



Ricerca di Sistema elettrico

Modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo.
Linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo.

E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco

MODELLO ENERGETICO DEL MICROCLIMA ALL'INTERNO DI UN EDIFICIO RICOPERTO CON ESSENZE VEGETALI IN AMBIENTE CLIMATICO MEDITERRANEO
LINEE GUIDA PER L'INCREMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DI UN EDIFICIO RICOPERTO CON ESSENZE VEGETALI IN AMBIENTE CLIMATICO MEDITERRANEO

E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco (Università degli Studi di Bari "Aldo Moro"
Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali - DISAAT)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material)

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"*

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Evelia Schettini

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	7
2.1 MODELLO ENERGETICO DEL MICROCLIMA ALL'INTERNO DI UN EDIFICIO RICOPERTO CON ESSENZE VEGETALI IN AMBIENTE CLIMATICO MEDITERRANEO	7
2.2 LINEE GUIDA PER L'INCREMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DI UN EDIFICIO RICOPERTO CON ESSENZE VEGETALI IN AMBIENTE CLIMATICO MEDITERRANEO	15
2.3 PUBBLICAZIONI.....	18
3 CONCLUSIONI.....	18
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	18
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	21

Sommario

In estate le città risultano più calde di circa 5°C rispetto alle aree periferiche e rurali in quanto gli edifici e le strade assorbono e rilasciano calore. Il fenomeno del riscaldamento urbano, noto come "isola di calore urbana", influenza negativamente le condizioni esterne di comfort umano, incrementa la concentrazione di polveri sottili e di inquinanti, contribuisce a un incremento della domanda di energia per il condizionamento climatico all'interno degli edifici, così come aumenta l'impatto ambientale a causa della crescente domanda di energia. Una soluzione tecnologica sostenibile per migliorare l'efficienza energetica degli edifici è l'uso di tetti e pareti verdi al fine di ridurre il consumo di energia per il condizionamento estivo e migliorare l'isolamento termico in inverno. Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università di Bari in collaborazione con l'ENEA UTEE AGR ha studiato, all'interno dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, un modello energetico finalizzato all'incremento dell'efficienza energetica per edifici caratterizzati dall'applicazione di sistemi verdi. Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha, inoltre, individuato il quadro normativo nazionale e internazionale per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali. Le norme vigenti indicano le linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali. L'uso di tetti verdi e pareti può contribuire a mitigare il fenomeno dell'isola di calore abbassando i valori della temperatura dell'aria esterna, a ridurre le emissioni di gas quali la CO₂, a ridurre la quantità di acque meteoriche scaricate nella rete fognaria, a incrementare l'isolamento acustico dell'edificio e l'attutimento dei suoni, a contribuire al comfort umano, a migliorare la qualità dell'aria e, soprattutto, a ridurre l'uso di energia per il condizionamento degli edifici.

1 Introduzione

Il fenomeno del riscaldamento urbano, noto come isola di calore urbana, influenza negativamente le condizioni di comfort esterne e la concentrazione di agenti inquinanti come polveri sottili e anidride carbonica, così come aumenta l'impatto ambientale a causa della domanda di energia per il condizionamento (Karlessi et al., 2009; Karlessi et al., 2011; Santamouris, 2012; Berdahl e Bretz, 1997; Bretz e Akbari, 1997; Bretz et al., 1998; Gentle et al., 2011; Gladis e Schumann, 2011; Jo et al., 2010; Joudi et al., 2013; Li et al., 2013; Prado e Ferreira, 2005; Synnefa et al., 2006; Uemoto et al., 2010; Zinzi et al., 2012).

Durante il periodo estivo infatti nelle aree urbane si rilevano temperature superiori rispetto a quelle misurate in aree rurali; questa differenza è da attribuirsi alla profonda modifica che il territorio nei grandi centri urbani ha subito rispetto ai caratteri originari, e principalmente quindi alla tendenza da parte di strutture di edifici e di strade ad assorbire e rimettere calore, alla carenza di aree verdi, ad inadeguate condizioni di ventilazione negli attuali assetti insediativi ed alla ridotta possibilità per le radiazioni infrarosse emesse di disperdersi in atmosfera (Oke et al., 1991).

La Figura 1 esemplifica tramite una mappa isoterma concettuale le differenze di temperature che si possono sviluppare tra aree con differenti densità insediative (la linea tratteggiata rappresenta la sezione lungo la quale sono prese le misure) (EPA, 2008).

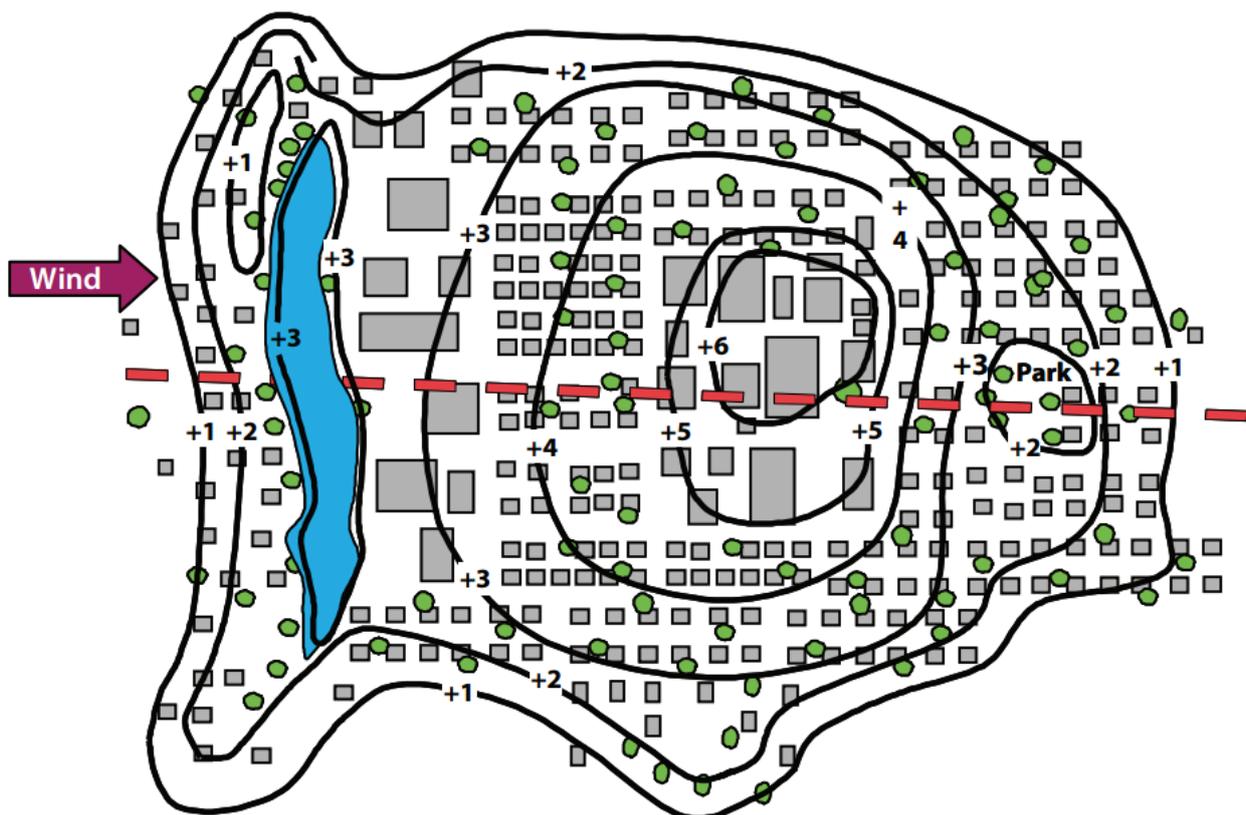


Figura 1: Mappa isoterma concettuale raffigurante una isola di calore urbana in atmosfera notturna (EPA, 2008)

La mutata natura del territorio genera inoltre un cambiamento del regime pluviometrico; temperature più elevate ed un maggior concentrazione di agenti inquinanti nell'atmosfera favoriscono lo sviluppo di temporali estivi. Una tecnologia sostenibile per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e per mitigare gli scambi termici è l'impiego di tetti verdi e di pareti verdi al fine di ridurre il consumo di energia per il condizionamento estivo ed aumentare l'isolamento termico in inverno (Cheng et al., 2010; Jim and Tsang,

2011; Jaffal et al., 2012; Köhler and Poll, 2010; Kolokotsa et al., 2013; Perini et al., 2011; Sfakianaki et al., 2009).

La tecnica di posizionare vegetazione sui tetti e su facciate di edifici (GRF) ha visto un crescente interesse in molte città. Utilizzando tale tecnica, grandi quantità di radiazione solare saranno assorbite e spese dalle piante per il proprio sviluppo vegetativo facendo penetrare all'interno dell'edificio una ridotta frazione di radiazione solare. Inoltre a seconda della tipologia di verde utilizzato ed a seconda della tecnica con cui è installato sull'edificio, si può ottenere una sensibile diminuzione della velocità del vento nello strato di aria a contatto con la superficie esterna della struttura edilizia migliorandone la resistenza termica (Perini et al. 2011).

I tetti e le pareti verdi possono pertanto essere considerati una soluzione verde per fornire isolamento termico alle strutture degli edifici contribuendo pertanto a ridurre il consumo di energia attraverso la riduzione della domanda di energia per il condizionamento degli ambienti (Perez et al., 2011); infatti ad una riduzione della temperatura interna pari a 0.5 °C può corrispondere un abbattimento dell'8% dell'utilizzo di energia elettrica per condizionamento (Dunnet e Kingsbury , 2004).

Si riscontra tra i benefici per l'ambiente circostante una riduzione del deflusso di acqua piovana, una riduzione dei picchi di precipitazioni e tuttavia gli studi effettuati in tale ambito sono stati sviluppati per regioni aventi clima freddo e con condizioni climatiche favorevoli allo sviluppo della vegetazione mentre pochi dati sono presenti per aree tipo il contesto Mediterraneo (Fioretti et al., 2010; Bengtsson et al. 2005; Carter e Rasmussen, 2006). In zone con clima freddo, i tetti verdi possono contribuire a ridurre i consumi di energia anche per il riscaldamento invernale riportando sensibili risparmi energetici maggiori rispetto a quelli ottenibili con la metodologia dei tetti freddi (Ascione et al., 2013).

L'innalzamento delle temperature nelle città (il cosiddetto fenomeno dell'isola di calore urbana) a causa dell'elevata concentrazione di calore assorbito e re-irradiato da tetti e pavimenti, può essere ridotto utilizzando la tecnica dei GRF, in particolare nelle aree fortemente urbanizzate. I GRF possono contribuire ad aumentare la vita utile delle più diffuse tipologie di tetti proteggendo le componenti del tetto dalla radiazione solare, da temperature estreme e da precipitazioni atmosferiche intense. Lo strato di protezione riduce la radiazione ultravioletta che intacca fortemente i materiali di rivestimento, le vernici ed i materiali plastici. Ne conseguono minori costi di manutenzione dell'edificio.

Le piante, oltre a migliorare la qualità dell'aria nelle aree urbane emettendo ossigeno, possono anche rimuovere le sostanze inquinanti presenti nell'aria, dare impulso alla biodiversità e fornire un ambiente esteticamente più gradevole per vivere e lavorare contribuendo pertanto a innalzare il valore di mercato dell'intero contesto insediativo. Grazie al contributo che i GRF possono fornire alla tematica generale di ridurre le emissioni di CO₂ nell'aria, un impiego diffuso di "tetti verdi", "tetti viventi", "facciata verde" e "tetti eco" può diventare parte della soluzione e una risposta attiva al Protocollo di Kyoto.

È stato riportato che a livello mondiale i GRF occupano una superficie di 234 ha, mentre in Italia sono presenti circa 1000 m² di tetti verdi. Poiché il settore delle costruzioni in Europa consuma il 40% del totale dell'energia finale, vi è un crescente interesse per l'utilizzo di tale "opzione verde" al fine di migliorare l'efficienza energetica di edifici civili in Europa e la tecnologia dei tetti e delle facciate verdi sta diventando comune nel settore dell'architettura moderna e delle nuove costruzioni.

I suddetti benefici sono perseguibili mediante un'adeguata progettazione dei sistemi di vegetazione, dal tipo di vegetazione impiegata, dalla tipologia di struttura di sostegno; nonostante l'interesse crescente, vi è ancora una carenza di dati quantitativi che possano illustrare compiutamente sia i materiali e che le tecniche o i contributi positivi che i tetti e le facciate verdi possono davvero fornire per l'efficienza e il risparmio energetico degli edifici, ai suoi occupanti, ed alla comunità vicina.

In Germania è stata portata avanti una buona ricerca di base in merito alle performance ambientali delle facciate verdi che ha portato allo sviluppo di norme e linee guida. Sebbene siano disponibili dati per alcune aree, soprattutto relativi alla Germania ed al Nord America, la maggior parte di tali dati non sono trasferibili a condizioni climatiche specifiche di altri paesi. Peraltro gli studi effettuati sono stati sviluppati per regioni aventi clima freddo e con condizioni climatiche favorevoli allo sviluppo della vegetazione mentre pochi dati sono presenti per l'ambiente climatico mediterraneo (Fioretti, 2010).

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari hanno condotto allo sviluppo di un modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo (Paragrafo 2.1) e alla individuazione delle linee guida attualmente presenti nel quadro normativo nazionale e internazionale per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo (paragrafo 2.2). Le attività svolte hanno consentito di elaborare una pubblicazione (paragrafo 2.3).

2.1 *Modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo*

Un modello energetico per la simulazione del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo ha sicuramente delle potenzialità sia da un punto di vista gestionale che progettuale. I modelli di simulazione dei fenomeni fisici inerenti il comportamento globale di un edificio riguardano:

- la radiazione solare incidente ed entrante nell'edificio;
- i meccanismi di trasmissione del calore e di trasferimento di massa;
- le funzioni di controllo degli impianti di regolazione delle condizioni ambientali interne;
- le condizioni di benessere di coloro che vivono o lavorano nell'edificio.

Il modello numerico implementato dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari coinvolge i primi due sottosistemi su elencati: la radiazione solare incidente ed entrante dell'edificio e il bilancio di energia per l'ambiente interno dell'edificio.

I meccanismi di trasmissione del calore

Le modalità di trasmissione dell'energia termica sono tre:

- conduzione
- convezione
- irraggiamento

I meccanismi di trasmissione per conduzione e per convezione si basano su gli stessi principi e sono legati alla presenza di massa in movimento nel sistema. La differenza sta nel fatto che la conduzione è associata a moti atomici o molecolari, mentre la convezione è legata a moti macroscopici di massa. L'irraggiamento, invece, è legato a fenomeni di propagazione di onde elettromagnetiche. Per questo motivo lo scambio termico radiativo può avvenire anche nel vuoto.

Trasmissione del calore per conduzione

La trasmissione del calore per conduzione avviene nei corpi solidi, liquidi e gassosi. Il calore passa dalla zona calda alla zona fredda attraverso vibrazioni delle molecole che compongono il corpo. In condizioni di regime stazionario (cioè le temperature dei singoli punti del flusso termico non variano sensibilmente con il tempo), considerando uno strato solido di materiale omogeneo ed isotropo, limitato da due superfici piane e parallele a distanza l e a temperatura T_1 e T_2 (Figura 2), il calore q trasmesso per conduzione si valuta tramite :

$$q = \frac{\lambda}{l}(T_1 - T_2) \quad [\text{W m}^{-2}]$$

dove λ è la conduttività del corpo [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$], fattore fisico che, per un corpo omogeneo, può essere considerato costante e caratteristico del corpo stesso; T_1 e T_2 sono le temperature delle facce del corpo [$^{\circ}\text{C}$] con $T_1 > T_2$

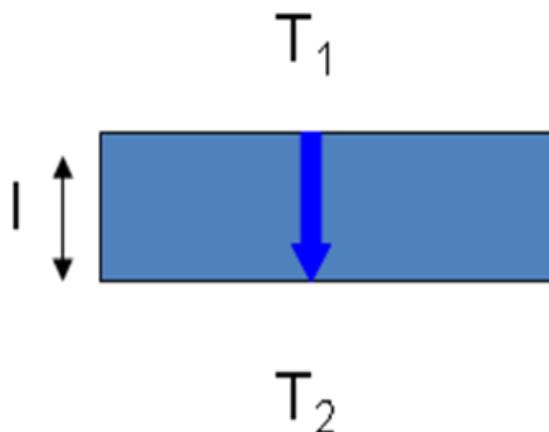


Figura 2:Trasmissione del calore per conduzione in regime stazionario.

I materiali caratterizzati da un alto valore di conduttività λ sono buoni conduttori termici (ovvero trasmettono elevati flussi termici con piccoli gradienti di temperatura) mentre quelli con basso λ sono detti isolanti termici e sono usati per coibentare termicamente le strutture. Il valore di λ per differenti materiali da costruzione è indicato in Tabella 1; la conduttività termica è in generale funzione della temperatura, ma tale dipendenza può essere trascurata nella maggior parte dei casi.

Tabella 1: Conduttività termica di differenti materiali da costruzione

	λ [$W\ m^{-1}K^{-1}$]	Densità [$kg\ m^{-3}$]
<i>MATERIALI DA MURATURA</i>		
Mattone pieno	0.7	Fino a 1600
Mattone forato	0.36	1200
Mattone forato porizzato leggermente murato con malta isolante	0.18	650
Muratura in pietra	2.3	Fino a 2600
Cemento armato	2.3	2400
Calcestruzzo CLS	1.6	1800
CLS alleggerito con argilla espansa	0.46	1100
<i>MATERIALI ISOLANTI</i>		
Argilla espansa	0.09	350
Polistirene espanso in lastre	0.04	20
Lana di vetro	0.04	20
Pannelli di calcio silicato	0.06	250
Pannelli in fibre minerali	0.045	115
<i>PAVIMENTAZIONE</i>		
Massetto in cemento	1.4	2000
Massetto in asfalto	0.8	2200
Ceramica	1.2	2000
<i>INTONACI E MALTE</i>		
Intonaco in cemento	1.4	2200
Intonaco plastico per cappotto	0.9	1200
Intonaco in calce	0.8	1600
Intonaco di gesso (calce/gesso)	0.7	1500
Malta di cemento	1.4	2200
Malta termoisolante < 800 kg/m^3	0.28	800

Trasmissione del calore per convezione

La trasmissione del calore per convezione avviene quando almeno uno dei corpi che prendono parte al fenomeno è un fluido, dunque avviene tra corpi solidi e fluidi (liquido o gas), o tra fluidi. Si instaura quando il fluido è in moto relativo rispetto al solido o al fluido. Il trasporto di calore si effettua mediante trasporto di materia: il fluido dalle zone calde si sposta verso i punti più freddi generando dei continui movimenti, detti correnti convettive. La convezione può essere naturale o forzata. La convezione naturale si verifica quando in un fluido le forze gravitazionali provocano correnti convettive, che portando a contatto parti della massa fluida che si trovano a differenti temperature ne provocano la miscelazione, favorendo la trasmissione del calore. La convezione forzata si verifica quando in un fluido i movimenti convettivi sono direttamente generati da cause meccaniche, ad esempio una pompa o un ventilatore.

Nelle ipotesi di regime stazionario, considerando un corpo solido caratterizzato dalla temperatura T_1 e un fluido caratterizzato dalla temperatura T_2 (Figura 3), il calore Q trasmesso per convezione si valuta tramite :

$$Q = h (T_1 - T_2) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

dove h è il fattore di convezione [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$], T_1 è la temperatura del solido [K], T_2 è la temperatura del fluido [K]

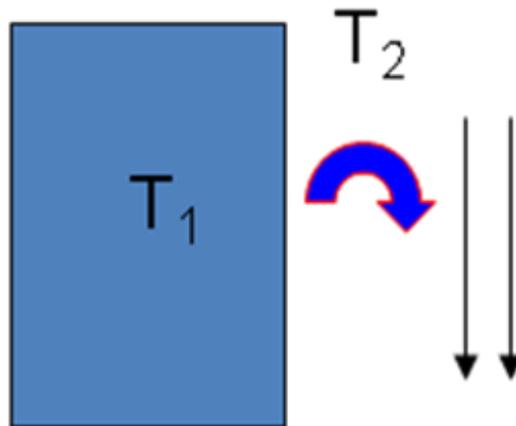


Figura 3: Trasmissione del calore per convezione in regime stazionario.

La valutazione del fattore di convezione h dipende sia dalle proprietà del fluido (viscosità, densità, conduttività termica, calore specifico) sia dalla configurazione geometrica e dalle condizioni di moto. Tanto più h è elevato, quanto maggiore è lo scambio termico convettivo (ovviamente, a parità di differenza di temperatura).

Trasmissione del calore per irraggiamento

Si ha trasmissione del calore per irraggiamento ogni volta che due o più corpi aventi temperature diverse fra loro si trovano in presenza l'uno dell'altro, separati da un mezzo che sia sufficientemente trasparente alle radiazioni (ad esempio lo spazio vuoto o un aeriforme). Ciascuno dei corpi emette energia radiante e allo stesso tempo ne riceve dagli altri, assorbendo almeno in parte l'energia ricevuta. Naturalmente anche il mezzo, a meno che non si tratti di spazio vuoto, prende parte attiva allo scambio per radiazione in quanto anch'esso emette e assorbe, sia pure in misura ridotta, l'energia radiante.

I corpi hanno proprietà selettive sia nei confronti dell'emissione che nei confronti dell'assorbimento e del rinvio di energia radiante in misura diversa per le varie lunghezze d'onda. Inoltre, la distribuzione nelle varie direzioni dell'energia radiante irradiata da una sorgente, come pure la misura nella quale l'energia radiante incidente viene assorbita o rinvia o riesce ad attraversare il corpo, dipende anche dalla direzione. L'intensità e la lunghezza d'onda λ delle radiazioni emesse dipende dalla natura del corpo emittente e della sua temperatura. La temperatura di un corpo è legata al grado di agitazione termica delle

molecole che lo costituiscono ed è tanto più alta quanto maggiore è l'energia cinetica media delle molecole. A -273°C (0 Kelvin) l'energia cinetica è nulla.

Per meglio comprendere il comportamento dei corpi rispetto allo scambio termico per irraggiamento si ricorre alla definizione di un corpo ideale, detto corpo nero, che possiede le seguenti proprietà:

- a) assorbe tutta la radiazione incidente a qualsiasi lunghezza d'onda;
- b) fissate temperatura e lunghezza d'onda, emette più energia di qualsiasi altro corpo;
- c) emette in modo uniforme in ogni direzione.

Per un corpo nero la potenza termica radiante globalmente emessa E_n è definita dalla Legge di Stefan Boltzmann:

$$E_n = \sigma_0 T^4$$

dove σ_0 è la costante di Stefan Boltzmann, pari a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ e T è la temperatura del corpo [K]. Il modello radiativo costituito dal corpo nero è utile alla trattazione dei corpi reali. Nota infatti l'emissione globale di un corpo nero (E_n), è possibile ricondurre l'emissione globale di un corpo reale (E) a quella del corpo nero. Ovviamente tale emissione sarà una frazione di quest'ultima. Si definisce emissività ε del corpo la grandezza:

$$\varepsilon = E / E_n$$

dove E è l'emissione globale del corpo [Wm^{-2}] e E_n è l'emissione globale del corpo nero alla stessa temperatura [Wm^{-2}].

I valori dell'emissività di alcuni materiali sono presentati in Tabella 2

Tabella 2: Emissività superficiali di differenti materiali

	Temperatura [°C]	ε
Acqua distillata	20	0.96
Ghiaccio liscio	-10	0.95
Brina	-10	0.98
Neve	-10	0.85
Calcestruzzo	20	0.92
Carta bianca	20	0.70-0.90
Legname	20	0.50-0.70
Quercia piallata	20	0.90
Mattone rosso grezzo	20	0.93
Sabbia	20	0.60-0.90
Terra cotta	70	0.91
Terra secca	20	0.90
Terra umida	20	0.95
Vetro lucido	20	0.94

Trasmissione globale del calore

Quando la trasmissione del calore coinvolge convezione e conduzione si parla di 'trasmissione globale' del calore. Dato uno strato piano multiplo (figura 4), si consideri di calcolare la potenza termica Q che lo attraversa in condizioni stazionarie (proprietà dei materiali e condizioni al contorno indipendenti dal tempo) e in direzione normale alla parete (flusso monodirezionale) con la seguente relazione:

$$Q = K (T_1 - T_2) \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

dove T_1 è la temperatura del fluido che lambisce il lato 1 [K], T_2 è la temperatura del fluido che lambisce il lato 2 [K], K è il coefficiente globale di trasmissione del calore [$Wm^{-2}K^{-1}$], che si ricava utilizzando:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \quad [Wm^{-2}K^{-1}]$$

dove h_1 e h_2 sono rispettivamente i coefficienti di scambio termico per convezione del lato 1 e del lato 2 [$Wm^{-2}K^{-1}$]; s_i è lo spessore dello strato i -esimo della parete [m]; λ_i è la conducibilità termica dello strato i -esimo [$Wm^{-1}K^{-1}$].

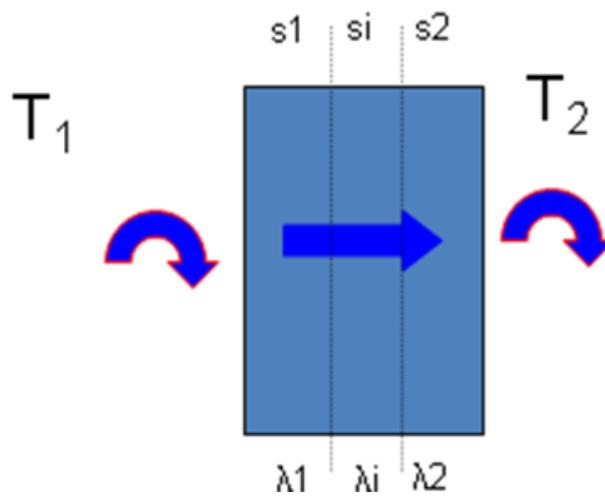


Figura 4: Trasmissione globale del calore in regime stazionario.

Modello di scambio energetico

La funzione della parete o tetto verde è di ridurre l'energia solare assorbita dalla parete o tetto schermato dalla superficie esposta direttamente alla radiazione del sole. La presenza della parete verde o del tetto verde consente la riduzione del fabbisogno energetico necessario al condizionamento estivo finalizzato a ridurre le elevate temperature interne nei periodi più caldi. Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari, insieme all'ENEA UTEE AGR, ha definito un modello in grado di simulare gli scambi energetici che avvengono in presenza di tetti / pareti verdi.

Il modello di scambio energetico è stato sviluppato per simulare la temperatura di un locale di un edificio la cui parete esterna, esposta a sud, è protetta con una parete verde.

I processi di scambio energetico che si instaurano nell'edificio sono stati interpretati analiticamente mediante la formulazione di un modello di simulazione del regime termico.

Il sistema alla base dei processi di scambio energetico è costituito da diversi strati: aria esterna, vegetazione (GRF), aria compresa nell'intercapedine tra GRF e parete esterna dell'edificio, superficie esterna della parete dell'edificio, parete dell'edificio, superficie interna della parete, aria interna all'edificio. Nell'ambito di tali strati si attivano processi di trasmissione del calore di tipo radiativo, dovuti sia alla radiazione solare sia alla radiazione nell'IR lungo emessa e ricevuta dalle superfici, di tipo convettivo, tra GRF ed aria e tra superfici dell'edificio ed aria, e di tipo conduttivo nelle pareti.

Scopo del modello proposto nella presente ricerca è la determinazione del regime termico dell'aria interna, assumendo come dati noti le proprietà radiometriche delle superfici, le caratteristiche fisiche dei materiali e della vegetazione e i parametri climatici del sito, cioè il valore della radiazione solare incidente, della temperatura dell'aria e della velocità del vento.

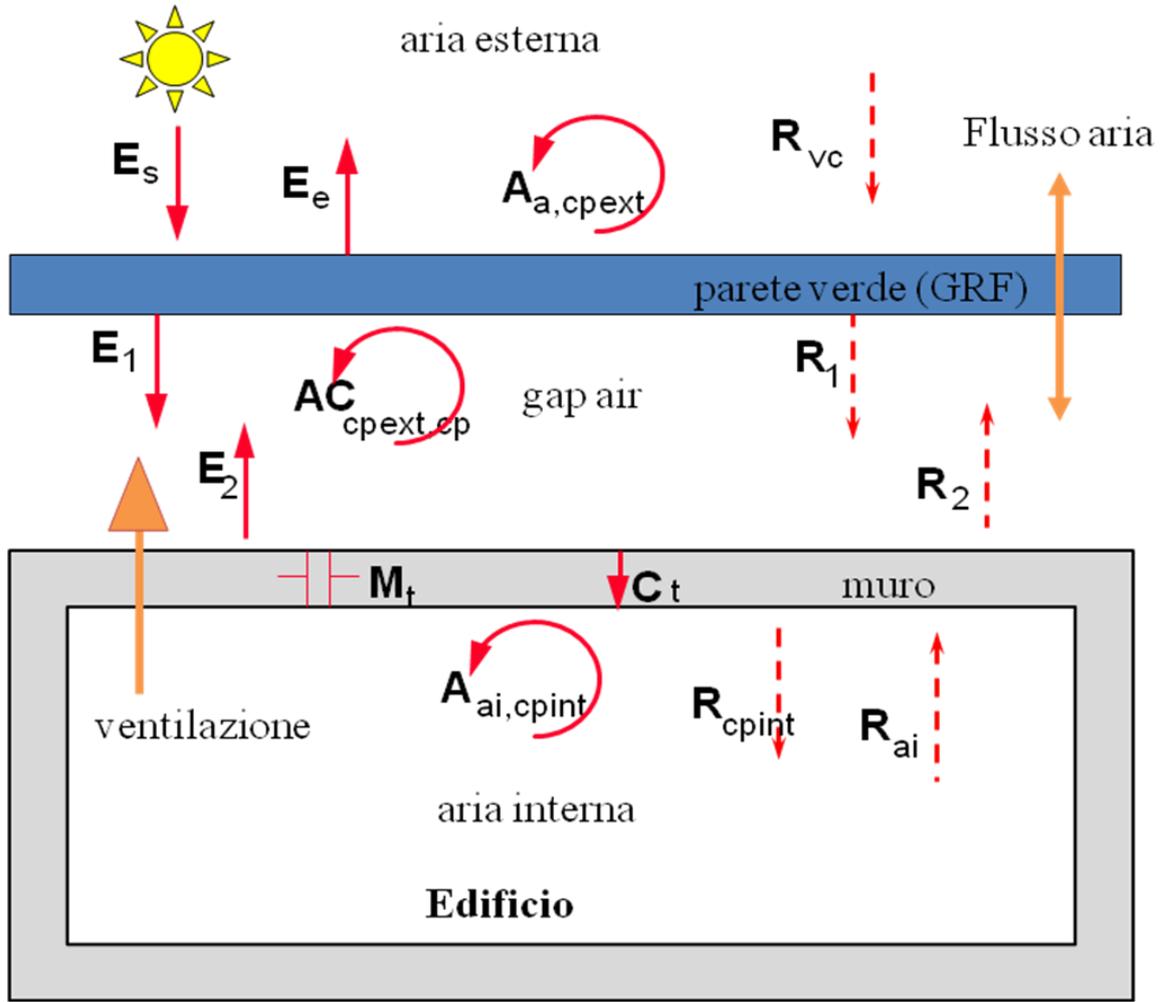


Figure 5: Flussi energetici che si instaurano nel sistema parete verde - edificio.

La rappresentazione del sistema fisico è stata realizzata per mezzo di un modello dinamico e monodimensionale (Bianchi e Scarascia Mugnozza, 1996), schematizzato mediante gli strati fittizi sopra descritti (Figura 5 e Tabella 3). Nel modello simulativo la rappresentazione degli scambi energetici è avvenuta, assumendo positivi i flussi energetici in ingresso, mediante le seguenti equazioni di bilancio energetico relative a:

GRF (nella formula indicato con "cpext"):

$$E_s + E_2 - E_3 - E_1 + A_{a,cpext} - AC_{cpext,cp} + \varepsilon_{cpext}(R_{vc} + R_2) - 2\varepsilon_{cpext}\sigma T_{cpext}^4 = 0 \quad (1)$$

superficie esterna muratura:

$$E_1 - E_2 + AC_{cpext,cp} + \varepsilon_{cp}(R_1) - \varepsilon_{cp}\sigma T_{cp}^4 + C_t - M_t = 0 \quad (2)$$

superficie interna muratura:

$$\varepsilon_{cp}(R_{a,int}) - \varepsilon_{cp,int}\sigma T_{cp,int}^4 + A_{ai,cpint} = 0 \quad (3)$$

aria interna:

$$\varepsilon_{ai}(R_{cp,int}) - \varepsilon_{a,int}\sigma T_{a,int}^4 + A_{ai,cpint} - H_{vent} = 0 \quad (4)$$

Tabella 3: Lista dei simboli relative alla Figura 5.

A = trasmissione di calore per convezione [W/m ²]	T = temperatura [K]
AC = trasmissione di calore per conduzione-convezione [W/m ²]	t = tempo [s]
C = trasmissione di calore per conduzione [W/m ²]	v = velocità del vento [m/s]
Cp = capacità termica massica [J/Kg K]	z = spazio discreto nel muro [m]
D = diffusività termica [m ² /s]	β' = coeff. Volumetrico di espansione aria β' = 1/T [1/K]
E = radiazione nel solare (0.3-3μm) [W/m ²]	ε = emissività [%]
g = costante gravitazionale g = 9.8 [m/s ²]	γ = angolo di inclinazione materiali di copertura rispetto al piano orizzontale = 0°
h = coefficiente convettivo	λ = conduttività termica [W/m K]
L = distanza [m]	ν = viscosità cinematica [m ² /s]
M = capacità di accumulo termico [W/m ²]	ρ = coefficiente di riflessione [%]
Nu = numero di Nusselt	ρd = massa volumica [Kg/m ³]
R = flusso di energia radiante nell'IR lungo (>3μm) [W/m ²]	σ = costante di Stefan-Boltzmann σ = 5.6697x10 ⁻⁸ [W/m ² K ⁴]
Ra = numero di Rayleigh	τ = coefficiente di trasmissione [%]
Pedici	
a = aria	Δ = intercapedine
cp = superficie esterna muro	j = contatore passo temporale Δt
cpint = superficie interna muro	k = contatore passo spaziale Δz
cpext = parete verde o GRF	r = banda dell'infrarosso lungo (>3μm)
ext = esterno	s = banda della radiazione solare (0.3-3μm)
i = interno	t = muro
int = interno	vc = volta celeste

Le equazioni relative ai flussi termici radiativi che interessano il materiale di copertura ed il suolo nelle incognite rappresentate dai flussi termici R_1 ed R_2 (Figura 5) sono :

$$R_1 = \varepsilon_{cpext} \sigma T_{cpext}^4 + \tau_{r,cpext} R_{vc} + \rho_{r,cpext} R_2 \quad (5)$$

$$R_2 = \varepsilon_{cp} \sigma T_{cp}^4 + \rho_{r,cp} R_1 \quad (6)$$

dove il significato dei termini è esplicitato nella Tabella 3 e i termini sono valutati tramite le seguenti relazioni:

$$A_{a,cpext} = h_{ext} (T_{a,ext} - T_{cpext}) \quad [W/m^2]; \quad h_{ext} = 7.2 + 3.8v \quad [W/m^2 K]$$

$$AC_{cpext,cp} = h_{\Delta} (T_{cpext} - T_{cp}) \quad [W/m^2]; \quad h_{\Delta} = Nu \frac{\lambda_a}{L_{cp,cpext}} \quad [W/m^2 K]$$

$$A_{cp,ai} = h_i \rho_d C p_a (T_{cp} - T_{ai}) \left[\text{W/m}^2 \right]; \quad h_i = 0.004 |T_{cp} - T_t|^{\frac{1}{3}} \left[\text{m/s} \right]$$

$$C_t = \frac{\lambda_t (T_{t,k=0} - T_{t,k=1})}{\Delta z} \left[\text{W/m}^2 \right]; \quad M_t = \rho d_t C p_t \Delta z \frac{(T_{t,k=0,j} - T_{t,k=0,(j-1)})}{\Delta t} \left[\text{W/m}^2 \right]$$

$$R_{vc} = \sigma T_{vc}^4 \left[\text{W/m}^2 \right]; \quad T_{vc} = 0.0552 \times T_{a,ext}^{\frac{3}{2}} \text{ in presenza di cielo sereno } \left[\text{K} \right]$$

$$T_{vc} = T_{a,ext} \text{ in presenza di cielo coperto } \left[\text{K} \right]$$

Il termine h_{Δ} , relativo allo scambio termico conduttivo-convettivo che si instaura fra GRF e superficie dell'edificio, è espresso mediante i numeri di Nusselt e Rayleigh (Duffie e Beckman, 1991):

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\text{sen } 1.8\gamma)^{1.6}}{Ra \cos \gamma} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \gamma} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos \gamma}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

$$Ra = \frac{g \beta' L_{cp,cpext}^3 |T_{cpext} - T_{cp}|}{\nu_a D_a} \quad (7)$$

l'esponente + indica che se il contenuto della parentesi è negativo il termine è nullo.

Mediante i termini C_t , M_t e R sono state rappresentate, rispettivamente, l'energia scambiata per conduzione fra lo strato esterno di muratura ed il primo strato di muratura, l'energia immagazzinata nel primo strato di muratura in funzione della sua inerzia termica, e i flussi che definiscono l'energia, nel range dell'IR lungo, in ingresso per i singoli strati; la frazione di energia emessa, nell'IR lungo, è valutata mediante l'espressione di Stefan-Boltzmann: $\varepsilon \sigma T^4$ (Vox, 1997).

La radiazione emessa verso la superficie terrestre dalle molecole di vapor d'acqua e di anidride carbonica presenti negli strati più bassi dell'atmosfera (Swinbank, 1963) è stata indicata con R_{vc} .

Le caratteristiche radiometriche $\tau_{r,lab}$ e $\rho_{r,lab}$ indicano i valori di trasmittanza e riflettanza medi (Vox e Schettini, 2007; Papadakis et al., 2000).

Per quanto concerne il contributo energetico della radiazione solare (0.3-3.0 μm), è stato risolto un sistema di 3 equazioni nelle 3 incognite E_1 , E_2 , E_e (Figura 5) assumendo nota la radiazione solare incidente E_s (Kindelan, 1980):

$$\begin{cases} E_e - \tau_{s,cpext} E_2 - \rho_{s,cpext} E_s = 0 \\ E_1 - \tau_{s,cpext} E_s - \rho_{s,cpext} E_2 = 0 \\ E_2 - \rho_{s,cp} E_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

La rappresentazione delle temperature nella muratura è stata realizzata matematicamente per mezzo dell'equazione di Fourier di diffusione del calore:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

ove la diffusività termica D è pari a: $D = \frac{\lambda_t}{\rho d_t C p_t} \left[\text{m}^2 / \text{s} \right]$.

L'equazione (9) è stata risolta con il metodo alle differenze finite implicito secondo lo schema di Crank-Nicolson (Gambolati, 1984). L'applicazione di tale metodo conduce alla discretizzazione della (9) che, con intervallo discreto temporale Δt e spaziale Δz , diviene per il generico strato k :

$$\frac{T_{t,k,(j+1)} - T_{t,k,j}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{D_k}{(\Delta z)^2} \left[T_{t,(k+1),(j+1)} - 2T_{t,k,(j+1)} + T_{t,(k-1),(j+1)} + T_{t,(k+1),j} - 2T_{t,k,j} + T_{t,(k-1),j} \right] \quad (10)$$

L'equ. (10) si può scrivere anche:

$$r_k T_{t,(k-1),(j+1)} - 2(1+r_k) T_{t,k,(j+1)} + r_k T_{t,(k+1),(j+1)} + r_k T_{t,(k-1),j} + 2(1-r_k) T_{t,k,j} + r_k T_{t,(k+1),j} = 0 \quad (11)$$

avendo posto $r_k = D_k \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2}$ in cui $k=1,\dots,K$ è il contatore del passo spaziale (Δz) e $j=0,\dots,N$ è il contatore

dell'intervallo temporale (Δt). L'uso del metodo implicito di Crank-Nicolson garantisce convergenza e stabilità indipendentemente dal valore di r_k prescelto. L'applicazione di tale metodo comporta la risoluzione di tante equazioni quanti sono gli strati di muratura prescelti (Scarascia Mugnozza et al., 1992).

Il programma risolutivo del modello di simulazione richiede, come input, i valori nel tempo dei parametri climatici misurati, ovvero stabiliti per mezzo di elaborazioni statistiche, di temperatura dell'aria, di radiazione solare incidente e di velocità del vento e, limitatamente all'istante iniziale, i valori di temperatura di tentativo per tutti gli strati in cui è stata discretizzata la muratura. Come output si ottengono le temperature nel tempo del muro nei suoi diversi strati e la temperatura dell'aria. Come si è visto da precedenti elaborazioni (Candura et al., 1999) i risultati sono influenzati solo per i primi passi temporali dai valori di tentativo delle temperature iniziali. Infatti il modello di simulazione, a distanza di pochi passi temporali dall'istante iniziale, converge rapidamente verso i valori sperimentali.

2.2 Linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo

L'auspicabile diffusione di sistemi a tetti e pareti verdi richiede la redazione di norme e codici costruttivi per regolamentare la progettazione di tali sistemi al fine di uniformare i requisiti richiesti per quanto riguarda i materiali, la selezione e la manutenzione degli impianti, la determinazione dei carichi permanenti e carichi accidentali, la definizione dei metodi di prova standard e analisi, la scelta delle tecniche di drenaggio, raccolta delle acque e ritenzione idrica.

Tuttavia, in molti paesi sono state approvate leggi nazionali al fine di stabilire gli standard e le linee guida per la progettazione e costruzione di edifici che incorporano sistemi di GRF.

Tabella 4: Leggi nazionali ed internazionali per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici.

Leggi nazionali ed europee
Dir. 2002/91/CE
DLgs 192/2005
DLgs 311/2006
DPR 59/2009
DM 26/6/2009
UNI 11235/2007
Dir.2010/31/UE
DM 22/11/ 2012

La Tabella 4 riporta le norme nazionali e internazionali che si sono avute dagli anni '90 per una progettazione tale da migliorare le prestazioni energetiche degli edifici. Le norme vigenti indicano le linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali.

Il Decreto legislativo n 192/2005 e sua integrazione Decreto legislativo n 311/2006 stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Il Decreto del Presidente della Repubblica n. 59/ 2009 (DPR 59, 2009) stabilisce le norme per l'efficienza energetica degli edifici su tutto il territorio nazionale definendo i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici sia per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, sia per la climatizzazione estiva e, limitatamente al terziario, per l'illuminazione artificiale degli edifici. In relazione all'impiego di coperture verdi in edilizia l'articolo 4, punto 18, lettera c) (Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti) del D.P.R. 59/09 riconosce la possibilità di impiegare sistemi per coperture verdi per il miglioramento delle prestazioni dell'edificio. Il legislatore evidenzia che per condizionare al meglio gli edifici, possono essere utilizzati anche tecniche e materiali innovativi come le coperture a verde, al fine di contenere le oscillazioni della temperatura dell'aria interna in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare. Il legislatore però stabilisce che bisogna produrre una adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali per attestarne l'equivalenza con le disposizioni di legge.

La norma UNI 11235 (UNI 11235, 2007) definisce i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde, in funzione delle particolari situazioni di contesto climatico, di contesto edilizio e di destinazione d'impiego.

La norma stabilisce quali elementi, definiti primari, devono sempre essere presenti:

- elemento portante;
- elemento di tenuta all'acqua;
- elemento di protezione all'azione delle radici (integrato o meno);
- elemento di protezione meccanica;
- elemento di accumulo idrico;
- elemento drenante;
- elemento filtrante;
- strato colturale;
- strato di vegetazione.

Per ognuno di questi elementi vengono descritte le tipologie comunemente diffuse e le prestazioni che devono soddisfare. Il valore di ogni caratteristica viene espresso in funzione di una norma di riferimento, che a sua volta definisce le procedure per la determinazione della caratteristica stessa.

La norma UNI 11235 si concentra prevalentemente sulle caratteristiche dei singoli elementi o strati, mentre fornisce solo poche e fugaci indicazioni sulle prestazioni dei sistemi e sugli aspetti botanici. Se da un lato rappresenta un punto di base per la possibilità di individuare e verificare le caratteristiche principali dei singoli elementi, nonché costituire il riferimento per il collaudo dell'opera, dall'altro non aiuta dal punto di vista progettuale, dove è necessario conoscere le prestazioni di tutta la stratigrafia nel suo insieme e le funzioni a questa richieste.

La norma UNI 11235 non è sufficiente a completare il quadro di riferimento tecnico per una corretta progettazione. Il limite di questa norma, che dovrebbe essere aggiornata, è nell'aver applicato per l'Italia tecniche provenienti da altri Paesi. Molte tecnologie per le coperture a verde pensile messe a punto per il clima continentale non trovano una corretta applicazione nel clima mediterraneo, completamente diverso da quello del centro Europa.

La Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio (Direttiva 2010/31/UE, 2010) riguarda la prestazione energetica nell'edilizia e abroga la direttiva 2002/91/CE. Tale Direttiva invita ad attuare strategie che contribuiscono a migliorare la prestazione termica degli edifici durante il periodo estivo al fine di limitare l'uso di impianti di condizionamento dell'aria. La Direttiva invita a scegliere misure che evitano

il surriscaldamento, come l'ombreggiamento e una sufficiente capacità termica dell'opera edilizia, nonché a sviluppare e applicare tecniche di rinfrescamento passivo, soprattutto quelle che contribuiscono a migliorare le condizioni climatiche interne e il microclima intorno agli edifici.

Il Decreto Ministeriale del Ministero dello Sviluppo Economico del 22 novembre 2012 (DM 22/11/2012, 2012), modificando il decreto DM del 26 giugno 2009, norma la certificazione energetica degli edifici su tutto il territorio nazionale.

La Commissione Europea ha lanciato nel 2005 il Programma GreenBuilding, che promuove l'efficienza energetica e l'utilizzo delle energie rinnovabili negli edifici, programma che si integra con programmi nazionali che sostengono il finanziamento, la sovvenzione e meccanismi fiscali a tal fine. La tabella 5 riporta una selezione dei programmi di certificazione disponibile in Europa e in tutto il mondo. La partecipazione a tali programmi migliora il valore di mercato dell'edificio, diminuisce la disoccupazione, incrementa le prestazioni energetiche degli edifici.

Tabella 5: Differenti programmi su risparmio energetico negli edifici nel mondo

Programmi di certificazione	Nazione
AQUA	Brazil
BERDE	Philippines
BREEAM	The Netherlands, United Kingdom
Build It Green	USA
CASBEE	Japan
CEPHEUS	Germany
DCBA	The Netherland
DGNB	Germany
Energy Rating	Denmark
Estidama United	Arab Emirates
GBAS	China
GBI Malaysia	Malaysia
Green Building Council	Italy, Philippine, India
Green Globes	Canada, USA
Green Mark	Singapore
Green Star	Australia, New Zealand, South Africa
GRIHA	India
HKBEAM	Hong Kong
HQE	France
Institute of Architecture Pakistan Green sustainable Architecture (IAPGSA)	Pakistan
International Green Construction Code (IGCC)	USA
KGBC	Korea
LEED	Brazil, Mexico, USA
Lider A	Portugal
Living Building Challenge	USA
Minergie	Switzerland
Nabers	Australia
NAHB NGBS	USA
PromisE	Finland
Protocollo ITACA	Italy
TQ Building Assessment tool	Austria
VERDE	Spain

La caratteristica principale della Green Building Challenge Certification, che nella prima generazione è stata applicata dal 1997 con il programma BREEAM nel Regno Unito, LEED in America, e con il Danish Energy Rating, è di non avere limitazioni strutturali perché non è legata alla realtà geografica, ma si tratta di un metodo di valutazione che può essere adattato alle diverse condizioni locali mantenendo la stessa struttura e terminologia di base.

2.3 Pubblicazioni

I primi risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati al X Convegno Nazionale di Ingegneria Agraria AIIA2013: "AIIA13 – Horizons in Agricultural, Forestry and Biosystems Engineering", Viterbo, 8 -12 settembre 2013.

Un articolo è stato pubblicato sul Journal of Agricultural Engineering: C.A. Campiotti, E. Schettini, G. Alonzo, C. Viola, C. Bibbiani, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco, G. Vox (2013) Building green covering for a sustainable use of energy. Journal of Agricultural Engineering 2013; volume XLIV(s2):e50, pISSN 1974-7071 | eISSN 2239-6268; doi:10.4081/jae.2013.(s1):e50; pp. 253-256.

3 Conclusioni

La ricerca finora svolta ha consentito quindi di sviluppare un modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo, individuando i termini coinvolti nello scambio energetico. La ricerca potrà continuare applicando il modello a diverse situazioni sia per condizioni climatiche esterne, temperatura dell'aria e radiazione solare, sia per caratteristiche costruttive dell'edificio e sia per sistemi GRF. Il modello, una volta testato, potrà servire per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di confort termico per le persone che usufruiscono dell'edificio.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha, inoltre, individuato il quadro normativo nazionale e internazionale per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali. Le norme vigenti indicano le linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali.

4 Riferimenti bibliografici

- F. Ascione, N. Bianco, F. de'Rossi, G. Turni, G. P. Vanoli Green roofs in european climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? Appl Energy 104 (2013), pp. 845-859.
- L. Bengtsson, L. Grahn, J. Olsson Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden Nord. Hydrol. 36 (2005), pp. 259-268.
- P. Berdahl, S.E. Bretz Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials, Energy and Buildings, 25(1997), pp. 149-158.
- A. Bianchi, G. Scarascia Mugnozza Studio e verifica sperimentale di un modello matematico di simulazione del microclima in serre a regime naturale con copertura in film plastico. Rivista di Ingegneria Agraria 27 (4) (1996), pp. 220-229
- S.E. Bretz, H. Akbari Long-term Performance of High-Albedo Roof Coatings, Energy and Buildings, 25 (1997), pp. 159-167.
- S.E. Bretz, H. Akbari, A. Rosenfels Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. Atmospheric Environment 32 (1998), pp. 95-101.
- A. Candura, G. Scarascia Mugnozza, G. Russo, G. Vox Modello numerico di solarizzazione e prove con film fotodegradabile, Colture Protette (1999), 28, (3), 79-86.
- T. L. Carter, T.C. Rasmussen Hydrologic behavior of vegetated roofs. J. Am. Water Resour. As. 42 (2006), pp. 1261-1274.

- C. Y. Cheng, K. K.S. Cheung, L.M. Chu Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Build. Environ.* 45 (2010), pp.1779-1787
- J. A. Duffie, W.A. Beckman Solar engineering of thermal process (1991) John Wiley & Sons, Inc.
- G. Gambolati Elementi di calcolo numerico (1984) Edizioni Libreria Cortina, Padova.
- C. Y. Jim, S.W. Tsang Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 1263-1274.
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 153 del 18.6.2010, pagg. 13–35
- DM 22/11/2012. Decreto Ministeriale del Ministero dello Sviluppo economico del 22 novembre 2012, Modifica del decreto 26 giugno 2009, recante: "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici". *Gazzetta Ufficiale* 13 dicembre 2012 n. 290
- DPR 59/2009. Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 , n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia. *GU* n. 132 del 10-6-2009; DPR 59 è in vigore dal 25-6-2009.
- N. Dunnet, N. Kingsbury Planting green roofs and living walls (2004), Oregon: Timber Press.
- EPA United States Environmental Protection Agency Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies (2008) <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>
- R. Fioretti, A. Palla, L. G. Lanza, P. Principi Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build. Environ.* 45 (2010), pp. 1890-1904.
- A.R. Gentle, J.L.C. Aguilar, G.B. Smith. Optimized cool roofs: integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95 (2011), pp. 3207-3215.
- F. Gladis, R. Schumann. Influence of material properties and photocatalysis on phototropic growth in multi-year roof weathering. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (2011), pp. 36-44.
- I. Jaffal, S. E. Ouldboukhite, R. Belarbi A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance *Renew. Energ.* 43(2012), pp. 157-164.
- J.H. Jo, J.D. Carlson, J.S. Golden, H. Bryan. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. *Building and Environment* 45 (2010), pp. 453-460.
- A. Joudi H. , Svedung, M. Cehlin, M. Rönnelid. Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*, 103 (2013), pp. 562-570.
- T. Karlessi, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, I. Livada Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Sol. Energy* 83 (2009), pp. 538-551
- T. Karlessi, M. Santamouris, A. Synnefa, D. Assimakopoulos, P. Didaskalopoulos, K. Apostolakis Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 570-576.
- M. Köhler, P. H. Poll Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecol. Eng.* 36 (2010), pp. 722-729.
- D. Kolokotsa, M. Santamouris, S. C. Zerefos Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Sol. Energy* 95 (2013), pp. 118-130.
- H. Li, J. Harvey, A. Kendall. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment* 59 (2013), pp. 536-546.
- T. R. Oke, G.T. Johnson, D.G. Steyn, I.D. Watson Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Bound.-Lay. Meteorol.* 56 (1991), pp. 339-358.
- G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Scarascia-Mugnozza, G. Vox, P. Feuilloley, J.A. Stoffers, Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials, *J. Agric. Eng. Res.* 77 (1) (2000), pp. 7–38.
- G. Pérez, L. Rincón, A. Vila, J. M. González, L. F. Cabeza Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl. Energy* 88 (2011), pp. 4854-4859
- K. Perini, M. Ottel , A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 2287-2294

- R. T. A. Prado, F. L. Ferreira. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37 (2005), pp. 295-300.
- M. Santamouris Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- G. Scarascia Mugnozza, G. Russo, G. Vox Modello numerico per l'analisi previsionale delle temperature nel terreno agrario solarizzato, Atti del Convegno "Informatica e Agricoltura", Firenze, 17-18 Dicembre (1992), pp. 185-194.
- A. Sfakianaki, E. Pagalou, K. Pavou, M. Santamouris, M. N. Assimakopoulos Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. *Int. J. Energ. Res.* 33 (2009), pp. 1059-1069.
- W. C. Swinbank Long-wave radiation from clear skies, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 89 (1963), pp. 339-348.
- A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80 (2006), pp. 968-981.
- K.L. Uemoto, N.M.N. Sato, V.M. John Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings* 42 (2010).
- UNI 11235 Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde. 2007. Ente Nazionale Italiano di Unificazione
- G. Vox Analisi degli scambi energetici radiativi nei modelli di simulazione del microclima delle serre, Atti del VI Convegno Nazionale A.I.I.A., Ancona 11-12 Settembre (1997), pp. 85-94
- G. Vox, E. Schettini Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection. *Polym. Test.* 26 (2007), pp. 639-651
- M. Zinzi, E. Carnielo, S. Agnoli Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application. *Energy and Buildings* 50 (2012), pp. 111-119

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli. Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili. Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation- Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

ing. Evelia Schettini – responsabile scientifico, EP, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre

prof. ing. Giacomo Scarascia Mugnozza – Direttore del Dipartimento DISAAT, Professore Ordinario, Ingegnere Civile, esperto di strutture serricole e di materiali costruttivi.

prof. ing. Giuliano Vox – Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale

ing. Ileana Blanco – Ingegnere Edile, dottoranda in "Gestione e ingegneria dei biosistemi agro-forestali".