

# Reflexión y refracción en componente de conducción de luz natural

*Rosalinda del V. González Gómez*

## Resumen

---

El objetivo del trabajo es analizar el fenómeno de reflexión y refracción de la luz a partir de la evaluación de una propuesta de Componente de Conducción de Luz Natural, que utiliza, una superficie interna reflectante en el elemento transmisor; y el agua como medio, en el elemento difusor. Para ello, se registraron niveles de iluminación en modelos a escala bajo condiciones de cielo real; y se compararon resultados, con los obtenidos en experiencias previas con otros dispositivos y los obtenidos a partir de cálculos. Los niveles de iluminación sobre el plano de trabajo se encuentran entre 1865 y 15314 lux; representando los valores promedios de iluminancia y flujo lumínico, obtenidos en cálculos, un 12% y 64% aproximadamente. El conocimiento del comportamiento de la luz ante las características de diferentes medios (opacos, transparentes, traslucidos), resulta de gran utilidad para caracterizar, describir, e interpretar fenómenos lumínicos presentes en el diseño de dispositivos.

Palabras clave: reflexión, refracción, Componente de Conducción de Luz Natural, luz natural.

\* Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia, [rosalindag2002@yahoo.es](mailto:rosalindag2002@yahoo.es)

## *Reflection and Refraction in the Conduction Component for Natural Light*

---

Abstract

The main purpose of this article is to analyze reflection and refraction phenomena of light based on assessment of a proposal for the conduction component of natural light, which uses a reflecting internal surface in the transmitter element and water as a medium in the diffuser element. Lighting levels were recorded on scale models under real sky conditions, comparing results obtained in previous experiences with other devices and those obtained from calculations. Lighting levels on the work plane are between 1865 and 15314 lux, representing average illuminance values and luminous flow obtained from calculations, producing 12% and 64%, approximately. Knowledge of light behavior influenced by the characteristics of different media (opaque, transparent, translucent) is very useful in order to characterize, describe and interpret light phenomena present in device design.

Keywords: reflection, refraction, natural light conduction component, natural light.

### Introducción

Existen diversas teorías que buscan explicar la naturaleza de la Luz: la teoría corpuscular (Isaac Newton), la teoría ondulatoria (Huygens), la teoría electromagnética (Maxwell), la teoría cuántica (Planck) y actualmente, se maneja la concepción, de la doble naturaleza de la luz (carácter dual). En esta última concepción, se considera que la misma, actúa como onda y como corpúsculo, pero no en forma simultánea; es decir, se propaga mediante ondas electromagnéticas, presentando fenómenos típicamente ondulatorios; pero en su interacción con la materia, en ciertos fenómenos de intercambio de energía, tiene carácter corpuscular (Bautista, 2008). La propagación rectilínea de la luz, la reflexión y la refracción (aspectos considerados en este trabajo), son explicadas mediante la teoría corpuscular; mientras que la interferencia y la difracción, son explicadas mediante la teoría ondulatoria.

La luz es capaz de viajar a través de la materia (medios) o en ausencia de la misma (vacío). Los medios, se clasifican de acuerdo a su comportamiento ante la luz en: opacos, traslucidos y transparentes; siendo su propagación a través de ellos, dependiente de sus características. En los medios traslúcidos, la luz se dispersa; mientras que en los transparentes (agua, vidrio, aire), la luz sigue en su interior trayectorias definidas, propagándose en línea recta cuando aparte de ser transparente el medio es homogéneo.

El objetivo de este trabajo es analizar el papel que juega la reflexión y la refracción de la luz a partir de la evaluación de un Componente de Conducción de Luz Natural, que combina ambas propiedades; la primera, a través del elemento transmisor (superficie interna reflectante), y la segunda, a través del elemento difusor (recipiente esférico de vidrio con agua). Para ello, se plantea:

- a. El análisis del comportamiento lumínico con base en los registros de iluminación obtenidos bajo condiciones de cielo real; estableciendo la comparación con los valores de iluminancia y de Factor de Luz Diurna (F.L.D.) determinados en normativa para actividad y/o espacio.
- b. Comparación de los resultados de iluminación y F.L.D. obtenidos con el dispositivo propuesto, con respecto a los resultados de los mismos parámetros, obtenidos en experiencias previas con Componentes de Conducción de Luz Natural y Botella Solar.
- c. Determinación del flujo luminoso de entrada, iluminancia media del local e intensidad luminosa, a partir del cálculo geométrico y trigonométrico del número de reflexiones a través del transmisor del conducto (Marín, 2012); lo que permitirá establecer comparaciones con otras formas de obtención de resultados.
- d. Análisis del fenómeno de refracción de la luz a partir de la Ley de Snell, lo que permitirá conocer el comportamiento del rayo de luz cuando atraviesa medios de distinta densidad.

La experiencia de investigación se llevó a cabo el día 29 de septiembre de 2014, en Maracaibo-Venezuela; basándose en experiencias previas de evaluación de Componentes de Conducción de Luz Natural (CCLN) y Botella Solar (BS) en modelos a escala, las cuales forman parte de una investigación titulada *“La iluminación natural como recurso sustentable en clima cálido – húmedo”*; teóricamente, se basa en estudios relacio-

dados con sistemas de transporte de luz natural, específicamente conductos de sol; así como también, con lo relacionado con el fenómeno de la luz y sus propiedades ópticas.

## Antecedentes

Previo a evaluar el dispositivo de conducción de luz natural presentado en este trabajo, se realizaron una serie de experiencias de monitoreo bajo condiciones de cielo real, utilizando modelos a escala con Componentes de Conducción de Luz Natural (CCLN) variando el tipo de difusor (acrílico punta diamante y vidrio claro); y modelos con botella solar. En ambos casos, se utilizaron superficies internas de diferente color. A continuación, se presenta un breve resumen, de los resultados más relevantes, considerados para la selección de las características del dispositivo a evaluar:

### 1.1. Experiencia con el Componente de Conducción de Luz Natural (CCLN)

Se procedió a evaluar en un modelo a escala la contribución de iluminación a través del CCLN utilizando dos modelos, uno con superficies internas negro mate y otro con superficies blanco mate; así mismo, para los dos tipos de difusores. Esta experiencia permitió establecer:

1. La contribución de iluminación en el espacio a través del dispositivo, utilizando difusor acrílico punta diamante y difusor vidrio claro; sin la componente de reflexión interna (superficies internas negro mate).
2. La contribución de la componente de reflexión interna en la iluminación del espacio (superficies internas blanco mate).

Con respecto al punto 1, el promedio de iluminación interior con el CCLN difusor acrílico punta diamante, para el día 22 de septiembre, fue de 923 lux; para esta fecha el tipo de cielo presente en la localidad al momento de las mediciones, correspondió en un 67%, a cielo nublado (5-7 octas de nubosidad), con un promedio de iluminación horizontal exterior de 67247 lux. Para el día 24 de septiembre, el promedio de iluminación con el mismo dispositivo fue de 1053 Lux; correspondiendo en un 89%, a un cielo con nubosidad parcial (3-4 octas de nubosidad) y una iluminación

horizontal exterior de 74456 lux. En ambos casos, la iluminación interior promedio representa un 1% aproximadamente de la iluminación horizontal exterior. El promedio de iluminación interior con el CCLN vidrio claro, para el día 27 de septiembre, fue de 4025 lux; correspondiendo en un 80%, a un cielo con nubosidad parcial (3-4 octas de nubosidad) y una iluminación horizontal exterior de 105800 lux; representando la iluminación natural interior un 4% aproximadamente de la iluminación horizontal exterior.

Con respecto al punto 2, se obtuvo a través del uso de superficies blanco mate y el CCLN difusor acrílico punta diamante, una contribución a la iluminación de un 48% (promedio) de la componente reflejada interna y con el CCLN vidrio claro, una contribución de un 49%.

## 1.2. Experiencia con la botella solar

Basados en la experiencia de la botella solar, llevada a cabo en distintos países por la fundación "My Shelter" (<http://sculptthefuturefoundation.org/portfolio/my-shelter-foundation-global-lighting-project/>), se procedió a evaluar la contribución de iluminación en el espacio a través de la misma. Para ello, se utilizaron dos modelos uno con superficies internas negro mate y otro con superficies blanco mate. Esta experiencia permitió establecer:

1. La contribución de iluminación natural en el espacio a través del dispositivo (superficies internas negro mate); estableciendo a posterior, la comparación con las bombillas incandescentes. Esto permitió, verificar el equivalente en vatios según la experiencia llevada a cabo por la Fundación "My Shelter" (entre 40 y 60 vatios).
2. La contribución de la componente de reflexión interna en la iluminación del espacio (superficies internas blanco mate).

Con respecto al punto 1, para las condiciones de cielo mencionadas, para el día 22 de septiembre, con una iluminación horizontal exterior promedio de 67247 lux, la iluminación interior obtenida en el modelo con botella solar equivale en un 44% aproximadamente a bombillas incandescentes de uso especial entre 15 y 25 vatios, en otro 44% a bombillas de uso común de 25 vatios, y en el porcentaje restante a bombillas de uso especial de 4 vatios. Para el día 23 de septiembre, el tipo de cielo presente en la localidad al mo-

mento de las mediciones, correspondió en un 56%, a cielo nublado (5-7 octas de nubosidad), y en un 45% a cielo cubierto; bajo estas condiciones, la iluminación obtenida equivale en un 67% a bombillas incandescentes de uso especial entre 4 y 15 vatios; alcanzándose hacia las 12:00 del mediodía, lo equivalente a una bombilla de 25 vatios (tabla 1 y 2).

TABLA 1. Resultados de Iluminación natural interior (Lux) obtenidos en los modelos con Botella Solar y superficies internas negro mate

Resultados de Iluminación natural interior (Lux) obtenidos en los modelos con Botella Solar y superficies internas Negro mate						
HORA	22 de Septiembre			23 de Septiembre		
	lext (Lux)	lint (Lux)	%	lext (Lux)	lint (Lux)	%
08:00 a.m.	66100	154	0,23	20930	12	0,05
09:00 a.m.	92600	248	0,27	33700	28	0,08
10:00 a.m.	84300	288	0,34	55800	67	0,12
11:00 a.m.	91400	382	0,42	72100	122	0,17
12:00 m.	47200	170	0,36	116300	241	0,21
01:00 p.m.	111900	445	0,40	38300	36	0,09
02:00 p.m.	42800	130	0,30	77800	75	0,10
03:00 p.m.	55400	170	0,31	53100	28	0,05
04:00 p.m.	13520	20	0,15	22660	4	0,02
Promedios	67247	223	0,31	54521	68	0,10

Fuente: Elaboración propia, 2014.

TABLA 2. Lúmenes de bombillas incandescentes según vatios

Bombilla incandescente (W)	Lumen
De uso especial	
4 W	16
10 W	82
15 W	110
25 W	172
De uso común	
25 W	260
40 W	490
60 W	820
75 W	1070
100 W	1560

Fuente: [http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/mx\\_es/connect/tools\\_literature/assets/pdfs/Catalogo\\_Philips\\_2010%20%284%29.pdf](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/mx_es/connect/tools_literature/assets/pdfs/Catalogo_Philips_2010%20%284%29.pdf)

Con respecto al punto 2, se obtuvo a través del uso de superficies blanco mate y el mismo dispositivo, una contribución a la iluminación de un 72% (promedio) de la componente reflejada interna; favorecido por la emisión luminosa producto de la penetración de la superficie de la botella (0.35 m-a la escala de trabajo-) hacia el interior del modelo.

Se observa que el nivel de iluminación interior obtenido a través de la botella solar bajo las condiciones señaladas, es bajo; sin embargo, resulta suficiente para "ver" dentro del espacio; es importante señalar, que no se alcanzó el nivel de iluminación equivalente a una bombilla entre 40 y 60 vatios.

En la tabla 3, se presenta el desempeño de los dispositivos evaluados, en función de otros parámetros cuyos resultados son producto de las distintas experiencias llevadas a cabo en modelos con CCLN y botella solar; y donde se observa:

El dispositivo que obtuvo mejor desempeño en cuanto al Factor de Luz Diurna (F.L.D.) y a los requerimientos de nivel lumínico para actividades según normativa fue el CCLN-DVC.

El mayor aporte de la componente de reflexión interna se logró a través de la combinación de la botella solar con superficies internas blanco mate; a pesar de tener el menor porcentaje de flujo lumínico de entrada al espacio.

El factor de uniformidad promedio sobre el plano de trabajo en todos los modelos con superficies blanco mate fue el mismo (superior a 0,6 correspondiente a trabajo fino según lo indicado en tabla 4).

De lo anteriormente expuesto, se desprenden las características del dispositivo a evaluar (propuesta): Cuerpo del CCLN de tubo de Cartón de 4 mm de espesor, diámetro 0.38 m. y longitud 1.14 m. (a la escala seleccionada) según la relación  $L/D = 3$ , con superficie interna reflectante (papel vinil cromado autoadhesivo); colector, de acrílico transparente de 3 mm de espesor; y difusor, un recipiente de vidrio transparente, de forma esférica, diámetro 0.45 m (a escala del modelo) con agua (figura 1 y 2).

El monitoreo se llevó a cabo bajo condiciones de cielo real, en el sector 18 de octubre, de la ciudad de Maracaibo, estado Zulia, el día 29 de septiembre de 2014. El dispositivo, se ubicó en el centro de la cubierta superior del modelo a escala, planteándose el registró simultáneo de la ilu-

TABLA 3. Desempeño de los dispositivos evaluados previamente antes de la propuesta.

<b>Desempeño de los dispositivos evaluados</b>							
Experiencia	Descripción	F.L.D. %	Nivel lumínico que abarca en normativa (lux)	% flujo de entrada	Distribución luminosa	Uniformidad (min/prom)	Componente Reflejada Interna (C.R.I.)
1	BS (sup.int. negro mate)	No alcanzó el nivel mínimo según normativa	20-300	4,52	Semi directa	0,7	-
	CCLN-DA(sup.int. negro mate)PD	Reducida -Mediana	20-1500	11,34	Directa	0,7	-
2 <sup>a</sup>	BS (sup.int. negro mate)	No alcanzó el nivel mínimo según normativa	20-200	4,52	Semi directa	0,6	-
	BS sup.int. blanco mate)	No alcanzó el nivel mínimo según normativa	20-300	4,52	Semi directa	0,7	72%
2 <sup>b</sup>	CCLN-DAPD (sup.int. negro mate)	Reducida - Mediana	20-3000	11,34	Directa	0,7	-
	CCLN-DAPD (sup.int. blanco mate)	Reducida - Mediana	20-3000	11,34	Directa	0,7	48%
3	AL (sup.int. negro mate)	Reducida - Mediana	20-1000	-	-	0,9	-
	CCLN-DAPD (sup.int. negro mate)	Reducida - Mediana	20-3000	11,34	Directa	0,6	-

TABLA 3 (Continuación)

## Desempeño de los dispositivos evaluados

Experiencia	Descripción	F.L.D. %	Nivel lumínico que abarca en normativa (lux)	% flujo de entrada	Distribución luminosa	Uniformidad (min/prom)	Componente Reflejada Interna (C.R.I.)
3	3 <sup>b</sup> AL (sup.int. negro mate)	Reducida - Mediana	20-1000	-	-	0,6	-
	BS (sup.int. negro mate)	No alcanzó el nivel mínimo según normativa	20-200	4,52	Semi directa	0,6	-
3 <sup>c</sup>	AL (sup.int. negro mate)	Reducida - Alta	20-20000	-	-	0,4	-
	SA	-	-	-	-	-	-
4	CCLN-DVC (sup.int. blanco mate)	Reducida - Alta	20-3000	11,34	Directa	0,7	49%
	CCLN-DVC (sup.int. negro mate)	Reducida - Alta	20-10000	11,34	Directa	0,4	-
5	CCLN-DVC (sup.int. blanco mate)	Reducida - muy alta	20-10000	11,34	Directa	0,7	-
	BS			Botella Solar			
	CCLN-DAPD			Componente de Conducción de Luz Natural Difusor Acrílico Punta Diamante			
	AL			Abertura lateral			
	CCLN-DVC			Componente de Conducción de Luz Natural Difusor Vidrio Claro			

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Tabla 4. Heterogeneidad del campo luminoso

<b>Factor de uniformidad sobre el plano de referencia</b>		
Normal	Trabajo fino	Iluminacion localizada
Mayor de 0,3	Mayor de 0,6	Mayor de 0,8

Fuente: acondicionamiento Natural y Arquitectura. Puppo, E.; Puppo, G. pp.111, 1971.

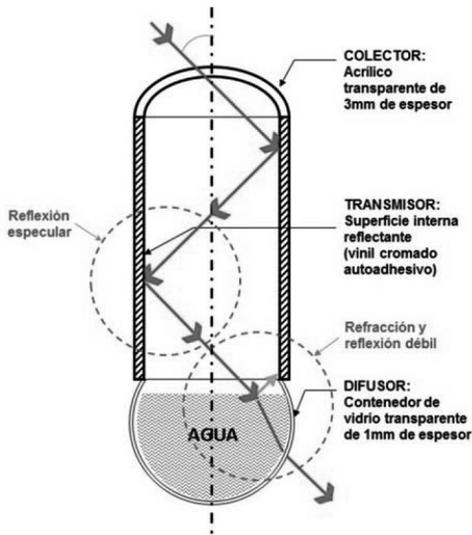


FIGURA 1. Propuesta de Componente de Conducción de Luz Natural  
 Fuente: Elaboración propia, 2014.

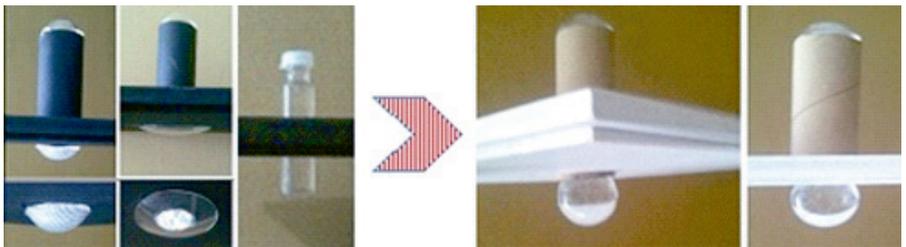


FIGURA 2. Componente de Conducción de Luz Natural evaluado  
 Fuente: Elaboración propia, 2014.

minación horizontal exterior y la iluminación natural interior horizontal y vertical; para lo cual, se utilizaron unos registradores de datos (HOBO datalogger) y un luxómetro digital T-10 Minolta (rango: 0.01-299.000 lux) (figura 3).

Para establecer la comparación se utilizó la tabla 5 con valores recomendados en norma IRAM-AADL j20-02 para el Factor de Luz Diurna promedio según la dificultad de la tarea (citado por Raitelli, 2006).



FIGURA 3. Ubicación del Componente de Conducción de Luz Natural evaluado y ubicación de dataloggers en el interior del modelo  
Fuente: Elaboración propia, 2014.

TABLA 5. Valores recomendados en norma IRAM-AADL j20-02 para el Coeficiente ó Factor de Luz Diurna promedio según la dificultad de la tarea

Clasificación de la tarea según su dificultad	F.L.D. promedio (%)	Ejemplos típicos de la norma IRAM-AADL j20-05
Reducida	1	Circulación, depósitos de materiales toscos, etc.
Mediana	2	Inspección general, trabajo común de oficina
Alta	5	Trabajos de costura, dibujo. etc.
Muy alta	10	Montaje e inspección de mecanismos delicados

(Citado por Raitelli, 2006).

Para establecer la comparación con niveles de iluminación según normativa, se utilizó lo indicado en la Norma Venezolana COVENIN 2249-93, en su artículo 4.1; el cual establece, tres niveles de iluminancia media en servicio para actividades y tareas visuales específicas y áreas de trabajo en condiciones normales (A, B y C). Los valores por encima del indicado como valor superior "C", suponen un derroche de energía y niveles por debajo del valor inferior "A", significan un desempeño visual menos eficiente. Los valores medios de la gama "B" corresponden a la iluminancia media en servicio recomendada de acuerdo a los requisitos visuales de la tarea, la experiencia práctica y la necesidad de una utilización eficaz de la energía (tabla 6).

TABLA 6. Tipos Generales de Actividad en Áreas Interiores  
 (Norma Venezolana)

Área o tipo de actividad	Iluminancia (LUX)			Tipo de iluminancia
	A	B	C	
1. Áreas públicas con alrededores	20	30	50	General en toda el área (G)
2. Simple orientación para visitas cortas periódicas	50	75	100	
3. Áreas de trabajo donde las tareas visuales se realizan solo ocasionalmente	100	150	200	
4. Realización de tareas visuales con objetos de tamaño grande o contraste elevado	200	300	500	Local en el área de la tarea (L)
5. Realización de tareas visuales con objetos de tamaño pequeño o contraste medio	500	750	1000	
6. Realización de tareas visuales con objetos de tamaño muy pequeño o contraste bajo	1000	1500	2000	

TABLA 6 (Continuación)

Área o tipo de actividad	Iluminancia (LUX)			Tipo de iluminancia
	A	B	C	
7. Realización de tareas visuales con objetos de tamaño muy pequeño y bajo contraste, por periodos prolongados	2000	3000	5000	Combinación de general y localizada sobre la tarea (G+L)
8. Realización de tareas visuales que requieren exactitud por periodos prolongados	5000	7500	10000	
9. Realización de tareas visuales muy especiales, con objetos de tamaño muy pequeño y contraste extremadamente bajo.	10000	15000	20000	

COVENIN 2249-93 (Iluminancias en tareas y áreas de trabajo), pág. 5.

## 2. Resultados

### 1.1. Análisis del comportamiento lumínico con base en los registros de iluminación obtenidos bajo condiciones de cielo real

Para esta fecha, el tipo de cielo presente en la localidad al momento de las mediciones, corresponde en un 75%, a un cielo con nubosidad parcial (3-4 octas de nubosidad) (Ver figura 4).

Los valores obtenidos del Factor de Luz Diurna (F.L.D.); el cual se establece, como la relación entre la iluminación interior (lux) y la iluminación horizontal exterior (lux) medidos en forma simultánea y expresado en

HORA	12:00 p.m.	12:36 p.m.	01:00 p.m.	01:36 p.m.
Iluminación Horizontal Exterior (Lux)	112900	108400	104200	101900
Condiciones del cielo (Observación directa)				

FIGURA 4. Condiciones del cielo para el 29 de Septiembre, 2014

Fuente: Elaboración propia, 2014.

porcentaje, se encuentran entre 1,83% y 13,56%, alcanzándose el nivel promedio para tareas de dificultad reducida y mediana en el período de 12:00 m. a 01:36 p.m.; siendo posible tareas de dificultad alta y muy alta al comienzo de las mediciones.

En relación a los niveles de iluminación obtenidos sobre el plano de trabajo (Figura 5), en el período de 12:00 m. a 01:36 p.m., los valores se encuentran entre 1865 lux y 15914 lux (promedio: 7423 lux); siendo posible las tareas y áreas de trabajo establecidas en la Norma COVENIN, en los puntos y de acuerdo a los niveles lumínicos indicados en: 1 (A, B,C), 2 (A,B,C), 3 (A,B,C), 4 (A,B,C), 5 (A,B,C), 6 (A,B,C), y 7(A,B); al comienzo de las mediciones, con una iluminación horizontal exterior entre 108400 lux y 112900 lux, se alcanzó el nivel para áreas de trabajo con mayor exigencia visual, 7 (C), 8 (A,B,C) y 9 (A,B).

2.2. Comparación de los resultados de iluminación y F.L.D. obtenidos con el dispositivo propuesto; con respecto a los resultados de los mismos parámetros, obtenidos en experiencias previas con CCLN y Botella Solar

Para establecer la comparación entre los distintos dispositivos, se seleccionaron los resultados obtenidos en el monitoreo con los modelos de superficies internas blanco mate, en el período horario entre 12:00 m. y 01:00 p.m., según la hora solar para cada una de las fechas (figura 6).

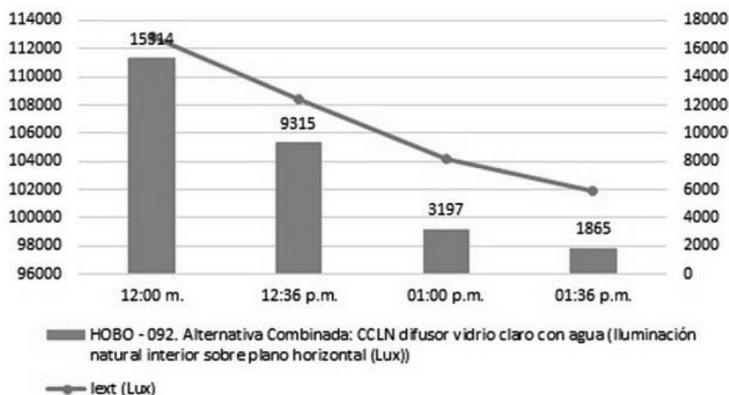


FIGURA 5. Resultados para el 29 de Septiembre, 2014  
Fuente: Elaboración propia, 2014.

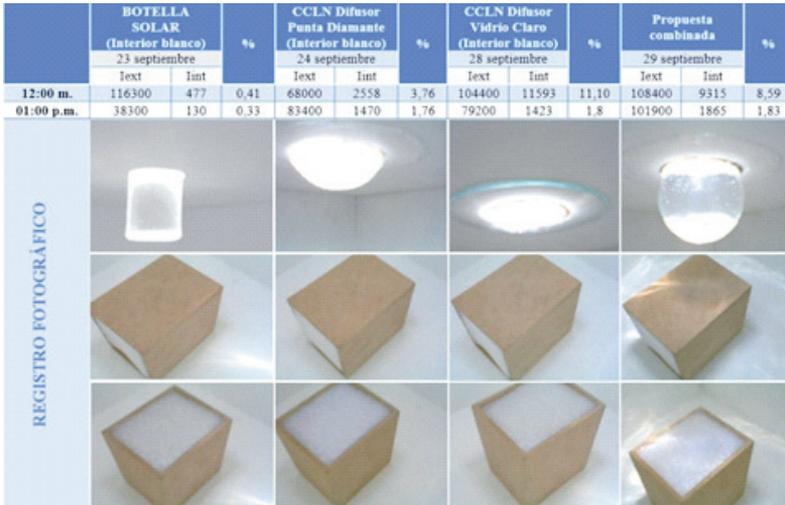


FIGURA 6. Comparación de resultados con experiencias previas  
 Fuente: Elaboración propia, 2014.

A las 12:00 m., el valor más alto de iluminancia horizontal exterior correspondió al día 23 de septiembre; sin embargo, los resultados obtenidos de iluminación interior con la BS resultaron los más bajos, representando solo un 5% de la iluminación obtenida a través del CCLN propuesto. Con el CCLN-DVC, se obtuvo el nivel de iluminación interior más alto, aproximadamente un 21% sobre el resultado del CCLN propuesto; a pesar de que el día 28 de septiembre a esa hora, la iluminancia horizontal exterior fue menor en un 4% (4000 lux) con respecto al día 29 de septiembre. En el caso del CCLN-DAPD, a las 12:00 m. el valor de iluminancia horizontal resultó muy bajo para establecer la comparación; sin embargo, con ese mismo dispositivo, a las 10:00 a.m. con una iluminancia horizontal exterior de 103900 lux, se obtuvo un valor de iluminación interior de 2054 lux, y a las 11:00 a.m., con una iluminación exterior de 113900 lux, se obtuvo una iluminación de 4971 lux; los cuales representan un 22% y un 53% del valor obtenido a través del CCLN propuesto.

A la 01:00 p.m., el valor de iluminación horizontal exterior para el día 23 de septiembre fue el más bajo; sin embargo, para una aproximación a los valores establecidos para la comparación, se consideraron los valores obtenidos a las 02:00 p.m. en el monitoreo con el mismo dispositivo, donde se obtuvo una iluminación horizontal exterior de 77800 lux, y

una iluminación interior de 264 lux; valores que siguen siendo muy bajos con respecto a los obtenidos con el CCLN propuesto. A esta misma hora, se observa que la iluminación interior obtenida en todos los CCLN representa un 1,8% (aproximadamente) de la iluminación horizontal exterior (F.L.D.), siendo el valor más alto el obtenido a través del CCLN-DVC a las 12:00 m.

En la figura 7, se presenta la comparación entre los distintos dispositivos de conducción de luz natural en relación al nivel de iluminación interior para las horas seleccionadas.

Es importante señalar que de acuerdo al registro fotográfico en el interior del modelo, la mayor uniformidad lumínica se observa en el modelo con CCLN-DAPD. Observándose, en los dispositivos con agua, ciertos efectos lumínicos (zonas de luz de mayor intensidad), los cuales, abarcaron mayor área en el CCLN-propuesto.

El resumen del desempeño del dispositivo propuesto, se observa en tabla 7.

2.3. Reflexión a través del elemento transmisor del CCLN propuesto (cálculo geométrico y trigonométrico del número de reflexiones).

La reflexión es el cambio en la dirección de un rayo de luz cuando este no logra traspasar la interfaz entre dos medios; la misma, se produce cuando un rayo choca contra una superficie formando un ángulo con la

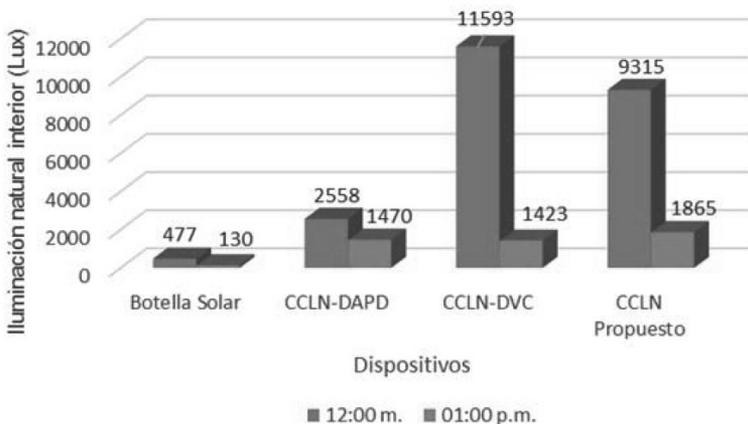


FIGURA 7. Comparación entre los dispositivos de conducción de luz natural  
 Fuente: Elaboración propia, 2014.

TABLA 7. Desempeño del dispositivo propuesto

Desempeño del dispositivo propuesto							
Experiencia	Descripción	F.L.D. %	Nivel lumínico que abarca en la normativa (lux)	% flujo de entrada	Distribución luminosa	Uniformidad (min/prom)	Componente reflejada interna (C.R.I.)
6	CCLN con difusor recipiente de vidrio con agua	Reducida – muy alta	20-15000	11,34	Directa	0,7	-

Fuente: Elaboración propia, 2014.

normal (ángulo de incidencia), y es rechazado en una dirección dada por el ángulo de reflexión (<http://www.astromia.com/glosario/reflexion.htm>). Dependiendo de la superficie donde incida el rayo de luz, la reflexión puede ser de dos tipos: especular o difusa. La primera, tiene lugar cuando la superficie reflectante está pulida (espejo), dando lugar a una reflexión dirigida; y la segunda, ocurre cuando la superficie es mate (Figura 8). Al respecto, se cumplen dos leyes básicas:

1era Ley: El rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano.

2da Ley: Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales:  $i = r$

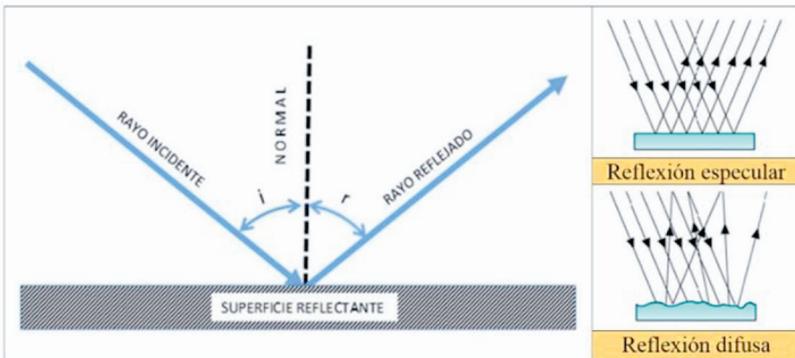


FIGURA 8. Reflexión de la Luz y tipos. Tomado de: [http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica\\_Aplicada/transparencias/05-Luz/18\\_-\\_reflexion\\_y\\_refraccion.pdf](http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica_Aplicada/transparencias/05-Luz/18_-_reflexion_y_refraccion.pdf) y [www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=138939](http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=138939)

Para lograr el máximo aprovechamiento de la luz hacia el interior de los espacios, utilizando conductos de sol o CCLN, es importante, la adecuada selección de superficies en cada una de sus partes constitutivas (elemento captador, transmisor y difusor); especialmente, la superficie de las paredes internas del elemento transmisor, a través del cual se logra la transmisión de la luz por reflexiones sucesivas o múltiples (figura 9). El estudio del número de reflexiones, permite predecir la Transmitancia de ductos (Urriol *et al.*, 2008); así como también, obtener aproximaciones de algunos parámetros lumínicos (Intensidad luminosa, flujo de entrada y/o iluminancia) útiles para el diseño de los mismos (Marín, 2012).

Es importante señalar que el número de reflexiones que sufre el rayo luminoso es un número entero, y depende del ángulo de incidencia, de la longitud y distancia de separación entre las caras ([www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf](http://www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf)).

A continuación, se presentan los resultados del análisis geométrico (cálculo gráfico) y trigonométrico, del número de reflexiones obtenidas a través del transmisor del CCLN propuesto, en el período horario evaluado según lo presentado por Marín (2012). Previo al análisis, este autor refiere en su trabajo, una “formulación empírica” que permite determinar la sección del conducto de sol, con una relación aproximada del 100%, entre la iluminancia en la boca del conducto y la iluminancia media del local:

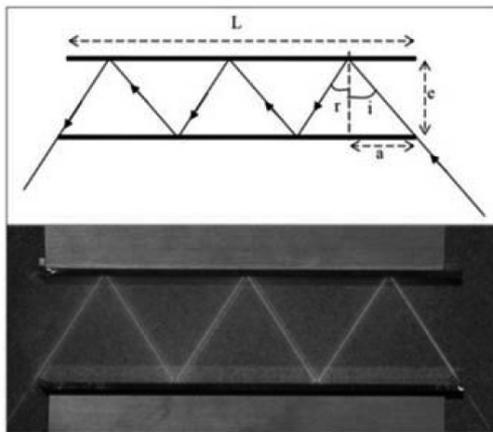


FIGURA 9. Ejemplo de reflexiones múltiples  
Fuente: [www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf](http://www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf)

$$\text{Relación} = E_{\text{boca}} / E_{\text{local}} \approx 100 \quad (1)$$

donde:

$E_{\text{Boca}}$  = Iluminancia en la boca (Lux)

$E_{\text{Local}}$  = Iluminancia media del local (Lux)

La sección del conducto, se determina a partir de la expresión:

$$Sc = ((S_{\text{Local}} * L) / 300)^{1/3} \quad (2)$$

donde:

$Sc$  = sección del conducto ( $m^2$ )

$S_{\text{Local}}$  = Superficie iluminada del local ( $m^2$ )

$L$  = Longitud del conductor (m)

Aplicando la expresión 2, la sección del conducto de sol debería ser de 0,32 m; sin embargo, para el caso de estudio la sección del mismo, se consideró de 0,38 m con una longitud de 1,14 m; para un espacio a iluminar de superficie: 9  $m^2$ .

### 2.3.1. Análisis geométrico

En el análisis geométrico, se determina: la intensidad resultante, el flujo resultante y la iluminancia en el local, el número de reflexiones se obtiene a partir del cálculo gráfico del rayo medio incidente (figura 10).

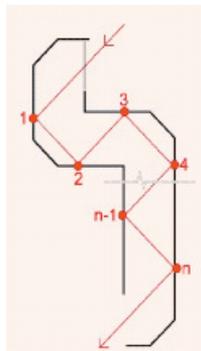


FIGURA 10. Cálculo gráfico del rayo medio incidente  
Fuente: Marín, 2012.

Las expresiones utilizadas para el cálculo, son las siguientes:

$$I = I_{\text{Boca}} * t_{\text{Boca}} * t_i * r^n \quad (3)$$

donde:

I = Intensidad que penetra en el local (cd)

$I_{\text{Boca}}$  = Intensidad en la boca (cd)

$t_{\text{Boca}}$  = Factor de transmisión del cerramiento de la boca

$t_i$  = Factor de transmisión del elemento de cesión al local

r = factor de reflexión del espejo

n = número de reflexiones calculadas gráficamente del rayo medio incidente

$$\Phi = E_{\text{Boca}} * S_{\text{Boca}} * t_{\text{Boca}} * t_i * r^n \quad (4)$$

donde:

$\Phi$  = Flujo que penetra en el local iluminado (lm)

$S_{\text{Boca}}$  = Sección de la boca ( $\text{m}^2$ )

$$E_{\text{Local}} = E_{\text{Boca}} * (S_{\text{Boca}} / S_{\text{Local}}) * t_{\text{Boca}} * t_i * r^n \quad (5)$$

Realizando el cálculo grafico del rayo medio incidente (figura 11) y aplicando las expresiones 3, 4 y 5, con un factor de transmisión promedio de 0,85 para vidrio transparente simple de 2 a 3 mm de espesor; de 0,75 para laminados de plástico (De Mascaró, 1977), y un factor de reflexión de 0,98 correspondiente al recubrimiento interno (vinil autoadhesivo cromado) del conducto, se obtuvieron los resultados (tabla 8):

La relación 1 entre la iluminancia en la boca del conducto y la iluminancia media del local, bajo las condiciones establecidas resulto ser de 124%.

### 2.3.2. Análisis trigonométrico

En el análisis trigonométrico, se determinó: la intensidad a una distancia "x" de la boca del conducto (Ley de decrecimiento en profundidad), y el número de reflexiones. Las expresiones utilizadas son las siguientes:

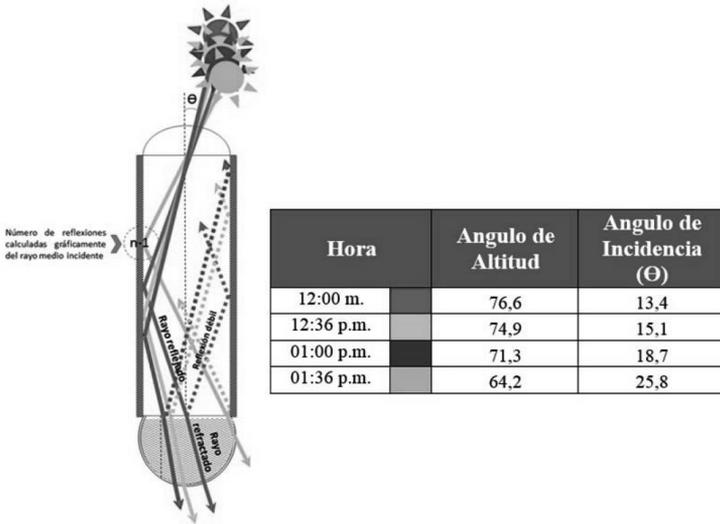


FIGURA 11. Cálculo gráfico del rayo medio incidente en el caso de estudio  
Fuente: Elaboración propia, 2014.

TABLA 8. Resultado de la aplicación del análisis geométrico del número de reflexiones

Análisis geométrico		
Intensidad (cd)	Flujo resultante (Lm)	Iluminancia local (Lux)
122928	8162	907
117803	7837	871
112768	7533	837
109315	7367	819

Fuente: Elaboración propia, 2015.

$$I_x = I_{Boca} * t_{Boca} * r^n \tag{6}$$

donde:

$I_x$  = Intensidad a una distancia "x" de la boca

$I_{Boca}$  = Intensidad en la boca

$$n = x * (\tan\theta / \varnothing) \tag{7}$$

donde:

$\theta$  = Angulo formado por la proyección del ángulo de incidencia del rayo respecto al eje del conducto.

$\varnothing$  = Diámetro del conducto

Aplicando las expresiones 6 y 7, se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 9):

TABLA 9. Resultado de la aplicación del análisis trigonométrico del número de reflexiones

Análisis trigonométrico		
Intensidad en la boca (cd)	Intensidad a una distancia "x" de la boca (cd)	Número de reflexiones
192829	142548	0,71 1
184789	136344	0,80 1
176891	129975	1,01 1
171474	124892	1,45 1

Fuente: Elaboración propia, 2015.

#### 2.4. Refracción a través del elemento difusor del CCLN propuesto.

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro medio transparente, incidiendo oblicuamente sobre la superficie de separación de ambos medios, experimenta un cambio de dirección y de velocidad, que se conoce con el nombre de Refracción. En este fenómeno, el rayo refractado puede acercarse o alejarse de la normal dependiendo de la densidad del medio que atraviesa. Esta situación, se relaciona con un número denominado **Índice de Refracción Absoluto "n" de un medio transparente**; que resulta del cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio (Netto, 2014).

$$n = c / v \quad (8)$$

donde:

n: índice de refracción

c: velocidad de la luz en el vacío

v: velocidad de la luz en el medio

Si el índice de refracción de un medio es mayor que el otro (tabla 10), se dice que tiene **mayor refringencia**; si ocurre lo contrario, se dice que tiene **menor refringencia** y si ambos medios tienen la misma refringencia, se dice que tienen **continuidad óptica** (Fogantini, 2007).

Tabla 10. Índices de refracción

n	Medio	índice de refracción
n1	Aire	1,0003
n2	Agua	1,3300

Fuente: valores tomado de Montalvo, 2010.

En este trabajo se seleccionó como medio el “agua”, basado en el principio de la botella solar (figura 12); en la cual, el espacio se ilumina gracias a que se produce una **“refracción horizontal de 360°”**, cuando los rayos del sol viajan en vertical a través del envase y chocan con el líquido; en este caso, la luz al entrar en la botella rebota contra las moléculas de agua, aumentando su potencia y dirigiéndola por todas direcciones, emitiendo luz equivalente a una bombilla de 55 vatios (Ramírez, 2013).

El fenómeno de la refracción se expresa a través de las siguientes leyes (Netto, 2014):

1ª Ley: El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.

2ª Ley (ley de Snell): Los senos de los ángulos de incidencia  $\theta_1$  y de refracción  $\theta_2$  son directamente proporcionales a las velocidades de propagación  $v_1$  y  $v_2$  de la luz en los respectivos medios ( $\text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2 = v_1 / v_2$ ); la expresión 9, representa la relación entre el ángulo de incidencia y el de refracción según esta Ley (figura 13):

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (9)$$

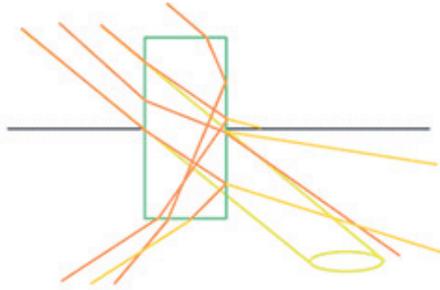


FIGURA 12. Efectos ópticos fundamentales en la botella solar:  
Refracción y reflexión total interna

Fuente: <http://physicsbuzz.physicscentral.com/2011/09/solar-bottle-superhero.html>

donde:

$n_1$  = Índice de refracción del 1er medio, o medio en el que se propaga el rayo incidente.

$n_2$  = Índice de refracción del 2do medio, o medio en el que se propaga el rayo refractado

$\theta_1$  = ángulo de incidencia al formado por el rayo incidente y la normal

$\theta_2$  = ángulo de refracción al formado por el rayo refractado y la normal

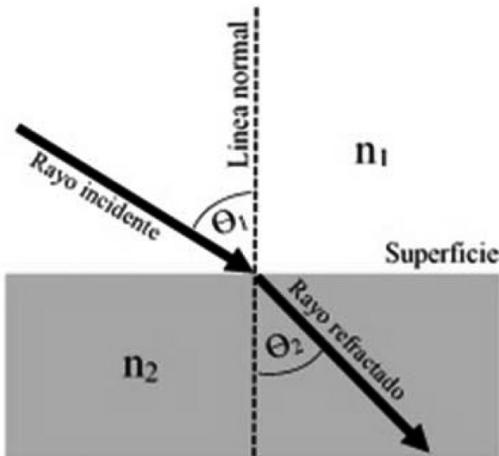


Figura 13. Ángulos de incidencia y refracción

Fuente: [http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica\\_Aplicada/transparencias/05-Luz/18\\_-\\_reflexion\\_y\\_refraccion.pdf](http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica_Aplicada/transparencias/05-Luz/18_-_reflexion_y_refraccion.pdf)

En el periodo estudiado, el ángulo de refracción resultó inferior al de incidencia, acercándose a la normal (tabla 11); esto ocurre, cuando la luz pasa de un medio de menor índice de refracción como el aire ( $n_1 = 1,0003$ ) a otro de mayor índice como el agua ( $n_2 = 1,3300$ ).

Es importante señalar que cuando un rayo luminoso incide sobre la superficie que separa dos medios (aire y agua, por ejemplo) parte de la luz incidente se refleja, mientras que la otra parte se refracta y penetra en el segundo medio, ocurriendo también otras reflexiones internas (Figura 14).

TABLA 11. Ángulos refractados según periodo evaluado

Angulo incidencia (Grados)	Angulo refractado (Grados)
13,4	10,03
15,1	11,30
18,7	13,95
25,8	19,10

Fuente: Elaboración propia, 2015.

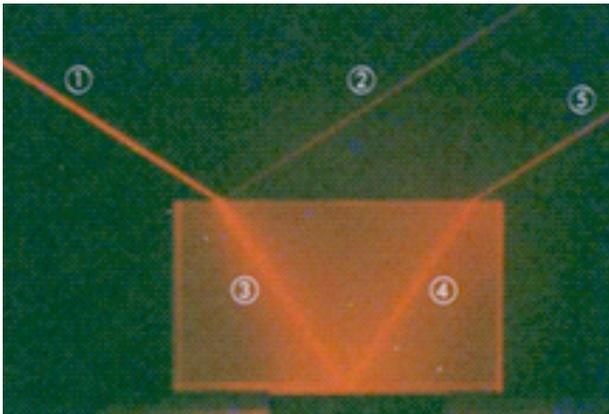


FIGURA 14. Trayectoria del rayo de luz cuando actúa en medios de distinta densidad:

1. Rayo incidente;
2. Rayo reflejado (reflexión débil);
3. Rayo refractado;
4. Rayo reflejado;
5. Rayo reflejado

Fuente: Gómez G., E. (2010).

Cuando la luz incide sobre un medio de menor refringencia, el rayo se desvía de la normal, resultando el ángulo de salida mayor que el ángulo incidente; esto es lo que se conoce como "reflexión interna". El ángulo de salida alcanzará los  $90^\circ$ , para algún ángulo de incidencia crítico  $\theta_c$ , y para todos los ángulos de incidencia mayor que este ángulo crítico, la reflexión interna será total.

## Conclusiones

A través del CCLN propuesto, se obtuvo un desempeño intermedio entre el CCLN-DAPD y el CCLN-DVC; con unos niveles de iluminación relativamente altos; principalmente, en el período horario cuando el sol alcanzó el mayor ángulo de altitud. En este caso, los rayos inciden con muy poca diferencia con respecto a la perpendicular a la superficie del medio transparente, lo que hace que en su trayectoria no experimenten una significativa desviación; traducándose, en un mayor aporte lumínico y térmico (calor) sobre el plano de trabajo. A medida que el rayo incide en forma más oblicua sobre el medio transparente, pierde intensidad porque una parte se refleja y otra se refracta, en función de las características del mismo.

El efecto de brillo alcanzado a través del paso de la luz en la botella solar es muy similar al obtenido en el CCLN propuesto. En el primer caso, la luz atraviesa la superficie plástica y directamente penetra a la columna de agua (pasa de un medio de mayor refringencia a uno de menor refringencia), produciéndose la denominada "refracción horizontal de  $360^\circ$ ", la cual se combina con la reflexión total interna. En el segundo caso, la luz atraviesa la superficie acrílica del elemento captador e interactúa con la superficie reflectante del elemento transmisor, produciéndose un número de reflexiones del tipo especular, que dependerá del ángulo de incidencia, la longitud del conducto y de la distancia entre las caras o diámetro; en este caso, el rayo que incide sobre la superficie del agua, es un rayo reflejado de menor intensidad (pasa de un medio de menor refringencia a uno de mayor refringencia), tendiendo los ángulos refractados hacia la normal; es importante señalar que, mientras más oblicuo sea el ángulo de incidencia, mayor será la ocurrencia del ángulo crítico y la reflexión interna total.

Otro aspecto a señalar es la presencia de ciertas concentraciones de luz, de intensidad variable, cuyos efectos pueden resultar indeseables o

perturbadores a nivel visual en la realización de tareas sobre el plano de trabajo. En este caso, influye también, la forma y material del difusor (recipiente esférico de vidrio); esto conlleva a realizar estudios, donde se involucren elementos que permitan redireccionar la luz hacia superficies del espacio, en búsqueda de obtener una distribución más uniforme por la contribución de la componente de reflexión interna proveniente de las superficies del mismo.

Con respecto a los valores promedios de iluminancia y flujo de entrada, obtenidos a través del análisis geométrico, estos representan solo un 12% y un 64% aproximadamente, de los obtenidos a través de las mediciones bajo condiciones de cielo real. En el primero, los valores se mantienen más o menos constantes, con poca variación entre ellos; mientras que en el segundo caso, se observa una gran diferencia entre los valores obtenidos en las diferentes horas; ya que, estos resultan dependientes de la variabilidad en las condiciones de cielo de la localidad. Con respecto al análisis trigonométrico, este determinó, un decrecimiento en la intensidad de la luz desde la boca del conducto a la salida del difusor, de un 74% aproximadamente.

El conocimiento del comportamiento de la luz ante las características físicas de los diferentes medios (opacos, transparentes y traslucidos), resulta de gran utilidad para caracterizar, describir, e interpretar fenómenos lumínicos presentes en el diseño de dispositivos de conducción de luz; en búsqueda de sentar las bases para el planteamiento y/o adecuación de alternativas que permitan la utilización de la iluminación natural como recurso sustentable en clima cálido-húmedo. Es por ello, que se recomienda: 1) la obtención de registros de iluminación en un periodo mayor de tiempo; 2) la evaluación del dispositivo utilizando difusor plástico y estableciendo combinaciones de elementos que ayuden a desviar o redirigir el rayo de luz, considerando la forma de las superficies (con el mismo ángulo de incidencia los rayos tienden a juntarse en superficies cóncavas; mientras que, en superficies convexas, tienden a separarse); 3) evaluar el comportamiento térmico del dispositivo actual y con el recipiente plástico con agua como difusor.

## Agradecimiento

A la M.Sc. Magalis Gallardo del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de L.U.Z. y a la Arquitecto Joely Sulbarán.

## Referencias

- Bautista, L. (2008). Naturaleza de la luz. Física de 2do. Bachillerato. Editor: Fisicanet en línea. [www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap08\\_Luz.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap08_Luz.php) Consultado: Noviembre, 2014.
- Catálogo general de lámparas Philips (Philips lighting México) 2010 / 2011. Ver.23082010. [http://www.lighting.philips.com/pwc\\_li/mx\\_es/connect/tools\\_literature/assets/pdfs/Catalogo\\_Philips\\_2010%20%284%29.pdf](http://www.lighting.philips.com/pwc_li/mx_es/connect/tools_literature/assets/pdfs/Catalogo_Philips_2010%20%284%29.pdf). Consultado: Octubre, 2014.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales Ministerio de Fomento. Norma COVENIN 2249-93 (1993). ISBN: 980-6019-34-2. CDU: 628.976.28.977. Publicación de FONDONORMA. Caracas-Venezuela. [http://www.inpsasel.gob.ve/moo\\_docCOVENIN\\_2249\\_1993.pdf.pdf](http://www.inpsasel.gob.ve/moo_docCOVENIN_2249_1993.pdf.pdf). Consultado: octubre, 2014.
- De Mascaró, L. R. (1977). *Luminotecnia-Luz Natural*. Ediciones Summa. 72 Pág. Buenos Aires.
- Elicabe Urriol, J. J.; Navone, H. D.; Bellucia, H. A.; Vázquez, J. (2008). Iluminación natural por conductos de superficie interna reflectante. Reporte Técnico RT-ID-08/01 en línea. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería, y Agrimensura (FCEIA). Universidad Nacional de Rosario. Argentina. <http://www.fceia.unr.edu.ar/secyt>. Consultado: Diciembre, 2014.
- Fogantini, p. (2007). *Diseño experimental-Refracción de la luz*. Instituto Jesús en el Huerto de los Olivos, Olivos, Buenos Aires.
- Gómez G., E. (2010). *Fundamentos de Óptica*. Tema 1- óptica geométrica. Departamento de Física Aplicada III. E.S. Ingenieros-Universidad de Sevilla.
- Marín H., J. A. (2012). Conductos de sol-introduciendo los rayos del sol en el interior de la arquitectura. EKOTECTURA 2012-13 de octubre 2012. Material del Encuentro Internacional. Bogotá, Colombia. Departament de Construccions Arquitectoniques I. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Montalvo Arenas, C. E. (2010). 1\_optica.pdf en línea. [http://historiaguanam.mx/descargas/ensenanza/portal\\_recursos\\_linea/apuntes/1\\_optica.pdf](http://historiaguanam.mx/descargas/ensenanza/portal_recursos_linea/apuntes/1_optica.pdf). Consultado: Diciembre, 2014.
- Netto, R. S. (2014). Física-Óptica en línea. [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap06\\_optica\\_geometrica.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap06_optica_geometrica.php) Consultado: Diciembre, 2014.
- Puppo, E.; Puppo, G. (1971). *Acondicionamiento Natural y Arquitectura*. pp.111.
- Raitelli, M. (2006). Diseño de la iluminación de interiores en línea-edUtecNe. Capítulo 8. [www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap08.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap08.pdf) Consultado: julio 2014.

Ramírez, A.; Rocío, C. (2013). Obtener luz a través de una botella de plástico en línea. [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/6954/mod\\_resource/content/0/Luz\\_botella\\_plastico.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/6954/mod_resource/content/0/Luz_botella_plastico.pdf) Consultado: Diciembre, 2014.

## Otras consultas en línea

<http://sculptthefuturefoundation.org/portfolio/my-shelter-foundation-global-lighting-project>

<http://www.astromia.com/glosario/reflexion.htm> Consultado: Diciembre, 2014.

[http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica\\_Aplicada/transparencias/05-Luz/18\\_-\\_reflexion\\_y\\_refraccion.pdf](http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica_Aplicada/transparencias/05-Luz/18_-_reflexion_y_refraccion.pdf) Consultado: Diciembre, 2014.

<http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AttAz.php> Consultado: Diciembre, 2014.

<http://physicsbuzz.physicscentral.com/2011/09/solar-bottle-superhero.html>.

<http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/Apuntes/Apuntes2Fis/ReflexionRefraccion.pdf>.

[www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf](http://www.heurema.com/PDF/PDF40-Reflex5/PDF40-Reflex5.pdf)

<http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=138939>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/totint.html>