

QUICK, RATIONAL AND ACCURATE LUMEN METHOD USING MINIMUM AVAILABLE DATA

Paul DINULESCU

“Politehnica” University of Bucharest

Abstract

One propose to patch together the various existing lumen methods and the CIE methods into a single, efficient, expeditious and more accurate method for the design and for the verification of a lighting installation in an interior by maintaining all their important particularities. The method uses analytical relationships for more accurate establishing of utilization factors for all room surfaces, using a minimum available data concerning the considered luminaire (i.e. flux code or the average luminous intensity distribution) and general data (average geometric multipliers for CIE reference room and luminaire arrangement, as a function of the room index). If the manufacturer does not supply the flux code, this may be easily calculated. The use of tabulated specific utilization factors and indispensable interpolations are avoided. The results are practically few different from those referring to a certain room shape and luminaire arrangement. The correction factors may be avoided. As for another methods, the proposed method applies to luminaires considered as point sources characterized by their average luminous intensity distribution.

1 Lighting installation models and denotements

The general model for interior general lighting calculations using the lumen method consists of a rectangular parallelepiped whereby the following diffusely reflecting surfaces are delimited (fig. 1):

- three material surfaces S_1 , S_2 , S_3 (the ceiling, the frieze and the four walls lumped together) characterized by their areas $A_1 = ab$, $A_2 = 2h'(a+b)$, $A_3 = 2h(a+b)$ and reflectances r_1 , r_2 , r_3 ;
- the working plane S_4 (material or immaterial) surface, having an area $A_4 = ab$; due to the fact that it isn't always a continuous, homogenous surface, an equivalent reflectance r_4 may be given to it;
- an immaterial surface defined by the plane of luminaires S_5 .

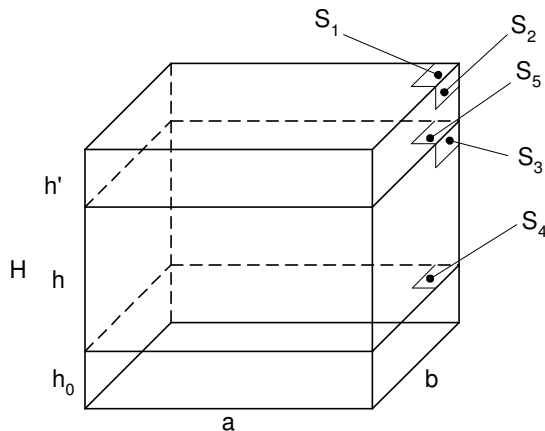


Figure 1 General calculation model

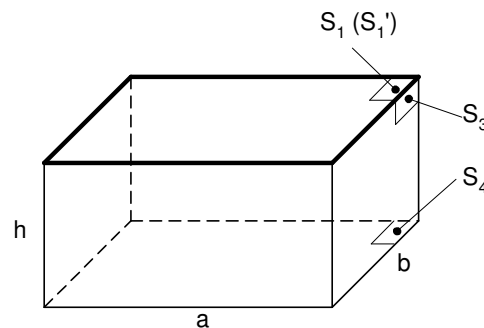


Figure 2 Simplified calculation model

To designate photometric characteristics and geometric characteristics the suffixes 1, 2, 3, 4 and 5 are respectively used.

Generally, illuminances on the room surfaces are given by the final luminous fluxes obtained as a result of the combined effect of direct- and interreflected fluxes.

One denotes: Φ_{li} – installed lamp flux; Φ , $\Phi_{\downarrow}$, $\Phi_{\uparrow}$ – installed luminaire fluxes (total, downward and useful respectively); $f = \Phi/A_4$, $f_{\downarrow} = \Phi_{\downarrow}/A_4$, $f_{\uparrow} = \Phi_{\uparrow}/A_4$ – flux densities of the interior (total, downward and useful respectively); Φ_e – luminous flux from a luminaire; Φ_{lc} – lamp flux of a luminaire; Φ_{0i} – direct fluxes, Φ_i – final fluxes; $U_i = \Phi_i/\Phi$ – utilances; $U_{ri} = E_i/f$ – reduced utilances; $u_i = \Phi_i/\Phi_{li}$ – utilization factors; A_i – areas; $E_i = \Phi_i/A_i$ – final illuminances; r_i – (average) reflectances; N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 – identifying numbers of a luminaire (flux code); $R_d = \Phi_{0d}/\Phi_{\downarrow}$ – direct ratio of the installation [1, 2].

Room index $K = ab/h/(a+b)$, ceiling-cavity index $K_c = ab/h'/(a+b)$ and suspension height ratio $J = h'/(h+h')$ are defined (h – mounting height, h' – suspension height).

Form factor from a surface j to a surface i [3] is denoted by f_{ji} (sometimes substituted for q_{ji} to avoid confusion with flux densities).

Two simplified three-surface models may be used instead of the general model. In the simplified models the ceiling and the frieze (ceiling cavity) is substituted for:

a) a single flat surface S_1' (fig. 2) coinciding with the surface S_5 (*flat equivalent ceiling*) having the area A_1 and an equivalent reflectance r_{1e} depending on r_1, r_2, K_c respectively on r_1, r_2, K, J [4, 5];

b) a single concave surface S_1' having the area $A_1 + A_2$ (*concave equivalent ceiling*) and the average reflectance r_c depending on A_1, A_2, r_1, r_2 [4, 5].

By comparing the three models described above, one can find that the general four-surface model is more complete but the relation for computation of the flux densities or illuminances are more complicated. More simple relations characterize the both simplified three-surface models and it follows from the calculation that they give identical results, very close to the general model results [5].

2 Comparison of different existing lumen methods used in lighting calculations

It has been shown [6] that in calculating the interior lighting the existing utilization factor methods are actually identical with the CIE methods [1, 2], all of them representing only versions on applying the general flux transfer theory, as it is briefly exposed in Annex.

With the same procedure for determining the direct flux distribution as well as by using properly calculated tables of coefficients and/or of utilization factors, both the CIE methods and any other version of the lumen method give identical results in calculating either final luminous fluxes or illuminances on the room surfaces. Despite all appearances, even coefficients for computing fluxes or illuminances are essentially the same.

All existing methods have as common traits:

- starting from a reference arrangement of luminaires in a reference interior;
- assumptions regarding evaluation of room reflectances, illuminance uniformity, inter-reflection circumstances.

Though, the CIE methods have important advantages such as:

- an accurate and quick determination, for any arrangement of luminaires and shape of the interior, either of direct fluxes or of their contribution to the final illuminances without necessarily calculate their own values;
- establishing and using the flux code of a luminaire as a main photometric datum (at least for symmetrical point sources);
- computation of illuminances on all room surfaces;
- eliminating the need to produce utilization factors table for each luminaire type.

Besides that, the CIE methods have some major disadvantages among which one can enumerate:

- they make use of some quantities not having an obvious physical meaning (e.g. installed flux density, reduced utilisation, reduced utilization factor, exchange coefficient etc);
- they are difficult to understand and complicate to use;
- they require two sets of relationships used to design an respectively to verify an installation and therefore, two sets of tables for a single (and sometimes irrelevant) value of the suspension height ratio;
- many tables have been elaborated depending on a given luminaire classification to which many existing luminaires cannot be easily affiliated.

On the other hand, both the CIE methods and the other lumen methods use tabulated data (coefficients for computing flux densities, illuminances or final fluxes, values of utilances or of utilization factors). This is a reminiscence of times when calculation means were still rudimentary. Frequently the number of required tables is great enough. By using tables one must perform numerous uncomfortable interpolations and insert correction factors. Moreover, tables cannot cover all practical cases involved in lighting design.

Under the conditions of computer-aided design, it is preferable to dispose of analytical relationships to directly calculate the quantities of interest for any value of reflectances, of room index and of suspension height ratio.

3 Basic relations

For the reason above (§ 1), the common used model of an installation considers the luminaires mounted on a flat ceiling and the ceiling reflectance either r_l (for $J = 0$) or r_{le} (for $J \neq 0$).

Only three surfaces (denoted S_1, S_3, S_4) and the corresponding direct fluxes ($\Phi_{01}, \Phi_{03}, \Phi_{04}$) and final fluxes (Φ_1, Φ_3, Φ_4) are therefore taken into account.

For evaluating the interreflections one uses the form factors f_{ij} between room surfaces, based on the final flux distribution; the inertia of the human eye cannot allow the perception of each reflection separately.

By solving the set of simultaneous equations of flux transfer written for all model surfaces

$$\Phi_i = \Phi_{0i} + \sum_j f_{ji} r_j \Phi_j \quad (i=1,3,4; \quad j=1,3,4) \quad , \quad (3.1)$$

one can obtain the relationship either between direct and final fluxes or between flux densities and final illuminances:

$$[\Phi_0] = [C] \cdot [\Phi] \quad (3.2)$$

$$[f] = [D] \cdot [E] \quad , \quad (3.3)$$

where $[\Phi_0]$, $[\Phi]$, $[f]$, $[E]$ are three-row vectors and $[C]$, $[D]$ result as square 3x3 numerical matrices.

The solution of the set (3.2), (3.3) may be written as

$$[\Phi] = [F] \cdot [\Phi_0] \quad , \text{ where } [F] = [C]^{-1} \quad , \quad (3.4)$$

$$[E] = [I] \cdot [f] \quad , \text{ where } [I] = [D]^{-1} \quad . \quad (3.5)$$

Coefficients $[C]$, $[D]$, $[F]$ and $[I]$ are expressed in terms of reflectances and, by means of form factors, of room index and suspension height ratio [4, 5].

This common approach can be considered as a source of all existing relationships that a number of countries have developed as their own individual methods in lighting calculations using the lumen method.

The points of difference from one method to another are confined in the main to:
a) the way that the direct flux distribution and interreflections are dealt with; b) the coefficients used; c) the quantities involved.

One can easily show (see Annex) that all these well-known methods used in lighting calculations for interior lighting may be derived from the basic relations above.

Each method comprises a number of specific tables of coefficients for classical ("manual") calculation of fluxes and/or illuminances.

4 Proposed method

4.1 Principles

Taking into account the exposed considerations both for and against concerning main lumen methods, it is useful to reexamine the present CIE methods in order to:

- patch the two methods together and maintain all their important particularities concerning especially the use of the flux code of a luminaire and calculation of direct fluxes;
- eliminate their useless particulars such as correction factors for unusual luminaire arrangements or where their values are too low to be taken into consideration;
- use quantities with an immediate physical meaning;
- make them more versatile (e.g. by reducing the number of formulas and/or tables);
- make them applicable by using computer-aided design by using either specific or general calculation programs (e.g. Mathcad, Matlab).

Such a revised method can be recommended as an *improved utilization factor method* that:

- is logical and conceptual simple;
- is closer to the physical meaning;
- needs only one set of relationship both for the design and for the verification procedure through the agency of utilization factors;
- can provide fluxes to all room surfaces;
- may also make use of a simplified model for the interior;
- uses only a single form factor (referring to rectangular parallel identical surfaces); one may dispense from exchange coefficients;
- may be conceived to provide procedures both for computer-aided design and for classical ("manual") calculations as well as for partly computer-aided calculations.

To perform either the design or the verification of an installation using the *utilization factor method based on the CIE methods*, the following technical data are needed: dimensions of the interior, room reflectances, luminous flux of a lamp (Φ_l), maintenance factor ($\delta < 1$), desired average illuminances on room surfaces (E_1, E_3, E_4), number of lamps in a luminaire (n_l). The Photometric Data Sheet (PDS) must contain luminous flux distribution of a luminaire only, in the form of flux code $N_1 \dots N_5$. If the manufacturer does not supply this datum, only the average luminous intensity distribution (shown preferably in tabular form or in the form of a polar diagram) is needed to calculate the flux code. Moreover, a table containing the average geometric multipliers must be available independently of the luminaire used. One exempts from specific utilization factor(s) table.

At the beginning one may be content with a CIE reference arrangement of luminaires in a reference interior for which reference geometric multipliers are known (or may be calculated) in terms of room index. Should it be necessary to depart from the standard luminaire arrangement or from the reference shape of the interior, the actual arrangement and the actual shape can be considered in a second iteration and the actual geometric multipliers can be computed by using specific relationships and calculation programs. One finds that the results are practically few different.

Utilization factor defined for a surface S_i is the single quantity to be determined. The definition of the utilization factor (§ 1) gives the main relationship used in calculations:

$$u_i = \frac{\Phi_i}{\Phi_l} = \delta \frac{E_i A_i}{N_l \Phi_l} \quad , \quad (4.1.1)$$

where N_l is the numbers of lamps in the installation. This simplest relationship serves both for the design and for the verification procedure.

Taking into account that, as in the CIE methods, there is no solution for any set of the three desired illuminances, in the design procedure it is preferable to consider firstly the requirement for the working plane only (and use the corresponding utilization factor), select the luminaire and the luminaire arrangement, then pass to the verification procedure and compare provided and given illuminances for all surfaces. If the requirements for the walls and the ceiling cavity are not achieved one can try to select another luminaire.

4.2 Calculation of the utilization factors

To calculate the utilization factors it is useful to adopt the simplified model of the installation (flat equivalent ceiling) and start from the relation (2.1.4).

The luminous flux Φ_l and respectively the illuminance E_l calculated by using the three-surface model refer to the equivalent ceiling. Therefore, the final flux on the ceiling-cavity surfaces has to be calculated for suspended luminaires by multiplying that flux by the coefficient of multiple reflections on the ceiling-cavity surfaces [4]:

$$\kappa_c = (K_c + 2)^2 / [(K_c + 2)^2 - 2(K_c r_1 + 2r_2)] \quad . \quad (4.2.1)$$

The reflectance of the equivalent ceiling may be calculated by the relationship [4]:

$$r_{1e} = K_c (K_c r_1 + 2r_2) / [(K_c + 2)^2 - 2(K_c r_1 + 2r_2)] \quad . \quad (4.2.2)$$

The matrix [C] in (2.1.4) has been found [4,II] as

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -(1-f_{45}) \cdot K/2 \cdot r_3 & -f_{45} \cdot r_4 \\ -(1-f_{45}) \cdot r_{1e} & 1-[1-(1-f_{45}) \cdot K] \cdot r_3 & -(1-f_{45}) \cdot r_4 \\ -f_{45} \cdot r_{1e} & -(1-f_{45}) \cdot K/2 \cdot r_3 & 1 \end{bmatrix} \quad . \quad (4.2.3)$$

Using the conservation and reciprocity relationships between form factors [4,II], only form factor between parallel flat surfaces either f_{45} (the case of suspended luminaires) or f_{4l} (ceiling mounted luminaires) is finally used:

$$f_{45} = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{\sqrt{a_*^2 + 1}}{a_*} \cdot \arctg \frac{b_*}{\sqrt{a_*^2 + 1}} + \frac{\sqrt{b_*^2 + 1}}{b} \cdot \arctg \frac{a_*}{\sqrt{b_*^2 + 1}} - \frac{1}{a_*} \cdot \arctg b_* - \right. \\ \left. - \frac{1}{b_*} \cdot \arctg a_* + \frac{1}{2a_* b_*} \cdot \ln \frac{(a_*^2 + 1)(b_*^2 + 1)}{(a_*^2 + b_*^2 + 1)} \right] \quad , \quad (4.2.4)$$

where

$$a_* = \frac{a}{h} = \frac{\mu + 1}{\mu} K \quad , \quad b_* = \frac{b}{h} = (\mu + 1)K \quad ; \quad \mu = \frac{b}{a} \quad . \quad (4.2.5)$$

A very good approximation is obtained by the relation:

$$f_{45} = \exp\left(-\frac{0,92}{K}\right) + \frac{0,02675}{K} - 0,011 \quad . \quad (4.2.6)$$

The relation:

$$f_{45} = \frac{\sqrt{K^2 + 1} - 1}{K} \quad (4.2.7)$$

also gives a good approximation.

Table giving f_{45} as a function of room index for standard rooms may be available as an alternative.

For ceiling mounted luminaires $r_{le} \rightarrow r_l, f_{45} \rightarrow f_{l4}, \kappa_c \rightarrow I$.

It follows from the calculations:

$$\begin{aligned} u_1 &= \kappa_c \{ F_{11} + [F_{12} - F_{11} + (F_{13} - F_{12}) R_d] N_4 \} N_5 \\ u_3 &= \{ F_{21} + [F_{22} - F_{21} + (F_{23} - F_{22}) R_d] N_4 \} N_5 \\ u_4 &= \{ F_{31} + [F_{32} - F_{31} + (F_{33} - F_{32}) R_d] N_4 \} N_5 \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

The direct ratio R_d is given by the relation:

$$R_d = M_1 N_1 + M_2 N_2 + M_3 N_3 + M_4 \quad , \quad (4.2.9)$$

where $M_1 \dots M_4$ (average geometric multipliers for the reference arrangement of luminaires in a standard room) are known as a function of room index [2].

Coefficients F_{ij} may be calculated by using relationships derived from the inversion of 3x3 matrices [4,III]. The simplest way consists in using the numerical matrix [C] by substituting the values of quantities involved and applying a fast method of inversion (e.g. MATHCAD or MATLAB procedures). Simple procedures are also used to calculate κ_c , r_{le} , R_d (including interpolations for geometric multipliers corresponding to intermediate values of K) and finally utilization factors.

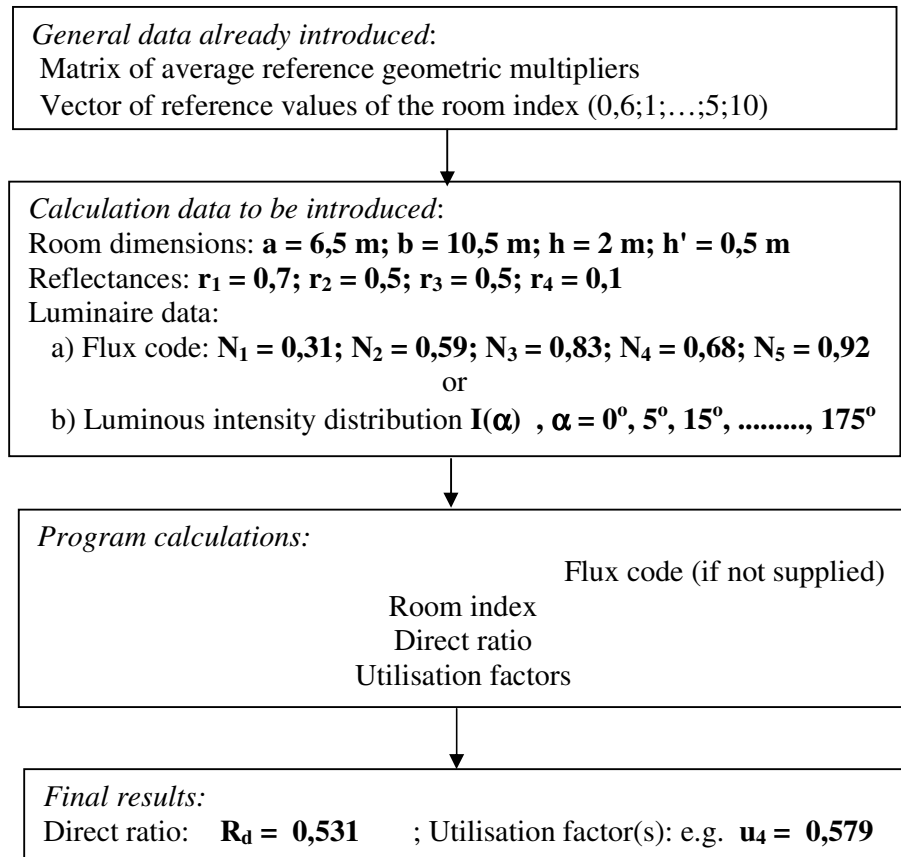


Figure 3 Calculation of direct ratio and utilization factors

Denoting

$$\begin{aligned} B_{11} &= F_{11} , \quad B_{12} = F_{12} - F_{11} , \quad B_{13} = F_{13} - F_{12} \\ B_{21} &= F_{21} , \quad B_{22} = F_{22} - F_{21} , \quad B_{23} = F_{23} - F_{22} \\ B_{31} &= F_{31} , \quad B_{32} = F_{32} - F_{31} , \quad B_{33} = F_{33} - F_{32} , \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

equations (4.2.8) become

$$\begin{aligned} u_1 &= \kappa_c \{ B_{11} + [B_{12} + B_{13} R_d] N_4 \} N_5 \\ u_3 &= \{ B_{21} + [B_{22} + B_{23} R_d] N_4 \} N_5 \\ u_4 &= \{ B_{31} + [B_{32} + B_{33} R_d] N_4 \} N_5 . \end{aligned} \quad (4.2.11)$$

Tables with coefficients B_{ij} or F_{ij} calculated for certain reference combinations of room reflectances and room index values may be also available if classic (“manual”) calculations are desired [7]. At least three tables are needed if the working plane is only considered. However, this practice eliminates the advantages offered by the analytical procedure described above.

As an example, figure 3 illustrates the main steps of a program used to calculate direct ratio and utilization factors

ANNEX

Particular procedures used with the lumen method

For simplicity, the discussion will be restricted to the relationships for the working plane.

For the working plane, the reduced utilance U_{r4} and the utilance U_4 are the same. Working plane utilization factor may be expressed as:

$$u_4 = U_4 N_5 ,$$

where N_5 is the light output ratio of a luminaire.

A.1. CIE Basic Method [1] and French (basic) Method [8]

From (2.5), it results for the working plane

$$E_4 = I_{31} f + I_{32} f_{\cup} + I_{33} f_u \quad (A.1.1)$$

respectively

$$E_4 = [I_{31} + (I_{32} + I_{33} R_d) N_4] f , \quad (A.1.2)$$

where $R_d = \Phi_{04} / \Phi_{\cup}$ is the direct ratio of the installation and $N_4 = \Phi_{\cup} / \Phi_c$.

The expression

$$U_{r4} = U_4 = I_{31} + (I_{32} + I_{33} R_d) N_4 \quad (A.1.3)$$

gives the (reduced) working plane utilance.

The working plane utilization factor will be:

$$u_4 = [I_{31} + (I_{32} + I_{33} R_d) N_4] N_5 . \quad (A.1.4)$$

A.2. French Applied Method [9]

Denoting

$$S = I_{31} + I_{32} N_4 , \quad R = I_{33} , \quad (A.2.1)$$

the expression (A.1.2) can be written as

$$E_4 = (R N_4 R_d + S) f = (R f_u^* + S) f , \quad (A.2.1)$$

where $f_u^* = f_u / f$ is the relative flux density on the working plane.

The (reduced) working plane utilance and the corresponding utilization factor are expressed as:

$$\begin{aligned} U_{r4} = U_4 &= R f_u^* + S \\ u_4 &= (R f_u^* + S) N_5 \end{aligned} \quad (A.2.2)$$

A.3. Russian Method [10]

The general equations (2.1) for the three-surface model are written in the form:

$$\Phi_i = (\Phi_{0i} + \sum_{j=1}^2 q_{ij} r_j \Phi_j) \kappa_i \quad , \quad (A.3.1)$$

where κ_i is the coefficient of multiple reflections on the surface i . With a flat ceiling model $\kappa_1 = \kappa_4 = 1$, $\kappa_3 > 1$.

It follows from (A.3.1) a set of simultaneous equations similar to (3.4) with the solution for the working plane:

$$\Phi_4 = A \Phi_{01} + B \Phi_{03} + C \Phi_{04} \quad , \quad (A.3.2)$$

where coefficients A , B and C are also expressed in terms of room reflectances and room index.

The utilization factor is given by:

$$u_4 = (A \Phi_{01} + B \Phi_{03} + C \Phi_{04}) / \Phi_{lt} \quad . \quad (A.3.3)$$

By employing (A.1.1) one has

$$\Phi_4 = E_4 A_4 = I_{31} \Phi + I_{32} \Phi_{\cup} + I_{33} \Phi_{04}$$

wherefrom

$$\Phi_4 = I_{31} \Phi_{01} + (I_{31} + I_{32}) \Phi_{03} + (I_{31} + I_{32} + I_{33}) \Phi_{04} \quad . \quad (A.3.4)$$

By comparing (A.3.4) with (A.3.2), it is easily seen that:

$$I_{31} = A \quad , \quad I_{31} + I_{32} = B \quad , \quad I_{31} + I_{32} + I_{33} = C \quad . \quad (A.3.5)$$

A.4. Transfer Factors Method [11]

The working plane utilization factor is given by

$$u_4 = D_1 T_{14} + D_3 T_{34} + D_4 T_{44} \quad (A.4.1)$$

where $D_i = \Phi_{0i} / \Phi_{lt}$ denote distribution factors and T_{14} , T_{34} and T_{44} are transfer factors between room surfaces.

Note the identity of equations (A.4.1) and (A.3.3) wherefrom

$$T_{14} = A \quad , \quad T_{34} = B \quad , \quad T_{44} = C \quad . \quad (A.4.2)$$

A.5. British Zonal Method [12]

Using the downward and upward components of the flux from the installation to the working plane ($\Phi_{4\cup}$ and $\Phi_{4\cap}$), one can express the utilization factor as:

$$u_4 = U_{\cup} \eta_{c\cup} + U_{\cap} \eta_{c\cap} \quad , \quad (A.5.1)$$

where $U_{\cup} = \Phi_{4\cup} / \Phi_{\cup}$ and $U_{\cap} = \Phi_{4\cap} / \Phi_{\cap}$ are lower and upper flux utilances respectively and $\eta_{c\cup} = \Phi_{c\cup} / \Phi_{1c}$, $\eta_{c\cap} = \Phi_{c\cap} / \Phi_{1c}$ are downward and upward light output ratio of a luminaire (Φ_{1c} is the lamp flux of the luminaire).

It is easily to show that

$$U_{\cup} = (1 - R_d)T_{34} + R_d T_{44} ; U = T_{14}$$

$$E_4 = [(1 - N_4)U_{\cap} + N_4 U_{\cup}]f \quad . \quad .(A.5.2)$$

It follows from (A.5.2), (A.4.2) and (A.3.5) the general equation (A.1.2).

References

1. CIE Publication No 40. *Calculations for Interior Lighting. Basic Method*
2. CIE Publication No 52. *Calculations for Interior Lighting. Applied Method*
3. Dourgnon, J. *Les réflexions mutuelles entre surfaces diffusantes*. Revue d'optique; 38, 1959; No: 8; pp: 365 – 394
4. Dinculescu, P. *O prezentare unitară a interreflexiilor in instalațiile de iluminat*. EEA-Electrotehnica, 38 (1990): I) nr. 2, pp. 65-70; II) nr.4, pp. 159-171; III nr.5, pp. 194-208
5. Dinculescu, P. *Calculations for Interior Lighting*. 8-th Conference "LIGHTING 90", Varna, 1990
6. Dinculescu, P. *On the Calculation of Average Illuminance in Various Existing Methods for Interior Lighting*. 6-th Conference "LIGHTING '84", Varna, 1984, pp. 81-86
7. Dinculescu, P. *Proiectarea instalațiilor de iluminat interior folosind tabele precalculate*. Energetica, Seria B, 41 (1993), nr. 6, p. 123-127
8. Norme ANFOR S 40-001. *Détermination des éclairagements sur le plan utile et sur les parois*
9. Norme UTE 71-121, 1970. *Méthode simplifiée de prédétermination des éclairagements dans les espaces clos*
10. Epaneshnikov, M.M. *Elektricheskoe osveshchenie*. Moskow-Leningrad, Energhiya, 1973
11. Bean, A.R. and Bell, R.I. *Calculation of Utilization Factors*. Lighting Research and Technology, 8, 1976, No. 4, pp. 200 – 210
12. IES Technical Report No. 2. *The Calculation of Utilization Factors. The BZ Method*. London, 1971

O VARIANTĂ RAPIDĂ, RAȚIONALĂ, EFICIENTĂ ȘI PRECISĂ A METODEI FLUXULUI LUMINOS, FOLOSIND UN MINIM DE DATE ȘI MATERIALE AUXILIARE

Rezumat

Se propune reunirea diverselor variante ale metodei factorilor de utilizare și metodelor propuse de CIE, într-o metodă unică, operativă și mai precisă de proiectare și verificare a instalațiilor de iluminat, reunind avantajele tuturor metodelor existente. Metoda are la bază relații analitice pentru calculul mai exact al factorilor de utilizare corespunzători suprafețelor încăperii, solicitând un număr minim de date lumino tehnice inițiale specifice corpului de iluminat folosit (codul de flux CIE sau distribuția intensității luminoase) și generale (multiplicatorii geometrici medii de referință, în funcție de indicele instalației). Se elimină astfel necesitatea tabelelor cu factori de utilizare precalculați specifici fiecărui corp de iluminat, precum și a interpolărilor inerente. Amplasarea și configurația de referință conduc la rezultate acceptabile practic. Pentru instalații care se abat de la situația de referință, multiplicatorii geometrici se pot, de asemenea, calcula. Ca și toate celelalte proceduri existente, metoda se aplică în cazul asimilării corpurilor de iluminat cu surse punctiforme simetrice, caracterizate prin curba de distribuție medie a intensității luminoase.

1 Modelul de calcul al instalației de iluminat și notații

Modelul general pentru calculul iluminatului interior general folosind metoda factorului de utilizare (metoda fluxului luminos) este un paralelipiped în care se disting următoarele suprafețe perfect difuzante (fig. 1):

- trei suprafețe materiale S_1 , S_2 , S_3 (tavanul, friza și cei patru pereți considerați împreună) caracterizate prin ariile corespunzătoare $A_1 = ab$, $A_2 = 2h'(a+b)$, $A_3 = 2h(a+b)$ și factorii lor de reflexie r_1 , r_2 , r_3 ;

- planul de lucru (util) S_4 (suprafață materială sau materializată, nu totdeauna continuă și omogenă) având aria $A_4 = ab$, căreia i se poate atribui un factor de reflexie echivalent r_4 ;

- planul corpurilor de iluminat S_5 (suprafață nematerială).

Pentru definirea caracteristicilor lumino tehnice și geometrice se folosesc respectiv indicii 1, 2, 3, 4 și 5.

În general, iluminările pe suprafețele încăperii sunt date de fluxurile luminoase finale obținute ca efect combinat al fluxurilor directe și reflectate.

Se notează: Φ_t – fluxul lămpilor instalate; Φ , $\Phi_{\cup}$, $\Phi_{\cap}$ – fluxurile luminoase instalate (respectiv total, inferior și superior); $f = \Phi/A_4$, $f_{\cup} = \Phi_{\cup}/A_4$, $f_u = \Phi_{\cap}/A_4$ – densitățile de flux (respectiv totală, inferioară și superioară); Φ_c – fluxul luminos al unui corp de iluminat; Φ_{lc} – fluxul lămpilor dintr-un corp de iluminat; Φ_{oi} – fluxurile directe, Φ_i – fluxurile finale; $U_i = \Phi_i/\Phi$ – utilanțele; $U_{ri} = E_i/f$ – utilanțele reduse; $u_i = \Phi_i/\Phi_t$ – factorii de utilizare; A_i – ariile; $E_i = \Phi_i/A_i$ – iluminările finale; r_i – factorii de reflexie (medii); N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 – indicatorii de distribuție ai corpului de iluminat; $R_d = \Phi_{oi}/\Phi_{\cup}$ – raportul direct al instalației [1, 2].

Se definesc mărimile adimensionale: indicele instalației $K = ab/h/(a+b)$, indicele cavității tavan-friză $K_c = ab/h'/(a+b)$ și raportul de suspendare $J = h'/(h+h')$ (h – înălțimea de montare, h' – distanța de suspendare).

Factorul de formă al suprafeței j în raport cu suprafața i [3] se notează cu f_{ji} (notație înlocuită uneori cu q_{ji} , pentru a evita confuzia cu densitățile de flux).

Practica arată că în locul modelului general (cu patru suprafețe de calcul) se pot folosi două modele simplificate, cu câte trei suprafețe de calcul, în care tavanul și friza (cavitatea tavan-friză) sunt înlocuite cu:

a) o suprafață plană S_1' (fig. 2) care coincide cu suprafața S_5 (*tavan echivalent plan*) având aria A_1 și un factor de reflexie echivalent r_{1e} care depinde de r_1, r_2, K_c respectiv de r_1, r_2, K, J [4, 5];

b) o suprafață concavă S_1' având aria $A_1 + A_2$ (*tavan echivalent concav*) și factorul de reflexie mediu r_c depinzând de A_1, A_2, r_1, r_2 [4, 5].

Comparând cele trei modele descrise anterior, se constată că modelul general este mai complet, dar relațiile de calcul al densităților de flux sau iluminărilor sunt mai complicate. Ambele modele simplificate sunt caracterizate prin relații mai simple și, așa cum rezultă din calcule, conduc la rezultate foarte apropiate de cele obținute prin folosirea modelului general [5].

2 Comparație între diversele variante existente ale metodei fluxului luminos

Așa cum s-a arătat [6], metodele factorilor de utilizare folosite în prezent sunt practic identice cu metodele CIE [1,2], reprezentând doar variante ale teoriei generale a transferului de flux luminos , așa cum se arată pe scurt în Anexă.

Pentru aceeași procedură de determinare a fluxurilor luminoase directe, ca și prin folosirea corectă a tabelelor precalculate cu coeficienți/factori de utilizare, atât metodele CIE cât și orice altă versiune a metodei fluxului luminos conduc la rezultate identice în calculul fluxurilor luminoase finale sau al iluminărilor medii pe suprafețele încăperii. În ciuda aparențelor, chiar și diverse variante ale coeficienților de calcul al fluxurilor sau iluminărilor sunt în esență aceleași.

Toate metodele existente au ca trăsături comune:

- considerarea inițială a unei amplasări de referință a corpurilor de iluminat într-o încăpere standard (de referință):

- ipotezele privind evaluarea factorilor de reflexie, uniformitatea iluminării, condițiile de schimb reciproc de flux luminos între suprafețe.

Cu toate acestea, metodele CIE au avantaje importante cum ar fi:

- determinarea rapidă și precisă, pentru orice amplasare a corpurilor de iluminat și orice configurație a încăperii, fie a fluxurilor directe, fie a contribuției lor la iluminările finale, fără a calcula în mod obligatoriu valorile respective;

- folosirea codului de flux al corpului de iluminat ca principală dată luminotehnică (cel puțin pentru sursele de lumină punctiforme simetrice):
- calculul iluminărilor pe toate suprafețele încăperii:
- eliminarea necesității câte unui tabel cu factori de utilizare pentru fiecare corp de iluminat.

Pe lângă aceasta, metodele CIE prezintă dezavantaje importante, printre care se pot enumera:

- utilizarea unor mărimi fără o semnificație fizică directă (de exemplu, densitățile de flux instalat, utilanțele reduse, factori de schimb etc);
- sunt mai dificil de înțeles și de aplicat;
- necesită două seturi de relații folosite pentru proiectarea respectiv verificarea unei instalații și, prin urmare două seturi de tabele pentru o anumită (și uneori nerelevantă) valoare a factorului de suspendare:
- multe tabele sunt întocmite pe baza unei clasificări a corpurilor de iluminat, la care corpurile reale nu se pot afilia totdeauna.

Pe de altă parte, atât metodele CIE, cât și alte variante ale metodei fluxului luminos au la bază folosirea de date tabelate precalculate (coeficienți pentru calculul densităților de flux, iluminărilor sau fluxurilor finale, valori ale utilanțelor sau ale factorilor de utilizare), reminiscență a vremurilor când mijloacele de calcul erau rudimentare. Deseori, numărul tabelelor necesare este destul de mare. Folosirea tabelelor implică numeroase și inconfortante interpolări, precum și introducerea de coeficienți de corecție. De asemenea, tabelele nu pot acoperi toate cazurile practice dintr-o instalație de iluminat.

În condițiile proiectării asistate de calculator, este preferabil să se dispună de relații analitice care să permită calculul direct al mărimilor care prezintă interes, pentru orice valori ale factorilor de reflexie, ale indicelui instalației sau ale raportului de suspendare și pentru orice corp de iluminat.

3 Relații de bază

Pe baza considerațiilor precedente (§ 1), cel mai uzitat model de calcul consideră corpurile de iluminat montate pe un tavan plan având factorul de reflexie fie r_l (pentru $J = 0$), fie r_{le} (pentru $J \neq 0$). În consecință, trebuie considerate numai trei suprafețe de calcul (S_1, S_3, S_4) și fluxurile corespunzătoare directe ($\Phi_{01}, \Phi_{03}, \Phi_{04}$) și finale (Φ_1, Φ_3, Φ_4).

În vederea evaluării interreflexiilor, se folosesc factorii de formă f_{ij} între suprafețele încăperii, deoarece inerția ochiului nu permite perceperea separată a fiecărei reflexii.

Rezolvând sistemul de ecuații referitoare la schimbul de flux scrise pentru cele trei suprafețe ale modelului (3.1), se obțin relațiile fie între fluxurile directe și fluxurile finale, fie între densitățile de flux și iluminările finale (3.2, 3.3) unde $[\Phi_0]$, $[\Phi]$, $[f]$, $[E]$ sunt vectori cu trei coloane iar $[C]$, $[D]$ sunt matrice numerice 3×3 .

Soluțiile sistemelor (3.2), (3.3) pot fi scrise sub forma (3.3, 3.4).

Factorii $[C]$, $[D]$, $[F]$ și $[I]$ se determină în funcție de factorii de reflexie și, prin intermediul factorilor de formă, în funcție de indicele instalației și de raportul de suspendare [4,5]

Această abordare este sursa tuturor relațiilor pe care diverse țări le-au stabilit ca propriile metodologii de calcul folosind metoda fluxului luminos. Diferențele principale între acestea constau în: a) modul de operare cu distribuția fluxurilor directe și cu interreflexiile: b) factorii (coeficienții) folosiți: c) mărimile care intervin.

Se poate arăta ușor (a se vedea Anexa) că toate metodologiile ("metodele") cunoscute folosite în calculul iluminatului interior pot fi deduse din relațiile de bază prezentate mai sus.

Fiecare "metodă" conține un număr de tabele specifice de factori (coeficienți) folosiți pentru calculul clasic ("manual") al fluxurilor luminoase și/sau al iluminărilor.

4 Metoda propusă

4.1 Principii

Având în vedere considerațiile pro și contra, expuse mai sus, privind metoda fluxului luminos, devine utilă reexaminarea celor două metode CIE existente în sensul de a reuni metodele respective și variantele uzitate ale metodei factorilor de utilizare, menținând particularitățile importante ale fiecăreia, în special în privința utilizării codului de flux (indicatorilor de distribuție) pentru un corp de iluminat și calculul fluxurilor directe, rezultând o metodă care să realizeze:

- eliminarea particularităților inutile, cum ar fi factorii de corecție pentru amplasări ale corpurilor de iluminat diferite de cea de referință sau cei cu valori prea mici pentru a fi luate în considerație în practică;

- folosirea de mărimi cu semnificație fizică nemijlocită;

- operativitate și suplețe, de exemplu prin reducerea numărului de formule și/sau de tabele sau eliminarea unora dintre acestea;

- adaptarea la proiectarea asistată de calculator, cu folosirea unor programe de calcul atât specifice cât și generale (de exemplu MATHCAD, MATLAB).

O astfel de metodă poate fi recomandată ca o variantă îmbunătățită a metodei factorului de utilizare care reunește calitățile tuturor celorlalte metode și care:

- este logică și simplă;

- este mai apropiată de semnificația fizică;

- necesită un număr minimal de date de catalog inițiale, renunțându-se la tabele cu valori precalculate, specifice fiecărui corp de iluminat;

- necesită un singur set de relații atât pentru problema de proiectare cât și pentru problema de verificare a unei instalații, care pot fi extinse la orice amplasare a corpurilor de iluminat și orice încăpere;

- permite determinarea fluxurilor luminoase și a iluminărilor pe toate suprafețele încăperii;

- folosește un singur factor de formă (pentru două suprafețe paralele identice), eliminându-se coeficienții de schimb;

- poate fi folosită atât pentru proiectarea asistată de calculator cât și pentru proiectarea clasică ("manuală").

În vederea proiectării sau verificării unei instalații de iluminat, folosind *metoda factorilor de utilizare bazată pe metodele CIE*, sunt necesare următoarele date inițiale: geometria încăperii, factorii de reflexie ai suprafețelor, fluxul luminos al unei lămpi (Φ), factorul de mentenanță ($\delta < 1$), iluminările medii necesare pe suprafețele încăperii (E_1 , E_3 , E_4), numărul de lămpi dintr-un corp de iluminat (n_l). Singura dată luminotehnică referitoare la corpul de iluminat folosit este codul de flux $N_1...N_5$. Dacă fabricantul nu oferă această dată, este necesară distribuția în plan a intensității luminoase, sub forma curbilor polare sau, preferabil, sub formă tabelară. Pentru inițierea calculului, este necesar un tabel cu multiplicatorii geometrici medii ai instalației independent de corpul de iluminat folosit.

Pentru început se poate opera cu o amplasare de referință CIE, într-o încăpere de referință, pentru care multiplicatorii geometrici sunt cunoscuți (sau pot fi calculați) în funcție de indicele instalației. În cazul unei amplasări diferite și/sau al unei încăperi de proporții diferite față de valorile de referință, acestea pot fi luate în considerare într-o a doua iterație când multiplicatorii geometrici reali pot fi calculați. Se constată însă că rezultatele obținute în situațiile practice sunt relativ puțin diferite.

Factorul de utilizare definit pentru o suprafață S_i este singura mărime care trebuie determinată. Pe baza definiției factorilor de utilizare (§ 1), rezultă principala relație folosită în

calcul (4.1.1), unde N_l este numărul total de lămpi din instalație. Această relație extrem de simplă servește atât pentru calculul de proiectare, cât și pentru calculul de verificare.

Deoarece, ca și în metodele CIE, pentru corpul de iluminat ales nu există totdeauna o soluție pentru orice combinație de valori ale iluminărilor necesare pe cele trei suprafețe de calcul, este preferabil să se considere inițial numai cerințele impuse pentru planul de lucru (și să se folosească factorul de utilizare corespunzător), să se stabilească numărul de corpuri de iluminat și amplasarea lor, apoi să se treacă la operația de verificare și să se compare valorile obținute și impuse ale iluminării pe toate suprafețele. În cazul când nu sunt satisfăcute cerințele impuse pentru pereți și tavan, se poate încerca alegerea unui alt corp de iluminat cu o distribuție convenabilă.

4.2 Calculul factorilor de utilizare

Pentru calculul factorilor de utilizare este indicat să se adopte modelul simplificat al instalației (tavan echivalent plan) și să se pornească de la relația (2.1.4).

Fluxul luminos Φ_l și respectiv iluminarea E_l calculate folosind modelul cu trei suprafețe de calcul se referă la tavanul echivalent. Prin urmare, fluxul luminos final pe suprafețele cavității tavan-friză trebuie calculat (4.2.1), pentru corpurile de iluminat montate suspendat, multiplicând acest flux cu factorul de reflexii multiple pe suprafețele respective [4]. Factorul de reflexie al tavanului echivalent poate fi calculat cu relația (4.2.2) [4]:

Matricea $[C]$ din (2.1.4) poate fi calculată folosind relația (4.2.3) [4].

Folosind relațiile de conservare și de reciprocitate între factorii de legătură [4],, rezultă că, în final, va fi folosit numai factorul de formă între două suprafețe plane paralele f_{45} (pentru montajul suspendat) sau f_{41} (pentru montajul corpurilor de iluminat direct pe tavan) (4.2.4, 4.2.5).

O foarte bună aproximare se obține cu relația (4.2.6). Relația (4.2.7) permite, de asemenea, o bună aproximare.

Ca o alternativă, poate fi precălcultat un tabel al f_{45} (f_{41}) în funcție de indicele instalației.

Pentru corpurile de iluminat montate pe tavan: $r_{le} \rightarrow r_l, f_{45} \rightarrow f_{14}, \kappa_c \rightarrow l$.

Din calcul, rezultă expresiile (4.2.8).

Raportul direct R_d este dat de relația (4.2.9) în care $M_1 \dots M_4$ (multiplicatorii geometrici medii pentru amplasarea de referință într-o încăpere standard) sunt cunoscuți în funcție de indicele instalației [2].

Factorii F_{ij} pot fi calculați folosind relațiile care rezultă din inversarea unei matrice 3x3 [4]. Cel mai simplu este însă să se utilizeze matricea numerică $[C]$, prin înlocuirea valorilor mărimilor care intervin și să se aplice o metodă de inversare rapidă (de exemplu, o secvență MATHCAD sau MATLAB). Alte procedee simple pot fi folosite pentru a calcula κ_c , r_{le} , R_d (inclusiv interpolarea pentru multiplicatorii geometrici corespunzători valorilor intermediare ale lui K) și, în final, factorii de utilizare.

Notând (4.2.10), ecuațiile (4.2.8) devin (4.2.11).

În vederea unei eventuale calculații clasice ("manuale"), se pot furniza tabele conținând factorii B_{ij} sau F_{ij} pentru anumite combinații de referință ale factorilor de reflexie ai suprafețelor și anumite valori ale indicelui instalației [7]. Sunt necesare cel puțin trei tabele în cazul considerării numai a planului de lucru. Această modalitate elimină însă avantajele oferite de modalitatea analitică descrisă anterior.

În figura 3 se prezintă pașii principali ai unui program de calcul al raportului direct și al factorilor de utilizare.

