
sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea: Ingegneria Edile Magistrale

POSSIBILITÀ DELL'USO DELL'ENERGIA SOLARE IN TESSUTI URBANI EDIFICATI. PROPOSTA DI UNO STRUMENTO DI CALCOLO IN AMBIENTE GIS

Autore: Marco Casucci

Relatori: Primo relatore Dott.ssa Carla BALOCCO, Relatore esterno Dott.Giovanni Battista Andreani; Commissione del 5 Luglio 2012, Presidente Prof.Ing. Paolo Spinelli

Sono e sono stata Relatore di numerose Tesi di Laurea triennali e Magistrali in Ingegneria Edile, ma di fronte al lavoro svolto da Marco Casucci, non posso che dire che la sua Tesi costituisce un esempio unico di un lavoro di ricerca, analisi e sviluppo originale, di validità e rigore pratico applicativo. La ricerca indaga e approfondisce in modo eccellente il tema della distribuzione della radiazione solare nei tessuti urbani diversamente edificati letta sia dal punto di vista luminoso che termico ed energetico.

La tesi di Marco Casucci presenta notevoli elementi di originalità: l'approccio metodologico nonché il programma di calcolo proposto e messo a punto sono un contributo fondamentale alla ricerca scientifica nell'ambito della razionalizzazione energetica e dell'impiego efficiente dell'energia finalizzate al contenimento dei consumi energetici degli edifici. Il lavoro offre poi prospettive pratiche progettuali utili alla programmazione energetica territoriale ed alla pianificazione urbanistica orientata sia a nuove città o estensioni di esse in cui sia garantito il benessere termoigrometrico, attraverso il controllo della formazione di isole di calore urbane, di aree a basso albedo e di alternanza di zone in ombra più fresche caratterizzate da brezze locali e venti dovuti alle variazioni di pressione, ma anche quello visivo e percettivo basati sul controllo del clima luminoso e della distribuzione delle ombre dirette ed indirette nel tessuto edificato.

La tesi risulta innovativa sia in relazione alle tematiche trattate, riallacciandosi in modo esaustivo e soddisfacente al filone di ricerche internazionali, sia in relazione alle potenzialità di applicazione pratica diretta, come ha dimostrato attraverso l'impiego dei Geographical Information Systems (GIS) cui Marco si è dedicato già a partire dal tirocinio sviluppato presso l'Azienda Geosystems di Firenze.

Le metodologie adottate, analizzate ed applicate con rigore nella fase di indagine, sono state efficacemente finalizzate alla realizzazione di uno strumento informatico integrato di pratico impiego, robusto, efficace e con tempi computazionali molto ridotti. Questo lavoro di Tesi si distingue a mio avviso per la capacità di affiancare al momento di analisi teorico sperimentale una fase propositiva, innovativa e realizzativa dei risultati raggiunti attraverso la messa a punto di un metodo di analisi e quantificazione su base oraria e per qualsiasi luogo e/o latitudine, della radiazione solare in ambiente urbano che tiene conto della variazione dei profili delle ombre portate su ciascuna facciata degli edifici studiati.

I risultati ottenuti, valicati anche con misure su campo, sono interessanti ed analizzati con uno spiccato senso critico che permette di individuare tematiche che potranno essere oggetto di approfondimenti scientifici metodologici nonché sperimentali successivi.

La tesi è esemplare per la volontà e capacità di affrontare le problematiche legate alla ricerca sperimentale, riuscendo a concretizzare il trasferimento tecnologico dal settore scientifico di ricerca che concerne la Fisica Tecnica Ambientale al settore aziendale produttivo coinvolto per la stesura e verifica del software prodotto.

Dott.ssa Carla Balocco

INTRODUZIONE

Nel mercato odierno delle costruzioni la progettazione energetica svolge un ruolo sempre più importante, sia nella realizzazione di nuovi edifici che nella ristrutturazione di quelli esistenti. Si parla ormai molto di risparmio e di

certificazione energetica, ma dopo 10 anni dalla pubblicazione della direttiva europea 2002/91, nata per effetto delle richieste del protocollo di Kyoto, si può fare ancora molto per migliorare l'efficienza energetica soprattutto nel settore di maggior consumo energetico: l'edilizia. La crisi finanziaria attualmente in corso ha accentuato ancora di più la necessità di non sprecare energia,

e quindi denaro, attraverso una progettazione attenta a questi requisiti.

Questa attenzione a livello mondiale è stata recepita anche nel nostro paese, infatti la normativa italiana attualmente vigente prescrive delle prestazioni attese dai nuovi edifici così stringenti da portare alla attuale discussione sugli NZEB *Net Zero Energy Building*, ovvero edifici connessi ad una rete energetica territoriale che nell'arco temporale di un anno solare presentano una somma algebrica dei flussi in ingresso e di quelli in uscita di valore pari a zero, e su edifici come produttori di energia.

Per cercare di determinare l'importanza della tematica dell'energia utilizzata per le abitazioni è opportuno riflettere su come questa viene utilizzata. Secondo il rapporto energia ambiente redatto da ENEA[4], il settore civile risulta essere il comparto che necessita di una quantità di energia primaria più alta rispetto agli altri settori e come la parte di energia primaria derivante dal gas, e quindi utilizzata principalmente per il riscaldamento degli edifici, rappresenta una delle voci più influenti sul bilancio dell'energia a livello nazionale.

L'elevata incidenza dei consumi per riscaldamento rispetto ai consumi totali del settore residenziale è da attribuire prevalentemente alle caratteristiche strutturali degli edifici la maggior parte delle quali sono stati costruiti in un periodo in cui la riduzione del fabbisogno energetico non era un criterio di progettazione e non hanno subito interventi atti a migliorarne le prestazioni energetiche.

Il tema della progettazione è molto vasto e complesso, coinvolgendo fenomeni ed aspetti molto diversi, spesso sinergici che richiedendo soprattutto un approccio integrato e multidisciplinare.

Se si guarda la progettazione del singolo edificio, essa richiede nell'ottica della sostenibilità e del risparmio energetico, un approccio sistemico, la lettura del sistema integrato edificio-impianto e quindi pensare ai sistemi energetici che con esso interagiscono. Se poi ci si rivolge alla progettazione urbana il tema diventa ancor più difficile in quanto richiede una visione sistemica delle risorse ambientali, energetiche, ma anche sociali e culturali in grado di individuare scelte progettuali capaci di tutelare, conservare/preservare e rendere godibile/fruibile il patrimonio delle nostre città che oggi più che mai risulta al centro delle problematiche legate alle trasformazioni economiche ed energetiche. Le attuali trasformazioni turistiche, ma anche tecnologiche, economiche ed energetiche inducono ad una riflessione di fondo su come

affrontare ed eventualmente razionalizzare questi cambiamenti. La questione risulta poi alquanto complessa se si pensa che il concetto stesso di edificio, ed ancor più di città, è cambiato e con esso anche l'approccio dell'abitante e fruitore o visitatore. Una percentuale crescente della popolazione mondiale, ormai superiore al 50% vive in ambiente urbano, dove si consuma la maggior parte delle risorse energetiche con impatti ambientali non trascurabili.

In tale contesto l'energia proveniente dalla radiazione solare potrebbe costituire una grande risorsa ma al contrario essa viene generalmente persa, concentrata per poi essere distribuita (quando arriva già degradata e distribuita sul territorio) con un ulteriore dispendio e perdite importanti.

Il tessuto urbano edificato interagisce con la radiazione solare amplificandone gli effetti in alcune zone, favorendo la formazione di fenomeni come ad esempio le isole di calore, e limitando la radiazione incidente in altre prevalentemente situate in ombra o appartenenti a tessuti con morfologie particolari.

La conoscenza della distribuzione della radiazione solare e delle connesse ombre portate nei tessuti urbani diversamente edificati influenza sia i carichi termici esogeni a cui è sottoposto l'involucro edilizio, sia la disponibilità di luce naturale chiamando in causa il cosiddetto "*Dritto al Sole*".

In questo contesto il progetto illuminotecnico si dimostra sempre particolarmente complesso e suscettibile di continui aggiustamenti, rimandando ad una significativa comprensione del fenomeno dell'illuminazione e del controllo dell'ambiente. In particolare una corretta progettazione illuminotecnica non può prescindere da un'analisi integrata delle prestazioni del singolo edificio e delle interazioni con gli edifici presenti nel contesto urbano.

Di progettazione energetica si può parlare a tutte le scale; ovvero essa trova declinazione e contenuti in tutte le dimensioni della progettazione dalla pianificazione territoriale alla progettazione edilizia passando per la pianificazione urbanistica generale e per parti urbane.

Con questo lavoro si vuole analizzare la disponibilità di strumenti che consentono di stimare la distribuzione della radiazione solare in ambiente urbano e mettere a punto quindi un nuovo algoritmo che fornisca indicazioni georeferenziate circa l'interazione presente fra edifici in zona urbana e la distribuzione ed entità delle ombre portate e delle zone di ombreggiamento presenti diversamente distribuite.

In particolare si è ritenuto utile individuare alcuni parametri fruibili per la progettazione come il fattore che indica la percentuale di ombreggiamento delle pareti degli edifici che compongono una città che può risultare utile per la progettazione a diverse scale.

Infatti per quanto riguarda la pianificazione urbana, grazie a tale attributo, si possono facilmente individuare le zone più critiche di un'intera città o dei suoi quartieri, in termini di ridotto accesso della radiazione solare, di necessario controllo di questa sul lato termico e su quello luminoso migliorando la qualità della vita degli abitanti. Inoltre questo parametro è un termine quantitativo e per questo facilmente utilizzabile per determinare l'impatto che la modifica di un'area in contesto urbano avrebbe sugli edifici circostanti ad esempio causata da ulteriori edificazioni oppure da modifiche sulla destinazione d'uso dei suoli o cambiamenti dovuti al piano del traffico, alla destinazione di spazi ad aree verdi o di verde attrezzato.

Allo stesso tempo, la percentuale di ombreggiamento, può essere utilizzata per la progettazione e l'analisi energetica di un nuovo edificio, o per la ristrutturazione e il retrofit energetico di uno esistente, utilizzando condizioni al contorno che non si discostano da quelle reali. A scala locale può risultare utile conoscere l'andamento del profilo dell'ombra sulle facciate dell'edificio per poter decidere in modo razionale posizione, dimensione ed eventuale inclinazione delle aperture trasparenti, nonché della necessità di eventuali schermi.

APPROCCI E METODOLOGIE

La distribuzione della radiazione solare può essere analizzata su contesti di estensione eterogenea con approcci dedicati.

Si può eseguire un'analisi su singoli edifici o su piccoli contesti, come un isolato, con l'ausilio di software BIM, acronimo di *Building information modeling*. Questi applicativi utilizzano modelli informatici molto dettagliati in cui ogni edificio viene descritto, mediante dati digitali, in tutte le sue caratteristiche come i materiali e particolari tecnici utilizzati. Tuttavia questo elevato grado di dettaglio rende questo tipo di modello non applicabile quando cresce il numero degli edifici.

Se invece si è interessati ad ottenere dei risultati su di un numero elevato di edifici è necessario utilizzare un tipo di modello con meno dettagli ma che permette una modellazione di un contesto molto esteso. Questo approccio è sviluppato nei software GIS (*Geographical Information System*)

che possono gestire una quantità di dati praticamente illimitata senza vincoli di estensione del territorio in esame. I risultati che si possono ottenere con questo tipo di modello saranno meno accurati ma in grado di fornire una visione globale su larga scala del problema.

Entrambi questi approcci richiedono la disponibilità di data base strutturati

Da uno studio dello stato dell'arte dei software per l'analisi della distribuzione della radiazione solare degli edifici è emerso che sono presenti numerose soluzioni BIM in grado di ottenere, sulla base di modellazioni rigorose, simulazioni molto accurate e non è stato individuato nessun ambito di intervento per questa tipologia di software.

Per quanto riguarda invece l'ambito GIS nel mercato odierno esistono diversi strumenti in ambito GIS per l'analisi della radiazione solare tra i quali segnaliamo per la sua vasta diffusione Solar Analysis che opera sulla piattaforma proprietaria *ESRI ArcGIS* ed il modulo *r.sun* [5] della piattaforma open source *GRASS*.

Questi strumenti di analisi della radiazione solare, come tutti gli altri che sono stati esaminati, consentono di analizzare gli effetti del sole in una zona geografica ed ottenere delle mappe della radiazione solare nelle sue componenti diretta e diffusa oppure della radiazione globale. I risultati possono essere facilmente integrati con altri sistemi di informazione geografica (GIS) e possono aiutare a modellare i processi fisici e biologici in atto.

Per eseguire questo tipo di elaborazione tutti gli strumenti conosciuti sul mercato si basano su modelli digitali del terreno o *DEM Digital Elevation Model*, ovvero dei modelli ottenuti a partire da immagini satellitari o aerofotografie che permettono con appositi processi basati sulla localizzazione di ciascun punto confine entro due immagini con punti di vista diversi e assegnano ad ogni elemento di superficie in pianta un valore di elevazione.

Si noti che un *DEM* riduce la vista dell'areo-foto a matrici di punti regolarmente distribuiti (secondo una scacchiera) sull'area in esame o in insieme di triangoli irregolarmente distribuiti di cui sono quotati solo i vertici.

Questo modellazione del problema consente di avere dei buoni risultati e con dei tempi di elaborazione accettabili ma le informazioni ottenute possono essere rapportati ad una fotografia aerea della radiazione solare incidente e per questo motivo forniscono delle informazioni utili soprattutto per quanto riguarda la radiazione orizzontale incidente sui tetti degli edifici e delle zone con basso indice di densità urbana come, ad esempio le

aree rurali.

Questo approccio risulta invece poco sensibile a tutto ciò che riguarda la superficie verticale degli edifici e a come questi interagiscono fra loro soprattutto per zone dove la densità di costruzioni è elevata, e quindi le interazioni fra edifici può essere molto influente sulle prestazioni energetiche dell'edificio e sui fenomeni che si possono creare negli spazi aperti fra le costruzioni, come le isole di calore.

Per questo motivo si è deciso di cercare di sviluppare uno strumento GIS che a differenza dei precedenti riuscisse a coniugare la prospettiva del pianificatore urbano e quindi ad avere una visione d'insieme del complesso città ed allo stesso tempo di creare un punto di vista interno alla città stessa studiando la distribuzione delle ombre e i conseguenti effetti sulle facciate degli edifici. Si cerca quindi risolvere un problema sensibile che fino ad oggi non è stato affrontato attraverso la creazione di uno strumento innovativo che non utilizza dati distribuiti secondo una maglia regolare (dati raster) ma dati vettoriali.

LO STRUMENTO PROPOSTO PER AMBIENTE GIS E IL SOFTWARE SVILUPPATO

Il software sviluppato permette, a partire da una cartografia bidimensionale georeferenziata con un attributo che specifica l'altezza degli edifici, di determinare la posizione del sole per una data ed un ora fornita da input e di conseguenza l'ombra propria, portata ed auto-portata sulle superfici verticali degli edifici. Una volta definito il profilo dell'ombra viene determinato per ogni parete un indice di ombreggiamento ottenuto come il rapporto fra l'area della parete coperta da ombra e l'area totale della stessa. Tale indice sarà per costruzione compreso fra 0, per una parete completamente esposta al sole, e 1 nel caso di parete completamente in ombra.

Il modello scientifico adottato prevede che gli edifici siano rappresentati da un solido ottenuto come estrusione della pianta dell'edificio e che il terreno sul quale sono edificati risulti orizzontale, Figura 1. Questo tipo di modello che può sembrare eccessivamente semplificato risulta uno standard in ambito GIS in quanto nella cartografia bidimensionale non ci sono informazioni circa gli aggetti presenti sulla facciata ed i risultati ottenuti confermano la bontà di questo modello.

Quando si realizza un nuovo applicativo in ambito GIS esistono dei problemi che devono essere

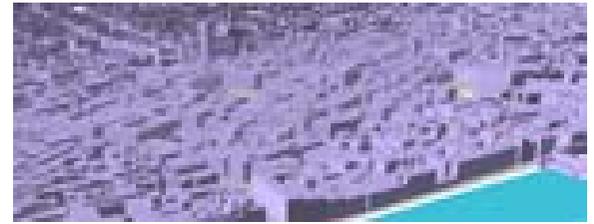


Figura 1: Panoramica del modello utilizzato per la simulazione.

affrontati in modo efficiente come ad esempio i tempi di esecuzione per ogni operazione elementare. Se ad esempio si ipotizza di dover esaminare un territorio che presenta un numero di edifici pari a 100000, mediamente composti da 7 pareti, e di dover confrontare fra loro tutte le pareti presenti in una cartografia estesa al fine di determinare il profilo delle ombre i tempi di esecuzione dell'algoritmo risultano molti lunghi e non compatibili con le normali attività lavorative. Infatti anche ipotizzando di poter eseguire 10 confronti per millisecondo, un tempo compatibile con le attuali frequenze di clock dei processori, il tempo di esecuzione necessario è pari a :

$$\begin{aligned} 0,0001 \text{ s} \times 1000000 \times 70 &= \text{Tempo di esecuzione per ogni singola parete} \\ 70 &= 1000000 \times 100000000 &= \text{Tempo di esecuzione totale} \\ \frac{1000000000}{60} &= \frac{11 \text{ (mili. anni)}}{60 \text{ (minuti)}} &= \frac{1,85 \text{ (m.}}{24 \text{ (ore)}} &= \frac{267 \text{ (giorni)}}{365 \text{ (giorni)}} &= 1,5 \text{ (anni)} \end{aligned}$$

E' quindi evidente la necessità di eseguire delle ottimizzazioni nella selezione delle pareti da confrontare.

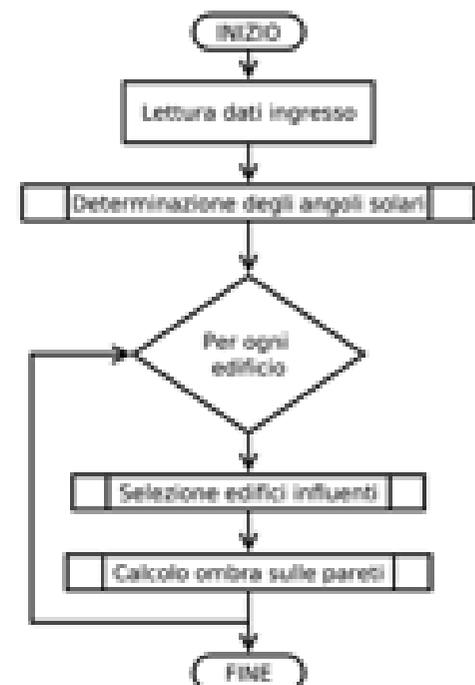


Figura 2: Diagramma di flusso semplificato dell'algoritmo

Lo strumento sviluppato segue un flusso di lavoro articolato in fasi, come mostrato in Figura 2, che dopo una fase di inizializzazione in cui vengono letti i dati in ingresso e create le strutture per memorizzare i dati prodotti dalla simulazione, prevede la determinazione della posizione del sole.

La posizione del sole rispetto alla terra è espressa secondo degli angoli convenzionali denominati altezza solare, o elevazione, ovvero l'angolo formato dalla retta sole-terra con il piano dell'orizzonte che può assumere valori fra 0° e 90° , ed azimuth solare, ovvero l'angolo, sul piano dell'orizzonte, che la proiezione della retta sole-terra forma con la direzione Nord ed è assunto positivo verso Est. Questi angoli dipendono, oltre che dal giorno e dall'ora, dalla latitudine e dalla longitudine del punto di osservazione. Gli angoli solari vengono determinati grazie all'uso di un algoritmo denominato «Solar Position Algorithm» [6], sviluppato dal Laboratorio Nazionale per le Energie Rinnovabili americano (NREL), riconosciuto per la sua rapidità e per l'accuratezza nello stimare la posizione del sole.

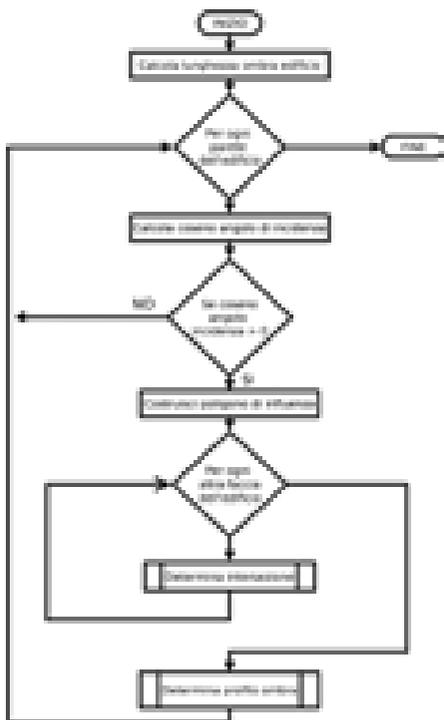


Figura 3: Diagramma di flusso semplificato per la determinazione dell'ombra propria ed auto portata

In seguito alla determinazione della posizione del sole si procede con il calcolo dell'ombra propria ed auto portata, Figura 3. Il concetto alla base della catalogazione fra pareti esposte al sole e pareti in ombra è l'angolo di incidenza ovvero l'an-

golo compreso fra la normale uscente dalla parete e il versore solare determinato dagli angoli solari di elevazione e di azimuth. Una superficie comunque orientata risulta esposta al sole quando l'angolo di incidenza è inferiore di 90° altrimenti la superficie è coperta da ombra propria.

Nel caso di parete in ombra propria si assegna un valore di ombreggiamento pari ad 1 e non sono necessari ulteriori elaborazioni per determinare il profilo dell'ombra sulla parete.

Viceversa per ogni parete che risulta esposta al sole, si determina l'eventuale presenza di ombre auto portate definite dalla proiezione delle pareti dell'edificio stesso che si trovano in ombra propria. Al termine di questa operazione si determina il nuovo valore di ombreggiamento sulla parete e si passa alla determinazione delle ombre portate, Figura 4.

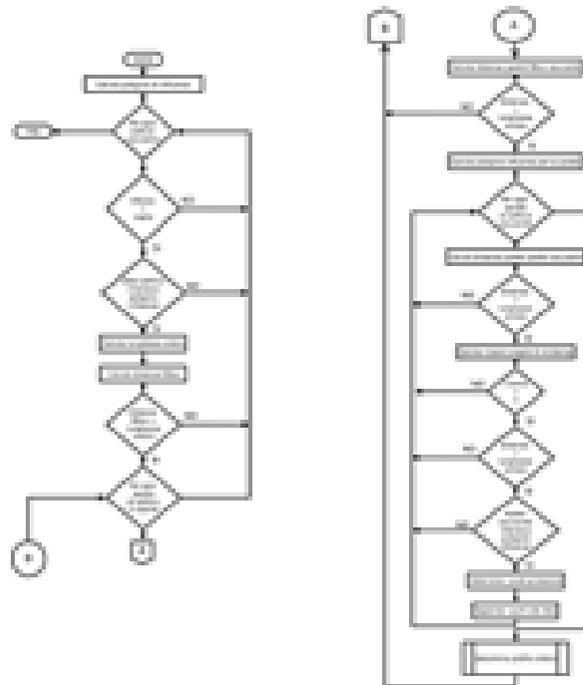


Figura 4: Diagramma di flusso semplificato per la determinazione dell'ombra portata.

Questo procedimento è quello che ha richiesto un grado di ottimizzazione maggiore in quanto è risultato essere la parte computazionalmente più onerosa.

Le ottimizzazioni che sono state eseguite hanno lo scopo di ridurre il numero di confronti necessari a determinare il profilo dell'ombra per ogni parete.

Il primo passo consiste nel calcolare la lunghezza nel piano dell'orizzonte dell'ombra per l'edificio più alto presente nella base dati per la data e l'ora di calcolo inseriti da input. Tale valore è denomi-

nato *profondità dell'ombra massima*.

Vengono quindi selezionati tutti gli edifici fra quelli presenti nella base dati che si trovano ad una distanza inferiore alla profondità dell'ombra massima dall'edificio in esame. Questa operazione, che viene eseguita tramite l'ausilio dello strumento GIS, permette di ridurre in modo considerevole gli edifici da confrontare ma include nell'insieme degli elementi selezionati anche edifici che per la loro posizione non possono proiettare ombre sull'edificio in esame.

Per questo è stata realizzato un ulteriore livello di ottimizzazione che, fra gli elementi precedentemente selezionati esegue un ulteriore cernita escludendo tutti quegli edifici la cui posizione non risulta idonea per proiettare un'ombra sull'edificio in esame.

Questa operazione è resa possibile grazie alla creazione di un poligono nel piano dell'orizzonte, detto *poligono di influenza*, ottenuto traslando la pianta dell'edificio in esame nella direzione del versore solare per una lunghezza pari alla profondità massima dell'ombra.

Tutti gli edifici che intersecano il *poligono di influenza* rimangono nella selezione, nell'immagine sono evidenziati dal colore rosso, mentre gli edifici celesti sono quelli che non intersecano il poligono di influenza e che vengono quindi scartati.

Per ogni edificio all'interno della selezione si esegue infine un controllo per verificare che l'altezza dell'edificio sia sufficiente a proiettare un'ombra ad una distanza pari a quella presente fra l'edificio stesso e la parete sulla quale vogliamo determinare il profilo dell'ombra.

Eseguiti questi tre livelli di ottimizzazione della selezione degli edifici si procede alla determinazione del profilo dell'ombra con delle operazioni di algebra lineare.

Una volta determinato il profilo dell'ombra sulla parete in esame si calcola l'indice di ombreggiamento per la parete che viene memorizzato nella struttura dati di uscita.

RISULTATI

Per verificare la correttezza dei risultati ottenuti sono stati eseguiti dei confronti fra i il profilo delle ombre ottenuto tramite la simulazione e i rilievi fotografici che sono stati sottoposti ad un processo di foto-raddrizzamento per poter eseguire un confronto diretto.

Dalla sovrapposizione delle due immagini si può constatare l'accuratezza della simulazione che

differisce dalla realtà per le sole parti in ombra dovute agli oggetti presenti.

In particolare in Figura 5 si può notare che i risultati differiscono in una zona situata sotto la linea di gronda dell'edificio, ombra dovuta all'oggetto della gronda stessa ed una zona, nell'intorno dell'ombra portata ottenuta attraverso la simulazione, dovuta agli oggetti presenti sugli edifici oscuranti.



Figura 5: Sovrapposizione del profilo dell'ombra ottenuto tramite la simulazione con il rilievo fotografico foto-raddrizzato di un edificio posto in via Pagnini, zona Statuto, il giorno 1 Giugno 2012 alle ore 8:55.

Per mostrare i risultati prodotti dalla simulazione abbiamo selezionato una piccola area in zona urbana del Comune di Firenze situata nei pressi dello stadio comunale *Artemio Franchi*.

In Figura 6 sono stati sovrapposti l'orto-foto e i valori dell'indice di ombreggiamento Ratio ottenuti mediante una simulazione effettuata per il giorno 1 Giugno 2012 alle ore 09:00. In questa rappresentazione è possibile individuare le pareti prevalentemente esposte al sole e quelle invece prevalentemente in ombra.



Figura 6: Visualizzazione della percentuale di ombreggiamento per le singole pareti.

Nel caso in cui oggetto dell'interesse l'utente non siano le singole pareti ma desideri una visione d'insieme di ogni singolo edificio sono necessarie delle operazioni di post processing che, a partire dai dati ottenuti attraverso la simulazione, determinino un valore caratteristico per ogni edificio come una media pesata dei valori di ombreggiamento delle pareti con un peso pari alla superficie



Figura 7: Visualizzazione del valore medio di ombreggiamento calcolato per ogni edificio.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Lo strumento creato costituisce un valido sussidio per le analisi della distribuzione della radiazione solare in contesti urbani.

In particolare possono essere individuati due ambiti di intervento: L'analisi dell'esistente e la pianificazione urbana. Del primo gruppo fanno parte: la valutazione delle potenzialità energetiche per un conseguente intervento di ristrutturazione con particolare attenzione alla distribuzione della radiazione solare e quindi al risparmio energetico, l'analisi per l'inserimento di pannelli solari, sia fotovoltaici che termici, specifici per le condizioni di esposizione della facciata.

Per quanto riguarda la pianificazione urbana l'applicazione può essere utilizzata per la progettazione di nuove aree urbane finalizzata all'ottimizzazione dell'esposizione dell'edificato, oppure per effettuare una valutazione dell'impatto della variazione del contesto urbano sulle zone limitrofe. Infine si può eseguire un'analisi del diritto al sole degli edifici, ovvero una valutazione della quantità di luce diretta incidente sull'involucro esterno.

Gli sviluppi futuri dell'applicazione sono orientati sia ad un'ottimizzazione della accuratezza dei risultati tramite una modellazione più rigorosa del terreno e della vegetazione e all'estensione del calcolo sui tetti, sia ad ampliare il campo di indagine estendendosi anche alla parte di analisi dell'irraggiamento solare nelle sue componenti diretto, diffuso e riflesso per contesti di dimensioni limitate.

Infine è auspicabile l'automazione del calcolo ad intervalli predefiniti per la creazione di atlanti delle ombre.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Comune di Firenze che mi ha fornito i dati necessari per sviluppare e testare l'algoritmo. Un ringraziamento particolare va alla Prof.ssa Balocco e al Dott. Andreani che mi hanno sostenuto ed aiutato durante la tesi e senza i quali non avrei potuto condurre a termine uno studio così nuovo ed interessante. Ci tengo a ringraziarli sia per il supporto professionale che non mi hanno mai fatto mancare sia per la loro disponibilità, comprensione ed umanità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Cascone Y. et al (2010), *"Calcolo dell'ombreggiamento sull'involucro dell'edificio"*, ENEA.
- [2] - Disi A. et al. (2009), *"L'immagine energetica della città"*, ENEA.
- [3] - ESRI, (2011), *"An overview of the Solar Radiation tools"*.
- [4] - Manna C. et al. (2010), *"Rapporto energia e ambiente. Analisi e scenari 2009"*, Roma, Ufficio Studi ENEA.
- [5] - Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., (2007), *"Potential of solar electricity generation in te European Union member states and candidate countries"*, Solar Energy, 81, 1295-1305.
- [6] - Reda, I., Andreas, A. (2008), *"Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications"*, National Renewable Energy Laboratory.