

DESARROLLO DE UN TUBO DE LUZ SOLAR DE BAJO COSTO Y ESTIMACIÓN DEL PAYBACK DEL SISTEMA

Gandhi Escajadillo Toledo (getpadesign500@gmail.com) - Universidade Federal do Paraná

Alexandre Vieira Pelegrini (avpelegrini@gmail.com) - Universidade Federal do Paraná

Resumen

Los ductos solares son tecnologías avanzadas de iluminación que ayudan a mejorar el confort visual en las edificaciones y reducen significativamente el consumo de energía destinada a la iluminación, pero actualmente el uso de estas tecnologías no está ampliamente difundido en el Brasil. Una de estas razones es que estos productos son importados y por lo tanto tienen elevados costos. El objetivo de este artículo es desarrollar un ducto de luz solar de bajo costo y hacer la estimación del payback del sistema. Para el desarrollo de este producto fueron considerados los parámetros de configuración e instalación de los ductos de luz solar. Para el análisis del payback fueron utilizadas simulaciones y el método del WLCC (Whole life Cycle Costing). Fue calculado un payback menor en comparación con los productos disponibles actualmente en el mercado, este payback está analizado con los parámetros ambientales de Curitiba y del local donde fue instalado el tubo. Con este trabajo se incentiva a realizar investigaciones sobre estos sistemas en el contexto brasileño.

Palabras clave: Ductos de luz solar; manufactura; payback

Área: GDP y Sustentabilidad

1. INTRODUCCIÓN

Brasil es un país que recibe más radiación solar que países que lideran el mercado mundial en el empleo de tecnologías que usan la energía solar y la luz solar. A pesar que Brasil presenta condiciones climáticas favorables, no existen muchos estudios sobre sistemas avanzados de iluminación natural e sobre los beneficios adquiridos con el uso de estos sistemas (SOUZA, 2005).

Una de estas tecnologías avanzadas de iluminación natural son los ductos de luz solar, estos sistemas son dispositivos lineares que conducen la luz solar y la luz del cielo al interior de los ambientes a través de un tubo guía altamente reflexivo (AL-MARWAEI; CARTER, 2006). Los ductos de luz captan la luz natural proveniente del cielo a través de un colector ubicado en la parte superior, transportando esta luz por una serie de reflexiones especulares y difusas a través de un canal, hasta llegar al nivel del techo. Este sistema permite dirigir y direccionar la luz del día al interior de los ambientes (KIM; KIM, 2010; MOHELNIKOVA, 2009).

Diversos estudios han comprobado los beneficios obtenidos a través del uso de ductos de luz, como mejorar y aumentar el nivel de iluminación en el ambiente interno, mejorar el confort lumínico y reducir el consumo energético destinado a la iluminación (SOUZA, 2005; KIM; KIM, 2010; MOHELNIKOVA, 2009; SOTO, 2010).

Los tubos de luz usan una energía renovable, la energía solar, no producen emisiones de CO₂ para generar esta energía, los tubos no tienen componentes que agredan el medio ambiente al ser descartados, siendo la mayoría de los materiales utilizados, reciclables; además poseen una vida útil más larga (MAYHOUB; CARTER, 2012).

En el Brasil, los tubos solares de luz, están siendo implementados en edificaciones principalmente de uso no residencial, como el caso de los tubos solares de las empresas Solatube, Espacio Solar y Chatron. Pero estas tecnologías están actualmente siendo importadas, en consecuencia tienen un precio elevado y su uso no está totalmente difundido entre los especialistas de iluminación (TOLEDO; BUSCH; PELEGRINI, 2012).

En Brasil una de las pocas investigaciones sobre la relación costo-beneficio y la economía de energía a partir del uso de sistemas de tubos solares fue realizada por la Light (Compañía de Energía Eléctrica) a través del programa de Eficiencia energética (PEE) en el 2011. El estudio fue realizado en las instalaciones del gimnasio de deportes de la isla de São João en Río de Janeiro. En este gimnasio fueron instalados ductos de luz pertenecientes a la empresa Solatube (LIGHT, 2011).

Fue obtenido como resultado una reducción en el consumo de energía para iluminación de 86 % y un payback estimado de 5 años, además de los beneficios de mejorar el confort visual del gimnasio (LIGHT, 2011).

En este panorama existe una carencia en la manufactura de este tipo de sistemas en Brasil, como también de investigaciones sobre estos sistemas en el contexto brasileño. Estos sistemas pueden estar disponibles en el mercado brasileño a un precio más accesible, si con base en estudios desenvueltos en el área académica, estos ductos de luz fueran proyectados, testados y configurados en Brasil y sobre condiciones climáticas brasileñas (TOLEDO; BUSCH; PELEGRINI, 2012).

Con el desarrollo de tubos de luz de bajo costo, se posibilita una posterior producción en serie y la instalación de estos sistemas en diferentes tipos de edificaciones. Se debe considerar también que los tubos de luz en comparación con otros sistemas avanzados de iluminación, representan una inversión inicial menor y poseen una tecnología más simple (MAYHOUB; CARTER, 2012).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un ducto de luz solar de bajo costo y hacer un análisis de la estimación del payback.

2. MÉTODO

En la primera etapa de este trabajo, fue realizado el desarrollo del tubo de luz solar de bajo costo, considerando todos los parámetros de configuración del sistema. En la segunda etapa fue analizada la estimación del payback del sistema de luz.

Es importante mencionar que esta investigación está con parámetros de la ciudad de Curitiba y del local donde fue instalado el tubo de luz, tanto en la partes del trabajo donde fueron realizadas las simulaciones como en la parte práctica de instalación del tubo de luz.

2.1. Configuración del Ducto de luz Solar

Para la configuración del ducto solar es importante explicar las partes que componen los tubos de luz solar (IEA, 2000):

- a) Un sistema de colecta de luz;
- b) Un sistema de transmisión y distribución de luz;
- c) Un sistema de emisión de luz.

Para esta etapa fueron considerados los parámetros de configuración del ducto solar, como elección de materiales, parámetros geométricos y parámetros de instalación. La Figura 1 muestra los principales parámetros de configuración e instalación para tubos solares, en

base a las recomendaciones de la literatura técnica nacional e internacional y de las empresas que comercializan estos ductos.

Figura 1 - Principales consideraciones para la configuración de los tubos de luz solar.

Parámetros	Características	Recomendaciones
Geometría y componentes	Relación diámetro/ altura para el mejor desempeño luminoso.	Tubo más eficiente con menor longitud del tubo
	La reflectancia interna de los tubos	La eficacia de los tubos depende en grande medida del porcentaje de reflectancia interior del tubo.
	Geometría de los tubos	Tubos rectos más eficientes
	Elementos ópticos para redireccionar la luz	La eficiencia del tubo aumenta cuando son usados para redireccionar la luz
	Forma de los colectores	Colectores em forma de domos son más eficientes
	Control de iluminación, sistemas mixtos.	Sistemas de control on-off y dimmer complementan y mejoran la eficacia de los sistemas.
Materiales	Colector: Fácil mantención Protección UV Elementos para redireccionar luz Alta transmitancia	Tecnología Rybender Metacrilato Policarbonato con tratamiento electrolítico
	Tubo exterior: Material Resistente, Bajo Peso.	Aluminio
	Revestimiento Interior: Altamente Reflexivo	Aluminio con alta porcentaje de reflectancia Láminas de alta reflectancia
	Difusor: Material que alcance buena difusión de la luz	Lente Fresnel Lente Prismática
	Mejor eficiencia de los tubos	Condiciones de cielo claro. Mejor desempeño en condiciones de cielo cubierto.
Orientación geográfica e Instalación	Posición del colector	Posicionar el colector para la línea del Ecuador
	Mejorar la eficiencia cuando no se recibe radiación solar directa	Uso de elementos de redirección de luz en el colector
	Localidades distantes de la línea del Ecuador	Tubo rectos más eficientes.
	Localidades que recebem abundante radiación solar	Uso de tubos doblados con diferentes ángulos.

Fuente: Adaptado de Toledo; Busch; Pelegrini (2012).

Como el objetivo es desarrollar un ducto solar de bajo costo, fueron tomadas algunas consideraciones al momento de configurar el tubo: Para reducir el costo en la manufactura de un domo para la parte de captador del tubo, fue considerado un corte en la parte superior de 30°, con dirección al norte, para maximizar la captación de luz.

Las características geométricas del tubo configurado en este caso, están en relación con el local donde fue instalado y con el área de iluminación que se necesitaba cubrir en el ambiente.

2.2. Cálculo del payback del tubo de luz solar

Debido al hecho que para el cálculo de economía de energía y payback de este sistema de luz, debería ser analizado la fase de post instalación del tubo después de al menos un año de ser instalado, fueron realizadas simulaciones computacionales en esta etapa para poder hacer estos cálculos.

En esta fase, inicialmente fue calculado el ahorro de energía, para esto fue utilizado el software Troplux, donde fue simulado el ducto configurado con los parámetros ambientales y geométricos correspondientes, en base a esto se calculó el porcentual de aprovechamiento de luz natural (PALN), seguidamente fue calculada la economía generada en todo el año.

El PALN es un método propuesto por Souza (2003), que sirve para calcular el aprovechamiento de luz natural y estimar la cantidad de energía utilizada en iluminación. Con este método se calcula el período en que la luz natural es suficiente para atender las necesidades de la tarea a ser realizada en un determinado local. En este caso fue usado el PALN por sustitución, con la siguiente fórmula (1):

$$PALN_s = \frac{\sum_{i=0}^N E_{in} \geq E_p}{n} \quad (1)$$

Donde: E_{in} es el promedio de iluminancias proporcionadas por la luz natural, E_p es la iluminancia del proyecto y n es el número de horas analizadas. En este caso la economía de energía depende de la relación que existe entre el número de horas en que la iluminación natural es mayor o igual a la iluminancia mínima exigida en el proyecto.

Para calcular el payback fue utilizada la fórmula del método de WLCC (*Whole lyfe Cycle Costing*), que permite evaluar los costos y beneficios de un sistema, considerando diversos factores que influyen el esquema de iluminación (BOUSSABAIN; KIRKHAM, 2004). Esta fórmula ha sido usada para calcular el payback del sistema de tubos solares en investigaciones pasadas, como en el trabajo de Mayhoub y Carter (2011). O NPV (Valor líquido actual) sirve para medir el valor líquido de inversión y es calculado utilizando la siguiente fórmula (2):

$$NPV = \sum \Delta PV_s + R_0 - [I_{0_DL} + \sum PV_{M_DL} + \sum PV_J] \quad (2)$$

Donde PV_s es el costo total anual de economía sobre el uso de solamente un sistema de iluminación eléctrica convencional (R \$), R_0 es el valor residual del sistema de iluminación (R \$), I_{0_DL} es la inversión inicial del sistema de iluminación (R \$), el PV_{M_DL} es el costo anual de manutención del sistema de iluminación natural (R \$) y el PV_J es la inversión futura para sustitución del sistema (R \$) (MAYHOUB; CARTER, 2011).

Para este trabajo, el resultado obtenido con el PALN, fue utilizado para calcular el ΔPV_s (economía de energía) y el presupuesto final, obtenido en la etapa de configuración del ducto de luz solar fue considerado en el I0_DL.

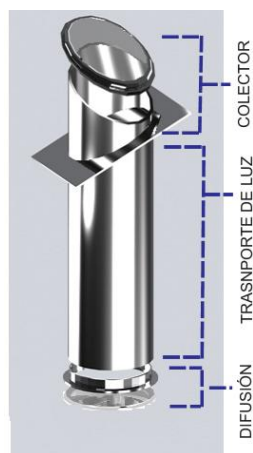
En este caso, los costos del tubo están compuestos por el precio inicial del tubo, los costos de sustitución del sistema y el costo anual de manutención (MAYHOUB; CARTER, 2011). Un NPV con valor cero indica que la suma de la economía de energía y el valor residual del sistema es igual a la suma de los valores del precio del tubo, la sustitución del sistema de luz y el costo de manutención anual. Por lo tanto esto equivale al tiempo en que fue obtenido el payback del sistema.

3. RESULTADOS

3.1. Configuración del Ducto de luz Solar

Para explicar todas las piezas que componen el prototipo de tubo solar fueran divididas estas en tres partes principales: El colector; el sistema de transporte y el sistema de difusión de luz (Figura 2).

Figura 2 – Partes del ducto solar



Fuente: Elaboración propia

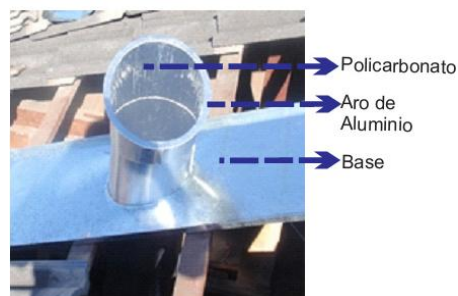
Para el caso de las piezas de aluminio fueron utilizados procesos manuales de manufactura, para las piezas de acrílico y policarbonato fueron usadas máquinas CNC para posibilitar los cortes a laser.

3.1.1 El colector y base del sistema

El tubo de luz necesita de una base en el tejado, para servir de impermeabilización en el techo y sostener la pieza del colector; en este caso fue configurada una base con las mismas medidas de las tejas de la casa donde fue instalado el tubo. Esta pieza fue hecha en aluminio, el mismo material del tubo. En la parte superior del tubo de luz solar está

localizada la pieza del colector, una elipse de policarbonato con 89 % de transmisión de luz. Este tiene protección UV. El tubo de luz y el colector están unidos por un anillo de aluminio con un sello impermeabilizante. La Figura 3 muestra las piezas de esta parte superior del tubo.

Figura 3 – Piezas superiores del sistema del tubo de luz



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Sistema de Transporte de luz

El tubo de luz debe ser ligero y no transmitir cargas considerables a la estructura del tejado, en este caso fue usado una chapa de aluminio de 0,7 mm de espesor. La relación diámetro: altura del tubo de luz es de 1:3. Este tubo tiene 25 cm de diámetro y 75 cm de altura en la parte más baja y 90 cm en la parte más alta. La parte más alta corresponde al corte de 30° del tubo (Figura 4).

Para la configuración del tubo, fue doblada la chapa de aluminio y cerrada en forma circular, antes de doblar el tubo fue pegado una lámina mylar® de 98 % de reflectividad al interior de la chapa, esta alta reflectividad de la lámina es importante para aumentar el desempeño del tubo solar. La Figura 4 muestra el proceso de manufactura del tubo y las dimensiones del tubo.

Figura 4 – Tubo de aluminio para el transporte de luz



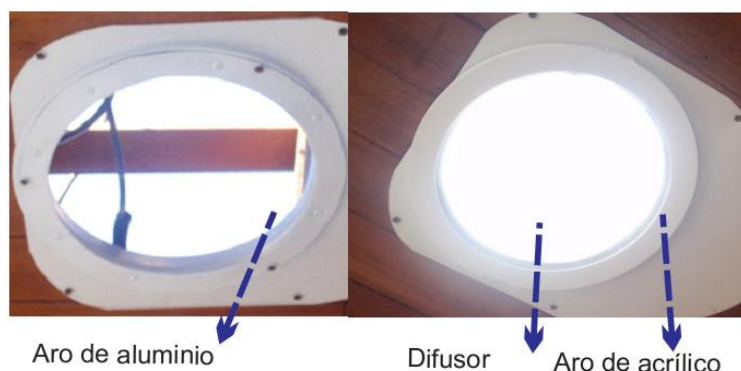
Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Sistema de Difusión de luz

La parte inferior del tubo está formada de tres componentes: El anillo de encaje para el cielo raso, el anillo de acrílico y el difusor de policarbonato. El anillo para encaje del cielo raso,

tiene como principal función sostener la pieza circular de policarbonato y el anillo de acrílico. Fue utilizado, para el difusor, el mismo policarbonato del colector, con transmitancia de 89 % y protección UV. Estas partes están expuestas en la Figura 5. El anillo de acrílico fija el difusor de policarbonato al aro de aluminio que está sujeto al cielo raso. Tanto el anillo de acrílico como el círculo de policarbonato son de fácil instalación y pueden ser retirados de forma simple.

Figura 5 – Piezas inferiores del sistema del tubo de luz



Fuente: Elaboración propia

3.2. Análisis del payback del sistema del tubo de luz Solar

Con base a las simulaciones en el programa Troplux, fue calculado el ahorro de energía eléctrica en el contexto curitibano y de la casa de teste donde fue instalado el ducto. El porcentual de aprovechamiento de luz natural en este caso está sintetizado en la tabla 1.

Tabla 1 – Porcentual de aprovechamiento de luz natural con el uso del tubo solar

Mes	PALN	kW (mensual)
Marzo	9.18 %	1.8
Junio	18.54 %	3.6
Setiembre	9.90 %	1.8
Diciembre	9.09%	1.8

Fuente: Elaboración propia

Fue utilizado el cálculo del ahorro de energía anual para colocar en los datos de la fórmula del WLCC, es importante aclarar que esta estimación pertenece al contexto residencial de Curitiba, correspondiendo este valor a una unidad de tubo de luz instalado.

Para el valor residual fue considerado que todos los materiales del tubo solar pueden ser reciclados al terminar la vida útil del mismo. Para el costo de este producto, caso sea realizada la producción en serie, fue estimado, un valor de 350 reales, en el contexto actual.

Este precio incluiría la instalación del tubo solar. En los costos de manutención de este producto, fue estimada solo una revisión anual en el tejado para verificar la impermeabilización del sistema y la manutención simple a la pieza del colector de policarbonato.

En este caso el tiempo estimado de vida útil del sistema es de 25 años, debido principalmente a los materiales utilizados, el policarbonato y el aluminio. A partir de este periodo se programa un reciclaje total de las piezas.

Con base a todos estos datos fue posible calcular un payback de 8 años en el contexto de esta investigación, también se debe considerar que en este cálculo no fueron considerados beneficios intangibles del uso de los tubos solares, como la mejora del confort lumínico a partir del uso de este sistema y los beneficios de la luz natural en los ambientes.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo fue desarrollado y configurado un tubo de luz solar de bajo costo y fue hecha una estimación del payback de este sistema, en el contexto brasileño.

Actualmente los ductos de luz solar son importados y por esta razón tienen elevados precios y un payback de tiempo prolongado, que no hace estos productos más accesibles y dificulta la inserción de los mismos en los diversos sectores de la construcción, a pesar de ser productos con grandes ventajas medioambientales, como la reducción del consumo de energía destinada a la iluminación y el uso de una energía renovable.

El tubo de luz propuesto en este trabajo, en comparación con los precios de los productos comercialmente conocidos, presenta una reducción de costos de hasta 270 % en el contexto actual de la pesquisa.

Aún se observa un payback elevado, pero se debe considerar que en comparación con los otros productos actualmente comercializados e importados, este payback es menor. También es importante resaltar como limitación de esta investigación, que el análisis del ahorro de energía y el payback están ligados a los parámetros ambientales de la casa donde fue instalado el tubo como también de la ciudad de Curitiba.

Actualmente las tecnologías avanzadas de iluminación no están siendo producidas en Brasil, se busca con este trabajo incentivar la producción y manufactura de este tipo de productos, como también incitar al aumento de investigaciones y estudios sobre estas tecnologías en Brasil.

Para futuras investigaciones se sugiere el análisis de la producción en serie del tubo de luz solar, también un estudio sobre el desempeño y eficiencia post instalación de estos tubos en

comparación con los productos existentes en el mercado.

Atualmente está siendo analizado el desempeño del prototipo, que está instalado en una casa de teste de la Universidad Federal de Paraná.

REFERÊNCIAS

AL-MARWAE, M.; CARTER, D. Tubular Guidance Systems for Daylight: Achieved and Predicted Installation Performances. **Applied Energy**, v. 83, n. 7, p. 744-788. Jul. 2006.

BOUSSABAIN, H.; KIRKHAM, R. **Whole life-cycle costing, risk and risk responses**. Blackwell; Oxford, 2004.

IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. Daylight in Buildings. **A Source Book on Daylighting Systems and Components**. Washington, USA, 2000.

KIM, G.; KIM J. Overview and New Developments in Optical Daylighting Systems for Building a Healthy Indoor Environment. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 256-269, Feb. 2010.

LIGHT. Revista de eficiencia energética de la Light. **Luz Natural com Tecnologia Inovadora**, n. 2, ago, 2011. Disponible en: <<http://www.light.com.br/web/institucional/eficiencia/pdf/revista-eficienciaenergetica2.pdf>>. Accedido el: 28/08/2012.

MAYHOUB, M.; CARTER D. The Costs and Benefits of Using Daylight Guidance to Light Office Buildings. **Building and Environment**, v. 46, n. 3, p. 698-710, Mar. 2011.

MAYHOUB, M.; CARTER, D. A Feasibility Study for Hybrid Lighting Systems. **Building and Environment**, v. 53, p. 83-94, Jul, 2012.

MOHELNIKOVA, J. Tubular Light Guide Evaluation. **Building and Environment**. v. 44, n. 10, p. 2193-2200, Oct. 2009.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz Natural através da utilização de Sistemas automáticos de controle para Economia de energia elétrica**. 2003. 208 f. Tesis (Doctorado en Ingeniería de Producción)-Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.

SOUZA, D. A. **Avaliação Teórica e Experimental do Desempenho de Duto de Luz, na Cidade de São Carlos – SP**. 2005. 124 f. Disertación (Maestría en Construcción Civil)-Universidad Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2005.

SOTO S. F. J. **Avaliação do Desempenho Luminoso de Duto de Luz: Estudo da Implementação em Ambientes Padrões de Habitações Populares em Três Latitudes**. 2010. 142 f. Disertación (Maestría en Dinámicas del Espacio Habitado)-Universidad Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 2010.

TOLEDO, G. E.; BUSCH, L. E.; PELEGRINI, A.V. Tecnologias e Benefícios dos dutos solares: Uma revisão estruturada da literatura visando identificar parâmetros de projeto e contribuir para o design sustentável. In: IV Simposio Paranaense de Diseño Sustentable, Curitiba, 2012, **Anais...Curitiba, SPDS 2012**.