



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

33



Diseño volumétrico-espacial e iluminación natural interior en edificios de apartamentos. Caso de estudio: La Habana.....	1
Estimación preliminar del impacto energético por la aplicación de luminarias con LEDs en la iluminación vial de La Habana	11
Una revisión bibliográfica de estudios sobre fachadas solares opacas y transparentes	32
Instalación del aerogenerador W+W 1200 para el Laboratorio de Energía Renovable	48
Propuesta de sustitución de la energía generada con un grupo electrógeno por energía renovable en la comunidad de Pinar Redondo, del municipio de San Luis	61

Diseño volumétrico-espacial e iluminación natural interior en edificios de apartamentos. Caso de estudio: La Habana

Volumetric-spatial design and indoors natural lighting in apartment buildings. Case study: Havana

*Dania González Couret**
*y Drey Felipe Abreu de la Rosa**

** Facultad de Arquitectura,
del Instituto Superior Politécnico
José Antonio Echeverría (ISPJAE), La Habana, Cuba.
e-mail: danial@arquitectura.cujae.edu.cu
y drey@arquitectura.cujae.edu.cu*

Resumen

Es reconocida la relación que existe entre la forma arquitectónica y el comportamiento de la iluminación natural en los espacios interiores. La geometría del edificio y su contexto influyen en los resultados cuantitativos y cualitativos de la iluminación natural, pero la arquitectura también determina en gran medida el ambiente térmico interior, y en ocasiones ambos requerimientos (iluminación natural y ambiente térmico) son contradictorios. Los resultados que se presentan en este trabajo forman parte de una investigación más amplia que pretende evaluar la influencia de los espacios de transición interior-exterior en el ambiente interior. Para ello se han realizado mediciones de temperatura y humedad en espacios interiores de edificios de vivienda en varias zonas urbanas de La Habana, y a la vez, se han simulado las condiciones de iluminación natural en dichos espacios. En el presente trabajo se discuten los resultados de la simulación automatizada de la iluminación natural, enfatizando en la influencia de los espacios de transición. Se ha estudiado una muestra representativa de las diversas tipologías arquitectónicas en diferentes contextos urbanos, usando el software profesional DIALux. Los mejores resultados se obtienen en espacios interiores relacionados con calles anchas, y por el contrario, los patinejos no resultan suficientes, aunque los resultados varían según sus proporciones.

Palabras clave: Iluminación natural, simulación automatizada, diseño arquitectónico, edificios de apartamentos

Abstract

It is acknowledged the relationship between the architectural form and the behavior of natural lighting in indoor spaces. The geometry of the building

and its context influence the quantitative and qualitative results of natural lighting, but architecture also determines to a large extent, the indoors thermal environment, and sometimes both requirements (natural lighting and thermal environment) are contradictory. The results presented in this paper are part of an ample investigation that aims at evaluating the influence of indoors-outdoors transition spaces in the indoor environment. To this end, temperature and humidity measurements have been made in indoor spaces of residential buildings in several urban areas of Havana, and at the same time, natural lighting conditions have been simulated in those spaces. In the present paper we discuss the results of the automated simulation of natural lighting, emphasizing the influence of transitional spaces. We have studied a representative sample of the different architectural typologies in different urban contexts, using the professional DIALux software. The best results are obtained in indoor spaces related to wide streets, and on the contrary, the patinejos are not enough, although the results vary according to their proportions.

Keywords: Natural lighting, automated simulation, architectural design, apartment buildings

Introducción

Aprovechar el suelo urbano es una condición esencial para la sustentabilidad del medio ambiente construido. Es por ello que muchos países desarrollados están intentando incrementar la densidad en las ciudades. Por otro lado, la conservación de los centros urbanos tradicionales es otro importante requerimiento para traspasar a las futuras generaciones el legado histórico de cada sociedad.

En relación con esto, el Instituto Nacional de Planificación Física en Cuba está promoviendo la rehabilitación integral de las ciudades tradicionales, y un punto de partida para ello debe ser la inserción de nuevos edificios de vivienda en los lotes disponibles. Pero, ¿cómo deben ser esos nuevos edificios?, ¿qué referencias arquitectónicas deben tomarse?

Durante los años sesentas y setentas se desarrollaron mayormente nuevas urbanizaciones fuera de la trama urbana tradicional, usando edificios tipo bloques mediante proyectos repetitivos en áreas urbanas abiertas. Cuando en los años ochentas se construyeron edificios atípicos en las zonas urbanas consolidadas, los errores cometidos [Gómez, 2001] mostraron la falta de conocimiento acerca del repertorio tradicional de edificios de apartamentos preexistentes en esos contextos. Finalmente, las últimas dos décadas se han caracterizado por el desarrollo de urbanizaciones dispersas, de baja densidad, que generan un crecimiento urbano desproporcionado y no sustentable.

Así, es inevitable proyectar y construir nuevos edificios de apartamentos en los centros urbanos tradicionales, como parte de su proceso de rehabilitación integral, y por eso es necesario conocer el amplio repertorio precedente de edificios de apartamentos integrados al contexto y que conforman las ciudades, para tomarlos como referencia de las buenas prácticas a recuperar, y evitar errores.

En la Facultad de Arquitectura de La Habana se han desarrollado diversas investigaciones durante los últimos diez años, encaminadas a caracterizar el repertorio de edificios de apartamentos existente en los centros urbanos tradicionales, y evaluar su comportamiento según la calidad del ambiente térmico y luminoso interiores, teniendo en cuenta, además, la percepción de los habitantes.

En esta ponencia se presentan, específicamente, los resultados de la evaluación de la solución volumétrico-espacial de los edificios de apartamentos existentes en tres contextos urbanos diferentes de la ciudad de La Habana, de acuerdo con su influencia en la iluminación natural interior.

Metodología

Con vistas a evaluar la influencia del diseño volumétrico-espacial del edificio en los niveles de iluminación natural interior, se seleccionaron espacios reales de la muestra objeto de estudio, compuesta por 279 edificios de apartamentos localizados en tres contextos diferentes de La Habana (Centro Habana, El Vedado y Miramar) [Zorrilla, 2008], para simular la iluminación natural interior. Los espacios seleccionados se relacionan con el exterior de diferentes formas, de acuerdo con la solución volumétrico-espacial del edificio y el contexto urbano.

La iluminación natural interior depende de diversas variables. La geometría del espacio de transición entre el interior y el exterior es el lo que se ha evaluado en el presente trabajo, que determina el ángulo de exposición a la bóveda celeste (e_0), así como la luz reflejada por los elementos exteriores del contexto (e_e).

En los niveles de iluminación también influye el coeficiente de reflexión de las superficies (interiores o exteriores) y el área de ventana, su localización, proporciones y tipo de cierre (de la ventana propiamente), así como el color, que determina el coeficiente de reducción de la iluminación que penetra. En aras de aislar la variable estudiada (la geometría del espacio de transición), se anuló el resto de las variables, asumiendo los mismos valores o características en todos los casos simulados.

El diseño volumétrico-espacial se caracterizó mediante ángulos (horizontales y verticales) que determinan la geometría exterior con respecto a la fachada expuesta del espacio interior a evaluar. Cada forma de relación interior-exterior fue identificada por los ángulos, las superficies que estos determinan (cerrada o abierta) y una dimensión, ya que teniendo una sola dimensión y las proporciones (ángulos), es posible obtener la caracterización de toda la geometría. Las formas de relación interior-exterior fueron clasificadas en investigaciones precedentes [De la Peña, 1986]:

- Hacia la calle: calles principales (15 m) y secundarias (6 m), considerando dimensiones mayores como excepcionales.
- Hacia corredores, espacios abiertos (sin techo) paralelos o perpendiculares a la calle, que pertenecen al propio edificio, es decir, que están dentro de su volumen como parte de la solución arquitectónica.
- Hacia corredores laterales, de fondo y perimetrales: espacios abiertos (sin techo) anexos al edificio como parte del contexto urbano.
- Hacia patios interiores: espacios abiertos (sin techo) localizados en el interior del lote, con anchos entre 1,6 y 4,0 m, y longitudes entre 4,0 y 26,0 m.
- Hacia patios laterales: espacios abiertos (sin techo) localizados hacia el interior del lote, pero lateralmente, donde una de las dimensiones es considerablemente mayor que la otra, con anchos entre 1,0 y 6,0 m y longitudes entre 9,0 y 25,0 m.
- Hacia pequeños patios o conductos («patinejos» o cajas de aire): espacios abiertos (sin techo), pero cerrados por sus cuatro superficies verticales, localizados hacia el interior del lote, con dimensiones menores que las de los patios (anchos entre 0,5 y 1,7 m, y longitudes entre 1,2 y 4,0 m).
- Hacia «grecas»: espacios abiertos (sin techo) similares a los patinejos, pero abiertos también por una de sus superficies verticales.

Partiendo de esta detallada clasificación, para la simulación se identificaron solo tres tipos generales, de acuerdo con su caracterización geométrica: corredor (Fig. 1), patio y «greca» (Fig. 2).

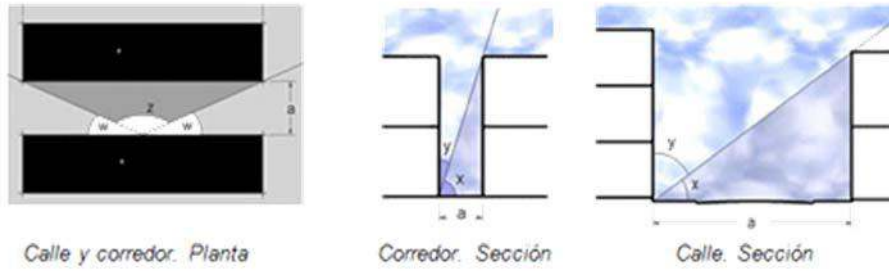


Fig. 1. Espacios tipo corredor: cerrados por el frente y abiertos en los laterales (corredores y calles).

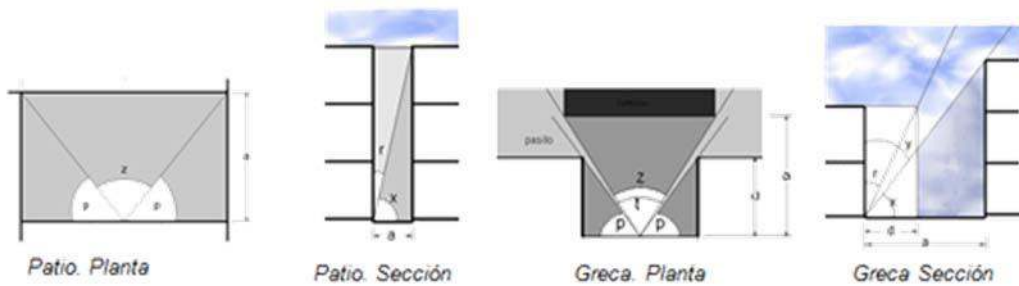


Fig. 2. Espacios tipo patio y greca.

Donde:

X: Ángulo de obstrucción en sección.

Y: Ángulo de apertura al cielo en sección ($x + y = 90^\circ$).

Z: Ángulo de obstrucción frontal en planta.

W: Ángulo de apertura lateral en planta ($z + 2w = 180^\circ$).

r: Ángulo de obstrucción lateral en sección.

t: Ángulo de apertura frontal en planta.

p: Ángulo de obstrucción lateral en planta ($t + 2p = 180^\circ$).

a: Distancia desde el origen del ángulo hasta la superficie de obstrucción frontal.

Casos de estudio

Teniendo en cuenta la caracterización geométrica de los espacios de transición, se seleccionaron 44 espacios interiores dentro del repertorio de edificios de apartamentos estudiados en investigaciones precedentes, representativos de cada uno de los tres contextos urbanos considerados (Centro Habana, El Vedado y Miramar), y de cada tipo de transición, incluyendo diversas orientaciones.

A pesar de que para seleccionar los casos de estudio se tuvo en cuenta la orientación (por su influencia en el ambiente térmico estudiado en otra

investigación paralela), esa variable no fue considerada en la simulación del comportamiento de la iluminación natural interior, ya que el programa usado toma como base un cielo uniforme para determinar el factor de día.

Los espacios seleccionados en Centro Habana se relacionan con el exterior a través de calles y patios, calles con diferentes secciones (proporciones) y orientación, y patios con proporciones extremas. En El Vedado y Miramar los espacios seleccionados se relacionan con patios, corredores y «grecas» (Tabla 1).

Tabla 1. Casos de estudio según tipo de espacio de transición y contexto urbano

Contexto urbano	Corredor	Patio	Greca	Total
Centro Habana	6	8	-	14
El Vedado	8	8	1	17
Miramar	4	4	5	13
Total	18	20	6	44

Programa de simulación

Se evaluaron cuatro programas para simular el comportamiento de la iluminación natural interior: DIALux 4.6 (2007), Ecotect (2007), Relux (2007) y Adeline (1998), comparando los resultados obtenidos mediante el empleo de cada uno de ellos con valores reales medidos por De la Peña [1986] en una sala de planta rectangular (5,2 x 3,6 m) con iluminación unilateral a través de un balcón, localizando el luxómetro en el centro del espacio. El factor de día obtenido en las mediciones fue de 0,56.

Para simular la iluminación natural usando Dialux 4.6 se consideró un coeficiente de 0,90 para las ventanas (ventanas de vidrio); los coeficientes de reflexión asumidos para el techo, las paredes y el piso fueron de 0,70, 0,50 y 0,20, respectivamente, y el tipo de cielo se consideró como uniforme, de acuerdo con el modelo definido para La Habana. El factor de día (e) se simuló en una superficie localizada a 0,75 m sobre el piso, y un punto localizado en el medio del espacio se usó para comparar los resultados con las mediciones reales. La coincidencia entre los valores simulados y medidos (e = 0,56) confirma que es posible usar el Dialux 4.6 para simular la iluminación natural. Este programa permite, además, elaborar el modelo

del espacio de forma fácil, rápida y precisa, y ofrece resultados numéricos y gráficos con buena calidad de terminación.

Simulación

Los casos de estudio fueron considerados en condiciones extremas. Es por eso que los espacios simulados se localizaron en planta baja y la hora asumida fue a las 4:00 p.m. en el mes de diciembre, la más crítica del año para la iluminación natural interior.

El Dialux 4.6 considera un cielo cubierto, que se corresponde con el cielo uniforme como modelo teórico, con la misma luminancia en todas las direcciones. El modelo es apropiado para el cielo de La Habana, definido como parcialmente nublado con tendencia a cubierto y no permeable a los rayos solares, con luz intermitente y luminosidad constante, como modelo isotrópico con la presencia alternativa del sol [De la Peña, 1992]. Para la latitud de La Habana, en diciembre a las 4:00 p.m., Dialux 4.6 asume valores de iluminación difusa en un plano horizontal exterior de 10 163 lux.

Para simular la iluminación natural interior en los casos de estudio seleccionados, se tomó un espacio estándar (3,60 por 3,60 m en área, y 2,80 m de altura) con una ventana de persianas de madera (1,40 m de ancho por 1,20 m de altura), de color blanco, y localizada en el centro de la pared, como tradicionalmente se usa. Los coeficientes de reflexión considerados para las superficies fueron: 0,2 para el piso, 0,5 en el techo y 0,7 para las paredes, así como 0,5 en los exteriores, coincidiendo con los valores recomendados por el programa. Para las ventanas se asumió una transmitancia de 36% y reflectancia de 79% (color claro). Los valores de la iluminación natural interior fueron reflejados en un plano reticulado en 0,75 m de altura sobre el nivel de piso.

El proceso de simulación se inició con un espacio directamente expuesto a un exterior abierto sin obstáculos, cuyo resultado fue posteriormente comparado con aquellos obtenidos en los diferentes tipos de espacios de transición con su geometría particular, para evaluar la influencia de cada solución volumétrico-espacial en la iluminación natural interior.

Resultados

Los resultados obtenidos en el proceso de simulación fueron resumidos con respecto a la geometría del espacio de transición y el porcentaje de reducción en comparación con un espacio similar vinculado a un exterior sin obstrucción, donde «a» es infinito y «x» equivale a 0°.

Los espacios simulados no satisfacen los niveles de iluminación natural interior requeridos (valor del factor de día = 1,5 para cocinas, comedores y

salas de estar), y sólo en un caso se obtiene la uniformidad mínima (0,3). Los mayores valores de iluminación natural se logran en espacios vinculados directamente a corredores (calles anchas), y el contexto urbano más favorable es Miramar, con una menor ocupación del suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Factor de día y uniformidad según tipo de espacio de transición y contexto

Contexto urbano	Corredor		Patio		Greca	
	e ₀	U	e ₀	U	e ₀	U
Centro Habana	0,32	0,09	0,03	0,18	-	-
	0,09	0,03	0,01	0,02	-	-
	0,46	0,15	0,02	1,00	-	-
	0,17	0,06	0,01	1,00	-	-
	0,20	0,09	0,00	0,00	-	-
	0,32	0,11	-	-	-	-
Contexto urbano	Corredor		Patio		Greca	
	e ₀	U	e ₀	U	e ₀	U
El Vedado	0,01	0,07	0,05	0,07	0,02	0,05
	0,01	0,07	0,05	0,07	-	-
	0,03	0,04	0,05	0,07	-	-
	0,03	0,04	0,05	0,07	-	-
	0,15	0,05	0,01	0,25	-	-
	0,02	0,05	0,05	1,00	-	-
	0,02	0,05	0,00	0,00	-	-

	0,02	0,05	0,00	0,00	-	-
Miramar	0,16	0,04	0,04	0,26	0,08	0,05
	0,14	0,05	0,04	0,26	0,06	0,31
	0,33	0,09	0,04	0,26	0,19	0,08
	0,14	0,04	0,04	0,26	0,19	0,08
	-	-	-	-	0,12	0,08

Con independencia de los insuficientes niveles de iluminación y valores de uniformidad obtenidos, la influencia de la geometría del espacio de transición en la iluminación interior se puede evaluar de forma relativa y comparativa, considerando la reducción del factor de día (en %) con respecto al espacio de referencia directamente relacionado con un exterior abierto.

Discusión y conclusiones

Existe una relación directa entre el tipo de espacio de transición y la reducción de la iluminación natural interior. Los corredores constituyen espacios solamente cerrados por el frente, pero abiertos en los laterales. Estos, al igual que los del tipo «greca», abiertos por una de sus superficies verticales (frontal o lateral), además de la parte superior también abierta, son más favorables que los patios desde el punto de vista de la iluminación (Fig. 3).

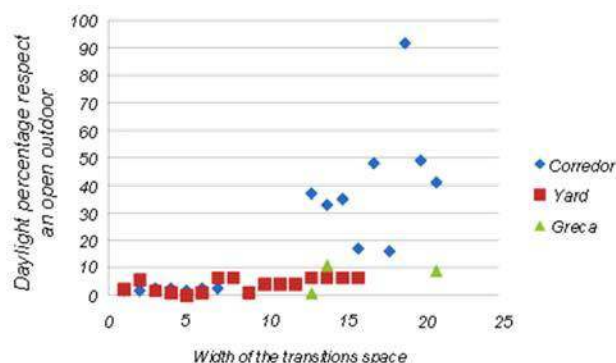


Fig. 3. Porcentaje de iluminación natural interior en espacios relacionados con cada espacio de transición, con respecto a la relación directa a un espacio abierto.

Por supuesto, las dimensiones y proporciones de los espacios de transición también influyen en la iluminación natural interior que decrece con la separación entre volúmenes, es decir, con la dimensión de los espacios de transición. En tal sentido, los espacios con anchos menores de 10 m reducen la iluminación interior en más de 50% con respecto a un exterior abierto. Algo similar sucede en relación con la altura de los edificios que determina el ángulo vertical (x). Con ángulos superiores a 60° , la iluminación interior también decrece a menos de la mitad del valor obtenido en un contexto abierto ($x = 0,0$). Para iguales alturas de los volúmenes edificados y distancias entre ellos, los corredores resultan mejores con respecto a la iluminación natural interior que los patios cerrados.

Estos resultados refuerzan algunas conclusiones anteriormente enunciadas con respecto a la conveniencia de reducir la ocupación del suelo en áreas urbanas compactas, y evitar el uso de patinejos para proporcionar iluminación natural y ventilación en edificios de vivienda. En próximas etapas de la investigación se hará una evaluación de estos espacios de transición desde el punto de vista térmico según el clima de Cuba, para tener una idea más exacta de cuál puede ser la forma más apropiada de transición interior-exterior desde un punto de vista más integral.

Bibliografía

- DE LA PEÑA, A. M. (1986). «Iluminación natural en la vivienda cubana», en *Revista Arquitectura y Urbanismo*, no. 3, ISPJAE, La Habana, 1986, pp. 40-45.
- DE LA PEÑA, A. M. (1992). «Iluminación natural en edificios bajo las condiciones de Cuba», Tesis de Doctorado, Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana, 1992.
- GÓMEZ BRIÑOLES, R. (2001). «Edificios multifamiliares en la ciudad de La Habana», Tesis de Maestría en Vivienda Social, Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana, 2001.
- ZORRILLA RODRÍGUEZ, A. (2008). «Edificios de apartamentos en la ciudad de La Habana. Tipología de diseño volumétrico espacial», Tesis de Maestría en Vivienda Social, Facultad de Arquitectura, ISPJAE, La Habana, 2008.

Estimación preliminar del impacto energético por la aplicación de luminarias con LEDs en la iluminación vial de La Habana

Preliminary estimation of the energy saving impact of the introduction of LED lamps in the street illumination in Havana

Por Ing. Jorge Luis Gironella Fernández e Ing. Lenia Saurí Padrón**

**Centro de Investigaciones y Pruebas
Electroenergéticas (CIPEL),
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto
Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE).
e-mail: evdi@electrica.cujae.edu.cu*

Resumen

En el trabajo se hace una revisión del estado del arte en el desarrollo de los LEDs utilizados en iluminación y, en particular su aplicación en los Sistemas de Alumbrado Público. Por otro lado se realiza también una comparación y propuestas de las posibles sustituciones de fuentes de luz tradicionales utilizadas en los Sistemas de Alumbrado Público por lámparas y luminarias con LEDs. Se analiza desde el punto de vista luminotécnico y energético un caso práctico del empleo de estas luminarias en una avenida en la ciudad de La Habana. Por último se evalúa el impacto que tendría desde el punto de vista energético y ecológico la generalización del empleo de los LEDs en el escenario y composición de lámparas de descarga que tiene la ciudad de La Habana.

Palabras clave: LEDs, ahorro energético, emisión y eficiencia luminosas, iluminación vial

Abstract

The paper is a review of the state of the art in the development of LEDs used in lighting and, in particular its application in Public Lighting Systems. On the other hand, we also made a comparison and proposals of the feasible substitutions of traditional lighting technologies used in the Public Lighting Systems by lamps and luminaires with LEDs. A case study of the use of these luminaires in a street in the city of Havana is analyzed from the point of view of quality of lighting and energy saving. Finally, it is also assessed the impact of the use of LEDs in the scenario of the Public Lighting System of the city of Havana both from the energy and environmental points of view.

Keywords: LEDs, energy saving, emission and lighting efficiency, street illumination

Introducción

La búsqueda de nuevas tecnologías para la producción de luz artificial ha sido interés del hombre desde su origen. No por gusto el uso generalizado de la electricidad no por gusto comienza precisamente por la lámpara incandescente de Edison; desde entonces y hasta hoy las aplicaciones más populares y generalizadas de lámparas que funcionan con electricidad son las fluorescentes, de mercurio, de halogenuros metálicos, de sodio y los más recientes LEDs de potencia.

Los diodos emisores de luz (*Light-emitting diodes*, LEDs, Fig. 1) son dispositivos semiconductores que tienen su origen en la década de los 60 del siglo pasado y constituyen una novedosa forma de obtener luz artificial, muy diferente de los tipos de lámparas existentes hasta ese momento y con cualidades técnicas que propiciaron su perfeccionamiento hasta nuestros días.



Fig. 1. Diferentes tipos de LEDs de potencia

Para tener una idea del salto tecnológico logrado en los últimos años en estos dispositivos, en la figura 2 se aprecia la proyección de los especialistas para el 2002 y lo que se ha logrado ya en el 2010.

Los LEDs actualmente comercializados en lámparas y luminarias presentan una eficiencia luminosa de hasta 90 lm/W para potencias de LEDs desde 1 hasta 10 W, aunque ya en los primeros meses del 2010 se han obtenido valores de hasta 200 lm/W a nivel de laboratorio y se espera llegar en poco tiempo hasta 300 lm/W.

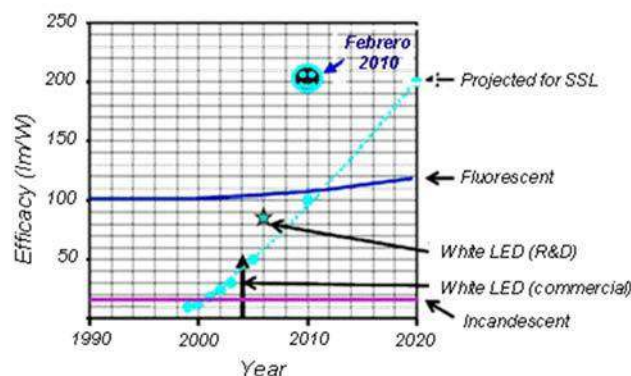


Fig. 2. Pronóstico de evaluación tecnológica de los LEDs en el 2002.
Fuente: ©2006 Rensselaer Polytechnic Institute, N.Y. 12180, USA. All Rights Reserved Efficacy. OIDA Technology Roadmap update, 2002.

Las principales ventajas de los LEDs pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- Vida útil mayor de 50 000 horas.
- Alta eficiencia en la producción de luz artificial (> 80%) y por tanto reducción de los costos de electricidad.
- Muy buena reproducción de color y temperaturas de color desde los 2 700 °K y hasta 7 000 °K para los de luz blanca.
- No emiten radiación infrarroja ni ultravioleta.
- Encendido instantáneo.
- Eliminación de efecto estroboscópico.
- Alto factor de potencia (> 0,95 ind).
- Fiabilidad de 95%.
- Mantenimiento mínimo.
- Resistentes a choques y vibraciones.
- Operan a baja tensión (no mayor de 48 V de corriente directa).

Las ventajas enunciadas han propiciado que en los últimos tres años las lámparas y luminarias que emplean LEDs hayan incursionado en sistemas de iluminación industrial, de proyección y vial con bastante éxito en el aspecto técnico. Muchos fabricantes tradicionalmente prestigiosos como PHILIPS, OSRAM y otros han perfeccionando esta tecnología y han comenzado a disminuir los precios aunque aun no lo suficiente como para propiciar su generalización. Hoy para su aplicación se requiere una relativa alta inversión inicial, lo cual suele ser una limitante para muchos inversionistas.

La utilización de luminarias con LEDs en la iluminación vial se presenta como una alternativa interesante en un futuro cercano, para reemplazar en muchos lugares las que emplean lámparas de sodio de alta presión (SAP), o Mercurio. El ahorro energético, su larga vida y sus menores gastos de explotación son ventajas que compensan sus relativos costos de inversión elevados ya que su recuperación ocurre en tiempos razonables.

No obstante lo anterior, debe señalarse que hasta el momento la mayoría de estas luminarias de iluminación vial no emplean propiamente lámparas de LEDs, es decir, tienen diseños específicos que los diferentes fabricantes obtienen con una determinada cantidad y distribución de los LED individuales para lograr una potencia y fotometría específicas para cada modelo (Fig. 3). Esto hace imposible hoy hablar de una estandarización de lámparas LEDs para estas luminarias y por lo tanto se sustituye la opción de reemplazo de lámparas por la de reemplazo de luminarias.



Fig. 3. Luminarias de iluminación vial que emplean LEDs individuales distribuidos de acuerdo a la fotometría y potencia que se desea obtener.

Otros fabricantes han comenzado a incursionar en la implementación de lámparas LEDs con base E-39 y E-40 que ya poseen una fotometría y potencia determinadas, y que pueden sustituir las lámparas de sodio o mercurio tradicionales en las luminarias existentes, lo cual abarata el cambio de tecnología y reduce los periodos de recuperación de las inversiones (Fig. 4). La limitante actual de esta tendencia está dada por la potencia individual disponible de las lámparas LEDs.



Fig. 4. Luminarias de iluminación vial que emplean lámparas de LEDs.

Este reemplazo de luminarias deberá realizarse con criterios técnicos económicos. Técnicamente la luminaria de LEDs que se decida emplear o se seleccione, debe cumplir que su eficiencia (lm/W) y su vida útil (horas) sean mayores que la que sustituye, y que su fotometría cumpla con los requisitos de la vía a iluminar.

Como resultado de lo anterior, en la actualidad no resulta posible, al menos en la iluminación vial, hablar de una sustitución exacta de lámparas de Sodio Alta Presión y de Mercurio de diferentes potencias por lámparas LEDs. En realidad lo que se realiza es, a partir de una iluminación vial existente con luminarias y lámparas tradicionales, la sustitución de dicha luminaria por una de LEDs que emita un flujo luminoso igual al de la lámpara existente, o que garantice un nivel de iluminancia igual al normado para la vía, con una fotometría similar pero con menor consumo de energía eléctrica.

En la tabla 1 se muestran los datos técnicos más importantes de las lámparas utilizadas para la iluminación vial en Cuba. Para esta tabla fueron considerados los datos técnicos más recientes de los fabricantes: Philips, Osram, Sylvania y General Electric.

Tabla 1. Datos técnicos más importantes de las lámparas utilizadas para la iluminación vial en Cuba

Tipo de lámpara	Potencia total	Emisión luminosa	Eficiencia de la lámpara	Horas de vida (catálogo)	Base o casquillo
	W	Lúmenes promedio (varios fabricantes)	Lm/W	horas	
HM 125 W	137*	6 275	46	24 000	E-27
HM 250 W	266*	12 925	49	24 000	E-40
HM 400 W	425*	22 125	52	24 000	E-40
HMM 160 W	160	3 117	19	12 000	E-27
HMM 250 W	250	5 500	22	12 000	E-40
HMM 500 W	500	13 667	27	12 000	E-40
Tipo de lámpara	Potencia total	Emisión luminosa	Eficiencia de la lámpara	Horas de vida (catálogo)	Base o casquillo
	W	Lúmenes promedio (varios fabricantes)	Lm/W	horas	
Incandescentes	100	1 360	14	1 000	E-27
Incandescentes	150	2 200	15	1 000	E-27
Incandescentes	200	3 100	15	1 000	E-27
Incandescentes	300	6 200	15	750	E-40
Incandescentes	500	9 070	18	1 000	E-40

*Nota: Los valores con * incluyen las pérdidas de balastos.*

En Cuba se han sustituido en los últimos años las lámparas de mercurio, y algún remanente de incandescencia por lámparas de mayor eficiencia como son las de sodio de alta presión.

Recientemente, en diciembre del 2009 se pone en explotación por primera vez en Cuba un sistema de iluminación vial con luminarias que emplean LEDs.

Para una adecuada comparación de las eficiencias de las luminarias con LEDs vs. otras lámparas, deben valorarse algunos aspectos técnicos de su funcionamiento que pueden ser decisivos en la sustitución, estos aspectos son la temperatura de la unión (T_j) y la temperatura ambiente (T_a) (Fig. 5), y sobre todo, saber cuáles son las potencias de LEDs más eficientes.

A modo de ejemplo, en la actualidad, el LED blanco más eficiente es el de 1 W de potencia, que alcanza valores entre 100 y 120 lm/W de eficiencia. Otros LEDs de 3, 5 y 10 W no sobrepasan en la actualidad los 75 lm/W.

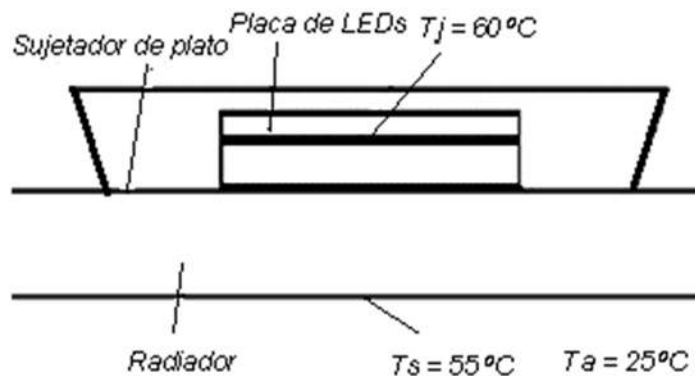


Fig. 5. Temperaturas en los LEDs.

Debe conocerse, además, que estos valores de eficiencia son definidos por los fabricantes para los LEDs individuales, en condiciones controladas de ensayo y nunca formando parte de una luminaria. Cuando los LEDs están formando parte de una lámpara o luminaria a LEDs, las eficiencias de estos son menores y su valor deberá ser definido por el fabricante.

Nótese en la figura 6, que a temperaturas ambientes mayores de 25°C la emisión luminosa de los LEDs disminuye, y con ello su eficiencia.

Otro aspecto a considerar en el cálculo final de la eficiencia de una luminaria a LEDs, es el consumo de energía que tiene el convertidor o fuente CA-CD que se requiere para el funcionamiento de los LEDs, y que por lo general se encuentra entre 7 y 20% de la potencia total de los LEDs y su valor varía con el fabricante.

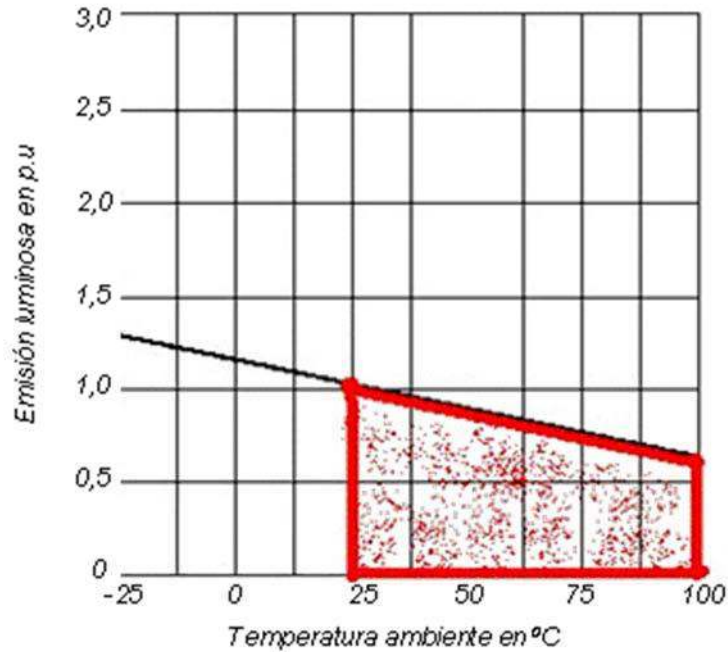


Fig. 6. Dependencia de emisión luminosa de los LEDs con la temperatura ambiente.

Posibles aplicaciones de LEDs en la iluminación vial atendiendo a su rendimiento luminoso

Las luminarias y lámparas a LEDs existentes en el mercado para aplicaciones de iluminación vial, reportan eficiencias de más de 80 lm/W y hasta 100 lm/W. En la tabla 1 se muestran los datos fundamentales de las lámparas de descargas de alta intensidad de mayor presencia en los sistemas de iluminación vial y en particular sus eficiencias. Se puede observar que, excepto las lámparas de SAP de 250 y 400 W, los valores de la eficiencia de las lámparas y luminarias a LEDs son iguales o mayores que la mayoría de las lámparas actualmente empleadas en la iluminación vial (Tabla 2), lo cual permite contar con otra opción técnica a considerar. El empleo de los LEDs, siempre requerirá de un análisis técnico-económico que lo justifique con respecto a las lámparas tradicionales.

Tabla 2. Posibles sustituciones de lámparas utilizadas en la iluminación vial por LEDs, en dependencia de la eficiencia (lm/W)

Eficiencia de la lámpara	Eficiencia de la lámpara	Horas máximas de vida (catálogo)	Horas de vida (real)	Recambio (anual)
	Lm/W	horas	horas	
LEDs	80-100	50 000	50 000	0,08
SAP (70-100-150 W)	69-90	24 000	20 000	0,2
HM (125-250-400 W)	46-52	24 000	20 000	0,2
HMM (160-250-500 W)	19-30	12 000	6 000	0,7
Incandescentes (100-500 W)	18-20	1 000	750-1 000	5

En la tabla 2 se puede observar que todas las lámparas incandescentes y de mercurio son técnicamente posibles de sustituir por soluciones LEDs, atendiendo a la inferioridad energética que estas poseen. En el caso de las lámparas de SAP deberá realizarse un análisis técnico más cuidadoso.

Teóricamente los ahorros energéticos posibles a obtener, suponiendo que sea posible sustituir las luminarias existentes por las de LEDs que satisfagan los requisitos fotométricos y luminotécnicos de la vía, son los mostrados en la tabla 3. Así las cosas, una lámpara incandescente de 100 W puede ser sustituida por una de LEDs de 17 W, si existiera en el mercado, y obtenerse un ahorro de 83% de la energía consumida.

Tabla 3. Potencia de LEDs con eficiencias de 80 y 100 lm/W requeridas para la sustitución de lámparas de incandescencia y mercurio, y porcentajes de ahorros

Tipo de lámpara	Potencia total (*)	Potencia y ahorro con LEDs de 80 lm/W		Potencia y ahorro con LEDs de 100 lm/W	
	W	W	Ahorro, %	W	Ahorro, %
Incandescentes	100	17	83	14	86
Incandescentes	150	28	82	22	85
Incandescentes	200	39	81	31	85

Incandescentes	300	78	74	62	79
Incandescentes	500	113	77	91	82
HMM 160 W	160	39	76	31	81
HMM 250 W	250	69	73	55	78
HMM 500 W	500	171	66	137	73
HM 125 W	137	78	43	63	54
HM 250 W	266	162	39	129	51
HM 400 W	425	277	35	221	48

(*) Incluye pérdidas de equipos auxiliares.

Posible impacto energético y medioambiental de la sustitución de las lámparas incandescentes y de mercurio existentes en la iluminación vial de La Ciudad de La Habana

Al cierre del 2009 se estimó que 5,2 % de las luminarias de iluminación vial de la ciudad utilizaban lámparas incandescentes de 100 W, y 5,7% eran de mercurio de diferentes potencias (Fig. 7). Estas luminarias consumen 11% de la energía total anual de la iluminación vial de la ciudad.

La potencia instalada y la energía consumida por estas luminarias de incandescencia y mercurio, así como el potencial de ahorro con el empleo de LEDs de diferentes eficacias luminosas, se aprecian en la tabla 4.

El impacto energético ideal de estas sustituciones consistiría en la obtención de un ahorro de 2 606 a 3 066 MWh anuales, en dependencia de la eficiencia de los LEDs empleados, y que se logren obtener en el mercado luminarias que cumplan con los requisitos de potencia de la tabla 3 y fotométricamente con las de la figura 7. Por otro lado, se reduciría en más de 50% la demanda de potencia que actualmente tienen estas luminarias con lámparas incandescentes y de mercurio en ciudad de La Habana, al cierre del 2009. El impacto ambiental de esta sustitución se estima en la reducción de 1 500 Ton de CO₂ dejadas de emitir a la atmósfera cada año.

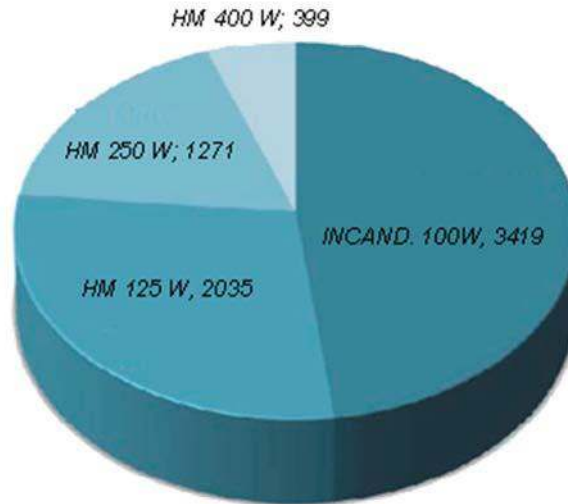


Fig. 7. Luminarias con lámparas incandescentes y de mercurio en La Habana, al cierre de 2009.

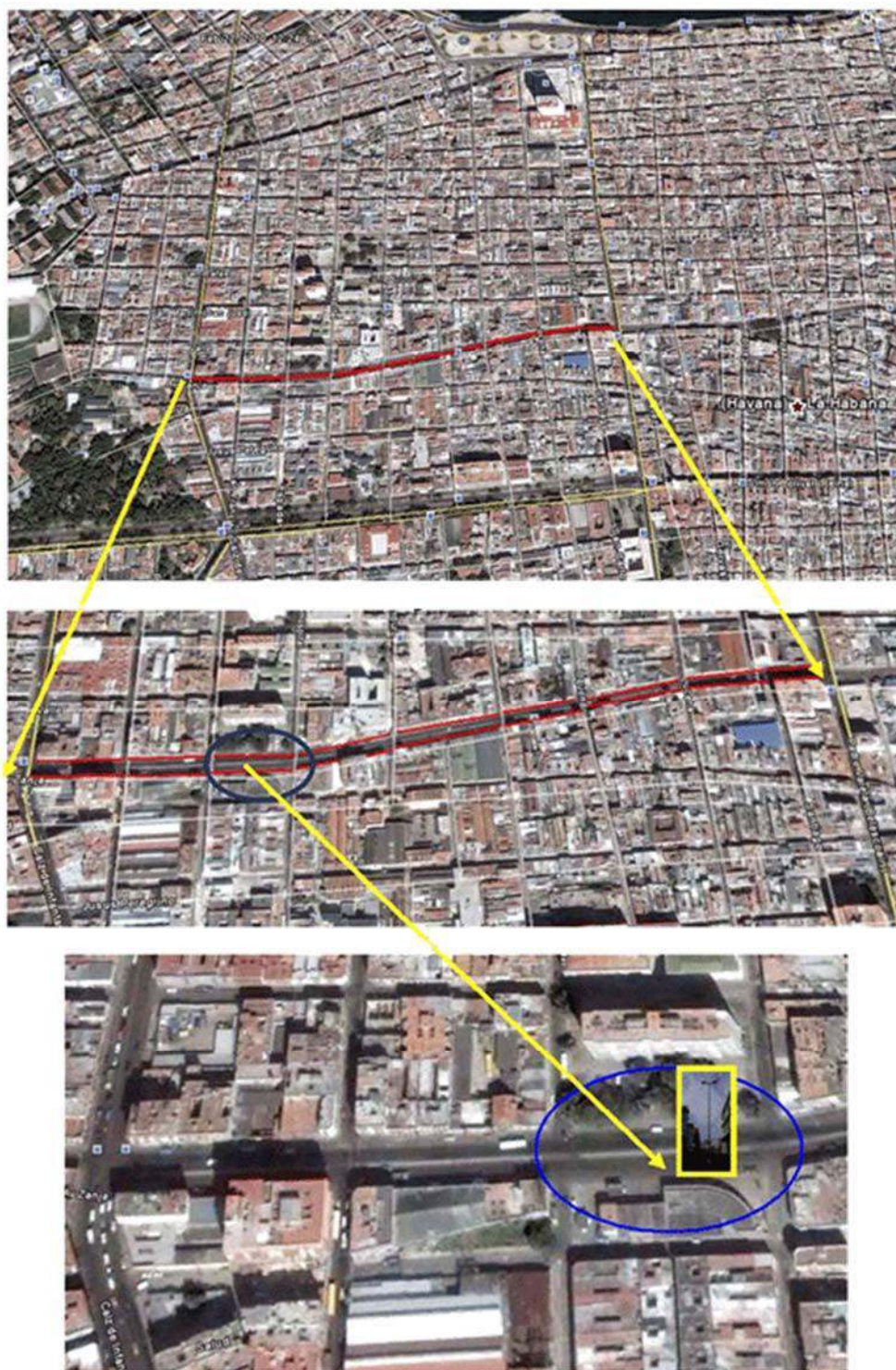
Tabla 4. Escenarios actuales y futuros de potencia instalada y energía consumida por luminarias de incandescencia, de mercurio, y con el empleo de LEDs de diferentes eficiencias luminosas en ciudad de La Habana

Tipo de lámpara	Para la condición actual		Para LEDs de 80 lm/W		Para LEDs de 100 lm/W	
	Potencia total con equipo auxiliar (kW)	Energía para (4 380 h/año) (MWh/año)	Potencia total con equipo auxiliar (kW)	Energía para (4 380 h/año) (MWh/año)	Potencia total con equipo auxiliar (kW)	Energía para (4 380 h/año) (MWh/año)
Incandescentes (100 W)	341,9	1 497,52	58,12	254,58	47,87	209,65
HM (125 W)	278,8	1 221,14	158,73	695,24	128,21	561,54
HM (250 W)	338,1	1 480,88	205,90	901,85	163,96	718,14
HMM (400 W)	169,6	742,85	110,52	484,09	88,18	386,22
Totales	1 128,4	4 942,39	533,28	2 335,76	428,21	1 875,56

Caso de estudio de una aplicación de luminarias LEDs en la iluminación vial en ciudad de La Habana

Este sistema se encuentra ubicado en La Habana, en un tramo de la calle Zanja, entre Infanta y Belascoaín (Figs. 8, 9 y 10) donde se reemplazaron

las luminarias de sodio de alta presión de 150 W existentes, y en su lugar se instalaron las luminarias STL- A220/180-PP100.RR, de 195 W de potencia.



Figs. 8, 9 y 10.

El sistema de iluminación a que nos referimos cuenta con 58 luminarias Haier modelo STL-A220/180-PP100.RR de 195 W de potencia total, con implantación axial o central (Fig. 11), que pueden operar a una tensión alterna comprendida entre 90~265 Volt; las mismas se encuentran ubicadas en 29 postes y suspendidas a una altura de 10 metros sobre la calle. Cada luminaria posee 168 LEDs. Los datos técnicos de esta luminaria se detallan a continuación.

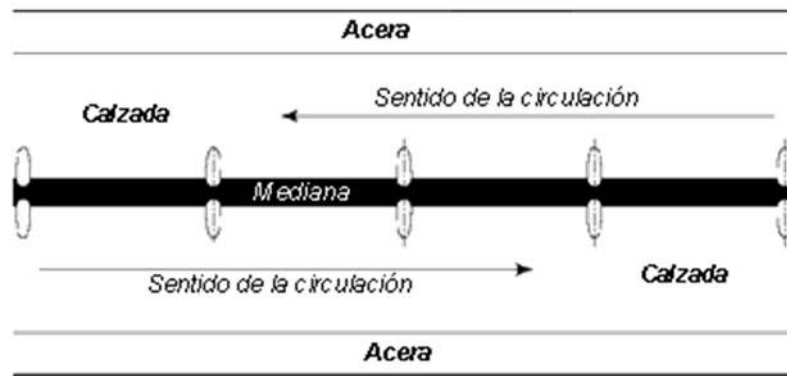


Fig. 11. Implantación axial o central.

Tabla 5. Datos técnicos más importantes de las luminarias STL-A220/180-PP100.RR utilizadas para la iluminación vial en la calle Zanja

No.	Parámetros eléctricos	Unidad	Valores
1	Tensión de entrada (CA)	V	90-265
2	Frecuencia	Hz	50-60
3	Consumo Total	W	195
4	Factor de Potencia		$\geq 0,96$ ind
5	Consumo de potencia de LEDs	W	180
6	Consumo de potencia de la fuente de CD a corriente constante	W	15

Parámetros luminotécnicos			
1	Eficacia del LED (OSRAM)	lm/W	>100
2	Flujo total de la luminaria	Lm	≥12800
3	Eficiencia de la luminaria	%	71%
4	Temperatura de color	K°	6 000±500
No.	Parámetros eléctricos	Unidad	Valores
5	Rendimiento de color	Ra	>70
Otros parámetros técnicos			
1	Temperatura de operación	°C	-25-50H
2	Humedad	%	10-90
3	Vida de servicio (dato teórico)	Hrs	>50,000
4	Nivel de protección	IP	IP65
5	Dimensiones	mm	983x360x73

De acuerdo a la tabla 3, esta luminaria es adecuada para sustituir a las luminarias de 250 W de mercurio y las de 500 W de mercurio mixta.

Los requerimientos luminotécnicos mínimos que se deben cumplimentar de acuerdo a la categoría y uso de esta avenida son:

- Nivel de iluminancia promedio horizontal mínimo: 17-20 lux.
- Uniformidad media (E_{min}/E_{med}): 0,33-0,4.
- Uniformidad extrema máxima (E_{min}/E_{max}): $\geq 0,1$.

Para comprobar o verificar los resultados de esta iluminación vial con la luminaria STLA220/180-PP100.RR, se procedió de la manera siguiente:

1. Se definió un tramo de la avenida que tuviera, como condición, una mínima influencia de la iluminación circundante en la vía, seleccionándose el tramo comprendido entre las calles Espada y Hospital (ver Fig. 10).
2. Se realizaron mediciones del ancho de la vía, la altura de la luminaria sobre la vía y la separación entre los postes.
3. Se seleccionó un punto de medición de parámetros eléctricos en el secundario del transformador que suministra la alimentación a 40 luminarias, en el tramo comprendido en las calles desde Infanta a Oquendo.
4. Se realizaron mediciones individuales de la tensión y corriente demanda por cada uno de los 29 postes.
5. Se instalaron contadores de energía activa en los dos circuitos de iluminación, para obtener el consumo de energía activa durante varios días.
6. Se realizaron mediciones de iluminancia horizontal en la senda Sur a 15 cm de altura de la calle. Estas mediciones no se podrán comparar con las existentes anteriormente, debido a que no se realizaron mediciones previas y las luminarias existentes eran de 150 W de sodio baja presión.
7. A los efectos de la comparación de ahorros energéticos, se consideró que la luminaria anterior a la sustitución era de 250 W de sodio de baja presión.

Resultados de las mediciones de las dimensiones de la vía y ubicación de luminarias

Ancho de la vía	10 m
Altura de la luminaria	10 m
Separación entre postes	30 m

Resultado de las mediciones de iluminancia horizontal a 15 cm de altura con respecto a la calle

Para la medición se seleccionaron cuadrículas de 1 m² y se distribuyeron en 10 filas (i) y 17 columnas (j), las mediciones se realizaron en el punto medio de cada cuadrícula y en total se tomaron 170 lecturas en los puntos.

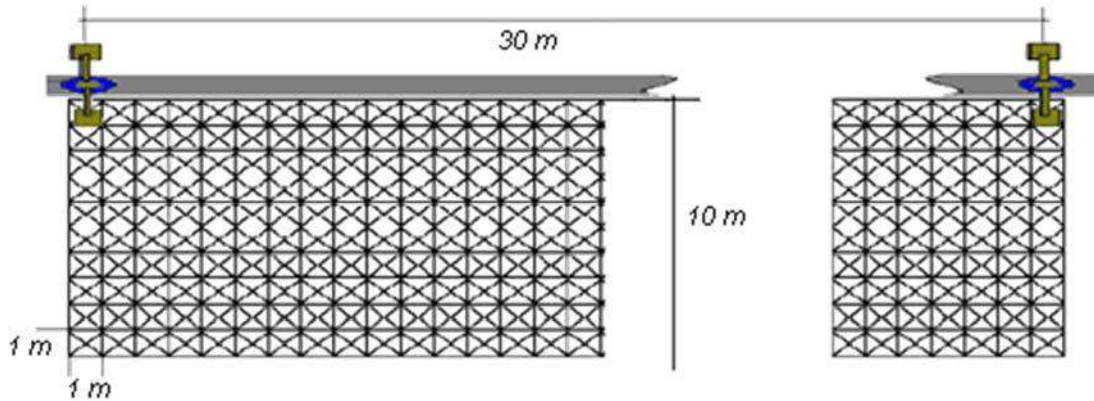


Fig.12. Mediciones de iluminancia horizontal.

Las mediciones de iluminancia en la vía, obtenidas en los 170 puntos fueron realizadas con un metro de iluminancia o luxómetro (Modelo Testo 545) y se muestran en la tabla 5, la tensión del circuito fue monitoreada durante el tiempo de la medición, 60 minutos y su valor promedio fue de 253 V.

Tabla 6. Mediciones de iluminancias E_{ij} en los puntos P_{ij} de la calzada (Lux)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	24	32	36	37	35	34	33	32	33	31	30	21	23	20	20	21	22
2	23	34	36	36	34	34	31	32	30	29	26	20	21	19	19	20	22
3	23	34	34	34	32	31	29	28	27	25	23	18	19	18	18	19	20
4	22	29	31	29	28	27	25	24	23	21	20	14	17	16	17	17	17
5	22	23	25	24	24	24	22	21	20	18	17	12	14	13	13	13	14
6	19	19	22	21	21	20	19	18	17	16	15	11	13	11	11	10	11
7	18	16	18	19	18	18	17	15	15	14	12	9	10	9	9	8	8

8	16	14	15	16	16	15	14	13	13	11	10	7	8	7	7	7	6
9	12	12	13	14	13	13	12	10	10	9	9	6	6	6	5	5	6
10	10	11	11	12	11	11	10	9	8	8	8	5	5	5	5	5	4

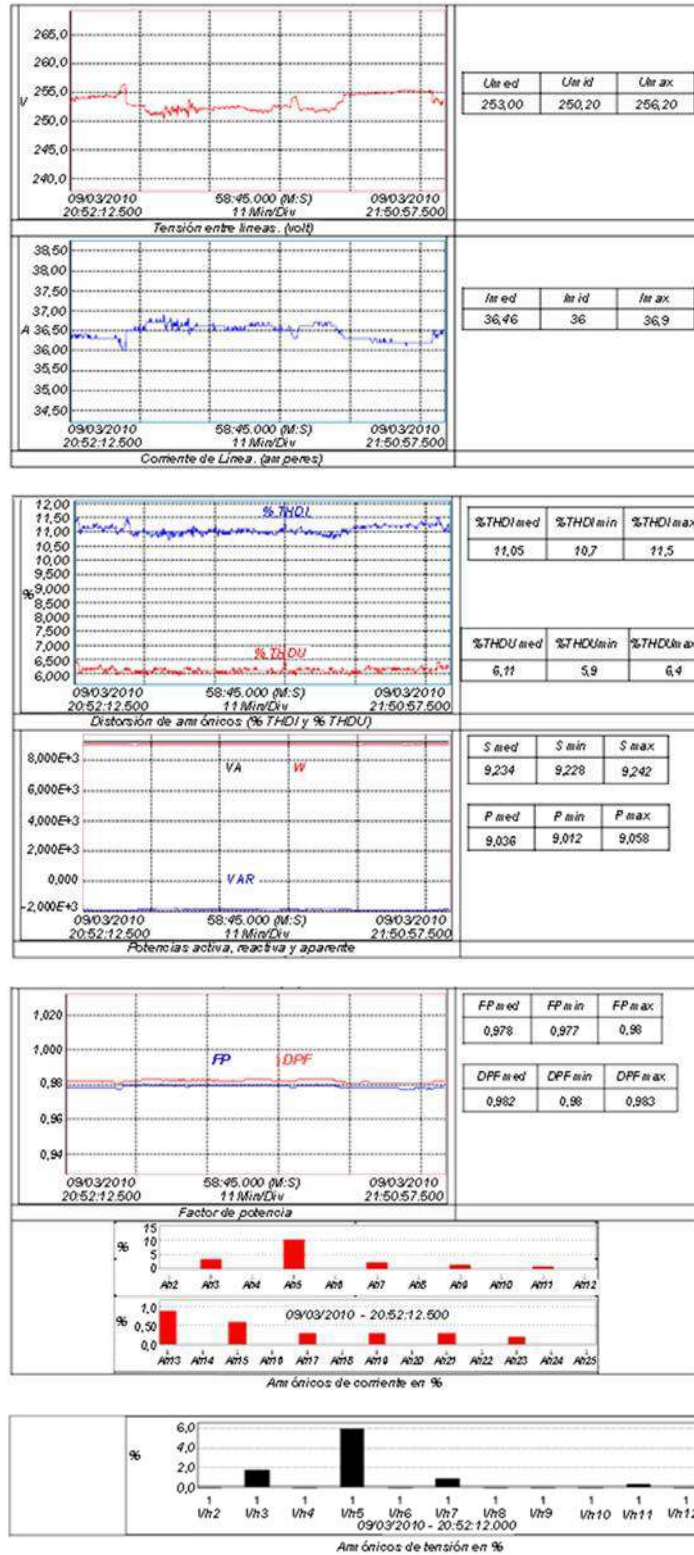
Los valores de Iluminancias extremas y medias, así como los de uniformidades obtenidas de las mediciones realizadas fueron los siguientes:

Iluminancias	Lux
E _{max} (lux)	37
E _{med} (lux)	18,11
E _{min} (lux)	4

Uniformidades	p.u.
U _{med} (0,33-0,4)	0,22
U _{max} ($\geq 0,1$)	0,11

Los valores de iluminancia promedio obtenidos están dentro de lo establecido para este tipo de vía; sin embargo, la uniformidad media es inferior a la normada y la uniformidad extrema está prácticamente en el valor mínimo. En la imagen de la figura 12 pueden apreciarse los problemas de uniformidad de la iluminancia que se asocian a las zonas oscuras entre luminarias, debidas a que la fotometría de la luminaria no es la adecuada para la altura de la misma sobre la calzada, o con la separación existente entre los postes.

Los resultados de las mediciones de los parámetros eléctricos realizadas durante una hora a intervalos de medición de un minuto, con un analizador Chauvin Arnoux CA8334B, debidamente certificado, en el alimentador totalizador del secundario del transformador de alumbrado de 15 KVA que alimenta el circuito de 40 luminarias, se muestran a continuación.



Figs.13-19. Resultados de las mediciones de los parámetros eléctricos.

Adicionalmente a la medición realizada con el analizador de redes, se colocaron metros contadores de energía en cada uno de los dos transformadores; estos metros registraron los consumos durante 11 días y los resultados fueron los siguientes:

Datos técnicos contador electrónico No.1 de energía activa, trifásico

- Dirección: Zanja e/ Espada y Hospital.
- Modelo: DTS634, Class: 2.0, No. 2006-10-49001597.
- 3x220/380 V, 3x50 (100) A, 60 Hz, 160 imp/kWh, IEC 62053-21, Hecho en China.
- Lectura de instalado: 000001.
- Lectura tomada: 001293, el día 12-3-2010.
- Consumo: 1 292 kWh en 11 noches de encendido.
- Consumo diario de 117,45 kWh.
- Consumo para 30 días: 3 523,5 kWh.
- Total de luminarias del circuito: 40.
- Consumo por luminaria: 2,94 kWh/día.

Datos técnicos contador electrónico No.2 de energía activa, trifásico

- Dirección: Zanja, entre Oquendo y Marquéz González.
- Modelo: DTS634, Class: 2.0, No. 2006-10-49001598.
- 3x220/380 V, 3x50 (100) A, 60 Hz, 160 imp/ kWh, IEC 62053-21, Made in China.
- Lectura de instalado: 000001.
- Lectura tomada: 000467 el día: 12-3-2010.
- Consumo: 467 kWh en 11 noches de encendido.
- Consumo diario de 42.45 kWh.
- Consumo para 30 días: 1 273,5 kWh.
- Total de luminarias del circuito: 18.
- Consumo por luminaria: 2,36 kWh/día.

La potencia individual promedio de las luminarias Haier medida en cada poste fue de 189,52 W, que para el circuito de 40 luminarias demanda una potencia total de 7,58 kW. La demanda total medida con el analizador de redes fue de 9,036 kW, lo que supone que la diferencia es la pérdida en los conductores del circuito de iluminación y que sería de 1,46 kW (16%). El consumo de energía diario de cada una de las 40 luminarias fue de 2,94 kWh; de estos, 2,47 kWh son propios de la luminaria y el resto son pérdidas de energía. Este circuito de iluminación promedia 13 horas diarias de trabajo.

Impacto energético de la sustitución de las luminarias de mercurio de 250 W existentes en ciudad de La Habana por la luminaria STL-A220/180-PP100.RR

Las 1 271 luminarias de mercurio de 250 W de potencia que existen en la ciudad, demandan 338,09 kW y consumen anualmente 1 480,88 MWh. La sustitución de estas por la luminaria STL-A220/180-PP100.RR, con una demanda de catálogo de 195 W, demandaría 247,85 kW y consumiría anualmente 1 085,56 MWh, lo que representa 27% de ahorro de energía (395,32 MWh) con respecto a la de mercurio, y una reducción de 198 t de CO₂ dejadas de emitir al medioambiente cada año.

Conclusiones

- El desarrollo de la tecnología LEDs en los últimos 4 años y sus beneficios han permitido ampliar sus aplicaciones luminotécnicas, incluyendo las de iluminación vial con buenas prestaciones técnicas.
- La utilización de luminarias con LEDs en la iluminación vial se presenta como una alternativa interesante en un futuro cercano, para reemplazar en muchos lugares las que emplean lámparas incandescentes o de mercurio. El ahorro energético, su larga vida y sus menores gastos de explotación son ventajas que compensan sus relativos costos de inversión elevados, ya que su recuperación de ocurre en periodos razonables.
- Debe señalarse que hasta el momento la mayoría de estas luminarias de iluminación vial no emplean propiamente lámparas de LEDs, es decir, tienen diseños específicos que los diferentes fabricantes obtienen con una determinada cantidad y distribución de los LED individuales para lograr una potencia y fotometría específicas con cada modelo . Esto hace imposible hoy hablar de una estandarización de lámparas LED para estas luminarias, y por lo tanto se sustituye la opción de reemplazo de lámparas por la de reemplazo de luminarias.
- Técnicamente la luminaria de LEDs que se decida emplear o se seleccione, debe cumplir que su eficiencia (lm/W) y su vida útil (horas) sean mayores que la que sustituye, y que su fotometría cumpla con los requisitos de la vía a iluminar.
- Los valores de eficiencia para los LEDs individuales son definidos por los fabricantes en condiciones controladas de ensayo, y nunca formando parte de una luminaria.
- Cuando los LEDs están formando parte de una lámpara o luminaria LEDs, las eficiencias son menores y su valor deberá ser definido por el fabricante.

- En la tabla 3 se muestran valores orientativos del impacto de la sustitución de lámparas de incandescencia y mercurio por LEDs, y los porcentajes de ahorros.
- La sustitución de luminarias con lámparas incandescentes y mercurio existentes en la ciudad de La Habana pudiera tener un impacto energético con un ahorro de 2 606 a 3 066 MWh anuales. Adicionalmente, se reduciría en más de 50% la demanda de potencia que actualmente tienen estas luminarias, y su impacto ambiental se estima en la reducción de 1 500 Ton de CO₂ dejadas de emitir a la atmósfera cada año.
- En el caso de estudio de una aplicación de luminarias LEDs en la iluminación vial en ciudad de La Habana, los valores de iluminancia promedio obtenidos están dentro de lo establecido para este tipo de vía; sin embargo, la uniformidad media es inferior a la normada y la uniformidad extrema está prácticamente en el valor mínimo, lo que puede ser debido a que la fotometría de la luminaria STLA220/180-PP100.RR no es la adecuada.
- El impacto energético de la sustitución de las luminarias de mercurio de 250 W existentes en ciudad de La Habana por la luminaria STL-A220/180-PP100.RR, representa 27% de ahorro de energía (395,32 MWh) y una reducción de 198 t de CO₂ dejadas de emitir cada año.

Bibliografía

ACH Export & Services Inc. LED Alumbrado Público – DRL-2060.
www.achexport.com.

ACH Export & Services Inc. LED Alumbrado Público – SP90.
www.achexport.com.

Catálogos electrónicos consultados.

Cómo seleccionar y comparar luminarias LED's para aplicaciones de alumbrado exterior.

Anfalum Comunica No.12. Enero 2010.

http://www.alumbradoled.com/131050_Quantum.html.

<http://www.ledsinternational.com/espanol/index.htm>.

http://www.lumination.com/category_products.php?id=52&cat_id=51.

http://www.osram.com/osram_com/News/Trade_Press/General_Lighting/index.html.

Illuminance measurements of roadways. *Hans Peter Grieneisen, Aline S.P. Timmins, André S. Sardinha, Lakyra B. Couceiro.* XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

Manual de alumbrado público y de iluminación exterior con LEDs de alta intensidad. DMX Tecnologías Monterrey. www.dmxledlights.com. 2005.
Norma IEC 61347-2-13:2006. Requisitos particulares para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LEDs. Operation Instruction, STL-A220/180 LED Lantern. Haier Group. 2009.

Una revisión bibliográfica de estudios sobre fachadas solares opacas y transparentes

A bibliographic review of studies on opaque and transparent solar facades

Por Guillermo Quesada Ramos,
Yvan Dutil*, Daniel Rousse*
y Stephane Halle*Chaire de recherche industrielle t3e,
École de technologie supérieure, Montreal, Canadá
e-mail: guillermo@t3e.info; Yvan@t3e.info; daniel@t3e.info
y Stephane.halle@etsmtl.ca

Resumen

Los pueblos antiguos denotaban un conocimiento de los principios de la arquitectura solar, orientando sus casas al sur para aprovechar el sol durante todas las estaciones del año. En la actualidad, la arquitectura solar está experimentando una verdadera revolución, producto, entre otros factores, al desarrollo de fachadas especiales utilizadas en los procesos de calefacción, ventilación, aislamiento térmico, sombreado, de generación de energía eléctrica y de iluminación natural de edificaciones, a las que se les ha dado el nombre de "fachadas solares". El trabajo siguiente tiene como objetivo presentar una exhaustiva revisión bibliográfica de estudios científicos efectuados sobre las fachadas solares durante los primeros 10 años del presente siglo. En total, fueron revisados 190 artículos, cuyo 75% se encuentra publicado en las revistas científicas *Energy and Buildings*, *Solar Energy*, *Building and Environment*, *Renewable Energy* y *Applied Thermal Engineering*.

Palabras clave: Fachada solar, radiación solar, almacenamiento térmico, chimenea solar, fachada ventilada

Abstract

Ancient people knew about the principles of solar architecture, positioning their houses facing south to take advantage of solar radiation during all seasons of the year. Currently, solar architecture is experiencing a real revolution, due to, among other factors, the development of special façades used in heating processes, ventilation, thermal insulation, shading, electric power generation and natural lighting of buildings, to which they have been given the name of "solar facades". The current paper aims at presenting an exhaustive bibliographic review of scientific studies on solar facades carried out during the first 10 years of the present century. In total, 190 articles were reviewed, out of which 75% were published in the scientific

journals Energy and Buildings, Solar Energy, Building and Environment, Renewable Energy and Applied Thermal Engineering.

Key words: Solar façade, solar radiation, thermal storage, solar chimney, ventilated façade

Introducción

En arquitectura, la fachada es, por definición general, la envolvente exterior de la superficie habitable de una vivienda, envolvente que se encuentra dispuesta verticalmente en la mayoría de los casos.

La fachada, además de su función estética, debe cumplir con otros requisitos: ser resistente al agua, aislar el edificio térmicamente y acústicamente, y en algunos casos, ser resistente al fuego.

Hoy en día la arquitectura solar atraviesa por una verdadera revolución a causa del desarrollo, entre otros, de fachadas solares diseñadas para la calefacción, ventilación, aislamiento, sombreado, generación de energía eléctrica e iluminación natural de las edificaciones. Sin embargo, su aplicación va acompañada de importantes desafíos en términos de la complejidad de los procesos, las tecnologías utilizadas y la capacidad de adaptación de estas soluciones para diferentes áreas geográficas con condiciones climáticas específicas. Este problema ha suscitado un gran interés en la comunidad científica internacional, la que ya ha llevado a cabo numerosos estudios sobre fachadas solares. La figura siguiente ilustra una clasificación general de dichas fachadas solares.

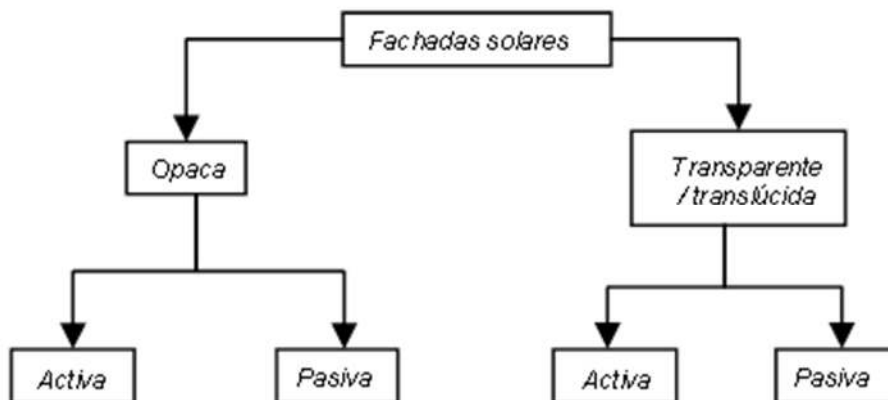


Fig.1. Clasificación general de fachadas solares.

Nuestro equipo ha realizado una revisión exhaustiva del trabajo científico realizado sobre las fachadas solares durante los primeros 10 años del presente siglo. Los resultados de este estudio se resumen a continuación.

Método de investigación

En primer lugar se definió el marco dentro del cual se llevaría a cabo este estudio. Se hizo hincapié en las bases de datos de las revistas científicas publicadas en los últimos diez años: *ScienceDirect*, *Taylor & FrancisJournalsySpringler*.

Luego se compilaron las palabras claves encontradas en búsquedas bibliográficas preliminares, las que más adelante fueron empleadas para realizar una búsqueda exhaustiva en las bases de datos antes mencionadas (Tabla 1).

Tabla1. Lista de palabras clave

Facade	<i>Solar facade, Multifunctional solar facade, Active facade, Active transparent facade, Double-skin facade, Unglazed transpired solar facade.</i>
Wall	<i>Solar wall, Trombe wall, Ventilated solar wall, Active thermal wall.</i>
Envelope	<i>Active building envelope, Window active envelope.</i>
Collector	<i>Unglazed perforated-absorber collector, Unglazed transpired solar collector.</i>
	<i>Heat discharge system, Active Thermal insulators, Building-integrated Phtovoltaic panel, Transparent heat insulation.</i>

Del conjunto de publicaciones científicas encontradas, las más pertinentes fueron seleccionadas y agrupadas según el tipo de fachada solar estudiada en cada publicación. A continuación, cada artículo fue analizado y reagrupado dentro de los conjuntos siguientes: estudios teóricos-experimentales, estudios de desarrollo, estudios de factibilidad y estudios de caso. Esto último se hizo para facilitar cualquier revisión bibliográfica ulterior que se desee realizar sobre el tema tratado en este trabajo.

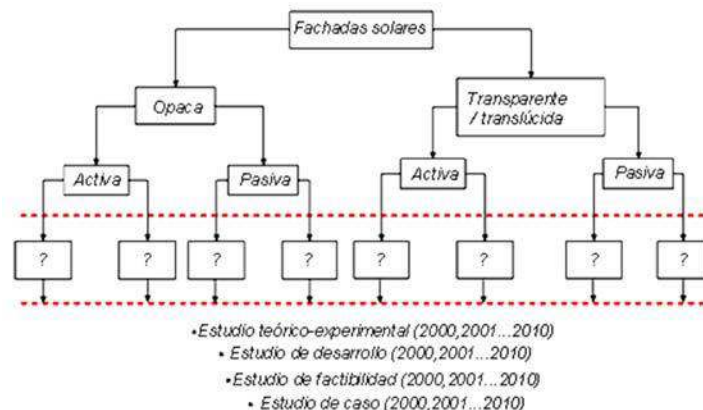


Fig.2. Esquema de la organización de la investigación.

Resultados

Un total de 190 artículos pertinentes fueron encontrados, cuyo 68% fue publicado entre el 2006 y el 2010 (Fig. 3). Se constata un aumento significativo en el número de publicaciones a partir del 2007.

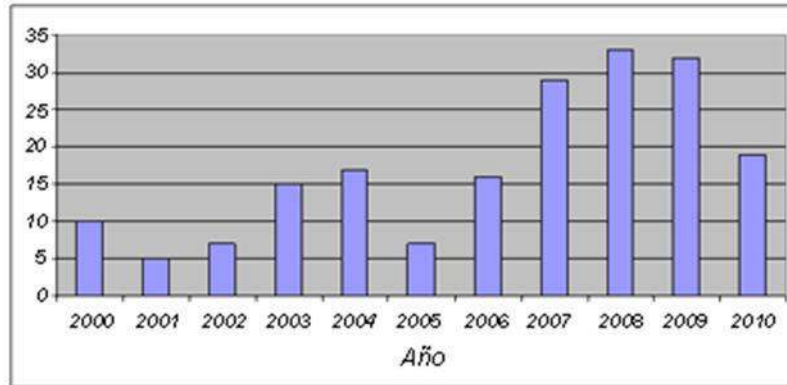


Fig.3. Distribución de artículos por año.

El 75% de los artículos consultados fue publicado en las 5 revistas científicas siguientes: *Energy and Buildings*, *Solar Energy*, *Building and Environment*, *Renewable Energy* y *Applied Thermal Engineering* (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de artículos de revista científica

Revista científica	Número de artículos
<i>Energy and Buildings</i>	60
<i>Solar Energy</i>	34
<i>Building and Environment</i>	21
<i>Renewable Energy</i>	18
<i>Applied Thermal Engineering</i>	9

En los epígrafes siguientes se describirán brevemente cada tipo de fachadas solares.

Fachadas solares opacas y activas

Las fachadas solares opacas absorben y reflejan la radiación solar incidente y no permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación. Si dichas fachadas son capaces de transformar la radiación

solar incidente en electricidad para su uso inmediato, o si ellas emplean aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) para transferir la energía térmica al edificio, entonces se identifican como fachadas solares opacas y activas.

Fachada solar térmica integrada al edificio [1-12]

Una fachada solar térmica integrada al edificio cumple simultáneamente la función de cubierta exterior y de colector de energía solar para fines de calentamiento. Esta tecnología ha despertado un gran interés por su relativa simplicidad tecnológica, sin embargo, aún se trabaja en optimizar su funcionamiento. Por ejemplo, el impacto del viento sobre dicha fachada no es bien comprendido. Actualmente se investiga en nuevos materiales de recubrimiento superficial para aumentar la versatilidad de esta fachada.

Fachada solar fotovoltaica integrada al edificio [13-24]

Una fachada solar fotovoltaica integrada al edificio consiste en la integración de paneles fotovoltaicos en la envolvente de la edificación, reemplazando con ello materiales de construcción tradicionales. En algunos casos, se emplea un flujo de aire detrás del panel fotovoltaico para mejorar su eficiencia energética.

Fachada solar híbrida fotovoltaica-térmica integrada al edificio [25-34]

Una fachada solar híbrida fotovoltaica-térmica integrada al edificio simultanea las funciones de una fachada solar fotovoltaica con las de una solar térmica. Esta combinación tiene como objetivo hacer un uso más eficiente de la energía solar incidente sobre la fachada. El panel fotovoltaico trabajará con mayor eficiencia a menor temperatura y a la vez suministrará calor útil para la edificación.

Fachadas solares opacas y pasivas

Las fachadas solares opacas y pasivas pueden ser paredes o superficies opacas acristaladas que transforman la energía solar incidente en energía térmica para la calefacción o ventilación del edificio, sin necesidad de utilizar aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control).

Pared de almacenamiento térmico [35-57]

Una pared de almacenamiento térmico o muro Trombe combina las funciones de colección y almacenamiento de la energía solar térmica en una sola unidad. El calor se transfiere desde la pared al aire interior por radiación y convección natural. Este es el sistema que más se ha estudiado. El mismo ha demostrado su potencial en la reducción de la demanda de calefacción (40-50%). Con el empleo de la norma internacional

UNE-EN ISO 13790 se pueden realizar cálculos que describen el comportamiento térmico de dicha pared.

Chimenea solar [58-67]

Una chimenea solar es una estructura que se compone principalmente de una superficie captadora acristalada para el calentamiento de aire. Cuando la energía solar calienta dicha superficie, se produce una corriente ascendente de aire en la chimenea y una aspiración natural de aire en la base de la chimenea, lo que se emplea para la ventilación del edificio. Aunque es similar al muro Trombe, la tecnología de la chimenea solar se encuentra menos desarrollada y los estudios realizados muestran un potencial significativo para su optimización.

Fachadas solares transparentes / translúcidas activas

Las fachadas solares transparentes / translúcidas no sólo absorben y reflejan una parte de la radiación solar incidente, sino también permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación. Se denominan fachadas solares transparentes / translúcidas activas, si además son capaces de transformar la radiación solar incidente en electricidad, para su uso inmediato, o si emplean aparatos eléctricos o mecánicos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) para transferir la energía térmica al edificio.

Fachada con ventilación mecánica [68-77]

Una fachada con ventilación mecánica utiliza un sistema de ventilación mecánico para proporcionar, eliminar o recircular el aire a través de una cavidad situada entre dos superficies transparentes o translúcidas que forman parte de la envolvente del edificio. El aire extrae el calor de dicha envolvente acristalada y, recirculando o desechando este aire caliente, se reducen los costos de calefacción (invierno) y aire acondicionado (verano) del edificio.

Fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio [78-87]

Una fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio forma parte de la envolvente del mismo, permite la entrada de luz natural en sus espacios interiores y transforma la energía solar incidente en electricidad, mediante el empleo de módulos fotovoltaicos semitransparentes.

Fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio [88-89]

Una fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio combina las funciones de un sistema fotovoltaico con las de una

fachada con ventilación mecánica. Sobre esta aplicación, muy pocos estudios han sido realizados hasta el momento.

Fachadas solares transparentes / translúcidas pasivas

Las fachadas solares transparentes / translúcidas pasivas pueden ser superficies acristaladas que transforman la luz solar en energía térmica para la calefacción o ventilación del edificio. No utilizan dispositivos mecánicos o eléctricos (bombas, ventiladores, válvulas, equipos de control) y permiten la ganancia solar directa hacia el interior de la edificación.

Fachada con ventilación natural [90-102]

Una fachada con ventilación natural proporciona, evacua o recircula el aire a través de una cavidad situada entre dos superficies transparentes o translúcidas pertenecientes a la envolvente del edificio. El movimiento del aire se produce debido a la presión del viento y (o) al efecto de chimenea. De modo similar a la fachada con ventilación mecánica, el aire extrae el calor de dicha envolvente acristalada, y recirculando o desechando este aire caliente se reducen los costos de calefacción (invierno) y de climatización (verano) del edificio.

Conclusiones

Se realizó una revisión bibliográfica de estudios científicos efectuados entre los años 2000 y 2010 sobre fachadas solares. Las fachadas estudiadas fueron agrupadas en nueve categorías (Fig. 4): fachada solar térmica integrada al edificio (STIE), fachada solar fotovoltaica integrada al edificio (SFIE), fachada solar híbrida fotovoltaica- térmica integrada al edificio (SFTIE), pared de almacenamiento térmico (PAT), chimenea solar (CS), fachada con ventilación mecánica (VM), fachada solar fotovoltaica semitransparente integrada al edificio (SFSIE), fachada solar fotovoltaica-térmica semitransparente integrada al edificio (SFTSIE) y fachada con ventilación natural (VN).

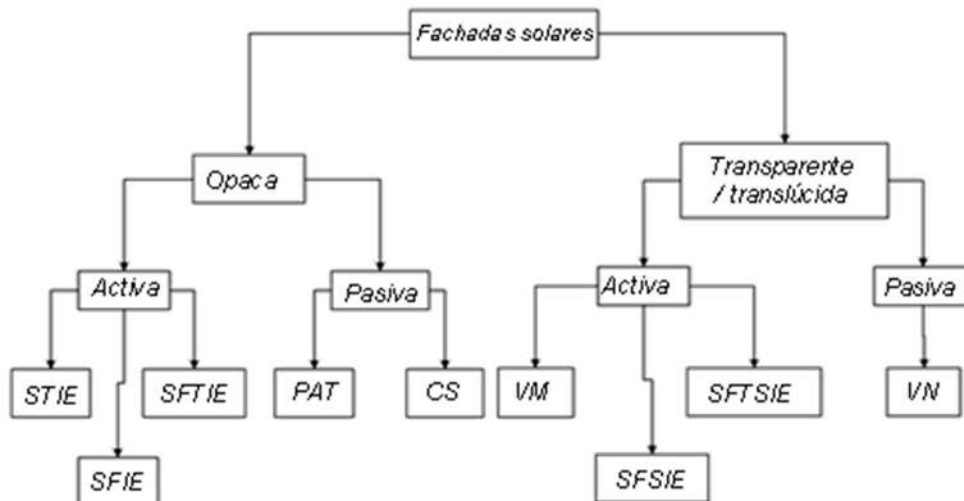


Fig.4. Clasificación de las fachadas solares.

Las fachadas ventiladas están ganando un espacio notable como elemento arquitectónico en edificios de oficinas. Más allá de la estética, dichas fachadas protegen al edificio y a la vez contribuyen a reducir los costos de calefacción (invierno) y de climatización (verano) del edificio. Diversos estudios prestan especial atención al uso de dispositivos de sombreado (ej.: persianas venecianas, masa térmica de hormigón) en el conducto de ventilación de la fachada con el fin de reducir la ganancia solar directa en los edificios.

Las fachadas solar fotovoltaica semitransparente y solar fotovoltaica-térmica semitransparente integradas al edificio, además de suministrar energía eléctrica, permiten el paso de la luz natural y del calor hacia el interior del edificio. Estas tecnologías se encuentran aún en una fase temprana de su desarrollo.

Los trabajos científicos revisados muestran un gran potencial en las aplicaciones de las fachadas solares en edificaciones, sin embargo, aún queda por investigar con vistas a optimizar sus rendimientos energéticos. Hoy en día, únicamente la pared de almacenamiento térmico y sus diferentes variantes muestran un avanzado grado de madurez tecnológica.

Para no sobrepasar el número exigido de páginas en este trabajo, en las referencias bibliográficas solamente aparecen 102 artículos de los 190 consultados. La lista completa de artículos consultados puede ser enviada por correo electrónico a todo aquel que se muestre interesado.

Bibliografija

- [1] VAN DECKER, G.W.E., HOLLANDS K.G.T., BRUNGER A.P., Heat-exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch, *Solar Energy*, 71, pp.33-45, (2001).
- [2] FLECK B.A., MEIER R.M., MATOVIC M.D., A field study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector, *Solar Energy*, 73, pp.209-216, (2002).
- [3] GUNNEWIEK L.H., HOLLANDS K.G.T., BRUNDRETT E., Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors, *Solar Energy*, 72, pp.317-325, (2002).
- [4] LEON M.A., KUMAR S., Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors, *Solar Energy*, 81, pp.62-75, (2007).
- [5] BOUTIN Y., GOSSELIN L., Optimal mixed convection for maximal energy recovery with vertical porous channel (solar wall), *Renewable Energy*, 34, pp.2714-2721, (2009).
- [6] RICHMAN R.C., PRESSNAIL K.D., A more sustainable curtain wall system: Analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall, *Building and Environment*, 44, pp.1-10, (2009).
- [7] RICHMAN R., PRESSNAIL K.D., Quantifying and predicting performance of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall through experimentation and numerical modeling, *Energy and Buildings*, 42, pp.522-533, (2010).
- [8] OREL B., SPREIZER H., SURCA V.A., FIR M., MERLINI D., VODLAN M., KÖHL M., Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, pp.108-119, (2007).
- [9] JAPELJ B., VUK A.S., OREL B., PERSE L.S., JERMAN I., KOVAC J., Preparation of a TiMEMO nanocomposite by the sol-gel method and its application in coloured thickness insensitive spectrally selective (TISS) coatings, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, pp.1149-1161, (2008).
- [10] KOZELJ M., VUK A.S., JERMAN I., OREL B., Corrosion protection of Sunselect, a spectrally selective solar absorber coating, by (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane, *Solar Energy Materials and Solar Cells*; 93, pp.1733-1742, (2009).
- [11] JERMAN I., KOZELJ M., OREL B., The effect of polyhedral oligomeric silsesquioxane dispersant and low surface energy additives on spectrally selective paint coatings with self-cleaning properties, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp.232-245, (2010).
- [12] UBERTINI S., DESIDERI U., Design of a solar collector for year-round climatization, *Renewable Energy*, 28, pp.623-645, (2003).
- [13] HENEMANN A., BIPV: Built-in solar energy, *Renewable Energy Focus*, 9:14, pp.16-19, (2008).

- [14] BRINKWORTH B.J., MARSHALL RH, IBARAHIM Z., A validated model of naturally ventilated PV cladding, *Solar Energy*, 69, pp.67-81, (2000).
- [15] YANG H., BURNETT J., JI J., Simple approach to cooling load component calculation through PV walls, *Energy and Buildings*, 31, pp.285-290, (2000).
- [16] CHOW T.T., HAND J.W., STRACHAN P.A., Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building, *Applied Thermal Engineering*, 23, pp.2035-2049 (2003).
- [17] HUANG M.J., EAMES P.C., NORTON B., Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials International, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, pp.2715-2733, (2004).
- [18] HUANG M.J., EAMES P.C., NORTON B., Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics, *Solar Energy*, 80, pp.1121-1130, (2006).
- [19] BLOEM J.J., Evaluation of a PV-integrated building application in a well-controlled outdoor test environment, *Building and Environment*, 43, pp.205-216, (2008).
- [20] FOSSA M., MÉNÉZO C., LEONARDI E., Experimental natural convection on vertical surfaces for building integrated photovoltaic (BIPV) applications, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, pp.980-990, (2008).
- [21] JIMÉNEZ M.J., MADSEN H., BLOEM J.J., DAMMANN B., Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, *Energy and Buildings*, 40, pp.157-167, (2008).
- [22] FRILING N., JIMÉNEZ M.J., BLOEM H., MADSEN H., Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy and Buildings*, 41, pp.1051-1057, (2009).
- [23] MAURUS H., SCHMID M., BLERSCH B., LECHNER P., SCHADE H., PV for buildings: Benefits and experiences with amorphous silicon in BIPV applications, *Refocus*, 5, pp.22-27 (2004).
- [24] MALLICK T.K., EAMES P.C., NORTON B., Non-concentrating and asymmetric compound parabolic concentrating building facade integrated photovoltaics: An experimental comparison, *Solar Energy*, 80, pp.834-849, (2006).
- [25] JI J., HAN J., CHOW T-T., YI H., LU J., HE W., SUN W., Effect of fluid flow and packing factor on energy performance of a wall-mounted hybrid photovoltaic/water-heating collector system, *Energy and Buildings*, 38, pp.1380-1387, (2006).
- [26] MURESAN C., MÉNÉZO C., BENNACER R., VAILLON R., Numerical Simulation of a Vertical Solar Collector Integrated in a Building Frame: Radiation and Turbulent Natural Convection Coupling, *Heat Transfer Engineering*, 27, pp.29-42, (2006).
- [27] CRAWFORD R.H., TRELOAR G.J., FULLER R.J., BAZILIAN M., Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with

- heat recovery unit, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, pp.559-575, (2006).
- [28] CHOW T.T., HE W., JI J., An experimental study of facade-integrated photovoltaic/water-heating system, *Applied Thermal Engineering*, 27, pp.37-45, (2007).
- [29] JIE J., HUA Y., WEI H., GANG P., Jianping L., Bin J., Modeling of a novel Trombe wall with PV cells, *Building and Environment*, 42, pp.1544-1552, (2007).
- [30] JIE J, HUA Y, GANG P, JIANPING L. Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage. *Applied Thermal Engineering* 2007;27:1507-1515.
- [31] JIE J., HUA Y., GANG P., BIN J., WEI H., Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment*, 42, pp.3529-3539, (2007).
- [32] TONUI J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements, *Solar Energy*,81, pp.498-511, (2007).
- [33] TONUI J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation, *Renewable Energy*, 32, pp.623-637, (2007).
- [34] TONUI J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82, pp.1-12, (2008).
- [35] FANG X., LI Y., Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls, *Solar Energy*, 69, pp.55-66 (2000).
- [36] FANG X., YANG T., Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls, *Applied Thermal Engineering*, 28, pp.2289-2294, (2008).
- [37] ZALEWSKI L., LASSUE S., DUTHOIT B., BUTEZ M. Study of solar walls -- validating a simulation model, *Building and Environment*, 37, pp.109-121, (2002).
- [38] ONBASIOGLU H., EGRICAN A.N., Experimental approach to the thermal response of passive systems, *Energy Conversion and Management*, 43, pp.2053-2065, (2002).
- [39] STRITIH U., Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings, *Energy and Buildings*, 35, pp.1097-1104, (2003).
- [40] CHEN W., LIU W., Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber, *Applied Thermal Engineering*, 28, pp.1251-1258, (2008).
- [41] HERNÁNDEZ V., MORILLÓN D., BEST J.F.R., ALMANZA R., CHARGOY N., Experimental and numerical model of wall like solar heat discharge passive system, *Applied Thermal Engineering*,26, pp.2464-2469, (2006).
- [42] THOMAS J., ALGOHARY S., HAMMAD F., SOBOYEJO W., Materials selection for thermal comfort in passive solar buildings, *Journal of Materials Science*,41, pp.6897-6907, (2006).

- [43] SHEN J., LASSUE S., ZALEWSKI L., HUANG D., Numerical study of classical and composite solar walls by TRNSYS, *Journal of Thermal Science*, 16, pp.46-55, (2007).
- [44] ZAMORA B., KAISER A.S., Numerical study on mixed buoyancy-wind driving induced flow in a solar chimney for building ventilation, *Renewable Energy*, 35, pp.2080-2088, (2010).
- [45] RUIZ Á., DOMÍNGUEZ S.Á., FERNÁNDEZ J.A.S. Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790, *Energy and Buildings*, 42, pp.763-773, (2010).
- [46] BAKOS G., Energy management method for auxiliary energy saving in a passive-solar-heated residence using low-cost off-peak electricity, *Energy and Buildings*, 31, pp.237-241, (2000).
- [47] BILGEN E., Experimental study of massive wall systems with fins attached on the heated wall and with glazing, *Heat and Mass Transfer*, 38, pp.159-164, (2001).
- [48] ONISHI J., SOEDA H., MIZUNO M., Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system, *Renewable Energy*, 22, pp.61-66, (2001).
- [49] TYAGI V.V., BUDDHI D., PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp.1146-1166, (2007).
- [50] NWACHUKWU N.P., OKONKWO W.I., Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall system, *Energy and Buildings*, 40, pp.371-374, (2008).
- [51] PASUPATHY A., VELRAJ R., SEENIRAJ R.V., Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp.39-64, (2008).
- [52] SHARMA A., TYAGI V.V., CHEN C.R., BUDDHI D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp.318-345, (2009).
- [53] ZHU N., MA Z., WANG S., Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Conversion and Management*, 50, pp.3169-3181, (2009).
- [54] HEIM D., Isothermal storage of solar energy in building construction, *Renewable Energy*, 35, pp.788-796, (2010).
- [55] BLASCO LUCAS I., HOESÉ L., PONTORIERO D., Experimental study of passive systems thermal performance. *Renewable Energy*, 19, pp.39-45, (2000).
- [56] YANG H., ZHU Z., BURNETT J., Simulation of the behaviour of transparent insulation materials in buildings in northern China, *Applied Energy*, 67, pp.293-306, (2000).

- [57] RAMAN P., MANDE S., KISHORE V.V.N., A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates, *Solar Energy*, 70, pp.319-329, (2001).
- [58] AFONSO C., OLIVEIRA A., Solar chimneys: simulation and experiment, *Energy and Buildings*, 32, pp.71-79, (2000).
- [59] ONG K.S., A mathematical model of a solar chimney, *Renewable Energy*, 28, pp.1047-1060, (2003).
- [60] ONG K.S., CHOW C.C., Performance of a solar chimney, *Solar Energy*, 74, pp.1-17, (2003).
- [61] BANSAL N.K., MATHUR J., MATHUR S., JAIN M., Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation, *Building and Environment*, 40, pp.1302-1308, (2005).
- [62] GAN G., Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, *Energy and Buildings*, 38, pp.410-420, (2006).
- [63] MATHUR J., BANSAL N.K., MATHUR S., JAIN M., ANUPMA, Experimental investigations on solar chimney for room ventilation, *Solar Energy*, 80, pp.927-935, (2006).
- [64] NOUANÉGUÉ H.F., ALANDJI L.R., BILGEN E., Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renewable Energy*, 33, pp.434-443, (2008).
- [65] NOUANÉGUÉ H.F., BILGEN E., Heat transfer by convection, conduction and radiation in solar chimney systems for ventilation of dwellings, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, pp.150-157, (2009).
- [69] SAKONIDOU E.P., KARAPANTSIOS T.D., BALOUKTSIS A.I., CHASSAPIS D., Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow, *Solar Energy*, 82, pp.80-94, (2008).
- [67] ZAMORA B., KAISER A.S., Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney shaped channels in natural convection by numerical investigation, *Applied Thermal Engineering*, 29, pp.762-769, (2009).
- [68] BAKER P.H., MCEVOY M., Test cell analysis of the use of a supply air window as a passive solar component, *Solar Energy*, 69, pp.113-130, (2000).
- [69] MCEVOY M.E., SOUTHALL R.G., BAKER P.H., Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by the use of modelling techniques, *Energy and Buildings*, 35, pp.1009-1020, (2003).
- [70] SOUTHALL R.G., MCEVOY M.E., Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation, *Solar Energy*, 80, pp.512-523, (2006).
- [71] ZÖLLNER A., WINTER E.R.F., Viskanta R., Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp.4401-4408, (2002).

- [72] SAFER N., WOLOSZYN M., ROUX J.J., Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind, *Solar Energy*, 79, pp.193-203, (2005).
- [73] BALOCCO C., COLOMBARI M., Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed facade: Non-dimensional analysis, *Energy and Buildings*, 38, 1-7, (2006).
- [74] GOSSELIN J.R., CHEN Q., A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window, *Energy and Buildings*, 40, pp.452-458, (2008).
- [75] JIRU T.E., HAGHIGHAT F., Modeling ventilated double skin facade--A zonal approach, *Energy and Buildings*, 40, pp.1567-1576, (2008).
- [76] GUARDO A., COUSSIRAT M., EGUSQUIZA E., ALAVEDRA P., CASTILLA R., A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Facades in Mediterranean climates, *Energy and Buildings*, 41, pp.534-542, (2009).
- [77] FULIOTTO R., CAMBULI F., MANDAS N., BACCHIN N., MANARA G., CHEN Q., Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building façade, *Energy and Buildings*, 42, pp.23-28 (2010).
- [78] FUNG T.Y.Y., YANG H., Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings, *Energy and Buildings*, 40, pp.341-350, (2008).
- [79] SONG J-H., AN Y-S., KIM S-G., LEE S-J., YOON J-H., CHOUNG Y-K., Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (BIPV), *Energy and Buildings*, 40, pp.2067-2075, (2008).
- [80] HAN J., LU L., YANG H., Thermal behavior of a novel type see-through glazing system with integrated PV cells, *Building and Environment*, 44, pp.2129-2136, (2009).
- [81] PARK K.E., KANG G.H., KIM H.I., YU G.J., KIM J.T., Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module, *Energy*, 35, pp.2681-2687 (2010).
- [82] PHANI G., TULLOCH G., VITTORIO D., SKRYABIN I., Titania solar cells: new photovoltaic technology, *Renewable Energy*, 22, pp.303-309, (2001).
- [83] XU X., DESSEL S.V., MESSAC A., Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes, *Building and Environment*, 42, pp. 1489-1502, (2007).
- [84] XU X., VAN DESSEL S., Evaluation of a prototype active building envelope window-system, *Energy and Buildings*, 40, pp.168-174, (2008).
- [85] XU X., DESSEL S.V., Evaluation of an Active Building Envelope window-system, *Building and Environment*, 43, pp.1785-1791, (2008).
- [86] MERCALDO L.V., ADDONIZIO M.L., NOCE M.D., VENERI P.D., SCOGNAMIGLIO A., PRIVATO C., Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues, *Applied Energy*, 86, pp.1836-1844, (2009).

- [87] SPANOS I., DUCKERS L., Expected cost benefits of building-integrated PVs in UK, through a quantitative economic analysis of PVs in connection with buildings, focused on UK and Greece, *Renewable Energy*, 29, pp.1289-1303, (2004).
- [88] DAVIDSSON H., PERERS B., KARLSSON B., Performance of a multifunctional PV/T hybrid solar window, *Solar Energy*, 84, pp.365-372, (2010).
- [89] INFIELD D., MEI L., EICKER U., Thermal performance estimation for ventilated PV facades, *Solar Energy*, 76, pp.93-98, (2004).
- [90] FAGGEMBAU D., COSTA M., SORIA M., OLIVA A., Numerical analysis of the thermal behaviour of ventilated glazed facades in Mediterranean climates. Part I: development and validation of a numerical model, *Solar Energy*, 75, pp.217-228, (2003).
- [91] BALOCCO C., A non-dimensional analysis of a ventilated double facade energy performance, *Energy and Buildings*, 36, pp.35-40, (2004).
- [92] PARK C-S., AUGENBROE G., MESSADI T., THITISAWAT M., SADEGH N., Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems, *Energy and Buildings*, 36, pp.1117-1130, (2004).
- [93] PARK CSC-S., AUGENBROE G., SADEGH N., THITISAWAT M., MESSADI T., Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modeling and occupant preference, *Building and Environment*, 39, pp.939-948, (2004).
- [94] PÉREZ I., MESEGUER J., ALONSO G., Influence of glass properties on the performance of double-glazed facades, *Applied Thermal Engineering*, 25, pp.3163-3175, (2005).
- [95] CHOW W.K., HUNG W.Y., GAO Y., ZOU G., DONG H., Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned façade, *Construction and Building Materials*, 21, pp.556-566, (2007).
- [96] KUZNIK F., RUSAOUEN G., Numerical Prediction of Natural Convection Occurring in Building Components: A Double-Population Lattice Boltzmann Method Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, *An International Journal of Computation and Methodology*, 52, pp.315-335, (2007).
- [97] COUSSIRAT M., GUARDO A., JOU E., EGUSQUIZA E., CUERVA E., ALAVEDRA P., Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated facades, *Energy and Buildings*, 40, pp.1781-1789, (2008).
- [98] XU X-L., YANG Z., Natural ventilation in the double skin facade with venetian blind, *Energy and Buildings*, 40, pp.1498-1504, (2008).
- [99] DALAL R., NAYLOR D., ROELEVELD D., A CFD study of convection in a double glazed window with an enclosed pleated blind, *Energy and Buildings*, 41, pp.1256-1262, (2009).

- [100] KIM Y-M., KIM S-Y., SHIN S-W., SOHN J-Y., Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter, *Building and Environment*, 44, pp.2236-2244, (2009).
- [101] LAOUADI A., Thermal performance modelling of complex fenestration systems, *Journal of Building Performance Simulation*, 2, pp.189-207, (2009).
- [102] TANAKA H., OKUMIYA M., TANAKA H., YOUNG G., WATANABE K., Thermal characteristics of a double-glazed external wall system with roll screen in cooling season, *Building and Environment*, 44, pp.1509-1516, (2009).

Instalación del aerogenerador W+W 1200 para el Laboratorio de Energía Renovable

Installation of W + W 1200 wind turbine for the Renewable Energy Laboratory

Por Ing. Claudio R. Echeverría Espino,
Ing. Oscar de la Presa Montejo*, M.Sc. Juan Israel Veliz Alonso*,
M.Sc. Janiel González Espinosa* y M.Sc. Marlene Oramas Ortega*
Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos (UMCC),
Autopista a Varadero, km 3½, Matanzas, 44740 MT, Cuba.
e-mail: claudio@divmtzas.empet.cupet.cu*

Resumen

En el trabajo se realiza la propuesta de instalación de un sistema eólico a partir de un generador W+W 1200 de fabricación alemana donado por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Aachen, Alemania. Para el montaje se realizó el diseño de la base de hormigón que soportaría la estructura metálica con el equipo en su conjunto. Se expone además la secuencia de montaje e instalación de todo el sistema.

Palabras clave: Aerogenerador, recurso eólico, potencia eólica

Abstract

In the current paper it is propose the installation of a wind power generation system wich includes a generator W+W 1200 of German manufacture donated by the University of Applied Sciences of Aachen, Germany. For the assembly of the system, it was designed a concrete base that would support the structure with the equipment as a whole. The sequence of assembly and installation of the entire system is also shown.

Keywords: Wind turbine, wind resource, wind power

Introducción

Las necesidades energéticas globales están creciendo en un porcentaje asombroso en todo el mundo.

La energía eólica constituye una manifestación de la energía solar indirecta; el Sol calienta distintamente la superficie de la Tierra, por lo que produce diferencias de presión en el aire, y provoca, en consecuencia, movimientos de este. Por tanto, se presenta en casi todas las áreas de la Tierra, pero su intensidad y regularidad es diversa.

Desde hace años, a nivel político existe en casi todo el orbe la tendencia de brindar un apoyo decidido a la energía eólica en su conjunto, según los niveles particulares de desarrollo. Así, se observa que se han creado beneficios fiscales, financieros y subvenciones para potenciar el desarrollo de esta industria. Por ejemplo, en la conferencia europea de Berlín (2004), la Unión Europea (UE) declaraba que, hasta 2020, el porcentaje de energías renovables debía cubrir 20 por ciento del consumo total de energía.

Esta política pone en la palestra del debate una alternativa viable para la subsistencia y el continuo desarrollo de la sociedad mundial: la necesidad de generar y utilizar la energía de la manera más racional en toda la diversidad de su existencia, si se tiene en cuenta que hoy en día la sociedad moderna necesita de la energía hasta el punto de que el desarrollo en todos los órdenes está ligado a su creciente consumo.

Desde los primeros años de Revolución, Cuba se proyecta por una cultura energética. En 1993 se aprueba el Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía, por la Asamblea Nacional del Poder Popular y el Consejo de Ministros, documento que fija las direcciones principales para el país en el uso de la energía. Posteriormente se crea la Universidad Técnica de Energías Renovables (UTER), que agrupa a los centros universitarios que laboran en temas relacionados con las energías renovables, el ahorro de la energía, la eficiencia energética y la educación energética. Hoy Cuba cuenta con la empresa estatal ECOSOL, la ONG CUBASOLAR (Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental) y varios centros de investigaciones del CITMA.

El 2006 –denominado *Año de la Revolución Energética*– marcó un hito en la política energética cubana. Los organismos correspondientes han trazado planes y acciones encaminados al estudio y aprovechamiento de las energías, siendo el tema de la energía renovable una de las fuentes de estudio, así como el aprovechamiento de la energía solar para la producción de electricidad y el calentamiento de agua. Esto se ha materializado en la colocación de numerosos paneles fotovoltaicos, como parte de la Batalla de Ideas, en las escuelas que no poseían electricidad; en su uso para el calentamiento de agua en hoteles y círculos infantiles, entre otras acciones, así como la instalación y puesta en marcha de parques eólicos en varias zonas del país.

Las Instituciones de la Educación Superior en Cuba han trabajado en la formación de especialistas energéticos en las universidades de La Habana, Matanzas, Las Villas y Oriente.

Desde la década de los sesentas y principios de los setentas, se realizan experimentos con superficies de absorción solar, se procesan y caracterizan celdas solares y aerogeneradores, se introducen los temas ambientales y de diseño bioclimático para el uso pasivo de la energía renovable, y se comienzan a desarrollar trabajos encaminados al mejoramiento de la eficiencia en los hornos y calderas de los centrales azucareros, así como en el quemado del bagazo (revista *Energía y tú*, 2003).

La enseñanza universitaria como centro receptor, generador e investigador de conocimientos no puede transitar sin integrar a su proceso docente educativo, lo más actual del desarrollo de la ciencia y la técnica. En cuanto a las carreras de Ciencias Técnicas, en particular en la formación de ingenieros mecánicos, la problemática de la energía no ha sido insertada exitosamente desde el punto de vista curricular.

En el 2001, las universidades de Matanzas y la de Ciencias Aplicadas de Aachen, Alemania, comenzaron un proyecto de colaboración para impulsar la investigación sobre fuentes de energía.

Fundamento teórico

Se definió como situación problemática la siguiente: Desde hace más de cinco años se encuentra en desuso un equipamiento para la producción de energía eléctrica eólica, donado por la Universidad de Ciencias Aplicadas de AACHEN, Alemania.

Hipótesis:

Si se instala el sistema el aerogenerador en la UMCC, se puede suministrar energía eléctrica con un potencial máximo de 1,2 kW, con el consiguiente ahorro de energía eléctrica.

Objetivo:

Realizar el montaje de un aerogenerador W+W 1200 en la azotea de la Facultad Química Mecánica de la UMCC.

Tareas:

1. Búsqueda bibliográfica a fin de conocer la situación actual de la energía eólica.
2. Análisis de la documentación del aerogenerador W+W 1200 existente en el laboratorio de energía renovable de la Facultad Química Mecánica.
3. Verificación del funcionamiento del aerogenerador W+W 1200.
4. Confección de planos de instalación y montaje.
5. Montaje e instalación del aerogenerador W+W 1200.

El cumplimiento de las tareas de la investigación permitieron la elaboración del informe que se presenta, el que ofrece los resultados del estudio bibliográfico referente al tema, la metodología utilizada en el proceso investigativo y los resultados obtenidos al realizarse el montaje e instalación del aerogenerador W+W 1200. Finalmente se ofrecen las conclusiones, las recomendaciones y los anexos.

Montaje del aerogenerador

Para realizar el montaje del aerogenerador se siguieron los pasos siguientes:

Cimentación

Se diseñó, un cimiento del tipo balsa, para distribuir cargas, sobre el techo de la azotea.

El punto con más responsabilidad de carga es el centro de la viga central, el que debe caer sobre el centro de la columna de hormigón, que está bajo techo, ya que el techo solo no sería capaz de sostener toda la carga de la estructura de acero, más el equipo; por tanto, es muy importante que el centro de la columna de acero (tubo de 140 mm de diámetro) quede arriba del centro de la columna de hormigón, que está bajo el techo, para garantizar la seguridad de la resistencia de la estructura de hormigón. Los cálculos para este fin se ofrecen a continuación:

1. Carga en el techo normal 146 kg/m².
2. Área de apoyo en la estructura de acero: 3,73 m²
1. m² ----- 146 kg
3,73 m² ----- x
2. X_{techo} = 544, 5 kg. Carga que absorbe el techo.
3. Carga total estructura y el equipo, X_{total}= 1 312,5 kg

$$X_{S\ techo} = X_{Total} - X_{techo}$$

$$X_{S\ techo} = 1312,5 - 544,5$$

$$X_{S\ techo} = 768\ kg$$

(1)

Donde:

X_{S techo}: Carga que queda sin absorber por el techo.

Por tanto, es necesario que el punto central de la columna de acero (Tubo de 140 mm de diámetro), quede encima del centro de la columna que se encuentra debajo del techo, para que la misma sostenga esta carga, de 768 kg, que no puede absorber el techo.

4. Carga axial admisible en la columna de 20x20 cm de hormigón.

$$P = 0.18 * f_c * A_c + 0.8 * f_s * A_s \quad (2)$$

Donde:

f_c : Esfuerzo admisible hormigón, kg/cm²

$f_c = 0.4 f_{c1} = 0.4 (175 \text{ kg/cm}^2) = 70 \text{ kg/cm}^2$

$A_c = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$ (área hormigón)

P : Carga axial en la columna, kg.

f_s : Esfuerzo admisible del acero, kg/cm² = 280 kg/cm²

$A_s = 1,13 \text{ cm}^2$ (cabilla diámetro 12 mm). Área de acero
 $\times 4 = 4,52 \text{ cm}^2$

Entonces:

$$P = 0.18 * 70 * 40 + 0.8 * 280 * 452$$

$$P = 6052.4 \text{ kg}$$

5. Concluyendo

La columna sí puede absorber toda la carga ya que ella tiene resistencia límite hasta 6 052,4 kg.

6. Resumiendo

Es muy importante colocar el centro de la columna de la estructura metálica arriba del centro de la columna de hormigón, dado que el techo y la columna conjuntamente, sí son capaces de resistir la carga de 1 312,5 kg de la estructura más el equipo; esto es muy importante, ya que si no se monta el centro de la estructura de acero con el centro de la columna de hormigón, el techo no resistiría el aerogenerador y su estructura.

Columna soporte

Se colocaron sobre los cimientos 2 vigas principales de longitud 14,5 m viga H 160, uniéndolas mediante expansionadores M16 a los cimientos y colocándolas en el ala de la viga; a continuación se colocaron los tranques interiores de longitud 3,28 m de vigas H 160; seguidamente se instaló la viga central de longitud 3,28 m viga H 160, luego se colocó el tranque exterior de longitud 3,47 m de I 140 y los 2 arriostres que van cerrando las esquinas de T60 milímetros, que van unidos a la estructura con tornillos M12.

Montaje de la torre del aerogenerador

Se unieron los tramos de la columna o sea el primer tramo con el segundo y este con el tercero; luego se colocó el pasador en la bisagra inferior del primer tramo para quedar unida la columna a la base de la estructura metálica.

A continuación se montó el aerogenerador con sus aspas al último tramo de columna.

Para el izaje de la columna desde el plano horizontal al vertical se utilizó una grúa camión Kato NK-300 30tn, para poder realizar una manipulación segura y precisa dada la altura en la que se realizó el montaje, en la azotea del tercer piso de la facultad de Química-Mecánica de la Universidad de Matanzas.

Cuando la columna estuvo en su posición vertical se colocaron 6 vientos o cables con tensores para asegurar la posición de la columna; a continuación se regularon los tensores de manera que quedaran tensados.

Mantenimiento de la estructura del aerogenerador W+W 1200

Limpieza del área, engrase de los elementos móviles de la estructura, se aplicó grasa de conservación a los elementos roscados y al resto que lo necesitara. Se limpió toda la superficie de la estructura metálica con cepillo de alambre. Se aplicó pintura anticorrosiva y esmalte para el acabado.

Montaje eléctrico

En el montaje eléctrico del aerogenerador se tuvo en cuenta su potencia para seleccionar el cableado a montar. Primeramente, del aerogenerador se instalaron los cables que suministran la energía hasta el regulador, que es el encargado de regular la corriente generada, y posteriormente entregárselas al banco de baterías para su almacenamiento.

Posteriormente, partiendo del banco de baterías se instaló el convertidor, que es el encargado de convertir la corriente directa de 24v a corriente alterna de 220v.

A su vez, esta corriente es utilizada en los consumidores, con un banco de disipadores encargados de disipar la energía producida y no utilizada por los consumidores

Cálculo de la velocidad del viento a diferentes alturas

La velocidad del viento a una cierta altura sobre el nivel del suelo es:

$$V = V_{ref} * \frac{\ln \frac{Z}{Z_0}}{\ln \frac{Z_{ref}}{Z_0}} \quad (4)$$

Donde:

v : Velocidad del viento a una altura z sobre el nivel del suelo.

v_{ref} : Velocidad de referencia, es decir, velocidad de viento ya conocida a una altura dada.

z_{ref} . $\ln(...)$: Función logaritmo natural.

z : Altura sobre el nivel del suelo para la velocidad deseada, v .

z_0 : Longitud de rugosidad en la dirección de viento actual.

z_{ref} : Altura de referencia, es decir, la altura en la que conocemos la velocidad del viento exacta (v_{ref}).

Tabla 1. Escala de velocidades de viento

Velocidades de viento a 10 m de altura		Escala Beaufort (anticuada)	Viento
m/s	nudos		
0,0-0,4	0,0-0,9	0	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	1	Ligero
1,8-3,6	3,5-7,0	2	
3,6-5,8	7-11	3	
5,8-8,5	11-17	4	Moderado
8,5-11	17-22	5	Fresco
11-14	22-28	6	Fuerte
14-17	28-34	7	
17-21	34-41	8	Temporal

21-25	41-48	9	
25-29	48-56	10	Fuerte temporal
29-34	56-65	11	
>34	>65	12	Huracán

Caracterización de los recursos eólicos

La cantidad de energía contenida en las masas de aire en movimiento en su circulación por las capas bajas atmosféricas representa el nivel del potencial energético del recurso eólico, que puede ser relativamente elevado, de tal modo que se justifica el esfuerzo de transformarla en energía útil y su aprovechamiento en condiciones favorables de eficiencia y rentabilidad, dado el grado de desarrollo alcanzado por las tecnologías de conversión eólica.

Potencia eólica disponible

Una masa de aire, m , que se mueve a una velocidad, v , tiene una energía cinética

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5)$$

La energía por unidad de volumen de la corriente de aire es

$$e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (6)$$

Donde;

ρ : Densidad del aire.

El flujo aire a través de una superficie A es

$$\phi = v \cdot A \quad (7)$$

Por lo tanto, la energía que fluye por unidad de tiempo, es decir, la potencia eólica disponible, (Pd) a través de una sección transversal de área A perpendicular a la corriente de aire a una velocidad v , es:

$$Pd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot v \cdot A = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (8)$$

La energía eólica disponible por unidad de área expuesta al viento es proporcional al cubo de la velocidad, por lo que pequeñas variaciones en la velocidad del viento se reflejan sensiblemente en la energía suministrada.

Tabla 2. Densidad del aire a presión atmosférica estándar

Densidad del aire a presión atmosférica estándar			
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Densidad, es decir, masa de aire seco, kg/m³	Contenido de agua máx., kg/m³
-25	-13	1,423	
-20	-4	1,395	
-15	5	1,368	
-10	14	1,342	
-5	23	1,317	
0	32	1,292	0,005
Densidad del aire a presión atmosférica estándar			
Temperatura, °C	Temperatura, °F	Densidad, es decir, masa de aire seco, kg/m³	Contenido de agua máx., kg/m³
5	41	1,269	0,007
10	50	1,247	0,009
15	59	1,225*	0,013
20	68	1,204	0,017
25	77	1,184	0,023
30	86	1,165	0,030
35	95	1,146	0,039
40	104	1,127	0,051
* La densidad del aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar, a 15 °C, se utiliza como estándar en la industria eólica.			

Determinación de la potencia generada por el aerogenerador W+W 1200 instalado en la Universidad de Matanzas

Para determinar la potencia real que generó el aerogenerador, se midió con un anemómetro la velocidad del viento, que fue de 8 m/s; a esta velocidad de viento se obtiene 28 V y una intensidad de 42 A, por lo que:

$$\begin{aligned}Pr_{eal_{gen}} &= I_{gen} * V_{gen} \\Pr_{eal_{gen}} &= 38 * 28 \\Pr_{eal_{gen}} &= 1064 W\end{aligned}\tag{9}$$

Donde:

$P_{real_{gen}}$: Potencia, W

I : Intensidad de la corriente generada, A

V : Voltaje de la corriente generada, V.

Para realizar el cálculo de la potencia que pudiera entregar el aerogenerador se realizaron los pasos siguientes:

- Se midió la velocidad del viento con un anemómetro manual digital en la base del aerogenerador por no poseer la estación meteorológica en funcionamiento obteniéndose un valor de 8m/s.
- El diámetro de las paletas (d_p) del aerogenerador es de 5 m.
- Se obtiene la Densidad del aire a la temperatura de 30 °C, $\rho = 1,165 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned}Pd &= \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot v^3 \\Pd &= \frac{1}{2} \cdot 1.165 \cdot \frac{3.1416 \cdot 5^2}{4} \cdot 8^3 \\Pd &= 1171.1139 W\end{aligned}$$

Como se aprecia la potencia disponible es superior a la potencia generada lo cual concuerda con las pérdidas de transformación y transmisión desde el aerogenerador hasta el regulador.

Conclusiones

El sistema eólico instalado en el techo de la Facultad de Ingenierías Química-Mecánica produce una potencia nominal instalada de 1 200 W.

7. La estructura de concreto diseñada para soportar el aerogenerador con su estructura metálica es capaz de soportar 175 kg/cm², superior al provocado por el peso del sistema.
8. El aerogenerador W+W está diseñado para trabajar con un mínimo de velocidad igual a 3 m/s y un máximo de 12 m/s.

9. La potencia entregada por el aerogenerador a una velocidad del viento de 8 m/s se estimó en 1 176 W.

Recomendaciones

1. Diseñar un sistema de protección anticorrosiva empleando los productos producidos en la Universidad.
2. Colocar un sistema de izaje que permita el despliegue y repliegue de la torre con el aerogenerador
3. Comprar baterías de plomo ácido de 160 A como mínimo de 12 ó 24 V para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación.

Seleccionar correctamente las cargas a conectar teniendo en cuenta que el voltaje nominal de la línea es de 220 V.

Bibliografía

- ACSA LMW. (2003). *Aerogeneradores Canarios*. Catálogos con los datos técnicos. [Online]. España. Disponible en Internet: <http://www.windfair.net>. Consultado en nov/07.
- ACSA LMW: (2003). *Miniturbinas eólicas*. [Online]. España. Disponible en Internet: <http://www.ascaeolica.com/es/pdf-miniturbinas.pdf>. Consultado en oct. /07.
- Asociación Danesa de la Industria Eólica. (2002). *Rugosidad y cizallamiento del viento*. [On line]. Disponible en Internet: <http://www.windpower.org/es/tour/wres>. Consultado en febrero/08.
- ÁVILA PRATS, D. (2003) «Análisis preliminar de factibilidad técnico-económica para la construcción de un parque eólico en la provincia de Matanzas». Tesis presentada en opción del grado académico de Master en Termoenergética Industrial. Universidad de Matanzas.
- BUCE, C. Y A. FABER. (2003). *Prácticas Introductorias a las Energía Renovable*. Edición española, Imprenta: Universidad de Matanzas. Cuba.
- Departamento de Energía de los Estados Unidos. *Sistemas eólicos para generación de electricidad*. [On line]. 2000. Disponible en Internet: <http://savoiapower.8k.com/F1000.html> Consultado en junio/08.
- El mundo, las energías renovables y su estado actual*. (2006). [On line]. Periódico: El Mundo. Actualizado: Abril 15 del 2006. Disponible en Internet: <http://www.el-mundo.es/encuentros/invitados/2006/04/15/1990/-19k>. Consultado en diciembre/07.
- Anónimo. (2003) Módulo EE Energía Eólica. [On line], APF-ITC, S.A. MICYT. Disponible en Internet: <http://www.energia.ar> Consultado en enero/08.
- Energía y tú*. (2003). CUBASOLAR. No 22. (abril-junio).

Energías Renovables. (2000). Asociación de profesionales de las Energías Renovables de Cataluña (APERCA). Disponible en Internet: <http://www.csostenible.net/castellano/renovables/renovables.asp#inicio>. Consultado en nov/08.

EWEA, Asociación Europea para a Energía Eólica (2002): *Informe Viento Fuerza 12*, Madrid.

Guía sobre Energía Renovable para constructores. (2003) [online]. Disponible en Internet: <http://www.InfinitePower.com>. Consultado en nov/07.

Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (1996). *Manuales de Energías Renovables*, volumen 2, Energía Eólica, Madrid. Publicado por Biblioteca Revista 5 Días.

MENÉNDEZ, M. (2001). «Diseño de sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos para la generación de electricidad en instalaciones autosustentables de pequeña capacidad en Cuba». Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISPJAE.

NREL. Ayudar de HOMER en español. [On line]. Disponible en Internet: <http://www.nrel.gov/softhomer/help/es>. Consultado en nov/07.

Reseña Energía Renovable. (2005). Situación actual de las fuentes alternativas. [On line]. Diciembre. Disponible en Internet: <http://www.ourplanet.com/imgversn/164/spanish/Resena.pdf>. Consultado en enero/08.

Anexos

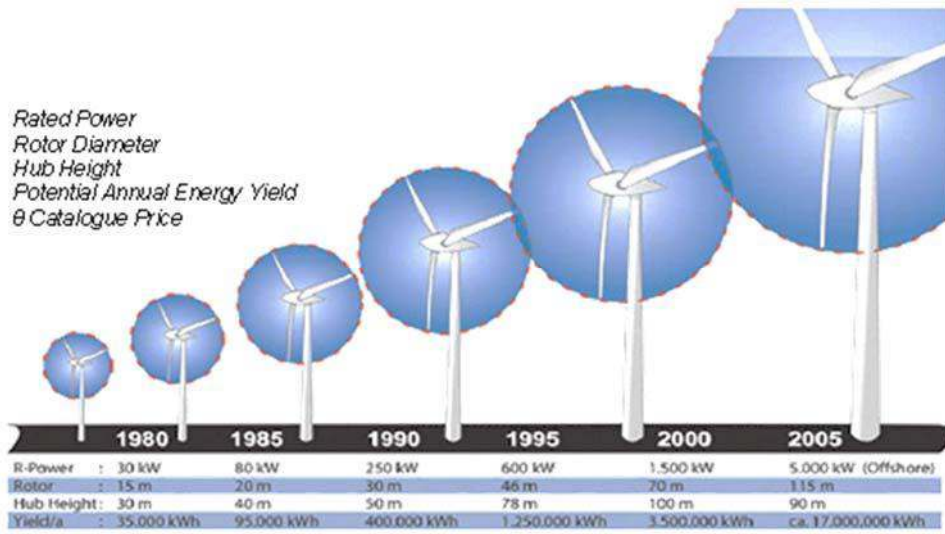


Grafico 1. Aumento de generación (kW) de los aerogeneradores por quinquenios.

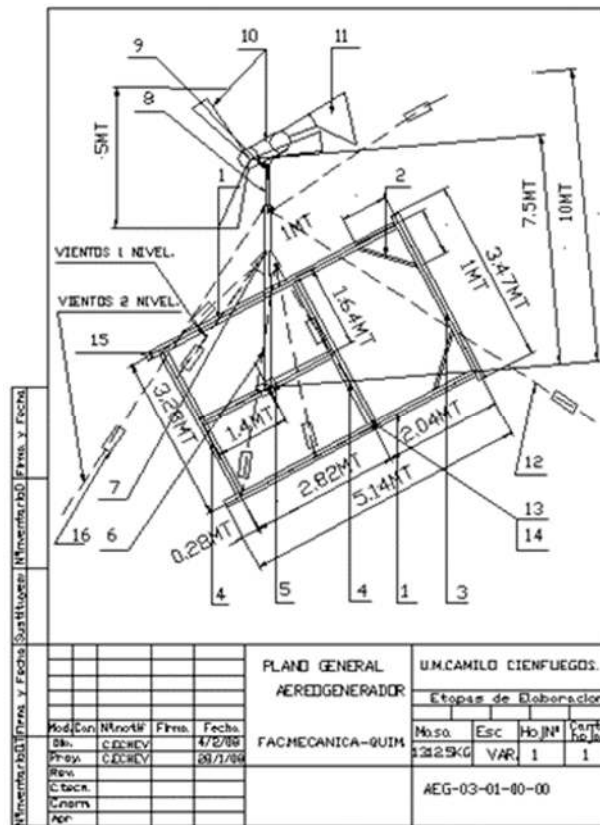


Grafico 2. Plano general del aerogenerador

Propuesta de sustitución de la energía generada con un grupo electrógeno por energía renovable en la comunidad de Pinar Redondo, del municipio de San Luis

Proposal for replacing the energy generated with a genset by renewable energy in the community of Pinar Redondo, San Luis municipality

*Por Zoila Millet R. *, María Rodríguez G. *,
Raúl Espino A*. *Generación Emergencia, GD, Energía renovable,
Provincia Stgo de Cuba. José Antonio Saco,
entre Corona y Padre Pico. Tel.: 022 657994.
e-mail. zoila@elecstg.une.cu, mariarg@oc.une.cu
y espino@elecstg.une.cu*

Resumen

La propuesta de sustituir el servicio de energía que se suministra actualmente por una planta emergente en la comunidad rural aislada de Pinar Redondo, en el municipio San Luis, por sistemas de generación de energías renovables es una solución que puede propiciar múltiples ventajas: la elevación de la productividad del trabajo, el mejoramiento de la calidad de vida, el ahorro de combustible y la disminución de la contaminación ambiental. La comunidad tiene una población de 177 habitantes con 59 viviendas, y recibe el servicio eléctrico por 4 horas diarias a través del grupo electrógeno emergente. Los sistemas renovables permitirán que este se extienda a 24 horas, mejorando la calidad de vida de la población que labora fundamentalmente en tareas agrícolas, donde sus principales renglones son los cultivos varios, el café y la ganadería. Los estudios del potencial energético realizados arrojan que en el sitio y próximos a él existen potenciales renovables disponibles; la energía solar que incide en la zona es del orden de 6,2 kWhm²día, una de las más altas del territorio, además de encontrarse próxima a potenciales hídricos con una potencia aproximada de 15 kW. Se propone restablecer un servicio de minihidroeléctricas y poner en funcionamiento un sistema fotovoltaico que satisfaga la demanda de la comunidad de 9 kW, aproximadamente, y prestará servicio durante 24 horas, con proximidad a los usuarios. Esta alternativa permite ahorrar 5 712 L de combustible diesel al año por concepto de traslado del combustible al territorio, permitiendo disminuir la contaminación provocada por la emisión de gases no deseados a la atmósfera. El aprovechamiento de los potenciales disponibles en el sitio permitirá encaminar el desarrollo social por vía sostenible, utilizando los recursos locales como son el hídrico y la radiación solar, cumpliendo los

lineamientos de la política económica del país y un nuevo ordenamiento de los sistemas renovables de energía.

Palabras clave: energías renovables, desarrollo rural sostenible, contaminación ambiental, ordenamiento territorial

Abstract

The proposal to replace the energy service that is currently provided by an emergency genset in the isolated rural community of Pinar Redondo, in the municipality of San Luis, by means of a renewable energy generation system, is a solution that can lead to multiple advantages: productivity increase, improvement of the quality of life, saving of fuel and the reduction of environmental pollution. The community has a population of 177 inhabitants with 59 homes, and receives electric service for 4 hours a day through the emergency genset. The renewable system will allow extending the electricity to 24 hours a day, bringing about positive changes in the quality of life of the population that works mainly in agricultural activities like various crops, coffee and livestock. The energy potential studies carried out showed that renewable potentials are available on the site and close to it; the solar radiation in the area is 6,2 kWh/m².day, one of the highest in the Cuban territory, besides being close to hydro potentials with an approximate power of 15 kW. It is proposed to rebuild the mini-hydroelectric service and put into operation a photovoltaic system that meets the demand of the community of 9 kW, approximately, and will provide service for 24 hours, with proximity to users. This alternative saves 5 712 L of diesel fuel per year by transferring fuel to the territory, allowing to reduce the pollution caused by the emission of unwanted gases into the atmosphere. The use of the potential available on the site will allow social development to be channeled through sustainable means, using local resources such as water and solar radiation, complying with the guidelines of the country's economic policy and a new ordering of renewable energy systems.

Key words: renewable energies, sustainable rural development, environmental pollution, territorial ordering

Introducción

Con el triunfo de la Revolución se inicia lo prometido en el Programa del Moncada [Castro, 1954]; se comienza con la rebaja de las tarifas eléctricas, poniendo fin a los abusos del poderoso monopolio del imperio; entre las primeras grandes inversiones que realiza la Revolución están la ampliación y montaje de nuevas centrales eléctricas, lo que muestra la importancia estratégica que significaba disponer de nuevas capacidades de generación para garantizar el desarrollo futuro del país.

El Sistema Electroenergético Nacional (SEN) constituyó una verdadera columna vertebral energética al manejar una capacidad total de generación instalada superior a 3,675 MW y más de 70,000 kilómetros de líneas en base de termoeléctricas, las cuales generan con una parte importante de petróleo importado. Esta dependencia del petróleo condujo a la crisis en la década de los noventa, con la caída del campo socialista y la Unión Soviética, situación que fue solucionándose en la medida en que se comenzó a utilizar el crudo nacional; la cogeneración en la industria azucarera jugó un papel importante mediante la interconexión de los ingenios al SEN, unido a la utilización del gas y a las instalaciones de plantas de ciclos combinados que contribuyeron al mejoramiento del sistema eléctrico.

Las zonas rurales y, entre ellas, las montañosas fueron las menos beneficiadas, pues la política del país en ese momento priorizaba la electrificación de las zonas urbanas, la industrialización del país y la centralización de todo el sistema eléctrico, aunque se incluía llevarla a los lugares de difícil acceso en las montañas como una vía de mejorar el desarrollo. El problema de la dispersión de las viviendas en las áreas rurales y el relieve montañoso, imposibilitaron extender la red nacional hasta los sitios de pequeñas demandas. Sin embargo y gracias al esfuerzo realizado en las últimas décadas, la electrificación, por todas las vías, específicamente de las zonas montañosas, creció. Para ello el país invirtió grandes sumas de capital, llevando el servicio eléctrico a los campos habitados, fijando un mínimo de 25 usuarios por kilómetro de línea, o un objetivo económico que lo justificara [MINED, 2006].

Dicho desarrollo se basó fundamentalmente en la utilización de los portadores energéticos convencionales y en la instalación de grandes centrales termoeléctricas (CTE) unidas al SEN.

Para lograr un mayor porcentaje de electrificación en las zonas rurales fue necesario ir a la búsqueda de la utilización de las Fuentes Renovables de Energía, comenzando en 1984 con el programa de las minihidroeléctricas desarrollado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) [CNE, 1984], y el Programa de Electrificación con Sistemas Fotovoltaicos que comenzó con la electrificación de los consultorios del médico de familia, la electrificación de escuelas rurales y salas de televisión, extendido a todo el país.

El consejo popular Pedernal al cual pertenece esta comunidad fue beneficiada con la ubicación de una mini hidroeléctrica y tres sistemas. Unido a ello fueron beneficiadas algunas comunidades con grupos electrógenos o diesel.

Desde el periodo prerrevolucionario se usaron las plantas diesel de forma temporal para beneficiar con solo 4 horas diarias [MINED, 2006].

Se tomaron los valores de las plantas diesel instaladas en la provincia de Santiago de Cuba, donde existen 113 plantas en comunidades de montaña, las cuales al cierre del 2010 registraron datos estadísticos, reflejados en la Tabla 1, que muestran los valores de eficiencia de generación.

Tabla 1. Datos de eficiencia al cierre del 2010

Horas trabajadas	11 601,24 horas
Energía generada	149 345,33 MWh
Consumo de combustible	42 877,75 ML
Índice de consumo	244,44 g/kWh

Fuente: Informe Cumplimiento de los indicadores de los GEE.

Nota: No se consideró el combustible de transportación para el traslado del combustible de operación.

En la figura 1 se observan los indicadores de consumo de la generación aislada o grupos emergentes de montaña en el municipio.

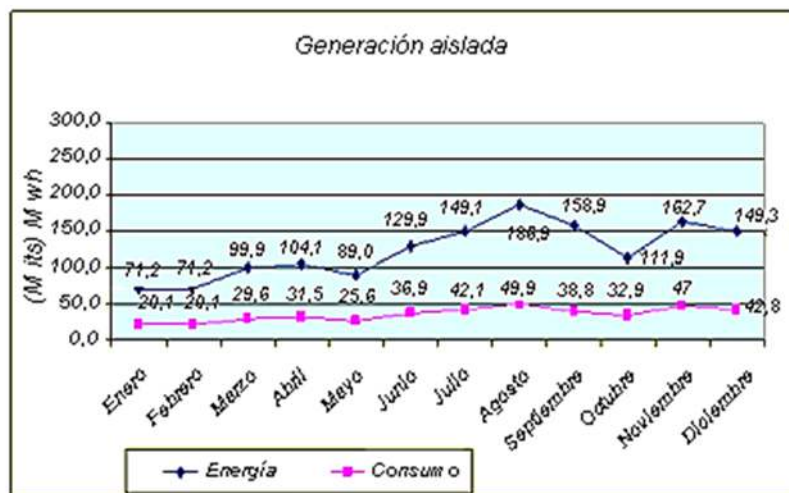


Fig. 1. Indicadores de consumo de generación aislada
Fuente: Informe Cumplimiento de los indicadores de los GEE.

Se valoró la ubicación de los grupos emergentes para electrificación de las poblaciones que viven aisladas y en lugares montañosos de difícil acceso.

Estas plantas emergentes están ubicadas en 8 de los 9 municipios que tiene la provincia; de ellos, el municipio con más grupos instalados es San Luis con 22, los cuales al cierre del 2010 habían consumido 42 877,75 ML, para una energía generada de 149 345,33 MWh en 11 601,24 horas de servicios prestados al año.

En la comunidad de Pinar Redondo se consumieron 5,7 ML de diesel para generar 19,62 MWh con un índice de consumo de 244 g/kWh para favorecer a una población de 177 habitantes. En la figura 2 se observa la ubicación de los grupos por municipio.

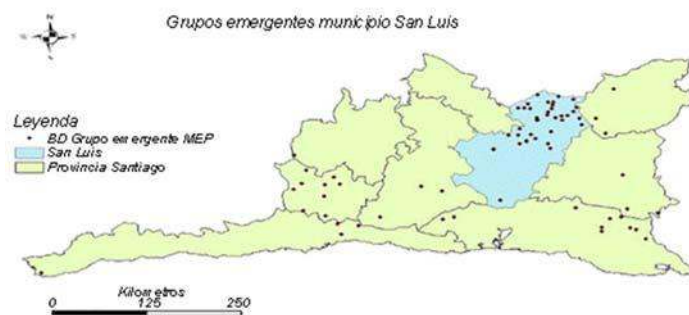


Fig. 2. Distribución de los grupos emergentes por municipio.
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que estos grupos electrógenos están ubicados en lugares montañosos y de difícil acceso, en el traslado del combustible para satisfacer sólo 4 horas la electricidad se consumen al año aproximadamente 1 000 L de diesel, lo que representa en la generación de la provincia 52% de consumo, como se muestra en la figura 3.

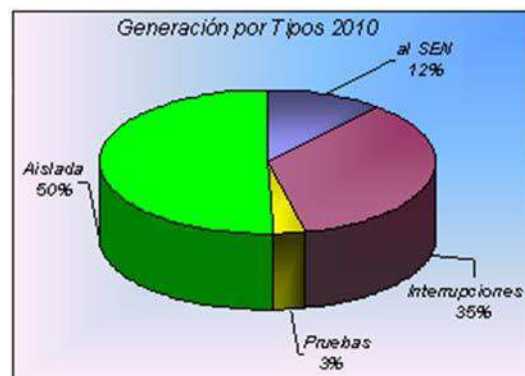


Fig. 3. Incidencia de la generación en la provincia.
Fuente: Elaboración propia.

La naturaleza dispersa de las energías renovables brinda una gran oportunidad para la generación de electricidad en forma distribuida mediante pequeñas unidades de generación cerca del punto de consumo, en forma análoga a cómo se hacía en los albores de la industria eléctrica.

Desde los años 80, el Estado cubano decidió establecer una política bien fundamentada dirigida hacia el uso de las fuentes de energía renovables, teniendo en cuenta el clima del país y los recursos renovables disponibles en cada municipio [IPF, 1980].

Uno de los recursos que está siendo explotado desde 1986, es la energía solar mediante los sistemas fotovoltaicos; en este municipio, por cada m^2 inciden 6,2 kW de radiación solar al día, lo que equivale a medio kilogramo de petróleo combustible o 5 kWh de energía eléctrica, valor promedio prácticamente invariable durante todo el año y casi igual en todo el país [IPF, 1980]. A pesar de sus características de relieve es uno de los más beneficiados, o sea que la aplicación de la tecnología es totalmente factible, lo que permitió llevar a cabo el Programa de la Revolución Energética con la electrificación de los consultorios médicos de la familia y salas de video y que ahora puede ser extendido a los grupos emergentes que prestan servicio en las comunidades de montaña, logrando satisfacer la demanda con los recursos autóctonos, mostrados en la figura 4.

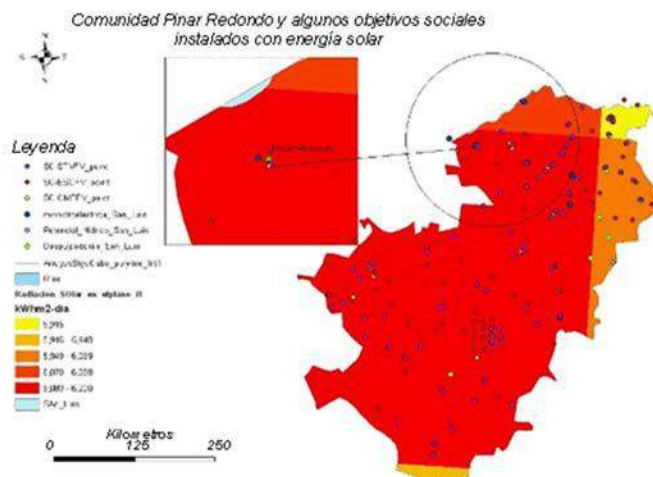


Fig. 4. Potencial solar y diferentes objetivos electrificados
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

Para el estudio realizado se tomaron los datos del gasto de combustible de los grupos aislados de montaña para generar energía en las cuatro horas

de servicio, además del análisis del consumo por el traslado del combustible a los puntos de generación.

Se tuvieron en cuenta el estudio del potencial renovable realizado en la provincia Santiago de Cuba y el inventario de las instalaciones de energía renovable que existen en ese territorio, además de la propuesta de electrificación realizada en el planeamiento eléctrico [Rodríguez, 2008], donde se encuentra el estudio de San Luis.

Para el estudio se utilizó la cartografía en 1:100 000 de la provincia Santiago de Cuba, los datos de potenciales hídricos [Rodríguez, et al., 2008], la información de los residuales de biomasa de la provincia [Durán, 2007] y la metodología desarrollada para el ordenamiento territorial de las energías renovables. La demanda máxima actual por vivienda y por la comunidad se observa en la tabla 2.

La comunidad Pinar Redondo del consejo popular Pedernal es una de las más alejadas del municipio y colinda con la provincia de Holguín; su terreno irregular dificulta la transportación del combustible mensualmente. El difícil acceso y el tiempo que toma el distribuidor para llegar hasta el grupo electrógeno propician que en ocasiones pasan días sin poder disponer de las 4 horas de servicio eléctrico.

Tabla 2. Demanda máxima actual de la comunidad (número de casa en una comunidad: 59)

Equipos	Potencia de consumo (W)	Porcentaje de propietarios (%)	No. De equipos	Promedio de uso al mismo tiempo	Máxima potencia (W)
Bombillos	40	151,4	95	0,8	3 040
Lámparas	25	67,5	52	1,0	1 300
TV (12 " B/N)	30	37,1	22	1,0	660
TV (21 " color)	100	7,6	8	1,0	800
Refrigeradores (2801)	115	29,6	20	0,5	1 150
Ventiladores	30	19,4	26	0,8	624
Radios	5	22,8	25	0,8	100
Grabadoras	15	19,2	11	0,8	132

Lavadoras	180	8,1	5	0,5	450
Planchas	1 000	7,5	4	0,2	800
Máxima demanda para una comunidad					9 056
Máxima demanda por casa					153

La provincia tiene experiencia en la utilización de un sistema fotovoltaico centralizado de 11 kW en la comunidad de Santa María del Loreto, del Municipio Songo la Maya (este se muestra en la figura 5), con muy buen resultado, que beneficia a 60 viviendas y una población de 200 personas con más de 10 años de explotación, el cual tuvo un costo de 150 000,00 USD [Díaz, Álvarez y Mosler, 2005].



Fig. 5. Sistema fotovoltaico Santa María del Loreto, del municipio de Songo-La Maya.

Se muestran sus impactos:

- *Impacto ambiental*

Con la instalación de la central FV se eliminó una planta diesel que además de emitir un alto nivel de ruido, propio de su funcionamiento, dejó de consumir entre 60 y 80 litros de petróleo diarios con la consiguiente eliminación de emisión de más de 15 Ton. anuales de CO₂ al ambiente, y de la contaminación de terrenos aledaños por derrames de combustible y lubricantes. Teniendo en cuenta que la central ha funcionado 24 horas diarias ininterrumpidamente durante 7 años, se han ahorrado 199,5 Tcc.

Para la construcción del campo de paneles de la instalación se aprovechó el perfil del terreno, requiriéndose un mínimo movimiento

de tierra, con lo que se evitaron cambios en la topografía y se logró el aprovechamiento de las áreas cultivables con siembras de poco follaje que no afectan el funcionamiento de la central y conservan el entorno natural original, además de evitar la degradación del terreno.

- *Impacto social*

El sistema ha logrado beneficiar alrededor de 200 personas con una considerable elevación de la calidad de vida, en los aspectos siguientes:

- a) Un servicio eléctrico ininterrumpido que garantiza iluminación doméstica y medios de comunicación y conservación de alimentos.
- b) La población en general ha elevado su nivel de conocimiento al tener mayor posibilidad de información mediante la radio y la televisión; los niños además han desarrollado mayores habilidades, debido a las posibilidades que tienen de estudiar y realizar actividades recreativas antes del horario de sueño.

- *Impacto económico*

El impacto económico radica en la elevación de la productividad del trabajo de la comunidad. Como ilustración de lo anterior se manifiesta el hecho de que, a partir de la instalación de la central, la producción de café ha ido en aumento, desde unas 30 mil latas en 1997, hasta más de 50 mil en 1999 (según entrevista realizada al administrador de la granja).

Teniendo en cuenta que las características de la comunidad de estudio es similar al ejemplo analizado, y valorando el alto consumo de combustible para entregar solo 4 horas de energía eléctrica, más lo difícil que se torna satisfacer las necesidades de la población, así como el consumo y demanda de la misma, se propone un sistema centralizado de 9 kW próximo a los usuarios.

Los sistemas fotovoltaicos son una opción válida para la electrificación rural si cumplen las condiciones siguientes:

- Cuando las posibilidades técnicas o económicas de llevar la red eléctrica convencional hasta cada una de las viviendas se tornan muy costosas, y las familias demandan cantidades moderadas de energía para su confort y satisfacción individual.

- Si las viviendas por electrificar se encuentran ubicadas en forma dispersa, los sistemas fotovoltaicos individuales son la mejor alternativa, debido a su autonomía y modularidad.

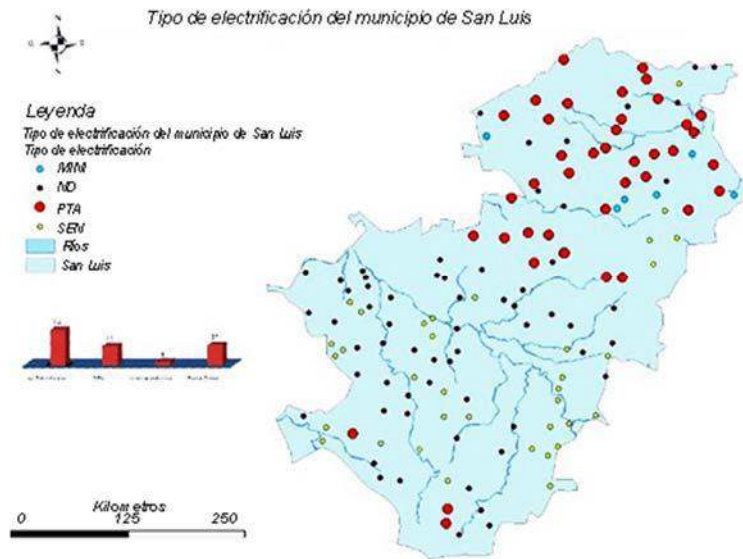
Sin embargo, si las casas por electrificar se encuentran ubicadas relativamente próximas entre sí, la opción más apropiada puede ser un sistema fotovoltaico centralizado debido a que la concentración de equipos y energía ofrece ventajas desde los puntos de vista técnico y económico.

Un sistema centralizado es un sistema fotovoltaico que satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad que se produce, almacena y transforma en un sistema fotovoltaico central y que luego se distribuye a través de líneas eléctricas hasta cada una de las viviendas. En Pinar Redondo se utilizarán los mismos cables empleados para recibir el servicios del grupo electrógeno.

Los sistemas centralizados tienen la misma estructura que un sistema fotovoltaico individual con suministro CA. Las características fundamentales de los sistemas centralizados son la concentración de equipos y la distribución de electricidad, y en esta comunidad pueden utilizarse los sistemas de distribución del grupo diesel.

Análisis y discusión de los resultados

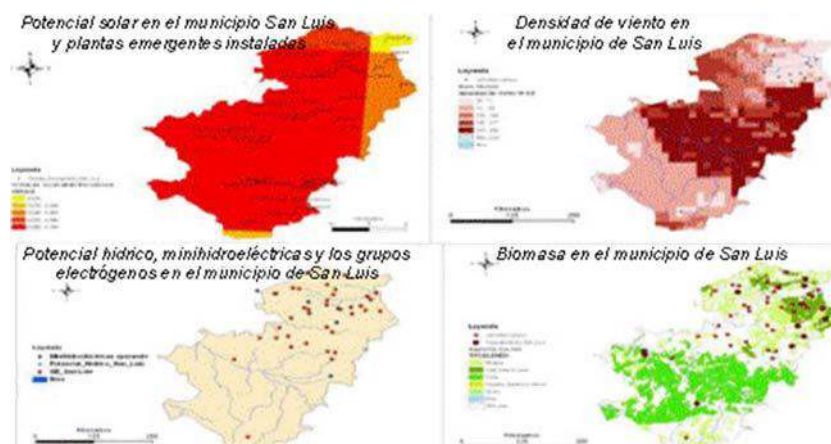
El municipio de San Luis está electrificado con diferentes tipos de tecnologías, entre las que se encuentran las plantas diesel o grupos electrógenos que se muestran en la figura 6, favoreciendo a 2 043 viviendas y una población de 6 200 habitantes, los cuales se dedican fundamentalmente a las producciones agrícolas



*Fig. 6. San Luis: tipo de electrificación y grupos electrógenos instalados
Fuente: Elaboración propia.*

Otra de las alternativas presentes en el municipio es la electrificación de objetivos sociales, fundamentalmente escuelas rurales, casas consultorios del médico de la familia, salas de televisión, además de existir 5 mini hidroeléctricas [Durán, et al., 2007].

Por las dificultades de llevar el combustible a esas comunidades y el gasto asociado se han valorado los potenciales renovables de la zona. En la figura 7, se observan las diferentes potencialidades renovables que existen en el municipio, donde se encuentran ubicados los grupos emergentes para comunidades aisladas y de difícil acceso.



*Fig. 7. Diferentes potenciales renovables GEE3
Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar la potencia de energía solar es muy elevada, aunque no se pueden descartar estudios puntuales para cada tipo de energía, pues los estudios de potenciales renovables autóctonos permitirían sustituir a estos grupos, así como solucionar la dificultad existente y aumentar el uso de horas de servicio a los pobladores, mejorando sus condiciones de vida.

La comunidad tiene instalado algunos sistemas fotovoltaicos en objetivos sociales (casa del médico, escuela y sala de televisión), como se puede observar en la figura 6, también tuvieron una mini hidroeléctrica próxima a la comunidad. En la figura también se observa que los niveles de radiación en la comunidad son muy elevados. Los parámetros que a continuación se relacionan se tuvieron en cuenta para el cálculo de la variante presentada.

1. Potencia máxima: 9,6 kW.
2. Energía diaria consumida: 30 kWh/m²día.
3. Días de autonomía de las baterías: 2,6 días.
4. Profundidad máxima de descarga de baterías: 70%.
5. Temperatura ambiente: 32 °C.
6. Eficiencia faradaica batería: 87%.
7. Eficiencia de cargador inversor a batería: 90%.

Se propone un sistema generador fotovoltaico centralizado, con los componentes siguientes:

Inversor bidireccional de 5 kVA/120VAC/60Hz: 2 unidades.

Módulo fotovoltaico 225 Wp/12VDC: 72 unidades.

Batería de 2V, Vf = 1,82 V/celda: 36 unidades.

Rack de baterías: 2 unidades.

Los costos del sistema se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Costo de los equipos propuestos

No	Descripción	U/M	Cantidad	Pu(USD)	Pt(USD)
1	Inversor bidireccional	U	2	5,40	10,80
2	Módulo fotovoltaico	U	72	604,50	43,740.00
3	Batería	U	36	420,00	15, 120.00
4	Rack de baterías	U	2	880,00	1,760.00

5	Kit de cable y accesorios	U	1	7,80	7,80.00
6	Montaje, instalación y puesta en funcionamiento	U	1	1,85	1,85.00
Total				192 255,0	60 640,00

Fuente: Precios obtenidos de Copextel S.A.

Conclusiones

1. La electrificación con fuentes renovables de energía en las comunidades aisladas que hoy tienen plantas para prestar el servicio durante 4 horas, pueden ser sustituidas por fuentes de energía autóctonas.
2. Los potenciales renovables autóctonos del municipio de San Luis pueden ser explotados y llevar al municipio a un desarrollo sostenible energéticamente.
3. Aun cuando el costo de un sistema fotovoltaico centralizado es elevado, se justifica su instalación para estas comunidades de tan difícil acceso, teniendo en cuenta los consumos y demanda para una vivienda en las montañas, y el gasto de combustible para generar 4 horas, las cuales no satisfacen las necesidades de la población.

Bibliografía

- CASTRO, F. *La historia me absolverá*. Edición I, 1954.
- CNE. *Comisión Nacional de Energía*. Energía, 1984. 1/84.
- DÍAZ, R., J. ÁLVAREZ Y H.-J. MOSLER. *Estudio comparativo sobre algunos aspectos de la salud en asentamientos rurales con relación a la electrificación*. 2005.
- DURÁN, J. *Informe del comportamiento de las Fuentes Renovables de Energía en la provincia Santiago de Cuba*. Estadística Provincial, 2007.
- DURÁN, J., et al. *Informe complementario de cada municipio*. Estadística provincial, 2007.
- IPF. *Anuario de la Oficina territorial de Planificación Física*. 1980.
- MINED. *Antecedentes de la Revolución energética en Cuba*. 2006.
- Ordenanza municipal sobre la incorporación de sistemas de captación y aprovechamiento de energía solar térmica y fotovoltaica en edificios*. Aprobado por el Pleno de la Corporación el 23 de febrero de 2006.

RODRÍGUEZ, M. *Ordenamiento Territorial y la Planeación de las Fuentes Renovables de Energía usando el Sistema de Información Geográfica en el municipio Guamá.*, en *Universidad Internacional de Andalucía*. 2008, Universidad Internacional de Andalucía: Huelva. p. 131.

RODRÍGUEZ, M., et al. *Propuesta de un SIG, para planeamiento de la electrificación en el país*, en *Convención de Energía y Arquitectura*. 2008. Habana (Cuba).

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

M.Sc. Manuel Álvarez González.

EDITOR JEFE:

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

EDITORA:

M.Sc. Madelaine Vázquez Gálvez.

CORRECCIÓN:

Ing. Jorge Santamarina Guerra

CONSEJO EDITORIAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

M.Sc. Manuel Álvarez González.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dra. Tania Carbonell Morales.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

M.Sc. Daniel López Aldama

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

WEB MASTER:

M.Sc. Fernando González Prieto.

CONSEJO ASESOR:

Dra. Elena Vigil Santos.

Dr. Conrado Moreno Figueredo.

Dr. Sergio Corp Linares.

Dr. José Guardado Chacón.

Dr. Deny Oliva Merecio.

Dra. Dania González Couret.

Dr. Juan José Paretas.

Lic. Bruno Henríquez Pérez.

M.Sc. Leonor Turtós Carbonell.

M.Sc. Alejandro Montesinos Larrosa.

Lic. Ricardo Bérriz Valle.

Dr. César Cisnero Ramírez



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>