

A RATIONAL PROCEDURE FOR DESIGNING OPTIMUM ROAD LIGHTING SYSTEMS

Luciano DI FRAIA, Professor

Department of Electrical Engineering, University of Naples "Federico II"

Via Claudio, 21 - 80125 Naples – ITALY

Tel. & Fax: 0039 081 7611957 - e-mail: difraia@unina.it

Abstract

After a critical analysis of the drawbacks of current design methods, a basic procedure to design economically optimized road lighting systems is suggested.

Keywords

Lighting optimization

1. Introduction

Current procedures for designing lighting installations for roads and the relevant maintenance programmes appear to be approximate and unsuitable for the economic optimization of the design. In this paper, a more rational design approach, providing the basis for a true optimization, is presented.

Some expressions used in this paper have the following meanings:

- *optimum design solution*: means the solution *exactly* meeting the design maintained photometric requirements at the *minimum* overall annual cost;
- *best maintenance schedule*: schedule providing a given maintenance factor at the *lowest* annual maintenance cost;
- *optimum maintenance schedule*: schedule associated to the *optimum* design solution, i. e. the schedule providing the *optimum* compromise between the annual initial and energy costs and the annual maintenance cost.

2. Drawbacks of current design procedures

2.1 Luminance yield factor method

A traditional procedure for designing the lighting installation of a straight road of infinite length, for a fixed observer position, is based on the use of the luminance yield curves in conjunction with the following formula:

$$L_{av} = \eta_L \cdot Q_O \cdot \phi \cdot MF / (w \cdot s) \quad (1)$$

where:

L_{av} : design maintained average luminance on the road surface (cd/m^2);

η_L : luminance yield factor; for a given road width, it is a function of: mounting height, h , overhang, b , and tilt angle, t , of the luminaire;

Q_O : average luminance coefficient ($\text{cd/m}^2/\text{lx}$)

ϕ : rated lamp lumen output (lm);

MF : maintenance factor of the installation;

w : width of the road (m);

s : spacing between the luminaires (m).

In practice, given the lamp luminaire and pole arrangement, this procedure consists of the following steps:

1. Select a maintenance programme
2. Calculate the corresponding MF
3. Fix h , b and t and read the value for η_L from the η_L curves given by the luminaire manufacturer.
4. Calculate s from Eq. (1).
5. If the lighting configuration so derived does not meet one or more of the uniformity (U_o , U_l) and glare (G , TI) requirements, repeat steps 3 and 4 for a different value for h (or b or t).

One drawback of this method results from the fact that the value for the variable parameters (h , b , t) are fixed at random, e.g. without a precise logic.

As a consequence, this can lead to a luminance level well higher than the design value strictly

required. Obviously, this overdesign conflicts with the concept of optimum.

Another drawback is that the current procedures for determining an economic maintenance programme, such as those suggested by CIE for interiors [1] and by IES [2], are based on trials and do not consider the fact that the factors involved are interdependent and the fact that a same maintenance factor can be provided by a large number of different maintenance schedules with different costs. Therefore, as shown in more details elsewhere [3], such procedures are inadequate to find optimum maintenance schedules.

2.2 Computer method

When using a software for design calculations, generally the procedure consists of fixing a value for MF and assuming a certain lighting configuration. Then, the computer program calculates the luminance and the other four photometric parameters. If one of them does not meet the minimum design requirements, a new lighting configuration is input and so on.

Also this procedure generally presents the above drawbacks associated to the yield factor method. Today, there exist some computer programs which automatically determine solutions complying with the design requirements. However, they investigate only one parameter, usually the spacing, all the others having to be fixed by the operator.

3. Proposed approach

A new design approach, overcoming the above drawbacks and offering the basis for an economic optimization of the design of a road lighting installation, is briefly described. It can be used with both the yield factor formula and a computer program.

3.1 Yield factor method

Given the design maintained luminance, the luminaire and the lamp types and the pole arrangement, from Eq. (1) results:

$$\eta_L \cdot MF / s = \text{constant} \quad (2)$$

The proposed procedure consists of the following steps:

1. Fix initial values for b and t (for example, $b=0$, $t=0$). As a result, η_L will depend only on h .
2. Fix an initial and high value for MF (for example, $MF = 0.80$). Then, Eq. (2) becomes:

$$\eta_L / s = \text{const} \quad (3)$$
3. Starting from an as high as possible value for s , use Eq. (3) and the yield luminance curves to obtain values for s and h , and select the first pair meeting the uniformity and glare requirements.
4. Determine the best maintenance schedule providing the MF value fixed in step 2.
5. Calculate the overall annual cost associated to the lighting configuration and to the best maintenance schedule so determined.
6. Repeat the procedure from step 1 to 5 for decreasing values for MF (e.g. $MF=0.75$ and below).
7. From the combinations lighting system/maintenance schedule so obtained, select the most economical: that is the *optimum one*.
8. For a complete optimization, fix other values for b and t and repeat the procedure from step 1 to 7.

3.2 Computer method

This procedure is similar to that used with the yield factor method.

Steps:

1. Fix b and t and a high value for MF .
2. Starting from a high value for s , explore s/h combinations until they meet all the design requirements.

Steps from 3 to 8: see the yield factor method.

4. Cost/Benefit ratio

Among the figures of merit currently used to evaluate various design options, a reliable one appears to be that based on the cost of the *actual* maintained luminance delivered.

However, seems to this writer that a still more rational figure is that based on the *design* maintained luminance

$$C/(T \cdot L_d),$$

where

C is the overall cost of the lighting system over the time interval T ;

T - group relamping interval (in equi-interval strategy)

L_d - design maintained luminance level.

This figure of merit implies that no value is given to the part of maintained luminance exceeding the design maintained value.

6. Problems associated to the proposed procedure

The proposed procedure involves the resolution of two problems.

The first one is that the determination of the optimum equi-interval maintenance schedule requires to identify the maintenance schedules providing a given value for MF . These can be many and many; in some cases, their number tends to be ∞ . Furthermore, this investigation is to be repeated for each of the MF values considered.

To quickly and rigorously solve this problem, a special computer program was developed by this writer [4]. This program virtually finds out automatically the most economic equi-interval maintenance schedule among all those providing a same desired MF .

Its input data are:

- unit maintenance costs;
- lamp lumen maintenance factor ($LLMF$)
- lamp survival maintenance factor (LSF)
- luminaire maintenance factor (LMF), as a function of air pollution.

The second problem is that, finding out the optimum design solution, requires to explore a very large number (several thousands) of combinations in terms of spacing, mounting height, tilt angle, overhang, luminaire arrangement and maintenance factor. A computer program capable of automatically

performing this optimization process was recently developed [5].

Conclusion

Current methods to design road lighting systems are affected from drawbacks which make difficult to optimize the design of a road lighting installation.

The procedure presented in this paper offers the basis for a reliable optimization.

From comparison with lighting installations designed by traditional procedures, it resulted that the proposed approach can yield cost and energy savings even greater than 50%.

References

- [1] Illuminating Engineering Society of North America: "*Lighting Handbook - Application Volume*" p.2-51, 1987
- [2] Commission Internationale de l'Eclairage: "*Maintenance of indoor electric lighting systems*", CIE 97- 1992
- [3] Di Fraia L. "*A rigorous procedure for optimization of equi-interval maintenance schedules*", Proceedings of the CIBSE National Lighting Conference, 1994
- [4] Di Fraia L. "*Ottimizzazione automatica dei programmi di manutenzione per impianti di illuminazione stradale*" Atti della 1^a Conferenza sulle Applicazioni delle Tecniche di Intelligenza Artificiale in Ingegneria, Napoli, 1994
- [5] Di Fraia L. "*Automatic design of optimised road lighting system*" Proceeding of the CIE Seminar on Computer Program for Light and Lighting, Wien, 1992

O PROCEDURĂ RAȚIONALĂ DE PROIECTARE A SISTEMELOR DE ILUMINAT STRADAL OPTIME

Rezumat

După o analiză critică a neajunsurilor metodelor actuale de proiectare, este sugerată o procedură de bază pentru proiectarea sistemelor de iluminat stradal, optimizată economic.

1. Introducere

Procedurile curente folosite în proiectarea instalațiilor de iluminat stradal și programe de întreținere relevante par să fie aproximative și nepotrivite optimizarea economică a proiectării. În această lucrare este prezentată o abordare mai

rațională a proiectării, asigurând baza pentru o optimizare reală.

Expresiile folosite în această lucrare au următoarele semnificație:

- soluție optimă de proiectare: soluție ce satisface exact cerințele fotometrice de proiectare, cu un cost total anual minim;
- cel ai bun program de întreținere: program ce asigură factorul de întreținere dat la cel mai scăzut cost de întreținere anual;
- program optim de întreținere: program asociat soluției optime de proiectare, de ex. programule asigură echilibrul optim între costurile inițiale anuale și energetice și costul anual de întreținere.

2. Neajunsurile procedurilor de proiectare curente

2.1. Metoda factorului de luminanță

O procedură tradițională de proiectare a instalațiilor de iluminat a străzilor de lungimi infinite, pentru o poziție fixă a observatorului, se bazează pe folosirea curbelor de luminanță în concordanță cu relația:

$$L_{av} = \eta_L \cdot Q_O \cdot \phi \cdot MF / (w \cdot s) \quad (1)$$

unde:

L_{av} : luminanța medie întreținută pe suprafața străzii proiectată (cd/m^2);

η_L : factorul de luminanță, pentru o stradă îngustă dată; este funcție de înălțimea de montaj, h , brațul, b , unghiul de înclinare a corpului de iluminat, t ;

Q_O : coeficientul luminanței medii ($\text{cd}/\text{m}^2/\text{lx}$)

ϕ : flux luminos al lămpii (lm);

MF : factor de întreținere al instalației;

w : lățimea străzii (m);

s : distanța dintre corpurile de iluminat (m).

În practică, fiind cunoscute corpul de iluminat și aranjarea stâlpilor, această procedură constă din următoarele etape:

1. Selectarea programului de întreținere
2. Calcularea MF corespunzător
3. Fixarea h , b și t și citirea valorii lui η_L din curbele η_L , date de fabricantul corpului de iluminat
4. Calcularea lui s din ec. (1)
5. Dacă configurația instalației astfel calculată nu îndeplinește condițiile de uniformitate (U_o , U_I) și orbire (G , TI), se vor repeta pașii

3 și 4 pentru diferite valori ale lui h (sau b sau t).

Un neajuns al rezultatelor acestei metode obținut din faptul că valorile parametrilor variabili (h , b , t) sunt fixate la întâmplare, de ex. fără o logică precisă.

Ca și consecință, aceasta poate duce la un nivel de luminanță mult mai mare decât valoarea strictă cerută de proiect. Desigur, această depășire a proiectului intră în conflict cu conceptul de optimizare.

Un alt dezavantaj este că procedurile actuale pentru determinarea unui program de întreținere economică, cum ar fi sugestiile CIE pentru interioare [1] și IES [2] se bazează pe încercări și nu iau în considerare faptul că factorii implicați sunt interdependenți și de faptul că același factor de întreținere poate dat de un număr mare de programe de întreținere cu costuri diferite. De aceea, cum este prezentat mai pe larg în alte lucrări [3], asemenea proceduri sunt inadecvate pentru găsirea unor programe de întreținere optime.

2.2. Metoda computerizată

Când utilizăm un software pentru calculele de proiectare, în general procedura constă în fixarea valorii MF și asumarea unei configurații de iluminat. Apoi, programul de calcul calculează luminanța și ceilalți patru parametri fotometrici. Dacă unul dintre aceștia nu îndeplinește minimum cerințelor de proiectare, se impune alegerea unei noi configurații și o nouă calculare.

De asemenea, aceasta procedură prezintă în general dezavantajele de mai sus, asociate metodei factorului de luminanță.

În prezent, există câteva programe de calcul care determină automat soluțiile ce îndeplinesc cerințele de proiectare. Totuși, ele analizează doar un parametru, de obicei distanța, iar toți ceilalți sunt fixați de operator.

3. Modul de abordare propus

Descriem pe scurt o nouă abordare a proiectării, care să suplinească neajunsurile de mai sus și care să ofere baza unei optimizări economice a unei instalații de iluminat stradal.

Poate fi folosită atât cu formula factorului de luminanță cât și cu un program de calcul.

3.1 Metoda factorului de luminanță

Fiind date luminanța întreținută, tipul corpului de iluminat, tipul lămpii și aranjarea stâlpilor, din ec. (1) rezultă:

$$\eta_L MF/s = \text{constant} \quad (2)$$

Procedura propusă constă în următorii pași:

1. Fixarea valorilor inițiale pentru b și t (de ex. $b=0, t=0$). Rezultă că η_L va depinde doar de h .
2. Fixarea unei valori mari inițiale pentru MF (de ex. $MF=0,80$). Ecuația (2) devine:
$$\eta_L/s = \text{const} \quad (3)$$
3. Pornind de la o valoare cât de mare posibilă pentru s , se folosește ecuația (3) și curbele de luminanță pentru a obține valorile s și h , apoi se selectează prima pereche care îndeplinește condițiile de uniformitate și de orbire.
4. Determinarea celui mai bun orar de întreținere conform valorii MF fixate la punctul 2
5. Calcularea costului anual total asociat configurației iluminatului și programului de întreținere determinat
6. Repetarea procedurilor de la punctul 1 la 5 pentru valori descrescătoare ale MF (ex. $MF=0,75$ sau mai jos)
7. Selectarea celei mai economice combinație a sistemului de iluminat și programul de întreținere obținute astfel: aceasta este soluția optimă
8. Pentru o optimizare completă, se fixează alte valori pentru b și t și se repetă procedurile de la punctul 1 la 7.

3.2. Metoda computerizată

Această procedură este similară cu cea folosită la metoda factorului de luminanță.

Etapele:

1. Fixarea valorilor b și t și o valoare mare pentru MF
2. Pornind de la o valoare mare pentru s , se încearcă combinațiile s/h până când vor îndeplini toate cerințele de proiectare.

Etapele 3-8: vezi metoda factorului de luminanță.

4. Raportul Cost/Beneficiu

Printre soluțiile care sunt utilizate acum pentru evaluarea diferitelor opțiuni de proiectare, o metoda sigură pare a fi cea bazată pe costurile luminozității menținute rezultată. În orice caz, autorul consideră că o posibilitate mai rațională e cea bazată pe proiectarea luminanței întreținute:

$$C / (T \cdot Ld)$$

unde:

- C : costul total al sistemului de iluminat în intervalul de timp T ;
- T : intervalul de timp pentru schimbarea în grup (în strategia echi-interval);
- Ld : nivelul de luminanță întreținută proiectată.

Această soluție consideră că nu se cunoaște valoarea părții din luminanța întreținută care depășește valoarea întreținută proiectată.

5. Probleme asociate procedurii propuse

Procedura propusă implică rezolvarea a două probleme.

Prima este că determinarea programului de întreținere equi-interval optim necesită identificarea programelor de întreținere corespunzătoare unei valori date a MF . Acestea pot fi foarte multe, în unele cazuri numărul lor tinde spre infinit. Mai mult, aceste investigații trebuie repetate pentru fiecare din valorile MF considerate.

Pentru a rezolva repede și bine această problemă, autorul a realizat un program de calcul special [4]. Acest program găsește automat cea mai economică programare a întreținerii equi-interval dintre toate programele pentru o valoare MF dorită.

Date de intrare sunt:

- Costurile de întreținere unitare
- Factorul de întreținere a luminozității lămpii ($LLMF$)
- Factorul de întreținere a supraviețuirii lămpii (LSF)
- Factorul de întreținere a lămpii (LMF), ca funcție de poluarea aerului

A doua problemă este aceea că după găsirea soluției optime de proiectare este necesară explorarea unui număr foarte mare (câteva mii) de combinații în ceea ce privește spațierea, înălțimea de montare, unghiul de atârănare, aranjamentul lampilor și factorul de întreținere. Recent a fost realizat un program capabil să realizeze automat acest proces de optimizare.

6. Concluzie

Metodele actuale de proiectare a sistemelor de iluminat stradal sunt afectate de neajunsurile care fac dificilă optimizarea proiectării instalațiilor de iluminat.

Procedura prezentată în această lucrare oferă baza pentru o optimizare corectă și sigură. Din compararea cu metodele tradiționale de proiectare a instalațiilor de iluminat rezultă că abordarea propusă poate duce la economii de energie și de cost chiar mai mari de 50%.