

ANEXO V: MÉTODO DE LOS NUEVE PUNTOS

1. Explicación del Método

Con este método se calcula la iluminancia horizontal media en una calzada, mediante una media ponderada, más exacta que una media aritmética, obteniéndose así mismo las uniformidades media y extrema y media.

En la figura se ha representado una calzada cuya anchura es A , iluminada mediante implantación unilateral con una interdistancia entre puntos de luz igual a d .

A la mitad de la separación entre dos puntos de luz se ha situado los nueve puntos P_1 , P_2 ,..... P_9 , tal y como se indica en la figura.

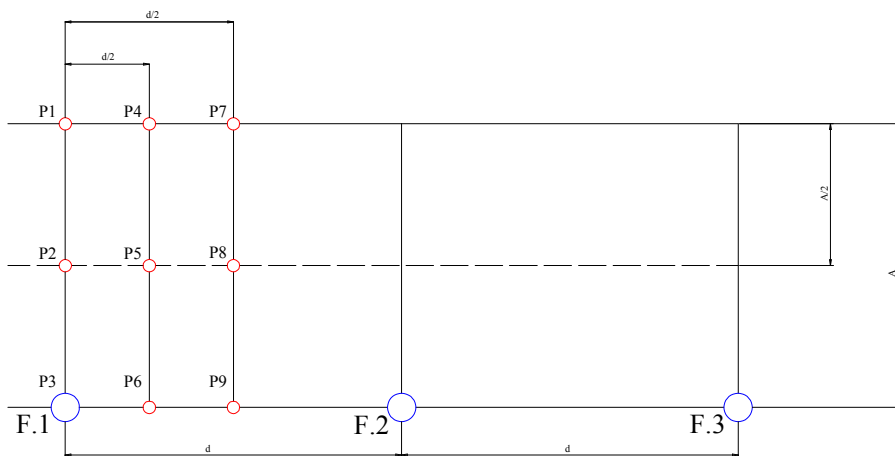


Figura 1.

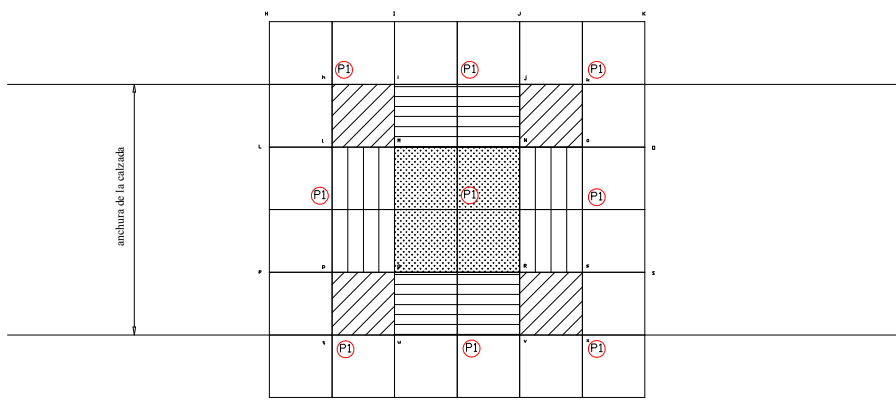
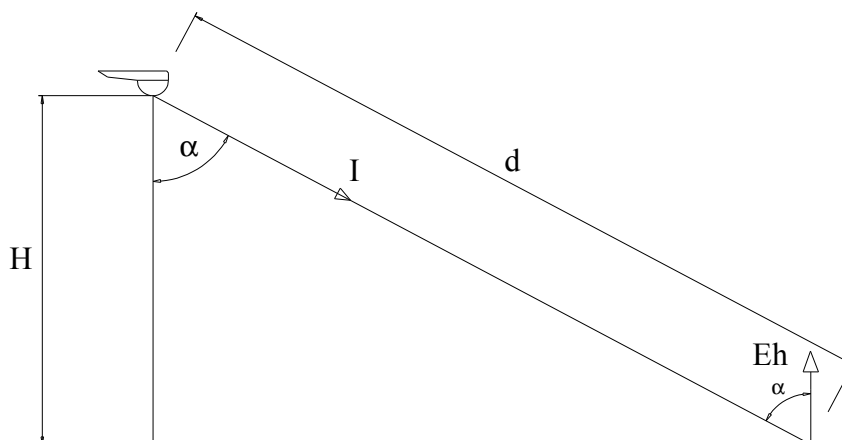


Figura 2

Generalizando la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, se puede hablar además de la iluminación normal E_n , también de la iluminación horizontal E_h e iluminación vertical E_v .



$$E_N = \frac{I_\alpha}{d^2} \quad E_V = \frac{I_\alpha}{d^2} \sin \alpha \cos^2 \alpha \quad E_H = \frac{I_\alpha}{d^2} \cos \alpha$$

Las intensidades luminosas a emplear en el cálculo de las iluminancias de los diversos puntos de la carretera, vendrán definidas por el plano C donde están contenidas las respectivas I_α , y por el ángulo γ que forman con el eje Z.

Para determinar I_α se recurre a la matriz de intensidades, que es una tabla de doble entrada (C- γ).

Una vez calculada las iluminancias de los nueve puntos, el cálculo de la iluminancia media se realizará de la siguiente manera.

Los nueve puntos son el centro de las siguientes superficies iguales entre sí y cuya área unitaria es S (figura 2):

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| P ₁ centro del área HILM | P ₅ centro del área MNQR |
| P ₂ centro del área LMPQ | P ₆ centro del área QRUV |
| P ₃ centro del área PQTU | P ₇ centro del área JKNO |
| P ₄ centro del área IJMN | P ₈ centro del área NORS |
| | P ₉ centro del área RSVX |

La iluminancia media del área repetitiva se deduce mediante la expresión: $E_m = \Phi/S$ siendo el flujo que se proyecta sobre la superficie S.

Pero hay que tener en cuenta que se trata de calcular la iluminancia de la calzada objeto de estudio, es decir, el área encerrada por los nueve puntos, que en la figura 2 viene representada por el área h k t x. Cada área unitaria que corresponde a cada punto ya no es igual, verificándose: $\Phi_1 = E_1 S_1, \Phi_2 = E_2 S_2, \dots, \Phi_9 = E_9 S_9$

Considerando las áreas por separado, se tendrá que la iluminancia media de la calzada objeto de estudio será:

$$E_m = \frac{E_1 S_1 + E_2 S_2 + E_3 S_3 + E_4 S_4 + E_5 S_5 + E_6 S_6 + E_7 S_7 + E_8 S_8 + E_9 S_9}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9}$$

Pero en la figura 2 se puede comprobar que:

S_1 = área hilM , S_2 = área IMpQ ,..... S_9 = área Rsvx.

De tal forma se verifica que:

$S_2 = S_4 = S_6 = S_8 = 2 S_1$; $S_3 = S_7 = S_9 = S_1$; $S_5 = 4 S_1$;

Valores que sustituidos en la expresión anterior, nos da la siguiente relación:

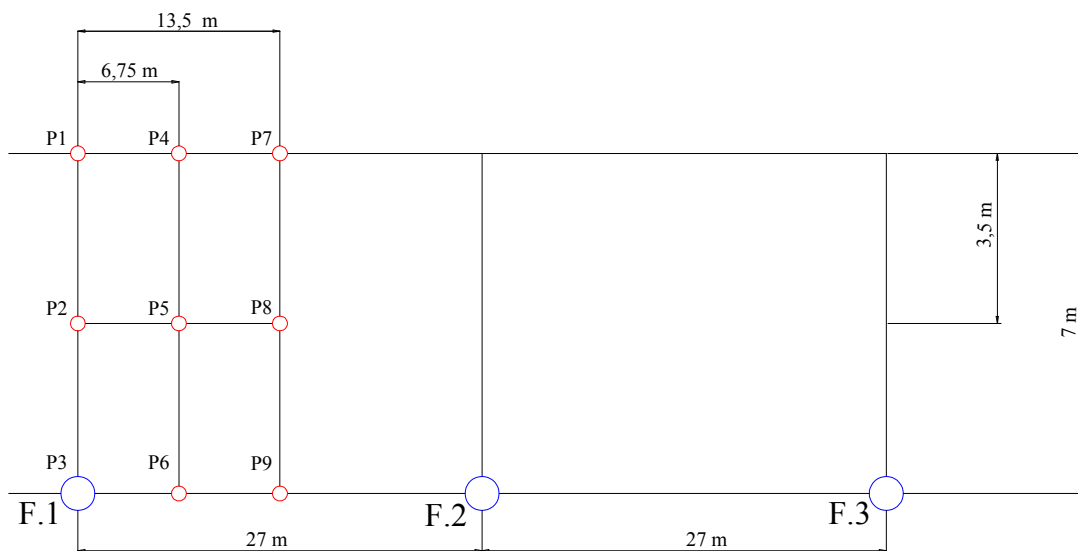
$$E_m = \frac{(E_1 + E_3 + E_7 + E_9) + 2(E_2 + E_4 + E_6 + E_8) + 4E_5}{16}$$

2. Ejemplo Vial II

Altura: $H = 9 \text{ m}$

Potencia: 150 W

Luminaria: IVH-1 V.S.A.P



E1: Iluminancia P1Efecto de F1 sobre P1

$$C = 90; \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{7}{9} = 37,87$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades se obtiene:

$$I_{\alpha} = 219,76 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 219,76 \cdot 15 = 3296,4 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{3296,4}{9^2} \cos^3 37,87 = 20,019 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P1

$$C = \tan^{-1} \frac{7}{27} = 14,53 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{27,89}{9} = 72,11 \rightarrow 72,5$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 240,078 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 240,078 \cdot 15 = 3601,17 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{3601,17}{9^2} \cos^3 72,11 = 1,288 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 20,019 + 1,288 = 21,30 \text{ lux}$

E2: Iluminancia P2Efecto de F1 sobre P2

$$C = 90; \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{3,5}{9} = 21,25$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades se obtiene:

$$I_{\alpha} = 287 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 287 \cdot 15 = 4305 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{4305}{9^2} \cos^3 21,25 = 43,027 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P2

$$C = \tan^{-1} \frac{3,5}{27} = 7,38 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{27,22}{9} = 71,7$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 159,19 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 159,19 \cdot 15 = 2387,85 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{2387,85}{9^2} \cos^3 71,7 = 0,9125 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 43,027 + 0,9125 = 43,94 \text{ lux}$

E3: Iluminancia P3Efecto de F1 sobre P3

$$C = 90; \quad \gamma = 0$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades se obtiene:

$$I_{\alpha} = 153 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 153 \cdot 15 = 2295 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{2295}{9^2} \cos^3 0 = 28,33 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P3

$$C = 0 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{27}{9} = 71,56$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 48,512 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 48,512 \cdot 15 = 727,68 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{727,68}{9^2} \cos^3 71,56 = 0,2843 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 28,33 + 0,2843 = 28,617 \text{ lux}$

E4: Iluminancia P4Efecto de F1 sobre P4

$$C = \tan^{-1} \frac{7}{6,75} = 46,04 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{9,724}{9} = 47,21 \rightarrow 47,5$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades se obtiene:

$$I_{\alpha} = 241,62 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 241,62 \cdot 15 = 3624,3 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{3624,3}{9^2} \cos^3 47,21 = 14,0265 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P4

$$C = \tan^{-1} \frac{7}{20,25} = 19,07 \rightarrow 20 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{21,42}{9} = 67,2 \rightarrow 67,5$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 412 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 412 \cdot 15 = 6180 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{6180}{9^2} \cos^3 67,2 = 4,4398 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será:

$$E_{Htotal} = 14,0265 + 4,4398 = 18,466 \text{ lux}$$

E5: Iluminancia P5Efecto de F1 sobre P5

$$C = \tan^{-1} \frac{3,5}{6,75} = 27,4 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{7,603}{9} = 40,19 \rightarrow 40$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 276,48 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 276,48 \cdot 15 = 4147,2 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{4147,2}{9^2} \cos^3 40,19 = 22,824 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P5

$$C = \tan^{-1} \frac{3,5}{20,25} = 9,8 \rightarrow 10 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{20,55}{9} = 66,3$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 276,4 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 276,4 \cdot 15 = 4146 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{4146}{9^2} \cos^3 66,3 = 3,3239 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será:

$$E_{Htotal} = 22,824 + 3,3239 = 26,1479 \text{ lux}$$

E6: Iluminancia P6Efecto de F1 sobre P6

$$C = 0 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{6,75}{9} = 36,86$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 139,652 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 139,652 \cdot 15 = 2094,78 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{2094,78}{9^2} \cos^3 36,86 = 13,246 \text{ lux}$$

Efecto de F2 sobre P6

$$C = 0 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{20,25}{9} = 66,037$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 84,53 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 84,53 \cdot 15 = 1267,95 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{1267,95}{9^2} \cos^3 66,037 = 1,048 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 13,246 + 1,048 = 14,2947 \text{ lux}$

E7: Iluminancia P7Efecto de F1 sobre P7

$$C = \tan^{-1} \frac{7}{13,5} = 27,4 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{15,2}{9} = 59,38 \rightarrow 60$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 478,72 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 478,72 \cdot 15 = 7180,8 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{7180,8}{9^2} \cos^3 59,38 = 11,714 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 2 \cdot 11,714 = 23,428 \text{ lux}$

E8: Iluminancia P8Efecto de F1 sobre P8

$$C = \tan^{-1} \frac{3,5}{13,5} = 14,53 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{13,946}{9} = 57,16 \rightarrow 57,5$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 396,856 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 396,856 \cdot 15 = 5952,84 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{5952,84}{9^2} \cos^3 57,16 = 11,87 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 2 \cdot 11,87 = 23,74 \text{ lux}$

E9: Iluminancia P9Efecto de F1 sobre P9

$$C = 0 \quad \gamma = \tan^{-1} \frac{13,5}{9} = 56,3$$

Entrando con dichos valores en la matriz de intensidades e interpolando se obtiene:

$$I_{\alpha} = 127 \text{ para un flujo luminoso de } 1000 \text{ lm}$$

Y puesto que el flujo de la luminaria es de 15.000 lm se obtiene:

$$I_{\alpha} = 127 \cdot 15 = 1905 \text{ cd}$$

Y la Iluminancia será:

$$E_H = \frac{I_{\alpha}}{d^2} \cos \alpha; \quad E_H = \frac{1905}{9^2} \cos^3 56,3 = 4,015 \text{ lux}$$

La Iluminación total en dicho punto será: $E_{Htotal} = 2 \cdot 4,015 = 8,03 \text{ lux}$

Iluminancia media

$$E_m = \frac{(E_1 + E_3 + E_7 + E_9) + 2(E_2 + E_4 + E_6 + E_8) + 4E_5}{16}$$

$$E_m = \frac{(21,30 + 28,617 + 23,428 + 8,03) + 2(43,94 + 18,466 + 14,2947 + 23,74) + 4 \cdot 26,1479}{16}$$

$$\boxed{E_m = 24,178 \text{ lux}}$$

Uniformidades

$$\text{Uniformidad media} = \frac{\text{Iluminación mínima}}{\text{Iluminación media}} \quad U_M = \frac{14,2947}{24,178} = 0,5912$$

$$\text{Uniformidad extrema} = \frac{\text{Iluminación mínima}}{\text{Iluminación máxima}} \quad U_{Ext} = \frac{14,2947}{24,178} = 0,325$$

Los valores de la iluminancia media y de las uniformidades obtenidos por el Método de los nueve puntos son muy aproximados a los resultados obtenidos con el programa Indalwin, quedando así demostrado que los valores del programa son correctos.

Sevilla, a 30 de enero de 2009

Autor del proyecto

Fco. Javier Álvarez Díaz