

## ILUMINACIÓN NATURAL CENTAL MEDIANTE DUCTOS DE SECCIÓN CUADRADA Y SUPERFICIE INTERIOR CUASIESPECULAR

J. J. Eliçabe Urriol<sup>1,2</sup>, H. A. Belluccia<sup>2</sup>, R. A. Seffino<sup>4</sup> y H. D. Navone<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR), Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina  
E-mail: elicabe@fceia.unr.edu.ar

<sup>3</sup> Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNR), 27 de Febrero 210 Bis, Rosario, Argentina

<sup>4</sup> Facultad Regional Rosario, Universidad Tecnológica Nacional, Rosario, Argentina

Recibido: 05-03-12; Aceptado: 03-05-12.

**RESUMEN.-** Se propone la utilización de ductos verticales de superficie interior cuasiespecular como un método alternativo de iluminación natural cenital de edificios y viviendas bajo condiciones de sombreado parcial. Utilizando un algoritmo basado en el método de Montecarlo se realizan comparaciones con técnicas tradicionales (lucernario, claraboya). Dos cantidades fundamentales son simuladas: heliofanía *in situ*, y los flujos de radiación solar que ingresan al edificio (ó vivienda) para una dada condición de incidencia de la radiación solar directa sobre las áreas de captación. Se exponen conclusiones preliminares.

**Palabras claves:** iluminación cenital, reflexión, radiación solar, heliofanía

## NATURAL ZENITH ILLUMINATION BY MEANS OF DUCTS OF SQUARE CROSS SECTION WITH QUASI-SPECULAR INNER SURFACE

**ABSTRACT .-**To improve the natural zenith illumination of buildings, under partial shadow as conditions, it is proposed the usage of vertical ducts with quasispecular inner surface, as an alternative method. Numerical comparisons with traditional techniques (skylights) are performed by using an algorithm which are based on the Montecarlo method. Two fundamental quantities are simulated: sunshine hours *in situ* and the solar radiation fluxes entering the buildings for a given *direct solar radiation* incidence on the capture areas. Preliminary conclusions are exposed.

**Keywords:** zenith illumination, reflection, solar radiation, sunshine hours.

### 1. INTRODUCCIÓN

La transmisión de radiación solar mediante ductos de paredes reflectantes, como estrategia de iluminación natural, permite llegar a zonas que están fuera del alcance de las técnicas tradicionales (básicamente, iluminación a través de elementos de cierre transparentes ó semitransparentes).

Entre las aplicaciones de evidente interés pueden señalarse las siguientes:

- Iluminación de un local profundo mediante ductos horizontales (Vázquez *et al.*, 1998).
- Hueco de iluminación-ventilación de un edificio, de pared interna especular (Eliçabe Urriol y Belluccia, 2010).
- Provisión de radiación fotosintéticamente activa a recintos para el crecimiento de vegetales.
- Utilización de un ducto para transmitir radiación solar a través de un ático.

Cabe agregar a estos usos la captación de radiación solar directa mediante un ducto vertical en reemplazo de una

claraboya o lucernario. Tal sustitución se vuelve atractiva en el caso de entornos urbanos de "alta densidad" ó, en general, cuando la cubierta del local a iluminar es sombreada varias horas al día por la presencia de obstáculos más o menos próximos.

Los ductos posibilitan una mayor altura de captación de radiación con el consecuente incremento del número de horas de radiación solar directa sobre el área de captación, efecto que puede pensarse como una ganancia de "heliofanía eficaz" (sección 2).

Sin embargo, es preciso considerar también la pérdida por absorción interna en el ducto, hecho que contrarresta la ventaja antedicha.

Por medio de simulaciones numéricas del proceso de reflexiones sucesivas en el interior de los ductos ó "lumiductos" (Eliçabe Urriol *et al.*, 2005) se busca establecer las condiciones que garanticen un beneficio neto en el caso de esta nueva aplicación.

Las simulaciones se han efectuado para sección cuadrada, geometría de uso frecuente en la construcción de lucernarios y claraboyas.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS

Con relación a la duración de la incidencia de la radiación solar directa se adoptan las definiciones que siguen:

- **Heliofanía local ( $H_l$ )** indica el número de horas de brillo solar medido por un instrumento del tipo Campbell-Stokes para una determinada localidad. Supone condiciones de horizonte despejado.
- **Heliofanía eficaz ( $H_e$ )** para una dada posición, es el número de horas de brillo solar observables desde dicha posición. Podría medirse mediante un heliógrafo colocado *in situ*.
- **Heliofanía relativa ( $H_{\%}$ )** expresa la fracción de horas de brillo solar *in situ*, dada por la relación  $H_{\%} = H_e / H_l$ .

En este trabajo los valores de  $H_l$  para condiciones de cielo claro son teóricos y no tienen en cuenta la sensibilidad de los instrumentos, cuyo umbral de registro es de unos  $120 \text{ W/m}^2$  (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2007).

Con respecto a la performance de los ductos para transmitir la radiación solar, se define la transmitancia de un ducto por la relación (Eliçabe Urriol *et al.*, 1987):

$$\tau = \Phi_b / \Phi$$

Donde  $\Phi_b$  es el flujo de radiación solar saliente por la base del ducto para un flujo de radiación solar ingresante  $\Phi$ .

## 3. SIMULACIONES NUMÉRICAS

Para efectuar las comparaciones numéricas entre la captación por ductos verticales y la convencional (por lucernarios, claraboyas, etc.) se ha asumido la latitud local de  $32.96^\circ$  y días de cielo claro, del equinoccio (casos 1, 2, 3 y 5) ó del solsticio de invierno (caso 4). Para determinar las transmitancias de los ductos se considera que la absorbancia en el rango solar del material reflectante es del 10%, y para la dispersión respecto de la reflexión especular se toma un valor  $3\sigma$  de  $15^\circ$ .

Los cálculos para la determinación de la heliofanía relativa se repiten cada media hora. Con igual intervalo temporal se simulan las pérdidas por absorción. La radiación directa incidente sobre el área de captación se calcula según el modelo de Hottel (Hottel, 1976), a nivel del mar.

La altura respecto a la cubierta de la construcción se indica con  $h$ ;  $h=0$  corresponde a un lucernario y  $h>0$  al extremo superior de un ducto de transmisión de luz.

Las transmitancias de las cubiertas de lucernarios y ductos se suponen iguales y no se han tenido en cuenta para los experimentos numéricos que siguen.

### 3.1 Caso 1.

Obstrucción: Pared de altura  $H=3.5\text{m}$ , que corre de este a oeste frente a la boca de captación, a una distancia  $d=2\text{m}$  al norte de la misma. La línea norte-sur pasante por el eje del ducto divide al muro en dos partes iguales, cada una de longitud  $a$  ( Fig. 1). Se tomó  $a=2\text{m}$ .

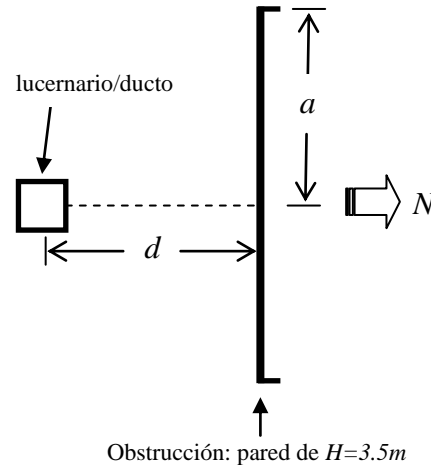


Fig. 1: Esquema en planta de un lucernario/ducto próximo a una pared que obstruye parcialmente la captación de radiación solar directa.

Tabla 1a: Caso 1. Variación con el tiempo solar  $t_s$  de los flujos de radiación por unidad de área ( $\text{W/m}^2$ ) suministrados por un lucernario ( $h=0\text{m}$ ) y ductos de altura de captación  $h=1\text{m}$  y  $h=2\text{m}$ ; para un día de cielo claro del equinoccio. La sección transversal de los ductos es de  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ , la semilongitud de la pared es  $a=2\text{m}$ .

$t_s(\text{hr})$	$h=0\text{m}$	$h=1\text{m}$	$h=2\text{m}$
0.0	0	599	510
0.5	0	572	477
1.0	0	539	434
1.5	0	481	376
2.0	564	423	321
2.5	497	353	258
3.0	420	286	189
3.5	334	207	130
4.0	243	134	73
4.5	154	66	31
5.0	75	22	9
5.5	22	3	1

Resultados: Se muestran en la Tabla I. Tanto la heliofanía eficaz como la ganancia de radiación solar mejoran significativamente para  $h=1$  y  $h=2$ .

Tabla 1b: Valores diarios de energía radiante entregada a través de la cubierta por unidad de área  $\Phi_{ba}$ , heliofanía eficaz ( $H_e$ ) y heliofanía relativa ( $H_{\%}$ ), para alturas de captación  $h=0\text{m}$ ,  $1\text{m}$  y  $2\text{m}$ , correspondientes a los respectivos valores horarios de la Tabla 1a.

$h$ (m)	$\Phi_{ba}$ ( $\text{MJ/m}^2$ )	$H_e$ (hr)	$H_{\%}$ (%)
0	7.28	8	66
1	12.17	12	100
2	9.18	12	100

3.2 Caso 2

Obstrucción: Pared de semilongitud  $a=3m$  (Fig. 1).

Resultados: Se muestran en la Tabla II. A nivel de la cubierta la incidencia de radiación es aún mas baja que en el caso anterior.

Tabla IIa: Caso 2. Variación con el tiempo solar  $t_s$  de los flujos de radiación por unidad de área ( $W/m^2$ ) suministrados por un lucernario ( $h=0m$ ) y ductos de altura de captación  $h=1m$  y  $h=2m$ ; para un día de cielo claro del equinoccio. La sección transversal de los ductos es de  $0.5 \times 0.5 m^2$ , la semilongitud de la pared es  $a=3m$ .

$t_s(hr)$	$h=0m$	$h=1m$	$h=2m$
0.0	0	599	510
0.5	0	572	477
1.0	0	539	434
1.5	0	481	376
2.0	0	423	321
2.5	0	353	258
3.0	420	286	189
3.5	334	207	130
4.0	243	134	73
4.5	154	66	31
5.0	75	22	9
5.5	22	3	1

Tabla IIb: Valores diarios de energía radiante entregada a través de la cubierta por unidad de área  $\Phi_{ba}$ , heliofanía eficaz ( $H_e$ ) y heliofanía relativa ( $H\%$ ), para alturas de captación  $h=0m$ ,  $1m$  y  $2m$ , correspondientes a los respectivos valores horarios de la Tabla IIa.

$h$ (m)	$\Phi_{ba}$ ( $MJ/m^2$ )	$H_e$ (hr)	$H\%$ (%)
0	3.72	6	50
1	12.17	12	100
2	9.18	12	100

3.3 Caso 3

Obstrucción: Pared de semilongitud  $a=3.5m$  (Fig. 1).

Resultados: Igual al caso anterior ( $a=3m$ ), dentro del error de discretización temporal.

3.4 Caso 4

Obstrucción: Semilongitud  $a=2m$ .

Resultados: Se muestran en la Tabla III para un día del solsticio de invierno (de cielo claro). Sólo con un ducto de altura  $h=2.5m$  puede captarse una cantidad apreciable de radiación solar directa.

3.5 Caso 5

Obstrucciones: Se consideró un punto de captación correspondiente a un lucernario instalado en la zona céntrica de la ciudad a  $7m$  de altura respecto de la calle. En la Tabla IV se dan los ángulos de obstrucción para un rango acimutal total centrado en la dirección norte, de  $220^\circ$  de amplitud.

Resultados: A nivel de la cubierta ( $h=0$ ) se obtuvo una heliofanía relativa del 80%. En este caso se requiere un elevado valor de  $h$  para aumentar la heliofanía relativa. Sin embargo, aún para  $h$  grande, la ganancia de energía no sería

relevante, dado que la interceptación de la radiación solar directa se produce para bajas altitudes solares.

Tabla IIIa: Caso 4. Variación con el tiempo solar  $t_s$  de los flujos de radiación por unidad de área ( $W/m^2$ ) suministrados por un lucernario ( $h=0m$ ) y ductos de altura de captación  $h=1m$  y  $h=2.5m$ ; para un día de cielo claro del solsticio de invierno. La sección transversal de los ductos es de  $0.5 \times 0.5 m^2$ .

$t_s(hr)$	$h=0m$	$h=1m$	$h=2.5m$
0.0	0	0	145
0.5	0	0	136
1.0	0	0	113
1.5	0	0	87
2.0	0	0	61
2.5	0	0	36
3.0	0	0	0
3.5	95	59	7
4.0	45	25	2
4.5	14	6	0
4.9	0	0	0

Tabla IIIb: Valores diarios de energía radiante entregada a través de la cubierta por unidad de área  $\Phi_{ba}$ , heliofanía eficaz ( $H_e$ ) y heliofanía relativa ( $H\%$ ), para alturas de captación  $h=0m$ ,  $1m$  y  $2.5m$ , correspondientes a los respectivos valores horarios de la Tabla IIIa.

$h$ (m)	$\Phi_{ba}$ ( $MJ/m^2$ )	$H_e$ (hr)	$H\%$ (%)
0	0.35	3	31
1	0.20	3	31
2.5	1.87	8	82

Tabla IV: Horizonte de obstáculos visto desde la posición de un lucernario ubicado sobre la cubierta de una construcción de  $7m$  de altura, en una zona de alta densidad edilicia de la ciudad de Rosario. El ángulo de obstrucción  $\alpha_o$  subtendido por cada obstáculo se indica para cada rango acimutal  $\Delta\gamma_o$  respecto de la dirección norte (este positivo).

$\Delta\gamma_o$ ( $^\circ$ )	$\alpha_o$ ( $^\circ$ )
-110, -90	43.7
-90, -82	7.6
-82, -75	1.2
-75, -60	14
-60, -52	6.7
-52, -45	14
-45, -40	8
-40, -30	9.7
-30, -21	2.5
-21, -7	15.9
-7, 0	43.3
0, 26.5	43.3
26.5, 35	15.3
35, 42	16.7
42, 60	4.8
60, 75	31
75, 80	12.5
80, 85	8.2
85, 89	2.9
89, 101	6.3
101, 110	6.8

#### 4. CONCLUSIONES

De los ejemplos presentados en la sección anterior resulta claro que la utilización de ductos de paredes reflectantes como elementos de iluminación natural cenital requiere del conocimiento previo de todos los obstáculos, lejanos ó próximos, que puedan interceptar la radiación solar directa; es decir, es preciso determinar en términos de ángulos de obstrucción, el horizonte “sensible” (ó “real”) que condiciona la captación de radiación. En el caso de objetos lejanos es fácil acceder a datos satelitales a los efectos de precisar dichos ángulos.

Pueden diferenciarse dos aspectos fundamentales a evaluar: (a) heliofanía eficaz y (b) flujo radiante ingresante al local a iluminar. El tipo de información geométrica descripto en el párrafo anterior permite obtener la heliofanía eficaz; y en caso de ductos de alta transmitancia (elevada reflectividad y especularidad internas, altura reducida respecto de un lado de la sección transversal) resulta suficiente para un análisis razonable. En general, hace falta también calcular la transmitancia de los ductos para estimar el flujo radiante, tal como se ha descripto en la sección 3.

#### REFERENCIAS

- Eliçabe Urriol, J.J., Lara, M. A. y Piacentini, R. D. (1987). Passive Solar Light-Ducts. *Applied Energy* **28**, 95-105.
- Eliçabe Urriol, J. J., Belluccia, H. A., Vital, M. B. y Navone H. D. (2005). Transmisión de radiación solar mediante ductos de sección rectangular y superficie interna cuasiespecular. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **16**, 15-20.
- Eliçabe Urriol, J. J. y Belluccia, H. A., (2010). Simulation of direct solar radiation transmission in a building well. *Nova Scientia* **5**, 3(1), 1-10.
- Grossi Gallegos, H. y Spreafichi, M. I. (2007). Análisis de las series de promedios anuales de heliofanía (duración de la insolación) en Uruguay. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **20**, 31-35.
- Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy* **18**, 129-134.
- Vázquez, J. A., Eliçabe Urriol, J. J. y Lara, M.A (1998). Optimización de la iluminación natural en locales profundos mediante lumiductos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **4**, 7-12.