

1. Fabbisogni energetici e simulazione dinamica: lo stato dell'arte

La valutazione della prestazione energetica di un sistema edificio-impianto comprende la valutazione del fabbisogno di energia per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione ed illuminazione [Direttiva Europea 2002/91/CE].

La quantificazione dei fabbisogni energetici deve necessariamente considerare differenti aspetti, che un recente studio svolto dal gruppo di lavoro dell'Annex 53 ha individuato come fattori direttamente correlati alla valutazione della "Building Energy Performance" (clima, involucro edilizio, dotazioni impiantistiche) e quelli aggiuntivi e influenzanti gli usi energetici finali degli edifici (gestione e manutenzione, livello di qualità ambientale indoor, comportamento dell'utente) [Filippi et al.].

Per valutare i fabbisogni energetici è ormai consolidato e riconosciuto come efficace il ricorso a strumenti di simulazione in regime dinamico, tra quali uno dei più impiegati in ambito scientifico è sicuramente E-plus [Fabrizio].

Una corretta simulazione del sistema edificio-impianto non può essere effettuata senza tener conto delle condizioni di comfort termo-igrometrico e visivo, quindi senza tener conto dei differenti livelli di qualità dell'ambiente interno [Ansaldi].

Il presente capitolo è volto ad analizzare lo "stato dell'arte" nel campo del calcolo dei fabbisogni energetici per illuminazione. Dopo un'analisi dei requisiti per quanto riguarda il comfort visivo dell'ambiente interno (vedi § *La domanda di luce per le diverse attività svolte negli ambienti confinati*), si passa ad analizzare l'interazione luce naturale luce artificiale (vedi § *Aspetti fisiologici e psicologici della luce naturale*) per poi analizzare l'incidenza dei fabbisogni per illuminazione sul risparmio energetico (vedi § *Il contributo della luce al risparmio energetico*). Viene poi fatta una ampia e dettagliata analisi degli studi effettuati e pubblicati in letteratura per quanto riguarda il calcolo dei fabbisogni energetici attraverso strumenti di simulazione dinamica (vedi § *Strumenti per il calcolo dinamico del fabbisogno energetico per illuminazione*), e gli edifici di riferimento (o archetipi) impiegati per tali simulazioni (§ *Lo strumento di calcolo: Energy Plus*

Nell'ambito dei programmi di simulazione termoenergetica degli edifici, EnergyPlus sta recentemente guadagnando un sempre maggiore consenso, in particolare nella comunità scientifica, per il notevole grado di dettaglio nella simulazione energetica degli edifici e per la caratteristica di essere un software integrato, che consente la simulazione di tutti i flussi di energia termica ed elettrica che attraversano le superfici di controllo dei sistemi oggetto di analisi.

EnergyPlus nasce nel 2001, a seguito di un lavoro iniziato nel 1996, come un programma innovativo a partire dai due software di simulazione termoenergetica degli edifici statunitensi DOE-2 e BLAST elaborati rispettivamente dal Ministero dell'Energia (Department of Energy, DOE) e dal Ministero della Difesa (Department of Defence, DOD).

Il team che ha realizzato il programma è composto, oltre che dal DOE, dal CERL (US Army Construction Engineering Research Laboratories), dall'Università dell'Illinois, dal Lawrence Berkeley National Laboratory, dall'Università statale dell'Oklahoma e dalla GARD Analytics. Ne è nato un programma che combina gli algoritmi più dettagliati di DOE-2 e BLAST, ma che si configura come un nuovo software, essendo basato sulla simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto di climatizzazione, a differenza dei programmi precedenti in cui l'informazione sui carichi termici determinati in ambiente veniva in cascata inviata ai componenti impiantistici.

Il programma è essenzialmente modulare, per facilitare l'inserimento di nuovi moduli, anche sviluppati in

parallelo da diversi estensori, ed eventuali link ad altri applicativi.

Il simulatore principale del programma è composto da tre moduli fondamentali, il *surface heat balance manager* che risolve il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete, l'*air heat balance manager* che risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi, e il *building systems simulation manager* per la simulazione dei componenti impiantistici. Questi moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'*integrated solution manager* che fa sì che i tre moduli siano risolti simultaneamente, e non in cascata, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. Si procede secondo successive iterazioni tra la domanda di energia dell'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione: alla prima iterazione si stima il carico termico dell'ambiente avendo fissato la temperatura interna pari alla temperatura di set point; assunto questo carico termico come potenza richiesta all'impianto, viene simulato il comportamento dell'impianto di climatizzazione e viene stimata l'effettiva potenza termica che l'impianto è in grado di fornire a quell'istante temporale; con questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria, nel termine che rappresenta la variazione dell'energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine.

L'air heat balance engine deriva da IBLAST (versione di ricerca del BLAST) e differisce dal metodo dei room weighting factors del DOE-2 perché considera il bilancio termico sull'aria ambiente (e perciò viene definito anche metodo esatto).

Le principali assunzioni su cui si basa il metodo sono:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme (perfetta miscelazione);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

L'air heat balance può essere sintetizzato, trascurando il flusso termico disperso per infiltrazione e per ventilazione tra zone adiacenti, nell'equazione:

$$C_z \frac{dt_z}{d\tau} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{l=1}^{N_{sup}} h_l A_l (t_{s,l} - t_z) + \dot{m}_v c_p (t_\infty - t_z) + \dot{Q}_N \quad (1)$$

dove

N è il numero delle sorgenti interne convettive [-]

$\dot{Q}_{i,c}$ è l' i -esima sorgente convettiva

$h_l A_l (t_{s,l} - t_z)$ è il flusso termico disperso dalle superfici di una zona termica a temperatura t_s

$\dot{m}_v c_p (t_\infty - t_z)$ è il flusso termico per ventilazione

\dot{Q}_N è il carico dell'impianto

C_Z è la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente.

Connesso all'air heat balance manager è il surface heat balance manager che comprende i moduli per la determinazione delle temperature superficiali (quelle della faccia interna incognite nello schema risolutivo dell'air heat balance) e dei flussi termici in corrispondenza delle facce interna ed esterna di ogni parete.

I flussi termici scambiati attraverso i componenti di involucro sono determinati utilizzando la tecnica dei fattori di risposta, basata sul concetto di funzione di trasferimento, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema.

Il building system simulation manager può simulare i più diffusi componenti impiantistici, ed è basato su una scomposizione dei componenti di un impianto in tre sotto-sistemi: l'*air loop*, il *plant loop* e il *condenser loop*. L'*air loop* serve a modellare le reti aerauliche, dalle unità di trattamento dell'aria ai terminali di impianto in ambiente; i *plant loop* e *condenser loop* a modellare le reti idroniche (fluidi termovettori sotto forma di acqua e fluidi di condensazione) e al loro interno si distinguono ancora componenti relativi alla domanda (batterie di scambio termico) e componenti relativi all'offerta (generatori di calore, gruppi frigoriferi nel caso del *plant loop*; torri evaporative, pozzi nel caso del *condenser loop*). In letteratura, si trovano molti lavori svolti da più autori che hanno dettagliato l'uso del software per la modellazione dei più svariati sistemi impiantistici. [Fabrizio, Lewis, Bazjanac, Crawley & Lawrie, Pedersen et alii, Ceylan & Myers].

Il software prende in considerazione l'aspetto legato all'illuminazione degli ambienti interni nel surface heat balance manager, poiché è all'interno di tale modulo che possono essere descritti i sistemi impiantistici per l'illuminazione artificiale degli ambienti. Da sottolineare come l'ambito illuminotecnico in E-Plus sia considerato da un punto di vista prettamente energetico: viene infatti indagato l'impatto che le sorgenti luminose considerate come apporti gratuiti, naturali o artificiali, hanno sul bilancio energetico dell'ambiente. La simulazione dell'illuminazione degli ambienti procede attraverso tre step ben definiti:

- in funzione del modello geometrico di calcolo dell'ambiente o dell'edificio da simulare, il programma procede al calcolo dei daylight factors, che rappresentano il rapporto tra l'illuminamento interno e quello esterno, e vengono calcolati per uno o più punti rappresentativi dell'ambiente; in questa computazione viene considerata tanto la componente diretta quanto la componente riflessa;
- sulla base del calcolo fatto sopra, viene calcolato, con il passo temporale impostato per la soluzione dell'equazione di bilancio termico, il contributo della luce naturale, eventualmente anche simulando la gestione di sistemi di schermatura mobili;
- viene infine simulato il sistema di illuminazione artificiale, al fine di determinare il contributo di energia elettrica necessaria per garantire i previsti valori di illuminamento sul piano di lavoro all'interno degli ambienti analizzati.

La simulazione è svolta per un ambiente tipo (aula scolastica) considerato rappresentativo del comportamento dell'intero edificio. In prima battuta, viene scelta un'aula inserita ad un piano intermedio, in posizione centrale rispetto alla struttura edilizia, in cui i solai interpiano e le strutture verticali interne non sono disperdenti in quanto confinanti con ambienti in cui viene mantenuta la stessa temperatura interna di comfort.

E-plus nasce come programma per analisi energetiche ma svolge simulazioni energetiche in regime dinamico anche in merito al consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale degli spazi interni. Rende come output dati di fabbisogno energetico con differente scansione temporale (orari, giornalieri, mensili, annuali)

Al suo interno uno specifico menu è dedicato alla definizione delle caratteristiche del sistema di illuminazione degli spazi interni.

Si considerino i fattori che influenzano il fabbisogno energetico per illuminazione artificiale.

Il programma dispone di un applicativo esterno di modellazione (Design Builder) con cui l'impianto di illuminazione è definibile ma con minore dettaglio.

Un'analisi illuminotecnica corretta richiede quindi il passaggio intermedio nel formato IDF con successiva fase di integrazione dei parametri di input.

Volendo analizzare i dati di input inseriti per la caratterizzazione del sistema dal punto di vista illuminotecnico, si ottiene un quadro in cui gli aspetti più legati al comfort visivo non sono presi in considerazione, a fronte di una valutazione riferita ad un livello di illuminamento medio calcolato puntualmente all'interno degli ambienti che diventa il parametro cui riferire le valutazioni per la determinazione del fabbisogno energetico.

L'algoritmo di calcolo si sviluppa attraverso 3 step:

1. il calcolo dei daylight factors
2. la determinazione, in funzione dei precedenti, della quantità di energia necessaria ad integrare il contributo naturale (si prende in considerazione tanto la luce diretta, quanto quella riflessa e quella diffusa)
3. l'integrazione del bilancio energetico con i dati derivanti dal calcolo illuminotecnico (riduzione degli apporti solari interni).

E-plus impiega la metodologia di calcolo propria di DOE-2 e sviluppata da Winkelmann e Selkowitz. Per svolgere i calcoli sono impiegati 4 differenti modelli di cielo: clear sky, Clear Turbid Sky, Intermediate Sky, Overcast sky.

La distribuzione di luminanza viene determinata impiegando il modello di Perez. I modelli di cielo sono derivati da modelli proposti da differenti autori (rispettivamente Kittler, 1965; CIE, 1973, Matsuura, 1987, Moon & Spencer, 1942).

Edifici di riferimento per la stima dei fabbisogni energetici).

1.1 La domanda di luce per le diverse attività svolte negli ambienti confinati

Numerosi studi hanno dimostrato che la luce in generale, sia artificiale, sia naturale, oltre che un effetto visivo, ha un'importanza fondamentale per la salute umana, per l'attenzione, la vivacità ed anche per il dormire [Van den Beld, Veitch, Van Bommel et al.].

Ricerche recenti hanno dimostrato che la luce incidente sulla parte superiore della retina ha un effetto biologico differente da quella incidente sulla parte inferiore [Glickman et al.]. La luce che raggiunge l'occhio dall'alto e che arriva alla parte inferiore della retina sembra avere un effetto biologico maggiore rispetto alla luce che raggiunge l'occhio dal basso. Tali risultati suggeriscono una maggiore sensibilità o una distribuzione più densa del nuovo tipo di fotorecettori nella parte inferiore della retina. Ciò, in perfetto accordo con la distribuzione spaziale della

luce e a conferma della notevole importanza fisiologica e psicologica della luce naturale [Van Bommel].

La luce naturale ha sempre avuto un ruolo importante, sia dal punto di vista estetico e simbolico che in relazione al comfort visivo ed all'illuminazione funzionale.

Dal punto di vista storico in Europa, la conoscenza di tecniche e l'attenzione alla progettazione architettonica mirata all'utilizzo della luce diurna negli edifici è stata utilizzata fin dai romani; già Vitruvio discuteva nei suoi scritti classici come provvedere ad una buona illuminazione naturale. Nel medioevo ed in epoca barocca, in edifici sacri, la luce era utilizzata addirittura come elemento espressivo; fino alla Rivoluzione Industriale, quando la ricerca sull'illuminazione naturale è stata potenziata attraverso le innovazioni tecnologiche come ad esempio le nuove tecniche per la produzione di vetro.

Attualmente, sia per edifici ad uso residenziale che per quelli ad uso commerciale o industriale, esistono molti motivi che orientano verso l'impiego dell'illuminazione naturale. Tra i motivi principali vanno annoverati:

- la qualità della radiazione visibile
- l'importanza della luce naturale come elemento di progetto
- la comunicazione visiva con l'esterno

Questi tre aspetti vengono qui di seguito brevemente analizzati ed indagati.

La qualità della radiazione visibile

Uno degli aspetti che caratterizza la qualità della luce naturale è il *rendimento del colore*.

L'occhio umano si adatta facilmente ad ogni sorgente luminosa, ma la percezione del colore può variare con la composizione spettrale della luce proveniente dalla sorgente. Ne consegue che gli oggetti possono cambiare colore al variare della luce che li investe.

Dalle indagini sistematiche condotte al fine di analizzare i motivi per cui la luce naturale è preferita rispetto alle sorgenti artificiali, già nel 1967 Markus verificava che il 95% di individui intervistati preferiva la luce naturale [Markus].

Cuttle, nei suoi studi condotti su soggetti inglesi e della Nuova Zelanda, verificò che quasi il 99% preferiva ambienti di lavoro con finestre e che l'86% preferiva l'illuminazione naturale. La preferenza per l'illuminazione naturale era dovuta ad un minor affaticamento e discomfort rispetto ai casi con sola luce artificiale. [Cuttle].

Heerwagen e Heerwagen attraverso delle interviste agli occupanti di alcuni uffici a Seattle, USA, nella stagione invernale ed estiva, verificarono che più della metà degli occupanti ritenevano la luce naturale migliore per il comfort psicologico, per l'aspetto dell'ambiente, per la salute in generale, per il benessere visivo e per la resa cromatica degli oggetti [Heerwagen et al.].

Più di recente, Galasiu et al. hanno verificato, sulla base di interviste condotte tra studenti e lavoratori, che la maggior parte di essi, tra il 65% ed il 78% considera l'illuminazione naturale nettamente migliore rispetto a quella artificiale, sia per benefici di carattere psicologico, sia di ordine produttivo (resa cromatica) [Galasiu, Veitch 2001 a, Veitch 2001 b, Veitch et al. 1993, Veitch et al. 1996].

L'importanza della luce naturale come elemento di progetto

La luce naturale è un importante elemento di progetto, dato che fornisce agli ambienti confinati una particolare sensazione di spazialità, dovuta al fatto che le superfici trasparenti, collegando gli ambienti confinati con l'esterno, fanno apparire i primi più ampi. Il senso dello spazio, benché sia prodotto essenzialmente dalla percezione visiva di un ambiente, è un fenomeno che è stato a lungo oggetto di ricerca. Già Inui e Miyata negli anni '70 asserivano che esso è maggiore per ambienti con ampie finestre [Inui e Miyata], ed un ambiente che

viene percepito come spazioso è più gradevole.

La luce proveniente dal sole e dal cielo aggiunge dinamica alle condizioni d'illuminazione di un ambiente, poiché produce variazione nel tempo di colore, contrasto e luminanza. Tale caratteristica non può essere raggiunta da nessun altro elemento di progetto e difficilmente può essere efficacemente simulata utilizzando le sorgenti artificiali.

Boubekri et al. scoprirono, da alcune ricerche condotte in ambienti di lavoro, che la dimensione ottimale dell'area investita da luce solare diretta di una stanza risultava essere circa il 25% dell'area totale del piano, con una dimensione massima ammissibile del 40% [Boubekri et al.].

La comunicazione visiva con l'esterno

Un importante beneficio delle superfici trasparenti in un involucro edilizio è che esse rappresentano i canali di comunicazione visiva con l'esterno, offrendo una veduta agli occupanti di un edificio [Manning, Huges, Heerwagen]. In esperimenti condotti in ambienti senza finestre, gli occupanti, nella maggior parte dei casi, manifestavano desiderio di contatto con l'esterno.

In un'ampia ricerca, Markus ha accertato le preferenze in proposito di circa 400 impiegati d'ufficio di Bristol [Markus 1967 a, Markus 1967 b]. Circa il 70% di essi ha definito la propria veduta "buona", ed il 25% "adeguata". Un'ampia maggioranza (circa l'88%), preferisce la vista di una città o di un paesaggio lontano, mentre solo il 12% la visione del solo cielo e degli edifici circostanti. Molti degli intervistati, il cui posto di lavoro era lontano dalle finestre, hanno manifestato il desiderio di essere collocati più vicino ad esse. Markus ha inoltre verificato sperimentalmente che in una lista dei fattori ambientali il bisogno della comunicazione visiva con l'esterno e perfino quello della luce naturale è considerato poco importante per coloro che già godono di tali condizioni, mentre per coloro che ritenevano la luce naturale del loro ambiente di lavoro insufficiente o la veduta poco gradevole, hanno collocato tali fattori ai primi posti della lista.

Ne'eman ed Hopkinson [Ne'eman e Hopkinson] hanno condotto un'analisi finalizzata alla determinazione della percentuale minima di superficie di una parete che occorre vetrare per consentire una adeguata vista all'esterno. Circa il 50% dei soggetti intervistati ha asserito che le superfici delle aperture devono essere tali da uguagliare almeno il 25% dell'intera parete su cui sono collocate, mentre l'85% dei soggetti giudica adeguate delle aperture che coprono il 35% del muro. Inoltre, se l'apertura non è unica, ma sono possibili delle aperture multiple, allora esse devono tutte ricadere entro un cono ottico dell'ampiezza massima di 60°.

Keighley ha analizzato la reazione di individui collocati in ambienti in cui le finestre ricoprivano solo il 20% della parete, ed ha riscontrato insoddisfazione da parte della quasi totalità [Keighley 1973 a, Keighley 1973 b]. Sempre per la stessa percentuale di vetratura si è notato che, nel caso in cui la larghezza dell'apertura è molto maggiore della sua altezza, allora la condizione viene considerata più accettabile. Infatti, una finestra molto larga consente la vista di un panorama più ampio, sebbene la visione del cielo o del suolo si restringa. Analizzando il possibile raggruppamento di tali ampie aperture, si è notato che i soggetti non gradivano tale configurazione. Anche l'impiego di molte piccole finestre, di differenti forme non è stato giudicato gradevole dai soggetti intervistati, mentre la combinazione di finestre di differenti dimensioni si è rivelata non pratica in ogni situazione in cui l'ingresso della luce naturale nello spazio confinato rappresentava un importante criterio di progetto.

Secondo studi più recenti [Tabet e Sharples], le dimensioni e la forma ottimali delle finestre dipendono fortemente dalle caratteristiche culturali e dalle condizioni climatiche ed al variare del paese in esame la richiesta di superfici vetrate è sensibilmente diversa.

Leather et al. hanno condotto una ricerca riguardo la visione e la quantità di luce solare diretta fornita dalle finestre di un'azienda europea. I soggetti partecipanti dovevano compilare alcuni questionari circa lo stress lavorativo, la soddisfazione ed il comfort. Il risultato fu che le persone che lavoravano in presenza di maggiori aperture verso l'esterno registravano una maggiore soddisfazione lavorativa, un maggior comfort ed una minore

intenzione a lasciare il proprio lavoro [Leather et al.].

Una ricerca condotta da Christoffersen et al. su 20 edifici danesi con le postazioni di lavoro posizionate ad una distanza massima di 7 m dalle finestre mostrò una maggiore preferenza per posizioni più vicine alle aperture verso l'esterno. "L'essere un mezzo di contatto con l'esterno" era l'aspetto più positivo della finestra, seguito dalla possibilità di poter osservare il tempo meteorologico e di poter aprire la finestra per incrementare la ventilazione naturale [Christoffersen et al.].

1.2 Aspetti fisiologici e psicologici della luce naturale

I motivi più significativi per utilizzare la luce naturale sono di ordine fisiologico e psicologico [Daryanani]. Gli esseri umani hanno un basilare bisogno di aperture verso l'esterno nell'ambiente in cui vivono, perché queste costituiscono il mezzo attraverso cui si comunica con l'ambiente circostante e non solo il mezzo attraverso cui passa la luce [Morgan, Hopkinson]. Durante gli anni '60, in Europa e negli Stati Uniti, sono state eseguite alcune ricerche volte a definire gli impatti fisiologici e psicologici che le finestre e le aperture producono sugli individui. Tali studi sono stati ripresi da Collins [Collins 1976, Collins 1977], per poi giungere, con Vischer all'analisi dell'impatto della luce naturale sul benessere fisico e mentale delle persone [Vischer]. Per condurre queste ricerche è stato necessario confrontare le reazioni dei soggetti che operano in edifici con finestre, con quelle di individui che svolgono la propria attività in edifici senza finestre.

Nel 1968 Hollister ha rilevato, in un rapporto per il Greater London Council, che per gli ambienti senza finestre, si riscontrano significative reazioni negative [Hollister]. Nelle abitazioni, sembra esservi un forte bisogno psicologico di luce naturale, ed a tal fine si rivelano sufficienti anche superfici trasparenti di modeste dimensioni [Holm e Roessler].

Numerose ricerche sono state condotte in ambienti con diverse destinazioni. Per gli edifici scolastici, secondo alcuni ricercatori, l'illuminazione naturale non sempre rappresenta una condizione favorevole, a meno che il sistema non sia accuratamente progettato, curando i valori degli illuminamenti, delle luminanze e dei guadagni termici, evitando, al contempo, fenomeni di abbagliamento [Langdon e Loudon, Kay, Nimnicht].

I benefici psicologici della luce naturale e la funzione delle finestre come canali di comunicazione visiva sono stati ben delineati da Perkins e Burts; essi sostengono che la visione dell'esterno è comunque una stimolante esperienza conoscitiva. Burts ha notato che la presenza di finestre aggiunge una sensazione di spazialità alle aule che risulterebbero altrimenti, opprimenti ed affollate, benché altri ricercatori sostengono che le finestre costituiscono un elemento di distrazione.

Confronti effettuati tra le prestazioni scolastiche, il benessere fisico ed il comportamento degli allievi di classi diverse, alcune con finestre ed altre senza, non hanno mostrato differenze tra i due gruppi. Gli insegnanti, tuttavia, hanno notato modificazioni nel comportamento degli studenti nelle classi senza finestre, tra questi un minor interesse verso gli stimoli esterni, un atteggiamento esitante ed incerto ed una maggiore aggressività [Demos et al.].

Le fabbriche senza finestre sono abbastanza diffuse, anche a causa delle necessità connesse ad alcuni processi industriali. La ricerca di Hollister sulle fabbriche svedesi, che furono costruite sottoterra nel 1946, senza alcun varco alla luce del giorno, stabilì che gli impiegati assumono atteggiamenti estremamente negativi, accusano disturbi di varia natura e si assentano frequentemente [Hollister]. Ricerche condotte in Russia e Cecoslovacchia, [Plant] dimostrano che gli occupanti di aziende senza finestre sono più frequentemente soggetti a disturbi fisici e psichici. Da tali studi si evince che la mancanza di luce naturale ha un maggiore impatto sul benessere sia fisico che mentale.

Per gli edifici destinati ad uffici, gli studi condotti su lavoratrici che operavano in ambienti senza finestre a Seattle, Washington [Ruys], mostrano che circa il 90% esprime insoddisfazione per la mancanza di finestre ed il

55% crede che ciò possa influire negativamente su esse e sul loro lavoro.

La presenza di luce naturale però, a seconda della quantità e della distribuzione qualitativa in un ambiente confinato, può produrre fenomeni compromettenti per il risparmio energetico ed il comfort termico e visivo degli utenti.

Nel primo caso, relativo alla qualità termica e quindi energetica degli ambienti confinati, una significativa presenza di luce solare diretta può incrementare gli apporti di calore per irraggiamento che, in periodi estivi, difficilmente possono essere ridotti da un buon impianto di climatizzazione, provocando un discomfort climatico per gli utenti. Anzi, tali condizioni comportano solo un incremento ulteriore del fabbisogno energetico primario degli edifici, senza ottenere particolari prestazioni di regolazione climatica.

Nel secondo caso, dal punto di vista fisiologico, in particolare in presenza di videotermini, si può verificare il cosiddetto effetto velo, compromettendo la visibilità dello schermo; dal punto di vista psicologico, si può verificare il fenomeno dell'abbagliamento molesto che, per effetto di elevati contrasti di luminanze nel campo di vista, o per la presenza di sorgenti luminose particolarmente ampie a luminanza diffusa, a lungo andare può provocare mal di testa o riduzione della produttività del lavoratore.

1.3 Il contributo della luce al risparmio energetico

Secondo l'International Energy Agency (IEA, 2006), il 19% di energia elettrica in tutto il mondo è consumata per l'illuminazione. Negli ultimi anni si è assistito ad una sempre crescente attenzione da parte dei vari paesi industrializzati nei confronti dell'illuminazione, con varie politiche tese alla riduzione dei consumi, rispettando comunque le esigenze di sicurezza e di comfort visivo: dall'adozione di lampade ad alta efficienza, alla messa al bando di lampade inefficienti, come quelle ad incandescenza, fino all'utilizzo di alimentatori elettronici ad alta efficienza per le fluorescenti, in accordo con la direttiva europea 2000/55/EC (Official Journal of The European Communities, 2000). Con queste finalità, nel 2000 è stato lanciato il Programma Europeo "Greenlight" (The European Greenlight Programme, 2000), che considera quello dell'illuminazione uno dei settori principali su cui puntare per ridurre i consumi energetici ed il conseguente danno ambientale che questi inducono.

L'impiego di luce naturale consente di ridurre in modo significativo i consumi di energia e la richiesta di picco negli edifici commerciali. La direttiva europea 2002/91/CE sulla certificazione energetica negli edifici prevede, oltre al calcolo dei consumi legati al riscaldamento e raffrescamento, anche quello relativo ai consumi di elettricità ai fini dell'illuminazione degli ambienti. Essa ha dato impulso alla emanazione della norma europea EN 15193 del 2007, che introduce un indice, il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator), per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici relative all'illuminazione.

In un progetto mirato ad un efficace controllo energetico dell'edificio, la potenza installata per l'illuminazione artificiale deve essere studiata e definita in funzione della disponibilità di luce naturale. È possibile ottenere i livelli di illuminamento richiesti e distribuzioni di luminanze omogenee, utilizzando al meglio la luce naturale. In tal modo il risparmio energetico conseguito sarà frutto non solo di una minore potenza installata per l'illuminazione artificiale, ma anche di una minore quantità di apporti gratuiti di calore per dispersione dalle lampade, influenzando positivamente sul calcolo dei carichi frigoriferi dell'impianto di climatizzazione estiva.

La radiazione di una qualsiasi sorgente di luce, sia essa naturale o artificiale, comporta anche un effetto termico. Esso è particolarmente significativo nel caso di sorgenti a bassa efficienza come ad esempio quelle ad incandescenza, che non a caso, dal settembre 2009 sono state "vietate".

Anche la radiazione solare, che per circa il 50% è costituita da radiazioni visibili, comporta un guadagno termico per gli ambienti. Poiché la sua efficienza è molto elevata, l'impiego di luce naturale determina, a parità di illuminamenti, non solo un risparmio di energia elettrica, ma anche una riduzione del carico termico in ambiente.

È ragionevole aspettarsi che la luce naturale possa ridurre il consumo di energia elettrica dovuto all'illuminazione

in un edificio, ma ciò non significa che l'illuminazione naturale possa sostituire totalmente quella artificiale, bensì che la luce elettrica non deve essere utilizzata quando è presente la luce naturale in quantità sufficiente. Quando la luce naturale non è sufficiente, a causa di condizioni climatiche e dell'ora del giorno, è necessaria l'illuminazione artificiale. In ogni caso, ***l'impiego di luce naturale consente di ridurre maggiormente il consumo energetico globale che quello di picco.***

Notevole impulso, negli ultimi anni, hanno ricevuto, sia nella ricerca, sia nella produzione industriale, sistemi innovativi di integrazione e controllo della luce naturale e di quella artificiale. La crescente disponibilità tecnico-economica di sistemi integrati di automazione impiantistica e la sempre più vasta diffusione di sistemi di automazione degli edifici (BMS – Building Management Systems) creano nuovi scenari per lo sviluppo di tecniche di analisi integrate finalizzate al risparmio energetico [Bernardo H. et al.]. La Building Automation, attraverso sistemi integrati e protocolli di interfaccia tra i vari componenti riconosciuti dalle diverse aziende produttrici, consente la regolazione e la gestione sia degli apparecchi illuminanti e quindi dei flussi di luce artificiale, sia delle schermature, in modo da garantire risparmio energetico e comfort visivo. Ma anche il comfort termico ne trae un vantaggio, infatti, riducendo al minimo l'utilizzo della luce artificiale, si riducono i carichi frigoriferi dovuti agli apporti gratuiti di calore dalle apparecchiature.

A fronte di questi risparmi di costi energetici, deve essere valutata la maggiore spesa per un più complesso sistema di controllo e di integrazione dell'illuminazione artificiale con quella naturale, di eventuali sistemi oscuranti e di altri elementi del sistema di illuminazione diurna, che non fanno parte degli edifici illuminati artificialmente. La riduzione delle potenzialità dell'impianto di raffrescamento estivo deve essere confrontata con le maggiorazioni dovute alle accresciute potenzialità dell'impianto di riscaldamento.

La corretta valutazione dell'apporto solare (termico e luminoso) richiede necessariamente l'utilizzo di strumenti di calcolo evoluti, oltre che la conoscenza delle dinamiche e delle interazioni energetiche che si sviluppano all'interno del sistema edificio-impianto.

Nell'analisi del possibile impatto energetico dei sistemi di controllo e gestione dell'illuminazione le norme permettono di individuare sia le esigenze prestazionali da soddisfare sia le potenze specifiche dei corpi illuminanti e i software sono utilizzati per dimensionare e simulare il sistema di illuminazione artificiale e valutare la potenza specifica installata. Alcuni software, basandosi su tecniche di simulazione di raytracing (Daysim,...), permettono di calcolare i valori di illuminamento all'interno degli ambienti, sulla base di profili annuali di radiazione solare di un anno tipo, allo scopo di mantenere predefiniti valori di illuminamento in specifiche aree.

È possibile, inoltre, con il supporto di specifici applicativi, definire modelli comportamentali degli utenti [Galasiu e Veitch, Boyce] come:

1. ***Utenza passiva***, in cui la luce rimane accesa durante tutta la giornata lavorativa e la schermatura è parzialmente abbassata nel corso dell'anno per contrastare l'ingresso della componente di luce diretta e con accensione e spegnimento della luce manuale (il controllo della schermatura è manuale).
2. ***Utenza manuale attiva***, in cui gli occupanti accendono la luce a seconda delle necessità ed abbassano manualmente la schermatura gradualmente durante il giorno, per ostacolare i raggi diretti.
3. ***Utenza automatizzata***, in cui si prevede il controllo automatico della schermatura e dell'accensione o spegnimento della luce, mediante sensori.

In tal modo è possibile determinare, in base alle tipologie di controllo, i consumi energetici.

I risultati ottenibili sono:

1. Il valore medio annuale del fattore di luce diurna, che permette di valutare il corretto utilizzo della luce naturale all'interno degli ambienti, al fine di garantire un'illuminazione diurna ottimale.
2. Il valore dell'autonomia di illuminazione che indica in percentuale per quante ore all'anno si riesce ad

- ottenere il livello minimo di illuminamento richiesto, con la sola illuminazione naturale (UDI – Useful Daylight Illuminance) [Nabil e Mardaljevic];
3. Il fabbisogno annuale di energia elettrica per l'illuminazione artificiale;
 4. I valori medi dell'illuminamento nei punti oggetto di indagine.

Essi permettono di ottenere un'analisi energetica accurata valutando il potenziale di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di CO₂ in funzione dei sistemi di controllo [Kurian] e delle schermature adottate.

Sistemi di controllo [Newsham] e schermature permettono di ottenere, oltre ai vantaggi relativi al risparmio energetico, anche riduzione di fenomeni di discomfort visivo dovuto ad un eccesso di luce naturale. Un ruolo importante per le finestrate lo giocano i vetri basso-emissivi o con sistemi di schermatura elettrocromici [Gugliermetti e Bisegna].

I sistemi schermanti, sebbene finalizzati alla riduzione della penetrazione della luce diretta [Wong e Istiadji], permettono comunque di raggiungere livelli di illuminamento sufficienti per svolgere predefiniti compiti visivi. Essi permettono di ottenere una riduzione dei contrasti di luminanze nel campo di vista e di conseguenza, i fenomeni di abbagliamento molesto.

1.4 Simulazione dei fabbisogni energetici

Il concetto di qualità ambientale degli edifici è direttamente connesso a quello di efficienza energetica ; l'uso efficiente di energia nella costruzione, nell'esercizio, nella manutenzione e nello smaltimento degli edifici , infatti, oltre a ridurre l'emissione di inquinanti nell'atmosfera, nel suolo, ecc., determina anche un miglioramento delle condizioni di benessere all'interno degli edifici. In quest'ottica, l'Environmental Building News-EBN's (Wilson e Malin) propone un elenco di 11 priorità per edifici sostenibili, tra le quali citiamo:

Risparmiare energia: progettare e costruire edifici energeticamente efficienti. L'uso continuato di energia è probabilmente il maggiore impatto ambientale specifico di un edificio, e per questo la progettazione energeticamente consapevole dovrebbe essere la priorità numero uno. Questa riguarda diversi aspetti, tra i quali l'utilizzazione di risorse energetiche rinnovabili, la minimizzazione dei carichi di raffrescamento e riscaldamento, e il potenziamento dell'illuminazione naturale.

Costruire edifici "sani" - comfort ambientale e sicurezza: per esempio attraverso l'introduzione della luce diurna in tutti gli spazi dove sia possibile, e la ventilazione naturale. Sono anche suggeriti la possibilità di controllo dell'ambiente da parte dell'utente, con finestre regolabili e dispositivi appropriati per il controllo della luce e della temperatura, tra altri.

Massimizzare la longevità: progettare per la durata e l'adattabilità funzionale degli edifici. Quanto più dura un edificio, maggiore è il periodo di tempo nel quale gli impatti ambientali saranno ammortizzati. Perciò, specificare materiali da costruzione durevoli e progettare per l'adattabilità degli spazi (specialmente in edifici commerciali), sono obiettivi importanti dal punto di vista ambientale.

Riciclare edifici: riutilizzare edifici e infrastrutture esistenti. Gli edifici esistenti di solito contengono una vasta quantità di risorse culturali e materiali, così come contribuiscono a dare un senso di identità ai luoghi. Ma è importante non dimenticare la priorità numero uno: massimizzare l'efficienza energetica anche quando si ristruttura un edificio.

Queste sono le quattro priorità che definiscono, quello che si intende per qualità ambientale in edifici. Per quanto riguarda l'efficienza energetica (intesa come conservazione di energia), l'energia può essere utilizzata nell'edificio con diversi usi finali, ma quelli strettamente legati al progetto di un edificio e sui quali si può intervenire sono l'illuminazione, la climatizzazione ambientale e il riscaldamento dell'acqua per uso igienico-sanitario (Lamberts et al). In Europa, il consumo di energia per illuminazione artificiale in edifici non residenziali è cresciuto molto; infatti, circa metà dell'energia elettrica utilizzata in questi edifici viene consumata in

illuminazione artificiale. Non c'è da stupirsi, quindi, che lo sfruttamento ottimale dell'illuminazione naturale, sia diventato, dopo il riscaldamento solare passivo e il raffrescamento passivo, il maggiore obiettivo nella progettazione energeticamente consapevole (Baker et al, 1993). La letteratura esistente (Baker et al, 1993; Maldonado, A.; 1988; Asada e Shukuya, 1988; Dobrin, 1988; Traverso e Vighi, 1988) parla prevalentemente di efficienza energetica attraverso l'uso dell'illuminazione naturale in edifici non residenziali (scuole, uffici, musei, centri commerciali, ecc.) in quanto sono quelli che hanno più esigenze di illuminazione, legate alle attività specifiche, alla produttività del lavoro, e alle esigenze di comfort visivo. Buone condizioni di illuminazione naturale in spazi di lavoro aiutano ad avere lavoro più efficiente e produttivo, ed allo stesso tempo aumentano il senso di benessere (Baker et al, 1993).

Tuttavia, anche in edifici costruiti per rispondere al problema del risparmio energetico, l'illuminazione naturale è stata sovente l'aspetto più trascurato del progetto. Così, nonostante l'aumento dell'efficienza delle fonti luminose, l'illuminazione artificiale in Europa rimane tra le maggiori fonti di consumo di energia in edifici non residenziali. Considerevole progresso è stato fatto anche nello sviluppo di sistemi di controllo che garantiscono l'uso della luce diurna in sostituzione della luce artificiale, ma questi sistemi non sono ancora sufficientemente diffusi (Baker et al, 1993).

Per progettare in modo energeticamente efficiente tenendo conto degli aspetti legati all'illuminazione degli ambienti, significa poter calcolare il fabbisogno degli edifici per illuminazione artificiale e poterli confrontare con dei valori di benchmark di fabbisogno per poter avere un riscontro della bontà della soluzione progettuale prescelta. L'approccio deve essere però di tipo integrato, ovvero tutti gli usi finali dell'energia nell'edificio devono essere considerato, focalizzando però l'attenzione sull'illuminazione artificiale.

Si può pertanto procedere in due differenti modi:

- effettuare una stima del fabbisogno energetico per i differenti usi finali dell'energia avvalendosi della normativa tecnica vigente, ovvero della UNI EN 15193-2008 *Prestazione energetica degli edifici. Requisiti energetici per illuminazione per il calcolo dell'energia elettrica per illuminazione artificiale*, e la serie delle UNI/TS 11300 per il calcolo del fabbisogno energetico per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e produzione acqua calda sanitaria;
- effettuare una stima del fabbisogno energetico attraverso un software di simulazione dinamica della prestazione energetica degli edifici.

In entrambi i casi risulta necessario individuare dei valori di riferimento di fabbisogno energetico con cui effettuare il confronto e, qualora non disponibili, definire dei valori di benchmark di fabbisogno energetico attraverso il ricorso alla simulazione di edifici di riferimento definibili come archetipi per le varie destinazioni d'uso.

Per la valutazione dei fabbisogni energetici nel presente lavoro si è optato per il ricorso a strumenti di simulazione dinamica.

Molto vasta è la trattazione in merito ai differenti strumenti di simulazione dinamica messi a disposizione della comunità scientifica. Una dettagliata rassegna può essere tratta nei lavori di Chidiac et al. che sottolinea come differenti tecniche di modellazione per la stima dei fabbisogni energetici siano ormai state implementate. Questo emerge analizzando quanto prodotto da Olofsson et al., da Catalina et al., da Ekici et al., da Yu et al, e da Perez-Lombard et al.

Nel prosieguo della trattazione si illustrerà pertanto il background relativo agli strumenti a disposizione per la valutazione del fabbisogno energetico per illuminazione degli edifici, nonché quello che è lo "stato dell'arte" relativo alla costruzione di edifici di riferimento (o archetipi).

1.5 Strumenti per il calcolo dinamico del fabbisogno energetico per illuminazione

Lo sviluppo dei software per calcolo illuminotecnico ha avuto un impulso in anni recenti quasi esclusivamente per esigenze legate alla progettazione della luce artificiale; questi programmi si sono recentemente arricchiti da numerosi opzioni, quali il collegamento ai più moderni strumenti per la progettazione assistita da calcolatore (CAD) ed a librerie di materiali e componenti, ma sono tuttavia ancora poche le applicazioni che si occupano espressamente della luce naturale o che la trattano in maniera sufficientemente precisa.

L'aspetto del calcolo illuminotecnico è affrontato secondo diverse modalità, a partire dalle più semplici, fino allo impiego di modelli matematici decisamente più complessi, in grado di tenere adeguatamente conto del comportamento ottico delle diverse superfici costituenti il modello geometrico dello ambiente di calcolo. In quest'ultimo caso, gli algoritmi di simulazione più diffusi sono il Ray-tracing e la Radiosity (Palladino et al, 1999).

Nel Ray-tracing, la definizione di un ambiente e delle viste tridimensionali che si ottengono modificando la posizione dell'osservatore avviene, in linea di principio, seguendo gli infiniti raggi emessi da una sorgente luminosa, seguendo le loro interazioni con le entità geometriche che compongono la stessa scena e calcolando l'intensità che giungono l'osservatore. In realtà però si opera il processo opposto (backward ray-tracing o ray-tracing inverso): grazie al principio della conservazione dell'energia ed al limitato numero delle unità elementari costituenti la maglia di rappresentazione di un qualsiasi monitor grafico (solitamente almeno 1024 x 768 pixel), si opera seguendo il comportamento del raggio uscente dall'osservatore e passante per ogni pixel dello schermo, verso e all'interno della scena tridimensionale, fino a che esso non raggiunga una sorgente luminosa o esca dal volume di vista. Dal punto di vista strettamente geometrico questa tecnica non presenta controindicazioni, il ray-tracing permette di risolvere le parti nascoste di una scena, di modellare con precisione le ombre, le riflessioni tra oggetti diversi ed i fenomeni di rifrazioni. In generale comunque questo processo è molto oneroso in termini di tempi e risorse di calcolo, per cui spesso si accetta un certo grado di approssimazione, limitando il numero delle iterazioni. Nonostante la rigorosità formale, le tecniche di ray-tracing soffrono di alcune gravi limitazioni: non è possibile infatti considerare adeguatamente l'apporto della radiazione diffusa, in grado di influenzare in modo netto la distribuzione spettrale della radiazione luminosa, e la mancanza di una simulazione globale della componente diffusa non consente, di conseguenza, di trattare in modo corretto il fenomeno delle ombre portate, che si presentano con bordi netti e ben definiti, del tutto innaturali. Inoltre, il Ray-Tracing, nello studio dell'illuminazione globale, presenta lo svantaggio di dipendere da un punto di osservazione, il che fa che per ogni nuova visualizzazione sia necessaria nuova determinazione dei percorsi dei raggi luminosi. (Claro, 1999).

In seguito ai problemi rilevati con l'algoritmo del Ray Tracing, si è cercato di sfruttare algoritmi che utilizzano modelli di illuminazione globale, che fanno riferimento alla radianza delle varie superfici costituenti la geometria oggetto della simulazione. Tali tecniche sono dette tecniche di Radiosity o radiosità (Palladino et al, 1999).

Il metodo della radiosità si basa sulle analogie con il trasferimento radiativo del calore. I valori della radianza delle superfici degli oggetti che sono parte della scena sono calcolati nell'intero spazio virtuale, in modo indipendente del quadro di vista, richiedendo così grandi capacità di calcolo e risorse hardware. La procedura più onerosa è senz'altro la determinazione dei fattori di forma – consistenti in relazioni geometriche tra le varie superfici – operazione che avviene utilizzando algoritmi diversi, generalmente basati su simulazioni agli elementi finiti. La risoluzione matriciale delle equazioni di bilancio energetico di ciascuna delle areole infinitesime componenti il modello geometrico fornisce i valori delle radianze delle varie superfici e consente, noti i coefficienti di riflessione, di ricavare gli illuminamenti, le luminanze e gli abbagliamenti. Data la sua capacità essenzialmente limitata, comunque, a modellare effetti di riflessione diffusa, la radiosity è molto spesso utilizzata in congiunzione con tecniche di ray-tracing, le quali, invece, modellano perfettamente gli effetti della riflessione speculare. Questo software, che fa parte di un pacchetto sviluppato dal I.E.A. (International Energy Agency - USA) - ADELIN ("Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment") è un strumento integrato per il calcolo degli effetti della luce e delle prestazioni dei sistemi di illuminazione di interni; in grado di

risolvere sia i problemi riguardanti la luce naturale, che quelli riguardanti l'illuminazione artificiale, rappresentando gli effetti sulle condizioni di illuminazione prodotti da tali sorgenti in ambienti confinati con geometrie più o meno complesse (Ward et al, 1996). Ovviamente, il software ha i limiti già menzionati prima, dovuti all'algoritmo del raytracing.

Come esempio di software che utilizza l'algoritmo del radiosity possiamo citare "LIGHTSCAPE", di proprietà della Autodesk. Il software calcola la propagazione della luce naturale e artificiale in un ambiente di qualsiasi geometria. Questo software utilizza gli algoritmi della radiosità e del raytracing, essendo quest'ultimo utilizzato però soltanto per raffinare le tecniche di rendering finali, non avendo alcuna influenza sui risultati numerici, che sono calcolati soltanto con la radiosità.

Una stima accurata delle prestazioni energetiche e quindi dell'efficacia di un sistema di gestione dell'illuminazione dipende da diversi fattori, connessi sia alle caratteristiche dell'edificio per il quale viene progettato sia alle caratteristiche del sistema previsto (criteri di controllo adottati, componenti il sistema, etc.).

In particolare entrano in gioco:

- la disponibilità di luce naturale esterna all'ambiente, che dipende da:
 - latitudine e longitudine del luogo,
 - giorno del mese e ora del giorno,
 - condizioni di cielo (coperto, sereno, intermedio, etc.)
- la quantità di luce naturale presente in ambiente, che dipende da:
 - disponibilità di luce naturale esterna,
 - presenza di ostruzioni esterne,
 - orientamento dell'ambiente (nel caso si consideri la presenza di radiazione solare diretta)
 - presenza di sistemi di schermature,
 - conformazione dell'ambiente e disposizione delle postazioni di lavoro,
- le caratteristiche dell'utenza, intese come:
 - profilo di occupazione,
 - modalità di interazione tra l'utenza e i componenti schermanti,
 - modalità di interazione tra l'utenza e l'impianto di illuminazione,
 - le caratteristiche e le prestazioni dell'impianto di illuminazione (tipologia di apparecchi,
 - distribuzione della luce in ambiente, etc.)
- la tipologia e l'architettura del sistema di controllo (controllo in base all'occupazione, alla presenza di luce naturale, alla volontà dell'utente, a scenografie predefinite, etc., tipologia di sensori adottati, raggruppamento dei terminali, etc.).

Differenti software, pensati per rispondere ad esigenze di utenti diversi, vengono utilizzati per poter stabilire il fabbisogno di energia elettrica per illuminazione.

Volendo sintetizzare i differenti software che si hanno a disposizione, si possono elencare qua di seguito,

con indicazione dei dati di input forniti e dei dati di output ottenibili [Aghemo et al.]:

- Daysim: utilizza come input
 - potenza specifica totale installata (W/m²);
 - tempo di ritardo del sensore di occupazione;
 - orario di inizio e fine dell'attività;
 - interazione dell'utente con i sistemi di controllo della luce artificiale e dei sistemi di schermatura; illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux);
 - valori di potenza parassita di stand-by per il sistema di controllo e i reattori degli apparecchi.

Restituisce come output:

- fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m²year);
 - Autonomia di Luce diurna Annuale;
 - Fattore di luce diurna
- Lightswitch: utilizza come input:
 - Potenza specifica totale installata (W/m²);
 - tempo
 - di ritardo del sensore di occupazione;
 - orario di inizio e fine dell'attività;
 - interazione dell'utente con i sistemi di controllo della luce artificiale e dei sistemi di schermatura;
 - illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux);
 - valori di potenza parassita di stan-by per il sistema di controllo e i reattori degli apparecchi.

Restituisce come output:

- fabbisogno annuo di energia elettrica per illuminazione (kWh/m²year);
 - Autonomia di Luce diurna Annuale;
 - Fattore di luce diurna
- Adeline: utilizza come input:
 - Potenza totale installata per l'illuminazione (W);
 - orario di inizio e fine attività;
 - numero di giorni lavorativi per settimana;
 - illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta.

Restituisce come output:

- energia totale risparmiata (kWh/anno e kWh/mese);
 - energia totale consumata (kWh/anno e kWh/mese);
 - ore totali di accensione (h/anno);
 - tempo di utilizzo della luce naturale (%);
 - Fattore di luce diurna;
 - Illuminamento naturale
- Energy Plus: utilizza come input:
 - Potenza totale installata per l'illuminazione (W);
 - orario di inizio e fine attività;
 - numero di giorni lavorativi per settimana;
 - illuminamento di riferimento in funzione dell'attività svolta (lux).

Restituisce come output:

- energia totale consumata;
- potenza totale installata per l'illuminazione;
- livelli di illuminazione naturale.

1.5.1. Lo strumento di calcolo: Energy Plus

Nell'ambito dei programmi di simulazione termoenergetica degli edifici, EnergyPlus sta recentemente

guadagnando un sempre maggiore consenso, in particolare nella comunità scientifica, per il notevole grado di dettaglio nella simulazione energetica degli edifici e per la caratteristica di essere un software integrato, che consente la simulazione di tutti i flussi di energia termica ed elettrica che attraversano le superfici di controllo dei sistemi oggetto di analisi.

EnergyPlus nasce nel 2001, a seguito di un lavoro iniziato nel 1996, come un programma innovativo a partire dai due software di simulazione termoenergetica degli edifici statunitensi DOE-2 e BLAST elaborati rispettivamente dal Ministero dell'Energia (Department of Energy, DOE) e dal Ministero della Difesa (Department of Defence, DOD).

Il team che ha realizzato il programma è composto, oltre che dal DOE, dal CERL (US Army Construction Engineering Research Laboratories), dall'Università dell'Illinois, dal Lawrence Berkeley National Laboratory, dall'Università statale dell'Oklahoma e dalla GARD Analytics. Ne è nato un programma che combina gli algoritmi più dettagliati di DOE-2 e BLAST, ma che si configura come un nuovo software, essendo basato sulla simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto di climatizzazione, a differenza dei programmi precedenti in cui l'informazione sui carichi termici determinati in ambiente veniva in cascata inviata ai componenti impiantistici.

Il programma è essenzialmente modulare, per facilitare l'inserimento di nuovi moduli, anche sviluppati in parallelo da diversi estensori, ed eventuali link ad altri applicativi.

Il simulatore principale del programma è composto da tre moduli fondamentali, il *surface heat balance manager* che risolve il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete, l'*air heat balance manager* che risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi, e il *building systems simulation manager* per la simulazione dei componenti impiantistici. Questi moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'*integrated solution manager* che fa sì che i tre moduli siano risolti simultaneamente, e non in cascata, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. Si procede secondo successive iterazioni tra la domanda di energia dell'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione: alla prima iterazione si stima il carico termico dell'ambiente avendo fissato la temperatura interna pari alla temperatura di set point; assunto questo carico termico come potenza richiesta all'impianto, viene simulato il comportamento dell'impianto di climatizzazione e viene stimata l'effettiva potenza termica che l'impianto è in grado di fornire a quell'istante temporale; con questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria, nel termine che rappresenta la variazione dell'energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine.

L'air heat balance engine deriva da IBLAST (versione di ricerca del BLAST) e differisce dal metodo dei room weighting factors del DOE-2 perché considera il bilancio termico sull'aria ambiente (e perciò viene definito anche metodo esatto).

Le principali assunzioni su cui si basa il metodo sono:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme (perfetta miscelazione);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

L'air heat balance può essere sintetizzato, trascurando il flusso termico disperso per infiltrazione e per

ventilazione tra zone adiacenti, nell'equazione:

$$C_z \frac{dt_z}{d\tau} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{l=1}^{N_{sup}} h_l A_l (t_{s,l} - t_z) + \dot{m}_v c_p (t_\infty - t_z) + \dot{Q}_N \quad (1)$$

dove

N è il numero delle sorgenti interne convettive [-]

$\dot{Q}_{i,c}$ è l' i -esima sorgente convettiva

$h_l A_l (t_{s,l} - t_z)$ è il flusso termico disperso dalle superfici di una zona termica a temperatura t_s

$\dot{m}_v c_p (t_\infty - t_z)$ è il flusso termico per ventilazione

\dot{Q}_N è il carico dell'impianto

C_z è la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente.

Connesso all'air heat balance manager è il surface heat balance manager che comprende i moduli per la determinazione delle temperature superficiali (quelle della faccia interna incognite nello schema risolutivo dell'air heat balance) e dei flussi termici in corrispondenza delle facce interna ed esterna di ogni parete.

I flussi termici scambiati attraverso i componenti di involucro sono determinati utilizzando la tecnica dei fattori di risposta, basata sul concetto di funzione di trasferimento, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema.

Il building system simulation manager può simulare i più diffusi componenti impiantistici, ed è basato su una scomposizione dei componenti di un impianto in tre sotto-sistemi: l'*air loop*, il *plant loop* e il *condenser loop*. L'*air loop* serve a modellare le reti aerauliche, dalle unità di trattamento dell'aria ai terminali di impianto in ambiente; i *plant loop* e *condenser loop* a modellare le reti idroniche (fluidi termovettori sotto forma di acqua e fluidi di condensazione) e al loro interno si distinguono ancora componenti relativi alla domanda (batterie di scambio termico) e componenti relativi all'offerta (generatori di calore, gruppi frigoriferi nel caso del *plant loop*; torri evaporative, pozzi nel caso del *condenser loop*). In letteratura, si trovano molti lavori svolti da più autori che hanno dettagliato l'uso del software per la modellazione dei più svariati sistemi impiantistici. [Fabrizio, Lewis, Bazjanac, Crawley & Lawrie, Pedersen et alii, Ceylan & Myers].

Il software prende in considerazione l'aspetto legato all'illuminazione degli ambienti interni nel surface heat balance manager, poiché è all'interno di tale modulo che possono essere descritti i sistemi impiantistici per l'illuminazione artificiale degli ambienti. Da sottolineare come l'ambito illuminotecnico in E-Plus sia considerato da un punto di vista prettamente energetico: viene infatti indagato l'impatto che le sorgenti luminose considerate come apporti gratuiti, naturali o artificiali, hanno sul bilancio energetico dell'ambiente. La simulazione dell'illuminazione degli ambienti procede attraverso tre step ben definiti:

- in funzione del modello geometrico di calcolo dell'ambiente o dell'edificio da simulare, il programma procede al calcolo dei daylight factors, che rappresentano il rapporto tra

l'illuminamento interno e quello esterno, e vengono calcolati per uno o più punti rappresentativi dell'ambiente; in questa computazione viene considerata tanto la componente diretta quanto la componente riflessa;

- sulla base del calcolo fatto sopra, viene calcolato, con il passo temporale impostato per la soluzione dell'equazione di bilancio termico, il contributo della luce naturale, eventualmente anche simulando la gestione di sistemi di schermatura mobili;
- viene infine simulato il sistema di illuminazione artificiale, al fine di determinare il contributo di energia elettrica necessaria per garantire i previsti valori di illuminamento sul piano di lavoro all'interno degli ambienti analizzati.

La simulazione è svolta per un ambiente tipo (aula scolastica) considerato rappresentativo del comportamento dell'intero edificio. In prima battuta, viene scelta un'aula inserita ad un piano intermedio, in posizione centrale rispetto alla struttura edilizia, in cui i solai interpiano e le strutture verticali interne non sono disperdenti in quanto confinanti con ambienti in cui viene mantenuta la stessa temperatura interna di comfort.

E-plus nasce come programma per analisi energetiche ma svolge simulazioni energetiche in regime dinamico anche in merito al consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale degli spazi interni. Rende come output dati di fabbisogno energetico con differente scansione temporale (orari, giornalieri, mensili, annuali)

Al suo interno uno specifico menu è dedicato alla definizione delle caratteristiche del sistema di illuminazione degli spazi interni.

Si considerino i fattori che influenzano il fabbisogno energetico per illuminazione artificiale.

Il programma dispone di un applicativo esterno di modellazione (Design Builder) con cui l'impianto di illuminazione è definibile ma con minore dettaglio.

Un'analisi illuminotecnica corretta richiede quindi il passaggio intermedio nel formato IDF con successiva fase di integrazione dei parametri di input.

Volendo analizzare i dati di input inseriti per la caratterizzazione del sistema dal punto di vista illuminotecnico, si ottiene un quadro in cui gli aspetti più legati al comfort visivo non sono presi in considerazione, a fronte di una valutazione riferita ad un livello di illuminamento medio calcolato puntualmente all'interno degli ambienti che diventa il parametro cui riferire le valutazioni per la determinazione del fabbisogno energetico.

L'algoritmo di calcolo si sviluppa attraverso 3 step:

4. il calcolo dei daylight factors
5. la determinazione, in funzione dei precedenti, della quantità di energia necessaria ad integrare il contributo naturale (si prende in considerazione tanto la luce diretta, quanto quella riflessa e quella diffusa)
6. l'integrazione del bilancio energetico con i dati derivanti dal calcolo illuminotecnico (riduzione degli apporti solari interni).

E-plus impiega la metodologia di calcolo propria di DOE-2 e sviluppata da Winkelmann e Selkowitz. Per svolgere i calcoli sono impiegati 4 differenti modelli di cielo: clear sky, Clear Turbid Sky, Intermediate Sky, Overcast sky.

La distribuzione di luminanza viene determinata impiegando il modello di Perez. I modelli di cielo sono derivati da modelli proposti da differenti autori (rispettivamente Kittler, 1965; CIE, 1973, Matsuura, 1987, Moon & Spencer, 1942).

1.5.2. Edifici di riferimento per la stima dei fabbisogni energetici

La determinazione del fabbisogno energetico di un edificio è utile alla verifica dell'efficienza del medesimo solo se è possibile raffrontare i dati derivanti dalla computazione con dati di consumo reale o con dati di fabbisogno calcolato. I primi sono di difficile reperimento: si trovano alcune utili indicazioni all'interno dei report ENEA per quanto riguarda i dati aggregati, o all'interno di pubblicazioni inerenti particolari destinazioni d'uso come ad esempio gli ospedali [Cavanagh e Vivoli]. I fabbisogni di edifici di riferimento possono essere ottenuti attraverso la simulazione energetica, previa individuazione e modellazione di edifici archetipo (o edifici di riferimento o benchmark reference building). Per perseguire tale strada diventa necessario stabilire innanzitutto cosa si intenda per "archetipo"

La parola archetipo deriva dal greco antico *αρχέτυπος* col significato di immagine: *tipos* ("modello", "marchio", "esemplare") e *arché* ("originale"); è utilizzata per la prima volta da Filone di Alessandria e, successivamente, da Dionigi di Alicarnasso e Luciano di Samosata.

Il termine viene usato, attualmente, per indicare, in ambito filosofico, la forma preesistente e primitiva di un pensiero (ad esempio l'idea platonica); in psicoanalisi da Jung ed altri autori, per indicare le idee innate e predeterminate dell'inconscio umano; per derivazione in mitologia, le forme primitive alla base delle espressioni mitico-religiose dell'uomo e, in narratologia, i metaconcetti di un'opera letteraria espressi nei suoi personaggi e nella struttura della narrazione; in linguistica da Jacques Derrida per il concetto di «archiscrittura»: la forma ideale della scrittura preesistente nell'uomo prima della creazione del linguaggio e da cui si origina quest'ultimo.

Nell'ambito della ricerca scientifica sull'analisi dei sistemi edificio-impianto e dei sistemi urbani il termine archetipo viene spesso utilizzato con diverse accezioni. Nel campo dello studio urbano ne troviamo traccia a partire da Martin, March e Trace [Martin, Martin e Trace] nella ricerca della miglior forma edilizia, nonché nei successivi lavori di Gupta [Gupta 1984, Gupta 1987], di Blowers e Steemers [Blowers, Steemers et al.] e di Ratti [Ratti et al.] che ha ricercato, valutando i benefici termici ed illuminotecnici, la miglior conformazione edilizia per i climi caldo torridi.

L'edificio archetipo viene indagato ed utilizzato nella analisi energetica del sistema edificio impianto, rientrando nell'approccio cosiddetto "bottom up approach" [Lukas e Ugursal, 2009], riportabile in italiano come "approccio induttivo". Il lavoro di Lukas e Ugursal illustra il cosiddetto Engineering Method per la stima dei fabbisogni, all'interno del quale l'uso degli archetipi edilizi serve a rappresentare il patrimonio edilizio di una determinata regione o di un determinato riferimento territoriale. Questa tecnica è utilizzata per classificare in generale il patrimonio edilizio secondo età, dimensioni, tipologia o altre variabili rappresentative. È possibile sviluppare archetipi edilizi per ciascuna destinazione d'uso e utilizzare queste descrizioni come i dati di ingresso per la modellazione energetica. All'interno di questo processo i fabbisogni energetici stimati diventano rappresentativi del patrimonio abitativo in esame. La tecnica degli archetipi è alternativa alla tecnica delle "distribuzioni" e a quella dei "samples", entrambe fatte rientrare da Lukas e Ugursal all'interno del metodo ingegneristico. L'approccio riprende precedenti lavori degli stessi autori [Lukas e Ugursal, 2008] e si collega al filone delle ricerche scientifiche in ambito internazionale volte ad individuare edifici rappresentativi di un patrimonio edilizio [Persily et al.] e allo sviluppo di veri e propri archetipi edilizi.

Parekh descrive il processo di sviluppo di archetipi per la simulazione di energia. L'autore delinea tre criteri di base nella generazione di archetipi: caratteristiche geometriche, caratteristiche termiche e parametri di funzionamento, ricavate da indagini e dati disponibili in letteratura.

MacGregor et al. ha sviluppato il modello energetico di un edificio residenziale per la Nova Scotia utilizzando tre livelli di isolamento e nove tipi di abitazione, con conseguenti 27 archetipi. Hanno usato valori tipici per

L'occupazione, gli elettrodomestici e le luci, e hanno valutato il fabbisogno di energia di ogni archetipo utilizzando il programma orario di analisi (HAP) sviluppato da Carrier Corporation.

Kohler et al. ha sviluppato un modello del settore edile tedesco per la stima di massa, energia e flusso monetario. Essi hanno classificato gli archetipi in funzione dell'età e hanno stilato un dettagliato database di elementi edilizi, materiali ed apparecchiature.

Huang e Broderick hanno sviluppato un modello simulazione di riscaldamento e raffreddamento per il patrimonio edilizio americano 16 edifici multifamiliari e 45 edifici monofamiliari "prototipo". Questi archetipi sono stati simulati in 16 regioni diverse; alcuni archetipi sono stati simulati in ben sei regioni. Gli autori hanno utilizzato DOE-2.1, un programma di simulazione sostenuto dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti. Carichi di riscaldamento degli edifici e carichi di raffreddamento sono stati disaggregati per mostrare le dispersioni di pareti, tetto, finestre, infiltrazioni, e guadagni interni.

Jones et al. ha sviluppato un modello di predizione energetica ed ambientale. Il modello impiega una procedura per la valutazione di un' abitazione sulla base di tessuto edilizio, vetri, ventilazione, riscaldamento dell'acqua, volume riscaldato e costi del carburante.

Shiple et al. ha sviluppato diversi archetipi di edifici canadesi. Gli archetipi erano basati su categorie come tipo, superficie, ed età. Il modello di analisi di energia ed emissioni utilizza il metodo bin ASHRAE modificato. Per la calibrazione del modello hanno utilizzato informazioni sul consumo di energia provenienti da un sottoinsieme degli edifici e utilizzato il modello per determinare l'impatto dei miglioramenti dell'involucro edilizio.

Carlo et al. ha avuto un approccio diverso allo sviluppo di archetipi per rappresentare gli edifici commerciali brasiliani. Utilizzando risultati della simulazione precedente di 512 edifici, gli autori hanno determinato le variabili primarie attraverso un processo regressivo grazie ad un'analisi della relazione numerica esistente tra tetto, facciata, e carico interno. Le combinazioni di queste variabili sono stati utilizzati per sviluppare 12 archetipi che sono stati ulteriormente arricchiti con variabili parametriche di simulazione. Ciò ha generato 695 edifici prototipo che sono stati simulati in DOE-2.1 per determinare il loro fabbisogno energetico.

Shimoda et al. hanno sviluppato modello residenziale di consumo per gli usi finali dell'energia. Hanno sviluppato 20 tipi di abitazione e 23 tipologie di occupanti per rappresentare la varietà delle case all'interno della città.

Wan e Yik hanno avuto un approccio alternativo agli archetipi e concentrati sui guadagni solari. Dopo aver condotto un sondaggio delle caratteristiche tipiche delle abitazioni di Hong Kong, hanno sviluppato un singolo archetipo della superficie di 40 m². Hanno applicato caratteristiche tipiche tra cui lo spessore delle pareti, rapporto tra finestre e pareti, spessore del vetro e fattore di assorbimento dei muri. Hanno poi fatto variare il layout in pianta e l'orientamento, mantenendo le geometrie e le dimensioni della camera. Hanno utilizzato come programmi di simulazione HTB2 e BECREs.

Yao e Steemers hanno sviluppato un modello basato su quattro topologie residenziali in Gran Bretagna: appartamento, villa semi-indipendente, villa individuale, e "mid-terraced". Hanno usato il metodo di calcolo sviluppato dal Martin Centre per calcolare le perdite di riscaldamento.

Palmer et al. hanno sviluppato un modello del patrimonio edilizio del Regno Unito con 431 archetipi. Hanno usato la ricerca BREDEM-8 come programma di simulazione del fabbisogno di riscaldamento e del consumo di acqua calda sanitaria di energia. Gli apporti interni sono calcolati sulla base dei dati di distribuzione e il consumo di acqua calda sanitaria si basa su valori tipici.

Petersdorff et al. hanno realizzato un modello edilizio dell'UE-15 esaminando cinque edifici di serie con otto standard di isolamento. Hanno usato Ecofys è costruito il modello di analisi ambientale (BEAM) per calcolare il

fabbisogno di riscaldamento per tre regioni climatiche. Le tre tipologie di edificio inclusi nel modello sono stati “terrace”, appartamento piccolo, e grande appartamento. Gli autori hanno considerato differenti scenari di retrofit e costruzione / demolizione.

Nishio e Asano hanno sviluppato uno strumento di generazione di archetipi sulla base del metodo Monte-Carlo. Gli autori hanno utilizzato numerose statistiche, sondaggi e set di dati dal Giappone per definire sia la distribuzione sia la variabilità degli alloggi. Il loro generatore di edificio utilizza il metodo Monte-Carlo per definire gli attributi per ogni archetipo su base probabilistica ipotesi.

Il metodo Monte Carlo viene utilizzato anche da Sartori per la costruzione di un modello di calcolo di una scuola rappresentativa del patrimonio edilizio scolastico norvegese, per poi poter verificare i vantaggi legati ad interventi di riqualificazione energetica del medesimo.

Clarke et al. incentra la ricerca sulle principali variabili determinanti la domanda di energia all'interno del patrimonio edilizio scozzese per creare classi termodinamiche rappresentative. Sono state sviluppate così 3.240 classi in base ad isolamento, permeabilità all'aria, dimensione della finestra, l'esposizione, e rapporto parete/pavimento. Ogni classe è stata modellata utilizzando il software di simulazione ESP-r per determinare il fabbisogno energetico utile dell'abitazione. Informazioni in merito all'impianto di riscaldamento e raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria, e illuminazione sono state poi utilizzate per calcolare il consumo totale di energia dell'edificio. I risultati sono stati incorporati in uno strumento di confronto dei risultati, di analisi e valutazione dell'impatto in seguito ad interventi di miglioramento sugli edifici.

Anche Chidiac et al. sviluppano un'analisi finalizzata alla costruzione di archetipi edilizi a destinazione d'uso terziaria (uffici) per poter valutare il fabbisogno energetico dei medesimi prima e dopo interventi di riqualificazione. Lo strumento da loro impiegato è E-plus.

Alcuni autori hanno inoltre proposto differenti procedure per la validazione dei modelli di calcolo dei fabbisogni energetici. Una ricerca preliminare in letteratura [Yoon et al., Westphal et al., Zhu, Pan et al.] mostra che una pratica tipica è quella di calibrare manualmente un singolo modello dell'edificio, dove la calibrazione avviene attraverso l'iterativa regolazione di diversi parametri fino a quando i risultati della simulazione corrispondono con i dati misurati. Tale procedura è molto onerosa in termini di tempo, richiede un alto livello di abilità degli utenti, e inevitabilmente risulta essere fortemente distorta dal personale giudizio dell'analista. Questo è in aggiunta al fatto che lo stesso problema è sotto determinato; ovvero a causa del gran numero di variabili interdipendenti e parametri e a seguito delle incertezze associate alla loro stima, c'è un'intrinseca impossibilità di individuare una soluzione unica. L'accettazione di una singola soluzione trascura queste incertezze intrinseche, e indebolisce la fiducia con cui il risparmio energetico può essere previsto. Nel suo recente lavoro Reddy et al. ha proposto un metodo che superi questa incertezza trovando modelli energetici dell'edificio più calibrati. La proposta di procedura utilizza il metodo Monte Carlo per generare uno spazio da cui modelli calibrati possono essere identificati.

Oltre ad uno studio generale degli archetipi, è possibile quindi finalizzare la creazione di archetipi come edifici benchmark per la simulazione termoenergetica dinamica. È il caso dei benchmark building models statunitensi, elaborati dal DOE (Department of Energy) statunitense, ovvero serie di modelli standard di edifici di riferimento, collocati in diverse località climatiche degli USA, da utilizzare come riferimento per la progettazione energetica dell'edificio e per favorire l'utilizzo della simulazione dinamica nel progetto di edifici e impianti di climatizzazione.

Questi modelli vengono utilizzati all'interno del programma di calcolo EnergyPlus, e con la semplice modifica dei dati climatici si possono generare i profili tipizzati e i valori di benchmark di consumo per località differenti da quelle statunitensi. Tale procedura viene implementata all'interno del rating system previsto dal sistema di certificazione del livello di sostenibilità energetico ambientale degli edifici di origine americana LEED

[Leadership in Energy and Environmental Design]. Tale protocollo prevede un credito denominato "Ottimizzazione della prestazione energetica" che pone la simulazione energetica in regime dinamico come mezzo per determinare la prestazione dell'edificio. Quest'ultimo si basa invero sul Building Performance Rating Method proposto dallo Standard ASHRAE ANSI 90.1:2007 Appendice G. Recepto dal *Manuale LEED Italia 2009 Nuove Costruzioni e Grandi Ristrutturazioni*, tale metodo propone di eseguire la valutazione energetica di un edificio attraverso il rapporto tra la sua prestazione e quella di un edificio di riferimento definito Baseline.

La simulazione energetica prevede tuttavia una buona conoscenza del sistema edificio, sia a livello impiantistico che di involucro, che spesso non si possiede, soprattutto nelle prime fasi della progettazione. Per ovviare ad una simile penuria di dati di input, al momento della creazione del modello, si può fare ricorso ai "benchmark building models", modelli di riferimento standard, sviluppati dal Dipartimento di Energia statunitense (U.S. DOE) e disponibili per diverse destinazioni d'uso. I primi DOE benchmark building models sono stati elaborati proprio con l'obiettivo di stabilire un punto di partenza comune per confrontare più facilmente i risultati delle ricerche e stimolare ad un uso più razionale dell'energia in edifici esistenti e di nuova costruzione. Questi primi modelli erano stati definiti attraverso medie statistiche di edifici esistenti ed erano pertanto caratterizzati da geometrie molto semplici e carichi termici abbastanza uniformi. Gli attuali modelli sono invece più complessi e maggiormente rappresentativi del patrimonio edilizio statunitense. I 15 modelli realizzati, includono 16 località e tre diverse fasce temporali (ante 1980, post 1980, nuova costruzione). Per la loro modellazione sono state utilizzate le analisi del 1999 e del 2003 del CBECS (Commercial Buildings Energy Consumption Survey). Tra di essi si registrano i benchmark dell'edificio per uffici piccolo, medio e di grandi dimensioni, l'ospedale e la casa di cura, il mall, il retail, le scuole primarie e secondarie. È in corso un'attività di contestualizzazione dei benchmark building models statunitensi in ambito italiano [Fabrizio et al., Corgnati et al., Margiotta e Puglisi], a partire da una analisi statistica del patrimonio edilizio non residenziale italiano [Citterio]. Infatti, molte sono le differenze tra una costruzione italiana ed una statunitense (caratteri morfologici e distributivi delle varie tipologie edilizie, stratigrafie e parametri prestazionali dei componenti di involucro, ecc.). La procedura che è stata elaborata per effettuare questa contestualizzazione parte dai lavori svolti in ambito internazionale per la creazione di edifici di riferimento [Torcellini, Winiarski et al.], è indicata in seguito ed è stata svolta per quattro aspetti [Fabrizio et al]:

- le caratteristiche distributive
- le tecnologie costruttive e i parametri prestazionali dell'involucro edilizio
- le caratteristiche degli impianti HVAC e di generazione dell'energia
- i carichi interni, i profili d'uso e altre condizioni al contorno.

Per quanto attiene alle caratteristiche distributive è necessario individuare gli schemi distributivi maggiormente caratteristici a livello italiano di quel tipo di costruzione, anche attraverso esempi di realizzazioni recenti.

Per quanto attiene ai parametri prestazionali dell'involucro edilizio, vi è un sicuro riferimento nel rispetto dei limiti di cui alla legislazione nazionale italiana (o regionale quando più stringente) ed è inoltre necessario individuare anche le caratteristiche costruttive tipiche di quel tipo di costruzione.

Per quanto attiene agli impianti HVAC è spesso facilmente identificabile, nella manualistica tecnica così come nella pratica professionale, la tipologia di impianto più diffusa per quel tipo di costruzione.

Per quanto attiene ai carichi termici e ai profili d'uso è possibile far riferimento ai valori della normativa tecnica Europea.

Una volta costruito il file di benchmark si procede alla simulazione nei diversi contesti climatici e all'elaborazione dei dati finali (energia finale, energia primaria, emissioni di CO₂, ecc.)

1.6 Bibliografia

AA.VV. *Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco*

immobiliare ad uso ufficio. Report RSE/2009/163, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, Marzo 2009

AA.VV., *The book of symbols: reflections on archetypal images*, in *Archive for Research in Archetypal Symbols* Taschen, 2010

Aghemo, C., Blaso, L., Pellegrino, A., Serra, V., *Improving energy performance of buildings through the use of lighting control systems: an overview of assessment tools*, Atti del Convegno The 26th Session of the CIE, 4-11 July, 2007, Beijing China, Volume 2° pp. D3-275 a D3-278, ISBN: 978 3 901 906 59 6 (convegno internazionale con referee)

Aghemo, C; Blaso, L; Pellegrino, A., Serra, V., *Consumi energetici per l'illuminazione artificiale negli edifici: la norma europea UNI EN 15193-2008 e sue applicazioni*, In: *Certificazione energetica: normativa e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto*, Convegno AICARR, Torino 25 novembre 2008, pp. 139-150, 2008, ISBN: 978-88-95620-24-4

Alexander, D.K., *HTB2 user manual version 2.0*, Welsh School of Architecture, University of Wales College of Cardiff; 1994.

Anderson, B.R., Chapman, P.F., Cutland, N.G., Dickson, C.M., Doran, S.M., Henderson, G. *BREDEM-8: model description*, Berkshire: BrePress; 2001.

Asada, H; Shukuya, M., *Luminous environment of a daylighted office space with a light-shelf and sloped ceiling*. In: *Environmentally friendly cities*, PLEA 98. Atti. Lisboa, Portogallo, giugno 1988.pp 433-436.

ASHRAE 1989. *Energy Efficient Design o/New Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1989, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers;

ASHRAE 2004. 90.1 Users Manual ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers;

ASHRAE 2007. *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers;

ASHRAE 2009, *Fundamentals - Handbook*, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers;

Baker, N.; Fanchiotti, A., Steemers, K., (Ed.). *Daylighting in Architecture. A European Reference Book*, James and James Ed., London, 1993.

Bazjanac V., *Building energy performance simulation as part of interoperable software environments*. Building and environment, 2004, vol. 39, pp. 879-883.

Benedetti, C., *Manuale di Architettura Bioclimatica*. Maggioli Editore, Rimini, 1994.

Bernardo H. et al. *Predictable impact of lighting control on the Energy consumption of a building through computational simulation*, In *Proceedings of ICREPQ'09 – Valencia* (Spain) 15 – 17 April 2009.

Blowers, A., (Ed.), *Planning for a Sustainable Environment*, A Report by the Town and Country Planning Association, Earthscan, London, 1993.

Boubekri M., Hull R., Boyer L. *Impact of windows size and sunlight penetration on office workers' mood and satisfaction: A novel way of assessing sunlight*, *Environment and Behavior* 23 (4) (1991), 474–493.

Boyce P.R. et al. *Occupant use of switching and dimming controls in offices*, *Lighting Research and Technologies* 38,4 (2006) 358-378.

Brainard G.C. *Photoreception for regulation of melatonin and the circadian system in humans*, In: *Fifth International LRO lighting research symposium*. Orlando (Fl) (2004).

- Broadbent, G., *Emerging Concepts in Urban Space Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- Bryin, I., *Atrium Buildings from the Perspective of Function*, Indoor Air Quality and Energy Use. Ashrae Transactions, Part II, 1995.
- Burts E. *Windowless classroom: windows helps to promote better classroom learning*, NEA Journal, (1961) 50: 13-14.
- Butera, F., *Architettura e Ambiente. Manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici*. Etaslibri, 1995.
- Capaso, A., Grattieri W., Lamedica, R., Prudenzi, A., *A bottom-up approach to residential load modeling*, IEEE Transactions on Power Systems 1994;9(2): 957-64.
- Carlo, J., Ghisi, E., Lamberts, R., *The use of computer simulation to establish energy efficiency parameters for a building code of a city in Brazil*, IBPSA, eighth international conference, Eindhoven, Netherlands;2003:131-8.
- Carolyn, P., Fisher, T., (Eds.), ARQ, Vol. 4 (no. 4), 2000.
- Carrier Corporation. *Hourly Analysis Program (HAP): 8760 hour load and energy analysis*, Available from: <<http://www.commercial.carrier.com>>; 2008.
- Catalina, T., Virgone J., Blanco, E., *Development and validation regression models to predict monthly heating demand for residential buildings*, Energy and Buildings 40 (10) (2008) 1825–1832.
- Catania, E.J.C., Chidiac, S.E., Morofsky, E., Foo, S., *Comparative analysis of energy simulation programs, Energy Plus and FEDS, using energy data from nine office buildings*, in: 2nd Canadian Conference on Effective Design of Structures, McMaster University, Hamilton, 2008.
- Cavenagh, S., Vivoli, F. P., a cura di, *Atti del Convegno sull'Uso razionale dell'energia negli ospedali*, FIRE, Milano 1997
- Ceylan H.T., Myers G.E., *Long-time solutions to heat conduction transients with time-dependent inputs*. ASME Journal of Heat Transfer, 1980, vol. 102, pp. 115-120.
- Cheung H.D., Chung T.M. *A study on subjective preference to daylight residential environment using con joint analysis*, Building and Environment 2008 vol. 43, no12, pp. 2101-2111.
- Chidiac, S.E., Catania, E.J.C., Morofsky, E., Foo, S., *A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings*, Energy and Buildings 2010
- Christoffersen J., Johnsen K., Petersen E., Valbjorn O., Hygge S. *Windows and Daylight – A post-occupancy evaluation of Danish offices*, In: Lighting 2000, Proceedings of the CIBSE/ILE Joint Conference University of York, UK:CIBSE, (2000), 112–120.
- Citterio, M. *Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati*, Report RSE/2009/161, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, Maggio 2009;
- Clarke, J.A., Ghauri, S., Johnstone, C.M., Kim J.M., Tuohy, P.G., *The EDEM methodology for housing upgrade analysis, carbon and energy labelling and national policy development*, IBPSA Canada, eSim conference, Quebec City, Canada;2008: 135-42.
- Claro, A., "Luz Solar: Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade/Ray-Tracing". In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1999. Atti.
- Collins B.L. et al. *A new look at windows*, Washington: National Bureau of Standards, Center for Building Technology, SBSIR, (1977), 77-1388.
- Collins B.L. *Review of the psychological reaction to windows*, Lighting Research and technologies, 8(2) (1976), 80-88.
- Corgnati S.P., Ariaudo, F., Fabrizio, E., Rollino, L., *Edifici tipo, indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad*

- uso scolastico (medie superiori e istituti tecnici), applicabilità di tecnologie innovative nei diversi climi italiani, Report RSE/2010/190, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, Settembre 2010;
- Crawley D.B., Lawrie L., Pedersen C.O., et alii, *EnergyPlus: creating a new generation building energy simulation program*. Energy and Buildings, 2001, vol. 33, pp. 319–331.
- Crawley, D.B. , Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, Y.J., Huang, W.F., Pedersen, C.O., Strand R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., *Energy Plus: creating a new-generation building energy simulation program*, Energy and Buildings 33 (4) (2001)443–457.
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T., *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*, Building Energy Directors Tool,2005.
- Cuttle C. *People and windows in workplaces*, In: Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, (1983), 203–212.
- Daryanani S. *Design considerations for the daylighting of new commercial buildings*, In Proceedings of the international daylighting conference, phoenix, Arizona. International Daylighting Conference, Washington (1983), 189-191.
- Demos G., davis S., Zuwaylif F.E. *Controlled physical environment*, Building Research 4 (1967), 60-62.
- Dobrin, M., *Daylighting in over-glazed educational buildings. Case Study of a school in Slovenia*. In: Environmentally Friendly Cities , PLEA 98. Atti. Lisboa, Portogallo, giugno 1988.pp 437-440.
- DOE2, *DOE-2: building energy use and cost analysis tool*, Available from: <<http://doe2.com>>; 2008.
- Eble-Hankins M.L. et al. *VCP and UGR glare evaluation systems: a look back and a way forward*, Leukos 1,2, 2004, 7-38.
- Ekici, B.B., Aksoy, U.T., *Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks*, Advance Engineering Software 40(5)(2009)356–362.
- ENEA, *Report Energia ed Ambiente – Analisi e scenari 2009*, Enea, Novembre 2010
- Energy Systems Research Unit. ESP-r version 11.3. University of Strathclyde University, Glasgow, Scotland.
- Fabrizio E. *Strumenti per la stima dei consumi. Potenzialità, criticità e utilizzo del software di simulazione dinamica EnergyPlus*. Cda, n. 2, febbraio 2009, pp. 14-21.
- Fabrizio, E., Guglielmino, D., Monetti, V., *Italian benchmark building models: the office building*, Atti del Convegno Building Simulation 2011, Sidney, 14-16 novembre 2011
- Filippi, M., Corgnati, S.P., Causone, F., Tala, N., Raimondo, D., Fabi, V., *Annex 53- IEA “Total energy use in buildings - Analysis and evaluation methods”*, Report RdS/2010/27, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, settembre 2010
- Galasiu A.D., Veitch J.A. *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review*. Energy and Buildings 38 (2006), 728-742.
- Galasiu A.D., Veitch. J.A. *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review*, Energy and Buildings 38 (2006) 728-742.
- Glickman G., Hanifin J.P., Rollag M.D., Wang J., Cooper H. and Brainard G.C. *Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans*, Journal of biological rhythms 2003 18(1):71-79.
- Gugliermetti F., Bisegna F. *A model study of light control systems operating with Electrochromic Windows*, Lighting Research and Technologies 37,1 (2005) 3-20.
- Gupta, V., *Solar radiation and urban design for hot climates*, Environment and Planning B: Planning and Design 11 (1984) 435–454.

- Gupta, V., *Thermal efficiency of building clusters: an index for nonair-conditioned buildings in hot climates*, in: D. Hawkes et al. (Eds.), *Energy and Urban Built Form*, Butterworths, UK, 1987.
- Heerwagen J.H. *Windowscapes: the role of nature in the view from the window*, International Daylighting conference, Proc. II (1986), Long Beach, Ca.
- Heerwagen J.H., Heerwagen D.R. *Lighting and psychological comfort*, *Lighting Design and Application* 16 (4) (1986), 47–51.
- Heshong L. et al. *Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, Research report for Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California, 1999.
- Heshong L. et al. *Skylighting and retail sales: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, Research report for Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California, 1999
- Hollister F.D. *Greater London Council: a report on the problems of windowless environments*, (1968) London Hobbs.
- Holm W., Roessler G. *Sunlight in dwellings*, In Proceedings of the CIE study group A symposium (1972), Varna – Bulgaria.
- Hopkinson R.G. *The psychophysics of sunlighting*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 13-20.
- Huang, Y., Broderick, J., *A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire US building stock*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-46303; 2000.
- Huges C. *An examination of the beneficial action of natural light on the psychobiological system of man*, In Proceedings of CIE 20th session, D603/1-4.
- Inui M., Miyata T. *Spaciousness in interiors*, *Lighting Research and technologies*, (5) (1973), 103-111.
- Jaccard, M., Baille, A., *CO2 emission reduction costs in the residential sector: behavioral parameters in a bottom-up simulation model*, *Energy Journal* 1996;17(4):107-35.
- Jones, P.J., Lannon, S., Williams, J., *Modelling building energy use at urban scale*, IBPSA, seventh international conference, Rio de Janeiro, Brazil;2001:175-80. Figure 6 reprinted with permission from the author.
- Kadian, R., Dahiya R.P., Garg, H.P., *Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi*, *Energy Policy* 2007;35 (12):6195-211.
- Kay J.D. *Daylighting for schools*, *Light and Lighting* (1963) 56: 252-257.
- Keighley E.C. *Visual requirements and reduced fenestration in offices – A study of window shapes*, *J. Building Sci.*, 8 (1973), 311-320.
- Keighley E.C. *Visual requirements and reduced fenestration in offices – A study of multiple apertures and window area*, *J. Building Sci.*, 8 (1973), 321-331.
- Knebel, D.E., *Simplified energy analysis using the modified bin method*, Atlanta: ASHRAE; 1983.
- Kohler, N., Schwaiger, B., Barth, B., Koch, M., *Mass flow, energy flow and costs of the German building stock*, CIB, 2nd international conference on buildings and the environment, Paris, France; 1997.
- Kurian C.P. et al. *Robust control and optimisation of Energy consumption in daylight-artificial light integrated schemes*, *Lighting Research and Technologies* 40 (2008) 7-24.
- Lamberts, R., Lomardo, L.L.B., Aguiar, J.C., Thomé, M.R.V. *Eficiência Energética em Edificações: Estado da Arte*. Procel/ELETROBRÁS,1996.
- Langdon F.J., Loudon A.G. *Discomfort in schools from overheating in summer*, *Journal of the institute of Heating and*

- Ventilating Engineers, (1970) 37:265-274.
- Leather P., Pyrgas M., Beale D., Lawrence C. *Windows in the workplace: Sunlight, view, and occupational stress*, Environment and Behavior 30 (1998) 739–762.
- Lewis M., *Integrated design for sustainable buildings*. ASHRAE Journal, 2004, vol. 46, n° 9, pp. S22-S30.
- MacGregor, W.A., Hamdullahpur, F., Ugursal, V.I., *Space heating using small-scale fluidized beds: a technoeconomic evaluation*, International Journal of Energy Research 1993;17(6):445-66.
- Maldonado, A., *Comparative analyses of the indoor environments in museums of archaeology with and without daylight*. In: Environmentally Friendly Cities, PLEA 98. Atti. Lisboa, Portogallo, giugno 1988.pp 483-486.
- Manning P. *Windows, environment and people*. Interbuild/Arena, (1967), 20-25.
- March, L., Trace, M., *The Land-use Performances of Selected Arrays of Built Forms*, L.U.B.F.S. Working Paper No. 2, 1968.
- Margiotta, F. e Puglisi G. *Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio*, Report RSE/2009/164, Enea, Cresme Ricerche Spa e Ministero dello Sviluppo Economico, Marzo 2009;
- Markus T.A. *The function of windows: a reappraisal*, Building Science, 2 (1967) 97-121.
- Markus T.A. *The significance of sunshine and view for office workers*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 59-93.
- Martin, L., *Architect's approach to architecture*, R.I.B.A. Journal, May 1967.
- Martin, L., March L., (Eds.), *Urban Space and Structures*, Cambridge University Press, UK, 1972.
- Martinelli, N. e Brasili A. (Assoimmobiliare, eFM), *Efficienza Energetica nel Terziario*, in La riqualificazione energetica nel real estate. Recupero ed efficientamento di un edificio esistente, 5 case history di grandi aziende che hanno saputo affrontare e risolvere il problema del risparmio energetico, Il Sole 24, Milano, Febbraio 2010
- Morgan C.J. *Sunlight and its effects on human behaviour and performance*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 21-26.
- Nabil A., Mardaljevic J. *Useful Daylight Illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*, Lighting Research and Technologies 37,1 (2005) 41-59.
- Ne'eman E., Hopkinson R.G. *Critical minimum acceptable window size, a study of window design and a provision of a view*. Lighting Research and Technologies, 2 (1970), 17-27.
- Newsham G.R. et al. *Individual control of electric lighting in a daylight space*, Lighting Research and Technologies 40 (2008) 25-41.
- Nimnicht G.P. *Windows and school design*. Phi Delta Kappa, (1966), 47: 305-307.
- Nishio, K., Asano, H., *A residential end-use demand model for analyzing the energy conservation potential of new energy efficient technologies*, In: Proceedings of energy efficiency in domestic appliances and lighting; 2006.
- Olofsson, T., Andersson, S., Sjögren, J.U., *Building energy parameter investigations based on multivariate analysis*, Energy and Buildings 41(1) (2009) 71–80
- Osterhaus W.K.E. *Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments*, Solar Energy 79(2005) 140-158.
- Palmer, J., Boardman, B., Bottrill, C., Darby, S., Hinnells, M., Killip, G., et al. *Reducing the environmental impact of housing*, University of Oxford: Environmental Change Institute; 2006.
- Pan, Y., Huang, Z., Wu, G., *Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in*

Shanghai, Energy and Buildings (2006), doi: 10.1016/j.engbuild.2006.09.013.

Parekh, A., *Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses*, IBPSA, ninth international conference, Montreal, Canada;2005:921-8.

Pellegrino, A; Blaso, L., Aghemo, C., *Environmental and energy performances of lighting control systems in buildings: results from different case studies*, Lighting Engineering Society of Slovenia (SVN), the 4th Conference BalkanLight 2008 and the 17th International Symposium Lighting Engineering 2008, Ljubljana 7-10 ottobre 2008, pp. 131-140, 2008, ISBN: 978-961-248-127-8

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., *A review on buildings energy consumption information*, Energy and Buildings 40(3)(2008)394-398.

Perkins L.B. *Windows and learning*, Glass, Metal and Glazing. October 1966: 11-14.

Persily, A., Musser, A., Leber, D., *A collection of homes to represent the U.S. housing stock*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7330; 2006.

Petersdorff, C., Boermans, T., Harnisch, J., *Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock*, Environmental Science and Pollution Research 2006;13(5):350-8.

Plant C.G.H. *The light of the day*, Light and Lighting 63 81970), 292-296.

Ratti, C., Raydan, D., Steemers K., *Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate*, Energy and Buildings 35 (2003) 49-59

Reddy, T.A., *Literature review on calibration of building energy simulation programs: uses, problems, procedures, uncertainty and tools*, ASHRAE Transactions 112(1)(2006)226-240.

Reddy, T.A., Maor, I., *Procedures for Reconciling Computer-Calculated Results With Measured Energy Data*, ASHRAE Research Project 1051-RP, United States, 2006.

Robbins C. L. *Daylighting. Design and Analysis*, Van Nostrand Reinhold book 1986.

Rocci, L., *Vocabolario Greco-Italiano*, Società Editrice Dante Alighieri, 1985

Ruys, J., *Windowless offices*, University of Washington, 1970.

Sartori, I., *Modelling energy demand in the Norwegian building stock*, Thesis for the degree philosophiae doctor, NTNU, Trondheim, July 2008

Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, M., Mizuno, M., *Residential end-use energy simulation at city scale*, Building and Environment 2004;39(8):959-67.

Shiple, D., Todesco, G., Adelaar, M., *Modelling a nation of buildings: estimating energy efficiency potential for large building samples*, IBPSA Canada, eSim conference, Montreal, Canada; 2002.

Steemers, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J., Nikolopoulou, M.H., Ratti, C., *City texture and microclimate*, Urban Design Studies 3 (1997) 25-50.

Swan, L., Ugursal V. I., *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1819-1835

Swan, L., Ugursal, V.I., Beausoleil-Morrison I., *Canadian housing stock database for energy simulation*, IBPSA Canada, eSim conference, Quebec City; 2008: 143-50.

Tabet K.A., Sharples S. *Climatic and cultural preferences in window design*, In Proceedings of 2nd european conference on architecture. Paris, France (1989), 82-85.

Toledo, M.; Lamberts, R., *Influência de Características Arquitetônicas no Consumo de Energia Elétrica de Edifícios de*

Escritórios em Florianópolis. In: III Encontro nacional e I Encontro latino-americano de conforto no ambiente construído. Gramado, Lúgio 1995. Atti. pp. 427-432.

Torcellini, P. et al. 2008. *DOE Commercial Building Benchmark Models*, National Renewable Energy Laboratory, Pacific Grove, California, CA, In: 2008 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings - Golden, CO, 17-22 Agosto 2008;

Traverso, G., Vighi, P., *Daylight control system for a new pavillion for modern art exhibition in the Biennale of Venice*. In: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CITIES , PLEA 98. Atti. Lisboa, Portogallo, giugno 1988. pp 441-444.

Tuaycharoen N., Tregenza P.R. *Discomfort glare from interesting images*, Lighting Research and Technologies 37,4 (2005) 329-341.

Van Bommel W.J.M, *Visual, biological and environmental aspects of lighting: recent new findings and their meaning for lighting practice*. Leukos 2005 - 2(1):7-11.

Van Bommel W.J.M., Van den Beld G.J. *Lighting for work: a review of visual and biological effects*, Lighting Research and Technologies 36(4):255-269 (2004).

Van den Beld G.J. *Licht und Gesundheit*, In: Tagung Licht 2002 – Maastricht 22-23.

Veitch J.A. *Lighting quality contributions from biopsychological processes*, Journal of the Illuminating Engineering Society 30 (1) (2001), 3–16.

Veitch J.A. *Principles of healthy lighting: highlights of CIE TC 6-11's forthcoming report*, In: Fifth International LRO lighting research symposium. Orlando (Fl) 1-8 (2004).

Veitch J.A. *Psychological processes influencing lighting quality*, Journal of the Illuminating Engineering Society 30 (1) (2001), 124–140.

Veitch J.A., Gifford R. *Assessing beliefs about lighting effects on health, performance, mood, and social behavior*, Environment and Behavior 28 (4) (1996), 446–470.

Veitch J.A., Hine D.W., Gifford R. *End users' knowledge, beliefs, and preferences for lighting*, Journal of Interior Design 19 (2) (1993), 15–26.

Vischer J.C. *The effects of daylighting on occupant behaviour: new direction for research*, International Daylighting conference, Long Beach, Ca, 1986, 419-429.

Wan, K.S.Y., Yik, F.H.W., *Representative building design and internal load patterns for modelling energy use in the residential buildings in Hong Kong*, Applied Energy 2004;77(1):69-85.

Westphal, F.S., Lamberts, R., *Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis*, Proc. Of the 9th International IBPSA Conference, pp1331-1338, Montreal, Canada, 2005.

Wilson, A., Malin, N., *Establishing Priorities with Green Buildings. European Directory of Sustainable and Energy Efficient Buildings. Components, Services and Materials*. Ed. James and James, London, 1997. pp.39-42.

Winiarski, D.W.; Halverson, M.A., and W. Jiang (2008). *DOE's Commercial Building Benchmarks - Development of Typical Construction Practices for Building Envelope and Mechanical Systems from the 2003 CBECS*. In Proceedings of 2008 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy;

Wong N.H., Istiadji A.D. *Effecto of external shading devices on daylight penetration in residential buildings*, Lighting Research and Technologies 36,4 (2004) 317-333.

Yao, R., Steemers, K., *A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK*, Energy and Buildings 2005;37(6):663-71.

Yik, F.W.H., Wan K.S.Y., Burnett, J., *Assessment of envelope energy performance in HK-BEAM for residential buildings*,

Transactions of the Hong Kong Institution of Engineers 2000;7(2):49-55.

Yoon, J., Lee, E.J., Claridge, D.E., *Calibration Procedure for Energy Performance Simulation of a Commercial Building*, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 125, pp 251-257, 2003.

Yu, Z., Haghghat, F., Fung, B.C.M., Yoshino, H., *A decision tree method for building energy demand modeling*, *Energy and Buildings* 42(10)(2010)1637–1646

Zhu, Y., *Applying computer-based simulation to energy auditing. A case study*, *Energy and Buildings*, Vol 38, pp 421-428, 2006.