

ANALISI DI RISPARMIO ENERGETICO CONSEGUIBILE CON SISTEMI DI BUILDING AUTOMATION

Michele De Carli, Valeria De Giuli, Antonino Di Bella, Alessandro Papparotto

Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Padova

ABSTRACT

La Direttiva Europea 2002/91/CE sulla certificazione energetica negli edifici prevede, oltre al calcolo dei consumi legati a riscaldamento e raffrescamento, anche quello relativo ai consumi di elettricità ai fini dell'illuminazione degli ambienti. Questo studio si propone di analizzare il fabbisogno energetico di un ufficio, con particolare attenzione all'aspetto illuminotecnico. L'analisi energetica, in termini di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, integrata con un'analisi illuminotecnica, risulta più completa e quindi più realistica.

L'energia elettrica spesa per luce artificiale ha una certa rilevanza sul fabbisogno energetico totale degli edifici di tipo non residenziale. La possibilità, quindi, di controllare in modo opportuno la luce diurna, mediante automazione di appropriate schermature solari, porterebbe, da un lato, ad una riduzione del consumo di energia elettrica e, dall'altro, ad una riduzione del carico termico solare estivo, con conseguente risparmio energetico per il raffrescamento.

INTRODUZIONE

Il problema della gestione energetica nell'ambiente costruito viene a tutt'oggi considerato come di esclusivo appannaggio dell'ambito edilizio (caratteristiche di isolamento termico dei sistemi costruttivi costituenti l'involucro edilizio) e termotecnico (integrazione ed ottimizzazione impiantistica), tralasciando spesso questioni ritenute secondarie e che tuttavia possono incidere notevolmente in termini di costi per l'utenza finale.

E' questo il caso dell'illuminazione naturale, il cui effetto dovrebbe essere valutato globalmente, sia per quanto riguarda i carichi termici, sia per le problematiche illuminotecniche e di comfort visivo, soprattutto negli edifici per il terziario e nell'edilizia scolastica.

La trattazione separata di questi aspetti può condurre ad errori di valutazione o, nel migliore dei casi, in uno spreco di risorse. D'altro canto, 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.

La crescente disponibilità tecnico-economica di sistemi integrati di automazione impiantistica e la sempre più vasta diffusione di sistemi domotici e di automazione degli edifici (BMS, Building Management Systems) crea nuovi scenari per lo sviluppo di tecniche di analisi integrate finalizzate al risparmio energetico.

Occorre inoltre sottolineare che sono oggi disponibili codici di calcolo dettagliati anche gratuiti per valutare sia gli aspetti illuminotecnici che energetici di riscaldamento e raffrescamento. In questo lavoro viene presentato un possibile studio integrato riguardante questi aspetti.

LA SIMULAZIONE DINAMICA DEI SISTEMI BMS

Nell'analisi del possibile impatto energetico dei sistemi di controllo e gestione dell'illuminazione in un ambiente ad uso ufficio, le norme di riferimento sono la UNI EN 12464-1, relativa alle problematiche connesse all'illuminazione artificiale di interni e la DIN 18599-4, per quanto concerne il calcolo della richiesta di energia primaria da parte dell'impianto illuminotecnico. Tale normativa dà indicazione di quali debbano essere le metodologie per effettuare il calcolo del consumo di energia primaria prendendo in considerazione tutte le possibili forme di utilizzo di energia all'interno di un edificio. Queste norme permettono di individuare sia le esigenze prestazionali da soddisfare (UNI EN 12464-1) che le potenze specifiche dei corpi illuminanti (DIN 18599-4). In questo lavoro, oltre alle succitate norme, sono stati utilizzati altri due software ai fini delle analisi illuminotecniche: DIALux e DAYSIM [1]. Il software DIALux viene utilizzato per dimensionare e simulare il sistema di illuminazione artificiale e valutare la potenza specifica installata. Il software DAYSIM si basa sulle tecniche di raytracing al fine di calcolare i valori di illuminamento all'interno di un ambiente, sulla base dei profili annuali di radiazione solare di un anno tipo, allo scopo di mantenere un certo grado di illuminazione nei punti di controllo.

Impostato un modello tridimensionale dell'ambiente oggetto d'indagine, definito un file climatico [2] e le coordinate dei punti di interesse (ad esempio il piano delle scrivanie dei posti di lavoro), il programma tiene conto delle caratteristiche dei componenti vetriati, delle schermature e dei materiali di rivestimento dell'ambiente. E' possibile in tal modo determinare l'illuminamento nei diversi punti di interesse e definirne un livello desiderato.

In particolare il software tiene conto, mediante una procedura interna, di un affollamento medio dell'ambiente; i dati relativi all'occupazione nell'arco della giornata lavorativa provengono dai risultati conseguiti da un progetto triennale di ricerca che ha portato a stilare un modello comportamentale di un lavoratore tipo, in edifici ad uso ufficio nel mondo occidentale. Tale modello si chiama Lightswitch [3] e su di esso si basa una più semplice interfaccia denominata Lightswitch Wizard [4]. Oltre a ipotizzare la presenza dei lavoratori, il modello prevede come il lavoratore usufruisca dell'illuminazione artificiale e di un'eventuale schermatura solare, a seconda delle proprie esigenze. A tale proposito, il programma DAYSIM permette di valutare tre diverse modalità di controllo dei parametri di illuminamento dell'ambiente:

- utenza passiva, in cui la luce rimane accesa durante tutta la giornata lavorativa e la veneziana è parzialmente abbassata nel corso dell'anno per contrastare l'ingresso della componente di luce diretta e con accensione e spegnimento della luce manuale (come pure manuale è il controllo della schermatura);
- utenza manuale attiva, in cui gli occupanti accendono la luce a seconda della necessità ed abbassano manualmente la veneziana gradualmente durante il giorno, per ostacolare i raggi diretti;

- utenza automatizzata, in cui si prevede il controllo automatico della schermatura e dell'accensione o spegnimento della luce, mediante fotocellule.

Il programma DAYSIM porge come risultato i valori di illuminamento nei punti oggetto di indagine, il grado di schermatura delle veneziane esterne e il carico interno dovuto all'illuminazione. Questi parametri servono come dati di ingresso per la simulazione dinamica termica. In questo studio è stato utilizzato il codice TRNSYS [5] per la simulazione termica dell'anno tipo.

IL CASO DI STUDIO

E' stato considerato un modulo di un edificio per il terziario di dimensioni 6x5x3 m, confinante con altri uffici aventi le stesse caratteristiche (Figg. 1a e 1b). Le postazioni di lavoro sono quattro e l'unica facciata rivolta all'esterno è caratterizzata da una superficie vetrata di circa 5.6 m², costituita da sei finestre, con vetrata doppia basso emissiva, di trasmissione luminosa del 72% e di fattore solare g pari a 0.6. E' stata presa in considerazione la località di Venezia e tutti i possibili orientamenti della facciata esterna: Nord, Sud, Est ed Ovest.

E' stata ipotizzata una veneziana esterna come schermatura solare, costituita da lamelle di 13 cm, disposte ad un interasse di 10 cm, di materiale opaco, con riflessione visiva pari a 56%. La posizione abbassata della veneziana si riferisce ad un'inclinazione di 45° delle lamelle per ogni orientamento.

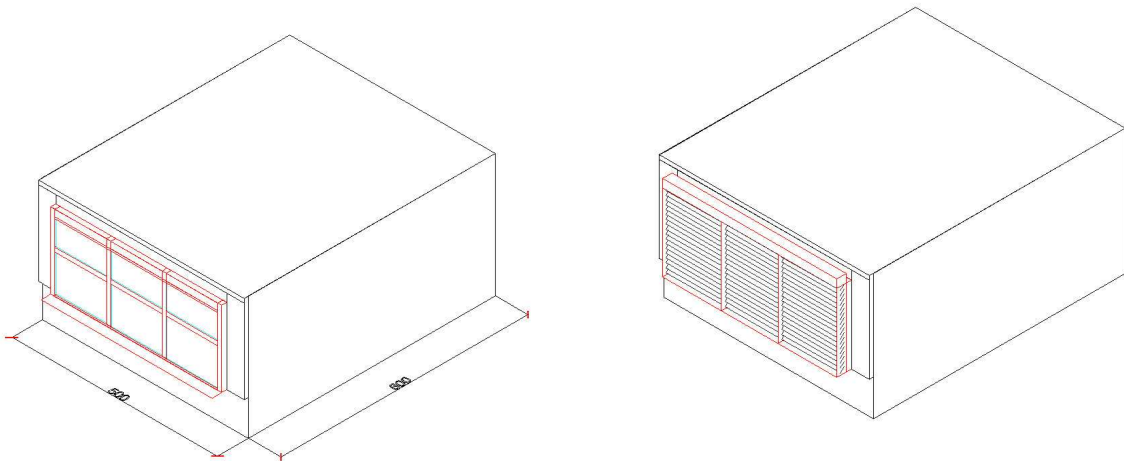


Fig. 1a - Ufficio privo di schermatura solare *Fig. 1b - Ufficio con schermatura solare*

I punti di controllo si trovano in corrispondenza alle scrivanie a 0.85 m di altezza (Fig. 2). E' stata considerata una giornata lavorativa che va dalle otto del mattino alle cinque del pomeriggio, con una pausa di 15 minuti al mattino, una di un'ora per il pranzo e un'ultima

di 15 minuti nell'arco del pomeriggio. L'ufficio è occupato dal lunedì al venerdì, per un totale di circa 1806 ore l'anno per persona.

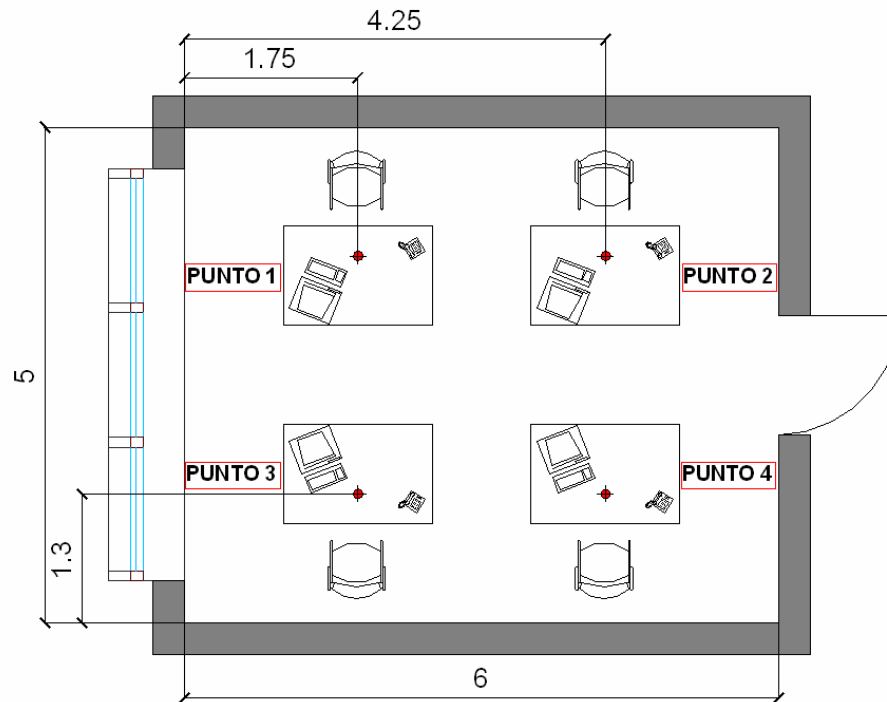


Fig. 2 - Layout dell'edificio e punti di controllo

Il dimensionamento dell'impianto di illuminazione artificiale

Lo studio dell'illuminazione artificiale di un ambiente viene svolto, solitamente, tramite l'ausilio di software specifici che consentono di effettuare simulazioni di spazi con geometrie complesse e di poter scegliere tra differenti tipologie commerciali di apparecchi illuminanti. Un'alternativa, nella misura in cui si debba calcolare solamente l'impegno di potenza specifico richiesto dall'impianto di illuminazione, è fornita dall'utilizzo di due procedimenti di calcolo semplificati proposti dalla normativa Tedesca DIN 18599-4. Secondo tale normativa, infatti, oltre al calcolo dettagliato effettuabile con i detti software specifici, sono ammesse altre due metodologie semplificate. Le metodologie complessivamente ammesse dalla normativa DIN 18599-4 sono pertanto (Tab. 1):

- Metodo tabellare ("tabular method");
- Metodo semplificato del fattore di utilizzo ("simplified utilization method");
- Dimensionamento dettagliato ("detailed engineering planning").

In particolare, nei primi due metodi va evidenziata l'impossibilità di prendere in considerazione eventuali lampade da tavolo.

Tab. 1 - Confronto tra le varie metodologie di calcolo della potenza specifica impegnata

	Metodologia di calcolo	Informazioni richieste	Durata calcolo/Precisione
1	METODO TABELLARE	destinazione d'uso geometria degli spazi tipologia di illuminazione tipo di lampada	++ bassa richiesta di tempo -- media accuratezza dei risultati
2	METODO SEMPLIFICATO DEL FATTORE DI UTILIZZO	destinazione d'uso geometria degli spazi tipologia di illuminazione tipo di lampada tipo di apparecchio illuminante	- richiesta di tempo modesta + media accuratezza dei risultati
3	DIMENSIONAMENTO DETTAGLIATO	destinazione d'uso geometria degli spazi tipologia di illuminazione tipo di lampada tipo di apparecchio illuminante gradi di riflessione delle superfici modello architettonico dettagliato specifiche dettagliate del sistema illuminotecnico scelto	-- elevata richiesta di tempo ++ elevata accuratezza dei risultati

Secondo le indicazioni della norma UNI EN 12646-1, essendo il locale oggetto di questo studio adibito ad uso ufficio, va garantito un illuminamento medio mantenuto, sulle zone di compito, pari a 500 lux. Le esigenze di prestazione visiva possono essere soddisfatte tramite diverse tipologie di illuminazione; tale scelta comporterà, a fronte di diversi risultati illuminotecnici in termini di "visual comfort", impegni differenti di potenza elettrica installata. Nell'ottica di minimizzare l'impegno di potenza elettrica installata, e quindi di ridurre i consumi, si è optato per un sistema a illuminazione diretta dotato di sorgenti luminose a lampade fluorescenti a scarica con alimentazione a reattore elettronico. I tre metodi di calcolo porgono i risultati riportati in Tabella 2. Si noti come il calcolo dettagliato comporti una riduzione del 15% della potenza specifica installata.

Tab. 2 - Risultati di potenza specifica installata, ottenuti con i tre metodi di calcolo esposti

metodo	potenza specifica installata [W/m²]
tabellare	14.5
semplificato del F.U.	14.1
dettagliato	12

Si riporta inoltre in Figura 3, a titolo esemplificativo, il risultato conseguito col metodo dettagliato.

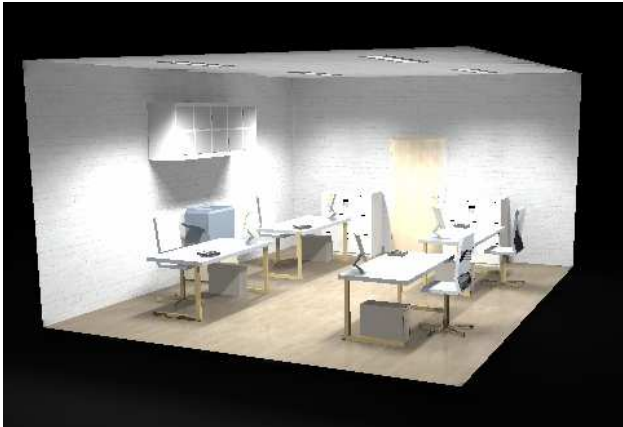


Fig. 3 - Immagine dell' ufficio considerato, ottenuta col metodo dettagliato

Condizioni al contorno per le simulazioni annuali

In accordo con lo studio del sistema di illuminazione artificiale si ottiene un impegno di potenza specifica da installare di 12 W/m². I materiali costituenti l'involucro della stanza e le relative caratteristiche sono illustrati nelle tabelle 3 e 4.

Tab. 3 - Caratteristiche dei componenti opachi

componenti opache	superficie	materiale	spessore	capacità termica	conduttività termica	spessore totale	trasmittanza termica	riflessione visiva
	[m ²]							
muro esterno	15	calcestruzzo	0.2	2016	1.2	0.32	0.276	0.6
		polistirene	0.1	25	0.03			
		intonaco	0.02	2016	1.4			
muro interno	18	intonaco	0.012	2016	1.4	0.124	0.457	0.6
		lana di roccia	0.1	72	0.05			
		intonaco	0.012	2016	1.4			
pavimento	30	calcestruzzo	0.07	2016	1.2	0.46	0.612	0.3
		lana di roccia	0.03	72	0.05			
		forato	0.35	907	0.44			
		intonaco	0.01	2016	1.2			
copertura	30	intonaco	0.01	2016	1.2	0.46	0.612	0.8
		forato	0.35	907	0.44			
		lana di roccia	0.03	72	0.05			
		calcestruzzo	0.07	2016	1.2			

Tab. 4 - Caratteristiche dei componenti vetrati

componente trasparente	superficie	area cornice/ finestra	fattore solare	trasmissione termica	trasmissione visiva
	[m ²]	[-]	g	U [W/(m ² K)]	T _{vis}
vetro doppio	5.6	0.18	0.6	1.5	0.72

Nel calcolo del fabbisogno energetico dell'ufficio in questione si suppone un impianto convettivo con aria primaria; per quanto riguarda le condizioni al contorno, sono state effettuate le seguenti ipotesi:

- set-point in riscaldamento: temperatura dell'aria di 21°C dalle 7:00 alle 18:00;
- set-point in regime di raffrescamento: temperatura dell'aria di 25°C dalle 7:00 alle 18:00 ;
- ventilazione: aria di mandata alla temperatura di 22°C, 1.8 ricambi orari (dalle 7:00 alle 18:00);
- carichi interni: 4 persone e 4 PC .

RISULTATI

I risultati forniti da DAYSIM sono:

- il valore medio annuale del fattore di luce diurna per ciascuno dei punti indicati nel file sensorpoint ;
- il valore dell'autonomia di illuminazione nei punti citati, che indica, in percentuale, per quante ore all'anno si riesce ad ottenere il livello minimo di illuminamento richiesto, sfruttando esclusivamente l'illuminazione naturale;
- il fabbisogno annuale di energia elettrica per l'illuminazione artificiale;
- il valore, espresso in lux per ora, del totale della luce che colpisce annualmente i punti di interesse;
- i valori dell'illuminamento nei punti oggetto di indagine ogni cinque minuti, sia nel caso di schermatura solare alzata che abbassata;
- il consumo di energia elettrica per l'illuminazione artificiale.

Daylight factor

Il fattore di luce diurna (FLD) , denominato anche Daylight Factor (D), è quel parametro che permette di valutare il corretto utilizzo della luce naturale all'interno degli ambienti, al fine di garantire un'illuminazione diurna ottimale. DAYSIM calcola il valore medio annuo di tale fattore, pertanto ne dà solo un'indicazione approssimativa; inoltre il fattore di luce diurna non cambia al variare dell'orientamento (Fig. 4).

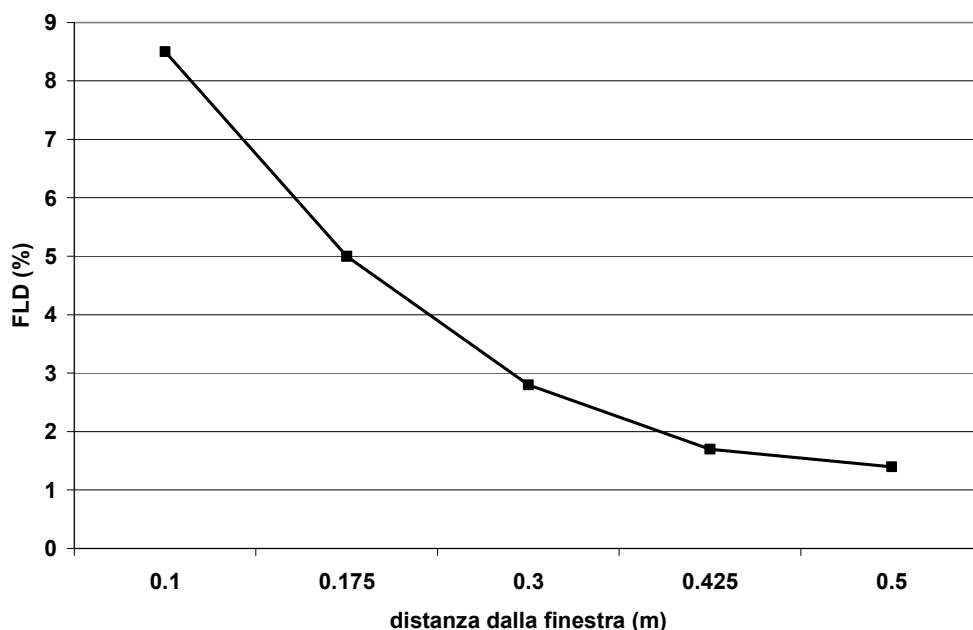


Fig. 4 - Andamento del fattore di luce diurna nei punti in cui sono stati posizionati i sensori, sull'asse della finestra

Come si può notare, il fattore di luce diurna subisce un brusco abbassamento nei primi 3 m dalla finestra, per poi scendere più dolcemente man mano che si arriva al lato opposto della stanza. Per valori di FLD superiori o pari al 5%, si può evitare di accendere la luce, mentre per valori di FLD non inferiori al 2%, la luce artificiale è richiesta in base alle necessità. Nel caso esaminato, si hanno valori di FLD inferiori al 2% solo a partire da una distanza di 4 m dalla finestra.

Consumo elettrico

In base al valore di illuminamento desiderato il codice di calcolo valuta il totale delle ore in cui si ricorre all'illuminazione artificiale e il relativo consumo di energia elettrica. Tali valori variano a seconda della tipologia di utente ipotizzato e in funzione di un eventuale ricorso a sistemi automatizzati di controllo. In Tabella 5 si riportano i suddetti risultati, distinti nei quattro orientamenti.

Come si può notare, il consumo di energia elettrica è identico e indipendente dall'orientamento nel caso di utente passivo e di controllo manuale.

Nel caso di utente attivo con controllo automatico, il consumo è pressoché identico per i quattro orientamenti, a parte a sud, dove esso risulta ridotto per circa un 25%. Inoltre, l'utilizzo di sistemi automatici di controllo, sia per la luce che per la schermatura, permette una riduzione dei consumi di oltre un terzo rispetto al caso in cui il controllo sia manuale.

Tab. 5 - Durata annua totale di accensione della luce e consumo annuo di energia elettrica per l'illuminazione nei casi esaminati

		luce accesa [h]	consumo elettrico per illuminamento [kWh/(m ² annuo)]
NORD	passivo-manuale	2389	28.7
	attivo-manuale	874	10.5
	attivo-automatico	707	8.5
SUD	passivo-manuale	2389	28.7
	attivo-manuale	990	11.9
	attivo-automatico	632	7.6
EST	passivo-manuale	2389	28.7
	attivo-manuale	1290	15.5
	attivo-automatico	699	8.4
OVEST	passivo-manuale	2389	28.7
	attivo-manuale	874	10.5
	attivo-automatico	707	8.5

Illuminanti

Il software DAYSIM fornisce i valori di illuminamento nei punti di controllo (a scelta ora per ora oppure ogni 5 minuti, in ogni giorno e mese dell'anno). Se, come nei casi studiati, si sceglie una simulazione avanzata e quindi si definisce, in termini geometrici e di materiali, una particolare schermatura solare, il programma calcola due set di valori di illuminamento, uno nel caso di schermatura alzata e l'altro nel caso in cui essa sia abbassata. A titolo di esempio, nelle Figure 5 e 6 si riportano i valori medi di illuminamento sui piani di lavoro, rispettivamente nei punti 1 e 2, nei mesi di luglio e dicembre per i quattro orientamenti.

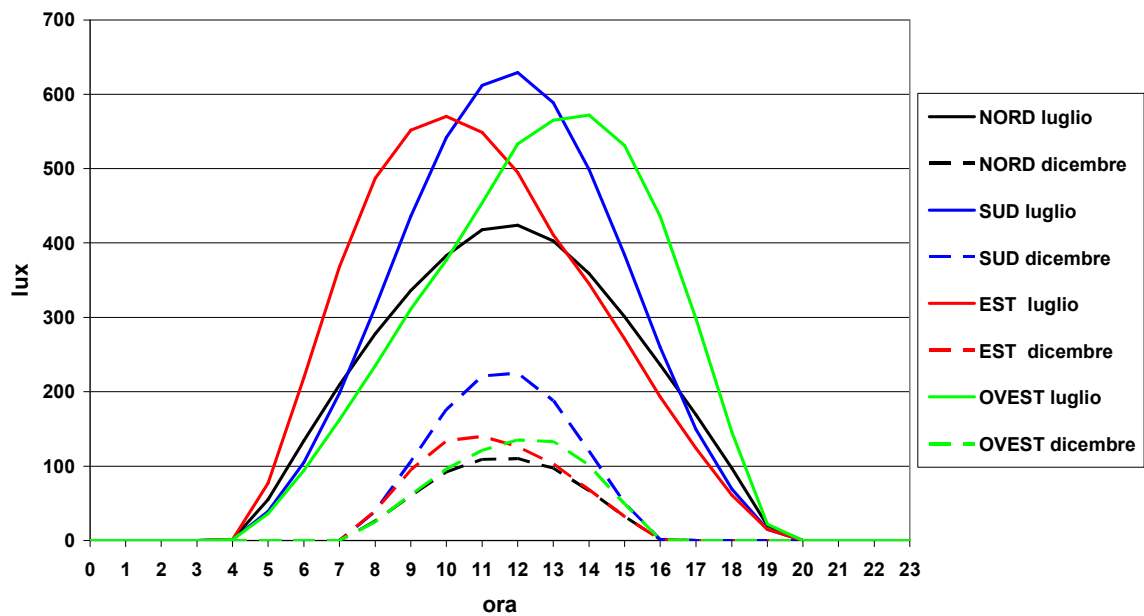


Fig. 5 - Illuminamenti medi, calcolati nel punto 1, nei mesi di luglio e dicembre, per i quattro orientamenti esaminati

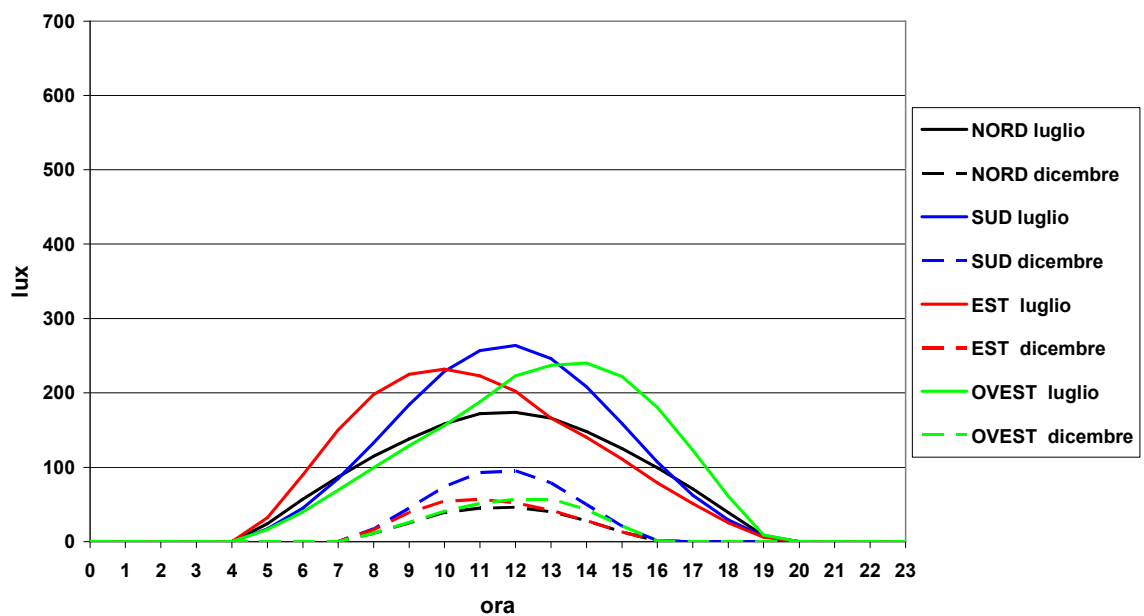


Fig. 6 - Illuminamenti medi, calcolati nel punto 2, nei mesi di luglio e dicembre, per i quattro orientamenti esaminati

Consumi energetici

I carichi interni dovuti all'illuminazione, il grado di abbassamento della veneziana e la presenza delle persone sono stati utilizzati come ingresso per il codice di calcolo energetico TRNSYS.

I risultati ottenuti dalla simulazione termica sono il fabbisogno energetico dell'ufficio, in termini di riscaldamento, raffrescamento (entrambi comprensivi di ventilazione) e illuminazione. Si è inoltre considerato separatamente il consumo annuo specifico di energia elettrica (kWh/m^2 annuo) dei quattro computer presenti nella stanza (Fig. 7). Come si può notare dal grafico, il consumo più rilevante è costituito dai computer. Il fabbisogno energetico per l'illuminazione è costante nei quattro orientamenti, nel caso di utente passivo. Nel caso di utente attivo si ha una riduzione dei consumi compresa tra il 46 e il 63%; inoltre, se si utilizza un sistema automatico di controllo di luce artificiale e schermatura, si ha un'ulteriore riduzione che va dal 19 al 46% a seconda dell'orientamento.

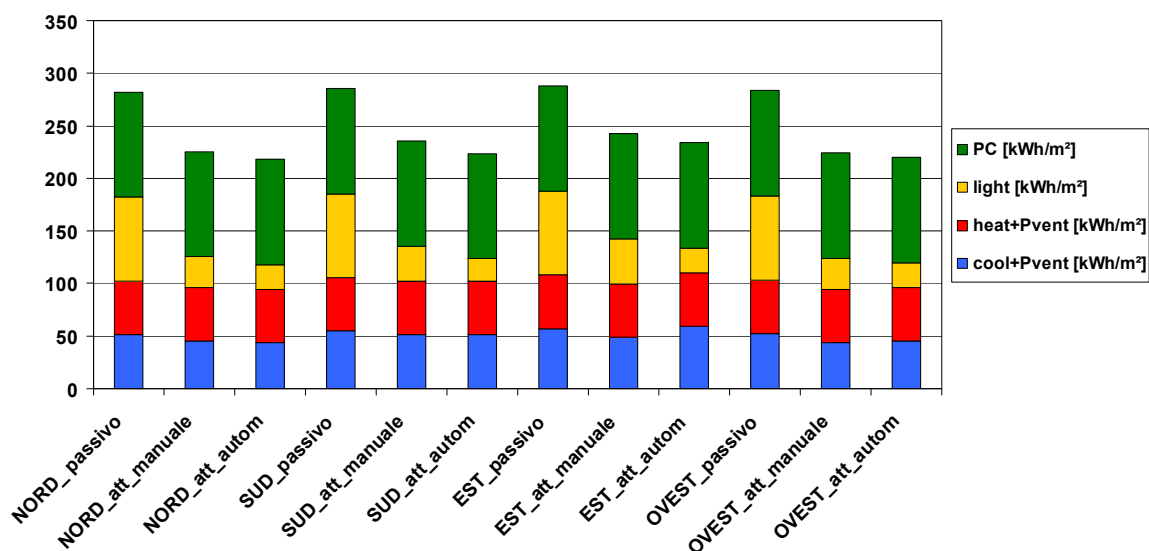


Fig. 7- Fabbisogni specifici di energia primaria annui [kWh/m^2] nei diversi casi analizzati

Parallelamente all'aspetto energetico, è stata calcolata l'emissione di CO_2 per il riscaldamento, il raffrescamento, l'illuminazione e i computer (Fig. 8). A tal fine si è ipotizzata la produzione di calore con caldaie a condensazione e di freddo mediante chiller a compressione, condensati ad aria. Si noti come, nel caso di utente passivo, l'emissione di CO_2 dovuta all'illuminazione rappresenti un contributo più rilevante, rispetto ai casi di utenza attiva, con o senza automazione.

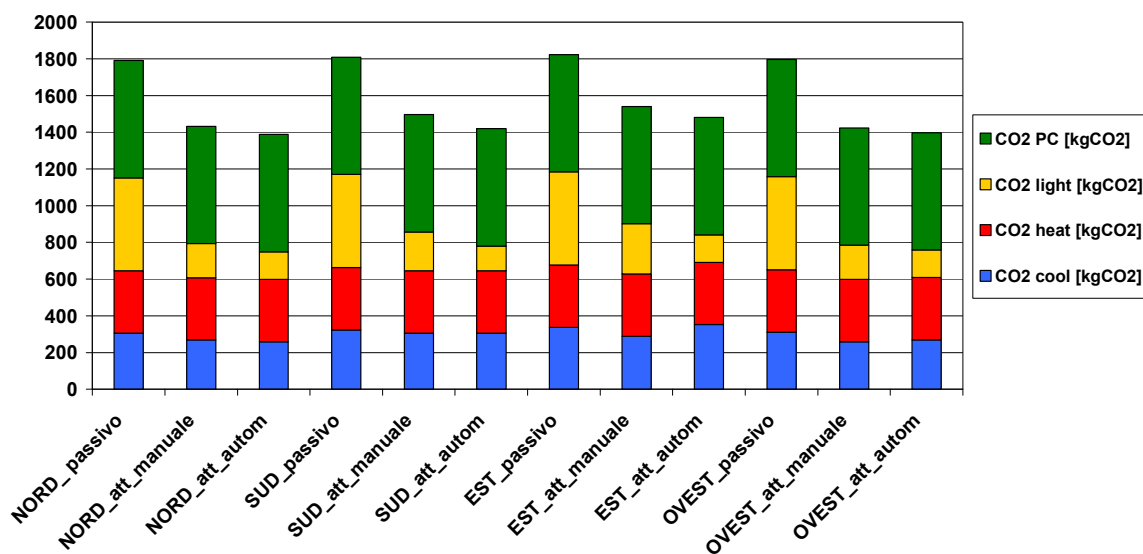


Fig. 8 - Istogramma relativo alle emissioni di CO₂

CONCLUSIONI

I risultati forniti dai codici di calcolo dettagliati permettono di ottenere un'analisi energetica accurata. Inoltre, la differenziazione delle simulazioni, in base alla tipologia di utente e ad una possibile automatizzazione del controllo della luce artificiale e della schermatura solare, ha portato ad un significativo risparmio energetico e ad una riduzione dell'emissione di CO₂.

Per quanto concerne il fabbisogno energetico dell'ufficio esaminato, si è riscontrato che, in assenza di meccanismi di automazione, nel caso di utente passivo il consumo di energia primaria per illuminazione artificiale rappresenta il 28% del fabbisogno complessivo, mentre nel caso di utente attivo tale valore è compreso tra 13 e 17%. Se si prevede un'automazione, ipotizzando comunque un'utenza attiva, il consumo scende ulteriormente (compreso tra 9.4 e 10.7%) rispetto al fabbisogno energetico totale.

Analizzando l'emissione totale di CO₂, l'illuminazione rappresenta il 28% nel caso di utente passivo, il 13-18% nel caso di utente attivo e il 9-11% nel caso dell'automazione. Un controllo automatizzato di luce e schermatura consente di ridurre del 70% l'emissione di CO₂, dovuta alla sola illuminazione.

Pertanto, si può ritenere che l'automazione sia un requisito importante nella progettazione di un edificio e se ne debba tener conto in una corretta progettazione, nell'ottica della riduzione dei consumi energetici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Reinhart , Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design, IRC Institute for Research in Construction – National Research Council, Canada, 2005
- [2] EnergyPlus, Energy Simulation Software, U.S. Departement of Energy
- [3] F. Dubrous, C. Reinhart, Lightswitch 2002- A Model for Electric Lighting and Blind Usage in Single Offices, 2003
- [3] C. Reinhart, Lightswitch 2002: A model for manual control of electric lighting and blinds, *Solar Energy* 77, pp. 15-28, 2004.
- [4] F. Dubrous, M. Morrison, C. Reinhart, The Lightswitch Wizard- Reliable daylight simulations for initial design investigation, *Proceedings of the Buildings Simulation 2003*, Eindhoven, The Netherlands, vol. III, pp. 1093-1100, August 11-14, 2003.
- [5] TRNSYS Version 15, Solar Energy Laboratory – University of Wisconsin, Madison USA