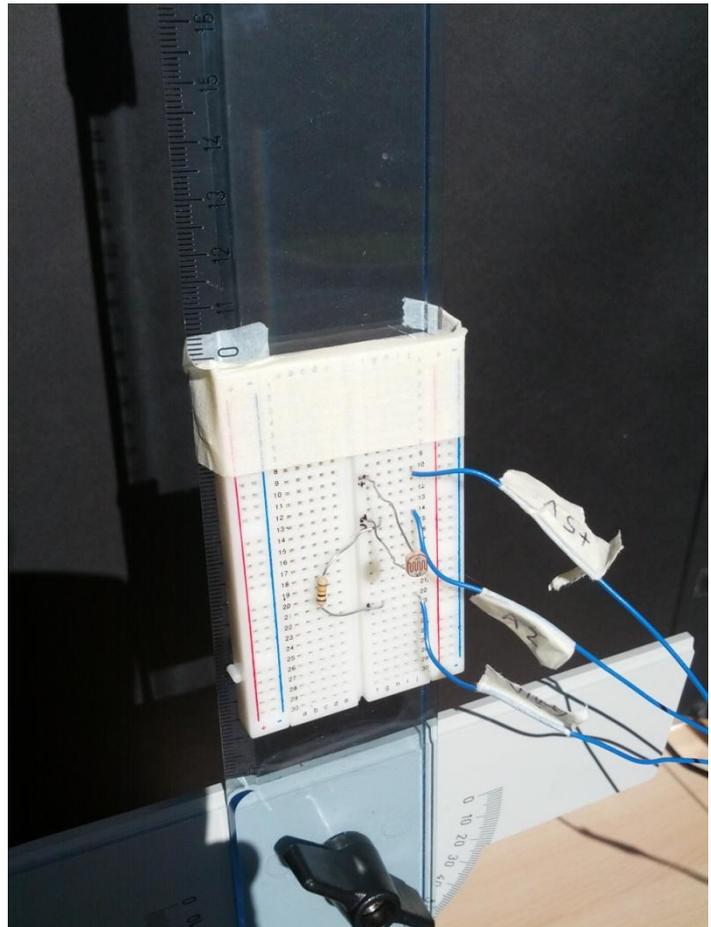


Figura 7.2 – Il sensore impiegato con la relativa circuiteria.

l'illuminamento è uniforme. Quando la barriera è invece abbassata si vengono a creare delle frange di diversa luminosità. Per determinare il valore medio della luminosità è necessario acquisire più misure in più punti. In particolare si è scelto di collocare i punti di misura su di un segmento verticale di lunghezza pari a un multiplo intero della distanza che separa le lamelle l'una dall'altra, che è anche la distanza del periodo di ripetizione delle frange. Questa scelta è analoga a quella effettuata nelle simulazioni ray tracing per il posizionamento dei ricevitori dietro la barriera. I punti di misura distano 1 cm l'uno dall'altro.

Le misure vanno effettuate in ambiente outdoor, esponendo la barriera frangisole alla radiazione solare orientandola verso sud.

Si è pensato di eseguire le misure per alcuni valori d'inclinazione delle lamelle e per una posizione del sole.

7.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FOTORESISTENZA

Come già spiegato la caratteristica resistenza-intensità luminosa della fotoresistenza è non lineare, in particolare ha un andamento del tipo $1/\sqrt{x}$. Ciò ha reso necessaria una caratterizzazione della fotoresistenza stessa.

Per effettuare tale caratterizzazione è stato necessario impiegare una fonte di radiazione luminosa in grado di variare la propria intensità. In particolare si è deciso di usare un simulatore di sole, ossia un apparecchio in grado di produrre una radiazione luminosa con caratteristiche spettrali e d'intensità analoghe a quelle della radiazione solare. Tali apparecchi sono normalmente impiegati nella caratterizzazione delle celle fotovoltaiche. Inoltre tali apparecchi sono in grado di variare l'intensità luminosa tramite l'applicazione di appositi attenuatori.

Si è inoltre impiegato un misuratore d'intensità solare, apparecchio impiegato per misurare la densità di potenza incidente della radiazione solare.

La caratterizzazione è stata effettuata tramite la scheda Arduino usata anche per il pilotaggio della barriera. In particolare la scheda Arduino non misura direttamente la resistenza, ma, tramite un partitore resistivo, misura un valore inversamente proporzionale alla resistenza della fotoresistenza.

Si è proceduto esponendo la fotoresistenza alla radiazione prodotta dal simulatore di sole e misurando la radiazione incidente tramite il misuratore d'intensità solare. Si poi eseguita una lettura del valore misurato dalla scheda Arduino. L'operazione è stata ripetuta per diversi valori della radiazione incidente, ottenuti tramite gli appositi attenuatori.



Figura 7.3 – Il simulatore di sole impiegato
[fonte: <http://chiplab.chem.polimi.it>]

Ciò ha permesso di ricostruire la caratteristica della fotoresistenza. Da questa, noto che la caratteristica conduttanza-intensità luminosa ha un andamento del tipo $a\sqrt{x}$ si sono ricavati i valori delle costanti a e b che meglio consentono di approssimare la curva dei risultati. La figura 7.4 mostra sia le misure che la regressione calcolata; si osserva che i risultati sperimentali e le previsioni teoriche sono in buon accordo.

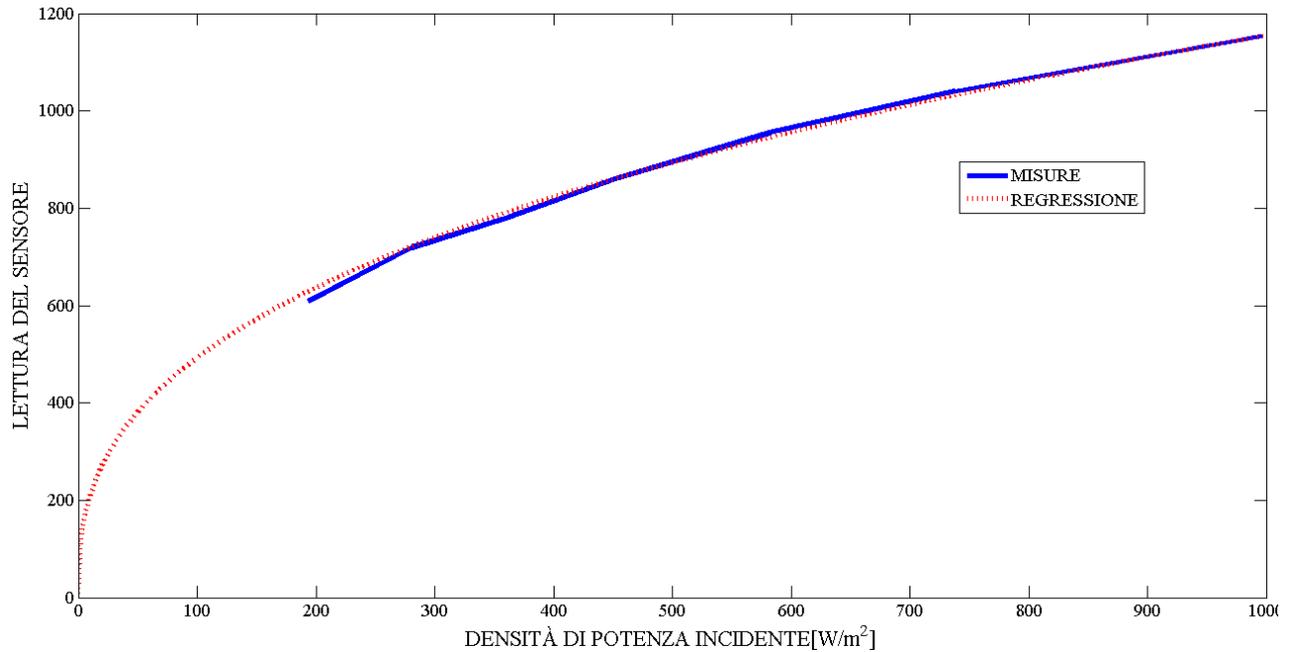


Figura Figura 7.4 – Caratterizzazione della fotoresistenza.

8. CONCLUSIONI

A seguito dello studio qui condotto sulle barriere frangisole è possibile affermare che le semplici barriere fisse non sempre consentono di avere dei vantaggi in termini energetici per quanto riguarda i consumi per riscaldamento-condizionamento, a causa dell'aumento dei consumi per riscaldamento. Tuttavia, a causa del minor prezzo dell'energia prodotta dal gas per riscaldamento rispetto all'energia elettrica usata per il condizionamento, anche quando non vi è convenienza in termini energetici vi è quasi sempre convenienza in termini economici per quanto riguarda i costi per riscaldamento-condizionamento.

Al contrario le barriere frangisole cosiddette intelligenti consentono sempre di avere i maggiori vantaggi sia in termini energetici che in termini economici, grazie alla loro capacità di adattarsi dinamicamente alle condizioni climatiche e d'illuminazione del momento.

Bisogna tuttavia sottolineare come le barriere frangisole abbiano altri vantaggi oltre a quelli finora considerati: in particolare esse consentono un maggior comfort per gli occupanti degli edifici evitando che essi vengano investiti direttamente dalla radiazione solare e siano soggetti a stress visivo e accaldamento. Quindi anche quando non vi è convenienza energetica, vi possono comunque essere dei vantaggi per gli utenti con l'installazione di barriere frangisole.

Infine si è messo a punto un metodo di misura a basso costo per la verifica sperimentale delle look-up table ottenute per simulazioni ray-tracing, che consentirà in futuro di validare le medesime.

BIBLIOGRAFIA E RINGRAZIAMENTI

[Akbari, 1995] Ashem Akbari, “Cool Construction Materials Offer Energy Savings and Help-Reduce Smog”, ASTM Standardization news, Novembre 1995

[ARPA Friuli] <http://www.arpa.fvg.it/index.php?id=298>

[Hu & White] C. Hu, R.M. White, "Solar Cells: From Basic to Advanced Systems", 1983, McGraw-Hill, New York

[Oke, 1987] T. R. Oke, “Boundary layer climates”, 1987, 2nd Ed., Routledge, London

[Ulaby et al., 1981] Fawwaz T. Ulaby, Richard K. Moore, Adrian K. Fung, 1981, “Microwave Remote Sensing – Active and Passive – Volume I – Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry”, Artech House Publishers, London

[Vitucci et al., 2012] Enrico Maria Vitucci, Vittorio Degli Esposti, Leo Capriotti, “Ray tracing to predict insolation in urban environment”, 2012, IGARSS 2012, IEEE

Si ringraziano il professor Vittorio Degli Esposti, Enrico Maria Vitucci, Leo Capriotti e Stefano Fiaschi per la loro cortesia e disponibilità.