

# Codice di calcolo KANDAELA

## Analisi e valutazione degli effetti della luce naturale ed artificiale in ambienti interni

C. Priolo, M. Alabiso, F. Groppi

### Introduzione

Il codice di calcolo KANDAELA è stato sviluppato dalla Conphoebus nell'ambito delle attività di ricerca dell'ENEL/DSR/CRAM al fine di permettere l'analisi e la valutazione dei livelli d'illuminamento interno dovuti sia alla luce naturale che a quella artificiale.

Tale codice è essenzialmente rivolto ai progettisti e a quanti necessitano di una valutazione quantitativa dei livelli di illuminazione di un ambiente interno. KANDAELA, infatti, è un utile strumento di calcolo sia durante la fase di progettazione architettonica degli ambienti sia nel corso della progettazione degli impianti di illuminazione e della pianificazione delle relative strategie di controllo.

Mediante questo programma di simulazione diventa possibile definire la distribuzione delle finestre e dei punti luce di un ambiente, sulla base di considerazioni non solo estetiche ma anche funzionali.

Il programma può essere inoltre utilizzato per l'ottimizzazione dei sistemi di controllo solare (schermi mobili, oggetti alette) e per la determinazione dell'effetto schermante dei dispositivi di ombreggiamento per ogni giorno all'anno.

Il software è disponibile sia su personal computer (in ambiente Windows) che su sistemi Macintosh e, presentando un'interfaccia che sfrutta pienamente le caratteristiche grafi-

Viene pubblicato il terzo di 3 articoli dedicati ai modelli di simulazione utilizzati dall'ENEL nel campo del risparmio energetico negli edifici.

Il primo articolo sul codice EDILEGO è stato pubblicato su HTE n. 89, mentre il secondo articolo sul codice ESP è stato pubblicato su HTE n. 92.

che di questi sistemi, è completamente interattivo e sicuramente *user-friendly* anche per gli utenti non particolarmente esperti nell'uso dei mezzi di calcolo automatico.

### Modello

KANDAELA permette di valutare i principali parametri illuminotecnici: *illuminamenti*<sup>(1)</sup> e *luminanze*<sup>(2)</sup>. Questi parametri sono fondamentali per determinare le condizioni di luce per gli ambienti studiati.

L'ambiente da simulare può avere pianta di forma generica (Fig. 1). Dopo aver dimensionato i muri esterni dandone l'altezza e la quota da terra (Fig. 2), è possibile, all'interno dell'ambiente, posizionare delle superfici verticali opache di forma rettangolare (per simulare tramezzi, pannelli espositivi ecc.).

Ogni superficie si suppone abbia comportamento *perfettamente diffondente*<sup>(3)</sup> e viene caratterizzata dal coefficiente di rinvio e dal colore.

Le sorgenti di luce artificiale possono essere sia di tipo pun-

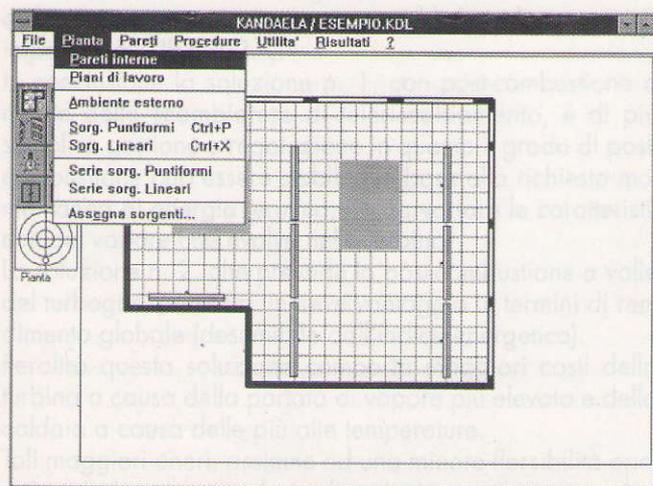


Figura 1 - Pianta dell'ambiente da simulare

(1) L'*illuminamento* [lux] è il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una sorgente e la superficie che lo riceve.

(2) La *luminanza* [cd/m<sup>2</sup>] di una sorgente è il rapporto tra l'intensità luminosa della sorgente in una data direzione e l'area apparente della sorgente vista dalla direzione stessa.

(3) Una superficie viene detta *perfettamente diffondente* quando la luce viene diffusa uniformemente in tutte le direzioni (cioè la luce riflessa non ha 'memoria' della direzione del raggio incidente).

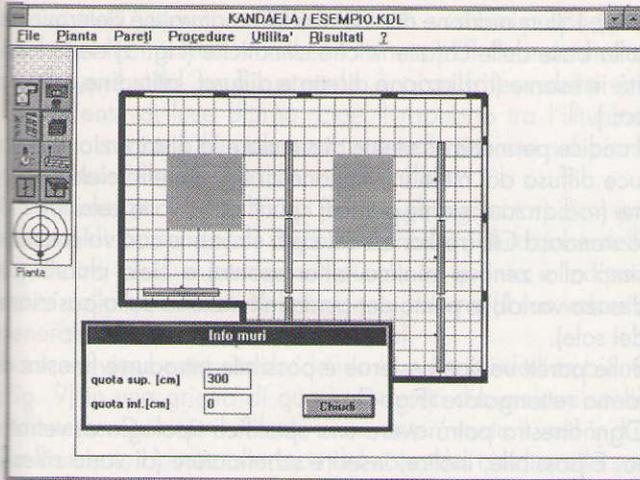


Figura 2 - Caratteristiche muri

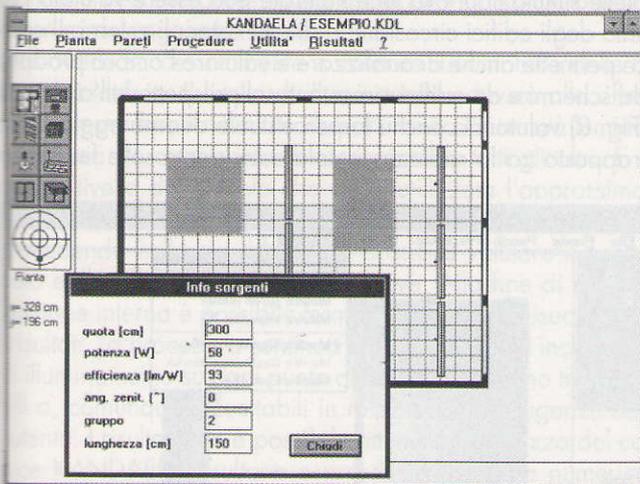


Figura 3 - Caratteristiche sorgenti di luce artificiale

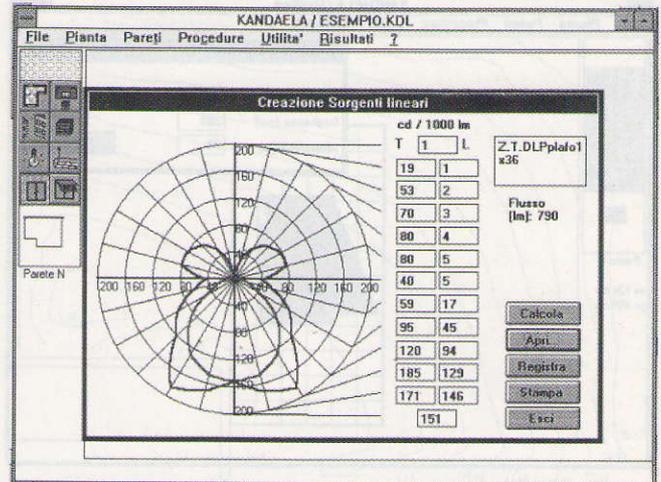


Figura 4 - Creazione sorgenti lineari

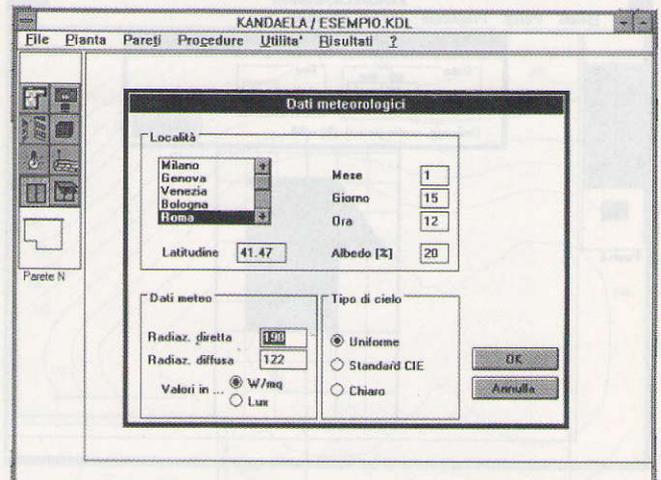


Figura 5 - Caratteristiche climatiche

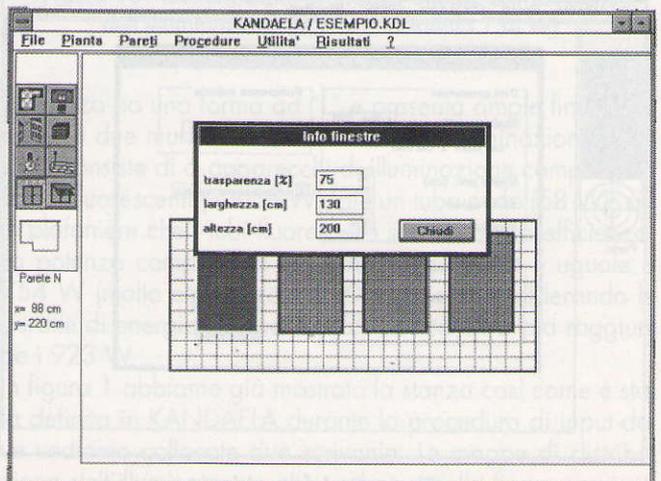


Figura 6 - Caratteristiche finestre

uniforme che lineare e ogni sorgente viene caratterizzata (Fig. 3) per posizione, inclinazione, potenza, efficienza luminosa<sup>(4)</sup>.

Mentre le sorgenti puntiformi hanno una dimensione piccola, le sorgenti lineari sono caratterizzate dall'aver, oltre ad una dimensione elevata, un'emissione luminosa ellittica (per es. i tubi fluorescenti). Ad ogni sorgente viene associato un apparecchio luminoso (la cosiddetta plafoniera) che riflette la luce in modo differente nelle varie direzioni, in funzione della sua geometria e dei materiali di cui è costituito.

KANDAELA è dotato di una libreria di sorgenti luminose (sia puntiformi che lineari) che può essere modificata ed ampliata a piacere dall'utente. Per immettere nella libreria un generico apparecchio luminoso è sufficiente assegnare, nella relativa sessione del programma, la curva fotometrica<sup>(5)</sup> associata (Fig. 4). Le caratteristiche fotometriche degli apparecchi luminosi sono generalmente riportate nei cataloghi re-

<sup>(4)</sup> L'efficienza luminosa [lumen/W] è il rapporto tra il flusso luminoso e la potenza.

<sup>(5)</sup> La curva fotometrica è il luogo dei punti aventi distanza dal centro della sorgente proporzionale all'intensità luminosa emessa nella direzione relativa. Essa permette di descrivere in modo completo il comportamento dell'apparecchio luminoso.

## Codice di calcolo KANDAELA

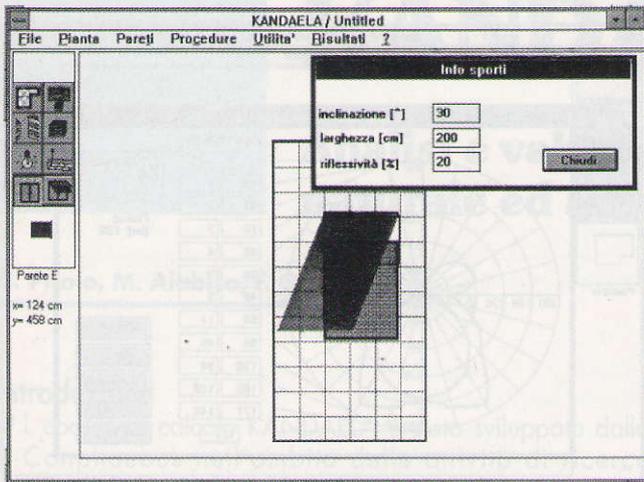


Figura 7 - Caratteristiche schermature esterne

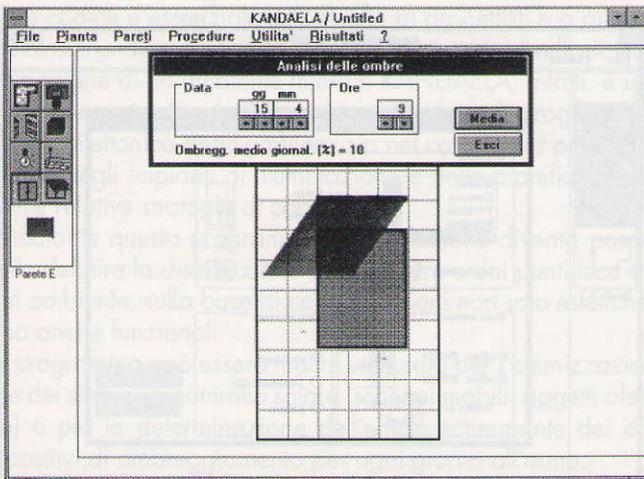


Figura 8 - Analisi delle ombre esterne

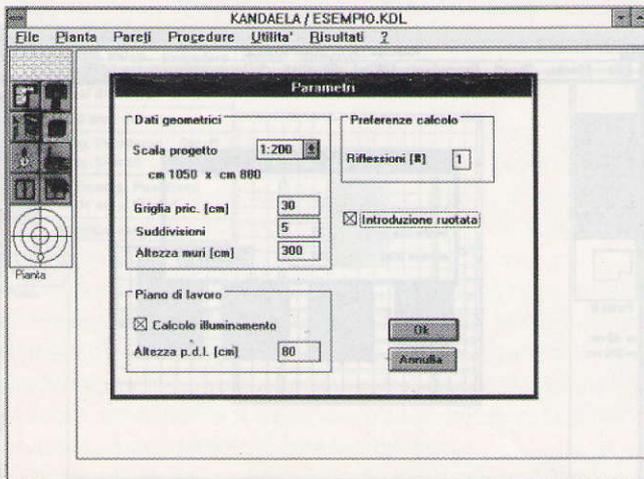


Figura 9 - Informazioni sulla fase di calcolo

lativi. L'illuminazione dovuta alla luce naturale è determinata sulla base delle caratteristiche climatiche (Fig. 5) della località in esame (radiazione diretta e diffusa, latitudine, albedo ecc.).

Il codice permette all'utente di simulare la distribuzione della luce diffusa dal cielo in funzione di tre modelli: cielo uniforme (radianza costante per tutti i punti della volta celeste), cielo standard CIE (radianza del cielo variabile con valore massimo allo zenit e minimo all'orizzonte) e cielo chiaro (radianza variabile punto per punto in funzione della posizione del sole).

Sulle pareti verticali esterne è possibile introdurre finestre di forma rettangolare (Fig. 6).

Ogni finestra potrà avere una specifica tipologia di vetratura. È possibile, inoltre, inserire schermature (di varia riflessività) sulle pareti esterne, aventi forma rettangolare e inclinate a piacere (Fig. 7).

Nelle simulazioni alla luce naturale può essere valutato l'effetto degli edifici circostanti o di altri ostacoli esterni. Il codice permette anche di analizzare e valutare l'ombra prodotta da schermi e da edifici circostanti sui prospetti dell'ambiente (Fig. 8) valutando anche la percentuale di ombreggiamento (rapporto tra la radiazione solare incidente sulle finestre in

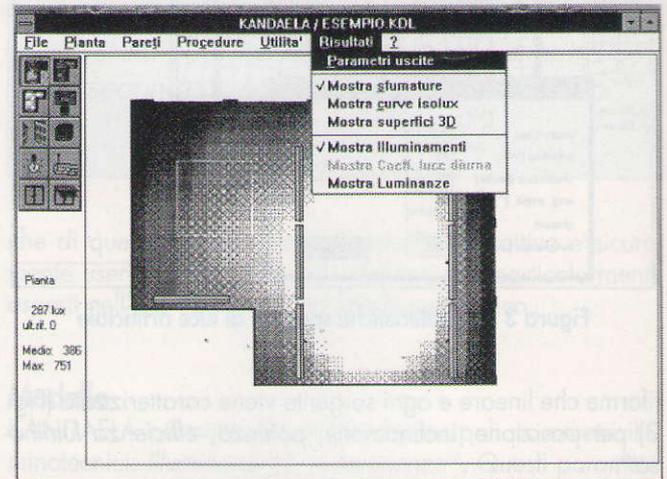


Figura 10 - Esempio di visualizzazione dei risultati in pianta mediante sfumature a retini

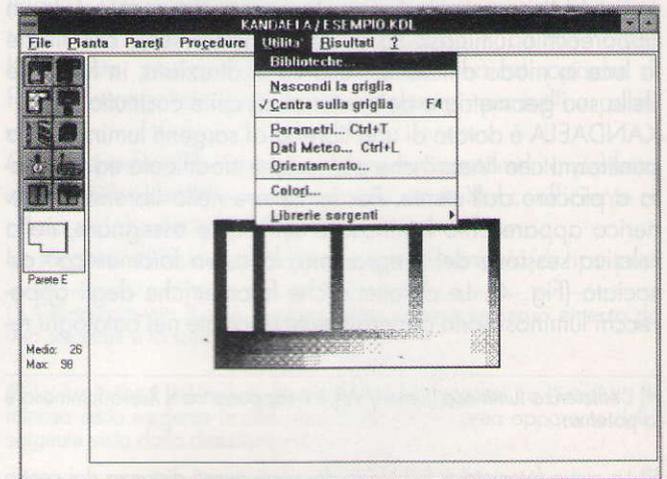


Figura 11 - Esempio di visualizzazione dei risultati sulla parete est mediante sfumature a retini

presenza di schermi, edifici circostanti e ombre proprie portate e quella misurata in assenza di essi). Effettuando una simulazione alla luce naturale è possibile valutare il Coefficiente di luce diurna, cioè il rapporto tra l'illuminamento interno e l'illuminamento esterno misurato sul piano orizzontale in assenza di luce solare diretta.

Il Coefficiente di luce diurna (o daylighting factor) è un parametro di fondamentale importanza nella valutazione delle condizioni di illuminamento naturale in quanto è indipendente dalla quantità di illuminamento esterno (il suo valore è generalmente indicato in percentuale).

Il calcolo viene eseguito dividendo le superfici dell'ambiente (Fig. 9) in una griglia di quadrati aventi dimensione scelta dall'utente. Durante il calcolo viene determinato il valore d'illuminamento dovuto alla luce del sole, del cielo e alle sorgenti di luce artificiale per un punto di riferimento situato al centro di ogni quadrato. Tale valore dipende dalla intensità luminosa della sorgente, dalla distanza e dall'angolo di incidenza del raggio luminoso.

Si procede successivamente a valutare il contributo delle riflessioni interne. Il livello di illuminamento dovuto alle riflessioni interne viene ricercato determinando l'intensità luminosa riflessa da ogni punto di riferimento su tutti gli altri. È a questo livello del calcolo che viene utilizzata l'approssimazione delle superfici a perfettamente diffondenti.

Procedendo nella simulazione è possibile valutare il contributo delle riflessioni interne successive. Alla fine di ogni riflessione interna è possibile fermare il calcolo e visualizzare i risultati. La procedura continua fino a quando gli incrementi di illuminamento su ogni punto ambiente diventano trascurabili o, comunque, accettabili in relazione alle esigenze dell'utente. I risultati che è possibile ottenere per mezzo del codice KANDAELA risultano espressi sia in forma numerica che grafica: è possibile infatti visualizzare punto per punto i valori di illuminamento e luminanza per tutte le superfici dell'ambiente (pavimento, soffitto, pareti laterali, pareti interne) e per un piano orizzontale (detto "piano di lavoro") a quota scelta dall'utente. Il piano di lavoro si considera perfettamente trasparente e quindi non incide sull'illuminamento delle altre superfici.

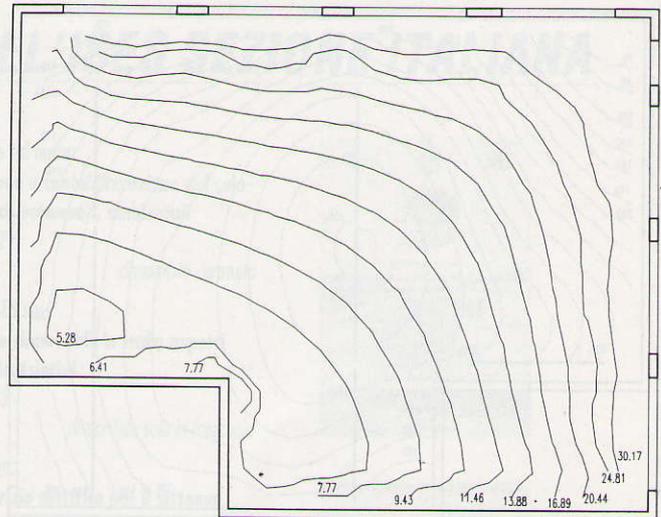
Nel caso si sia effettuata una simulazione alla luce naturale in assenza di sole è possibile anche visualizzare i risultati in termini di coefficiente di luce diurna.

I risultati sono riportati attraverso viste prospettiche con sfumature a retini (Fig. 10-11), mappature a curve di livello o visualizzazioni a tre dimensioni.

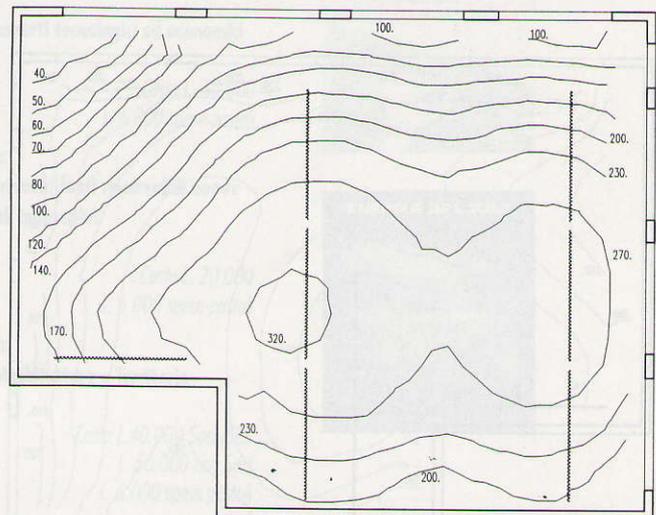
Le uscite grafiche possono essere registrate nel formato standard o in formato di interscambio (DXF) per permettere di essere importate dalla maggior parte dei CAD in commercio (per esempio AutoCAD).

## Applicazione

Per mostrare le potenzialità del software KANDAELA, viene presentata di seguito l'analisi costi-benefici effettuata per la ristrutturazione dell'impianto di illuminazione relativo a una particolare stanza di un ufficio. Tale applicazione è stata effettuata nel contesto di un'indagine svolta su un campione significativo del parco edilizio ENEL, finalizzata all'ottimizzazione della gestione energetica degli stabili.



**Figura 12 - Distribuzione del fattore di illuminazione naturale nella stanza (altezza piano di lavoro: 80 cm)**

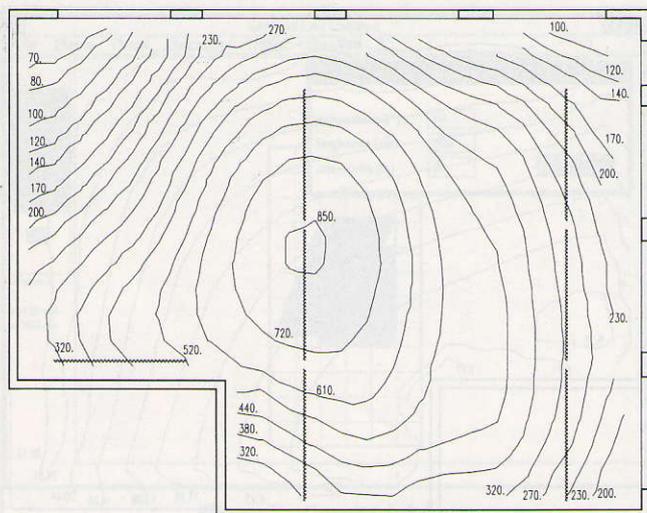


**Figura 13 - Illuminazione artificiale: attuale distribuzione dell'illuminazione (potenza installata 754 W)**

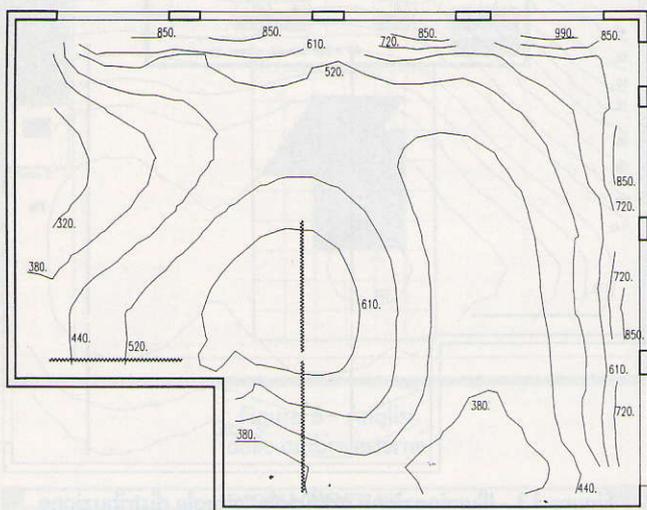
La stanza ha una forma ad "L" e presenta ampie finestre situate su due muri esterni. Attualmente, l'illuminazione artificiale consiste di 6 apparecchi di illuminazione composti da 2 tubi fluorescenti (2 x 58 W), più un tubo nudo (58 W); sia le plafoniere che i tubi fluorescenti sono a bassa efficienza. La potenza complessiva installata nella stanza è uguale a 754 W (molto elevata, circa 20 W/mq). Considerando le perdite di energia nei reattori la potenza installata raggiunge i 923 W.

In figura 1 abbiamo già mostrato la stanza così come è stata definita in KANDAELA durante la procedura di input dove vediamo collocate due scrivanie. Le mappe di distribuzione dell'illuminamento che vedremo nelle figure seguenti sono quelle calcolate sul "piano di lavoro" posto a 80 cm di

## Codice di calcolo KANDAELA



**Figura 14 - Illuminazione artificiale: distribuzione dell'illuminazione dopo l'ipotesi di sostituzione degli apparecchi luminosi (potenza installata 406 W)**



**Figura 15 - Integrazione tra illuminazione naturale e un parziale uso dell'illuminazione artificiale per un giorno nuvoloso (illuminazione esterna 2000 lux, potenza attivata 174 W)**

altezza. In figura 12 è mostrato l'output di KANDAELA per la distribuzione del coefficiente di luce diurna. Questa simulazione è stata eseguita con radiazione diretta nulla e ipotizzando per la radiazione diffusa una distribuzione di luminanza tipo cielo standard CIE. È possibile notare come il coefficiente di luce diurna è molto alto a causa dell'estesa area finestrata. In figura 13 è mostrata l'illuminazione ottenuta con l'attuale impianto di illuminazione. È possibile notare che il livello di illuminamento è molto basso e, per una gran parte della stanza, è insufficiente.

Per aumentare l'efficienza del sistema e per migliorare il comfort visivo per gli occupanti è stata proposta la sostituzione

dei vecchi apparecchi di illuminazione. In figura 14 è mostrata la configurazione proposta in cui sono stati sostituiti i corpi illuminanti con altri a maggior efficienza, contenenti tutti un solo tubo fluorescente, e tra di loro di differente tipologia in modo da garantire comunque l'illuminamento minimo richiesto sui piani di lavoro.

La potenza globale per questa soluzione è 406 W (492 W considerando le perdite di energia) quasi il 50% in meno dell'attuale configurazione, mentre l'illuminazione sul piano di lavoro è addirittura più alta che nell'attuale configurazione. La nuova distribuzione assicura al minimo 350 lux sull'area di lavoro.

Un'altra simulazione è stata eseguita per studiare l'integrazione tra la luce naturale e quella artificiale. In particolare è stata simulata una giornata nuvolosa con illuminamento esterno pari a 2000 lux (nei giorni invernali, per il sito considerato, circa il 30% delle ore comprese tra le 8 e le 16 presentano un livello di illuminazione inferiore a 2000 lux). Per questa simulazione sono stati considerati accesi solo i tre apparecchi di illuminazione più interni. La distribuzione ottenuta è riportata in figura 15. La distribuzione della illuminazione che si ottiene con questa nuova configurazione permette di integrare con maggiore successo l'effetto della luce naturale e artificiale, ottenendo un risparmio energetico dell'ordine del 40% rispetto ai consumi attuali. Il calcolo del risparmio energetico è stato effettuato considerando la distribuzione della illuminazione esterna generata in un "anno tipo" per il sito considerato e ipotizzando l'uso di un sistema di gestione automatica per il controllo dell'impianto di illuminazione.

## Conclusioni

Il software presentato in questo articolo permette al progettista di definire sia la struttura architettonica che il sistema di illuminazione di un edificio tenendo conto degli effetti di ogni particolare soluzione in termini di comfort visivo e richiesta di energia. In particolare, la possibilità di produrre la distribuzione dell'illuminazione naturale permette al progettista di stimare e ottimizzare l'impatto delle dimensioni e della posizione delle finestre oltre che studiare la migliore integrazione con la luce artificiale, in vista del miglior comfort e dei più bassi consumi di energia. ■

## Bibliografia

- [1] C. Priolo e S. Sciuto "A computer code for engineers and architects for the evaluation of daylighting in internal environment" Proceedings of the 1993 Solar Energy in Architecture and Urban Planning Conference (Firenze, maggio 1993).
- [2] C. Priolo e S. Sciuto "A computer code for the evaluation of natural and artificial illuminance and for control optimisation". Proceedings of Lux Europa 1993 (Edimburgo, aprile 1993).
- [3] S. Sciuto "Modellistica e rilevamento dati edifici-Attività relativa allo sviluppo del programma di simulazione KANDAELA" Rapporto tecnico Conphoebus S.c.r.l. per ENEL (Catania, dicembre 1993).
- [4] R. Li Destri, C. Priolo e M. Alabiso "Application of a lighting simulation tool to a large office building stock for energy rehabilitation" Proceedings of the 1993 Energy performance & indoor climate in buildings (Lione, novembre 1993).

Dott. ing. Claudio Priolo, Conphoebus Srl, Catania  
Dott. Maria Alabiso, dott. ing. Francesco Groppi,  
ENEL/DSR/CRAM Spa, Milano