



Artículo Original

Efectos de módulos fotovoltaicos en la carga térmica de un edificio industrial

Effects of photovoltaic modules on the thermal load of an industrial building

Indira Ochoa,^{a,1} Melbin Ávila,^a Héctor Villatoro^{a,b}

^a Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE), San Pedro Sula, Honduras

^b Carrera de Ingeniería en Energía, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), San Pedro Sula, Honduras

Historia del artículo:

Recibido: 20 marzo 2020

Revisado: 20 mayo 2020

Aceptado: 1 junio 2020

Publicado: 30 agosto 2020

Palabras clave

Carga térmica

Edificio industrial

Energía solar

Módulos fotovoltaicos

Techo

Keywords

Thermal load

Industrial building

Solar energy

Photovoltaic modules

Roof

RESUMEN. Introducción: Hay pocas consideraciones en los beneficios indirectos que proporciona la instalación de sistemas fotovoltaicos. El objetivo del estudio fue analizar la influencia de módulos solares fotovoltaicos (FV) instalados sobre techo en la carga térmica de un edificio industrial en Choloma, Honduras. **Métodos:** El estudio se realizó mediante la instalación y verificación de sensores de temperatura en las caras exterior e interior del techo de área de descarga del edificio antes y después de la instalación de un sistema fotovoltaico. La información registrada por los sensores se utilizó en un modelo termodinámico para calcular la transferencia y ganancia de calor. **Resultados:** La temperatura de techo exterior presentó una reducción promedio de 9.29 °C después de la instalación de módulos FV. Adicionalmente, la temperatura máxima de techo exterior disminuyó 14.6 °C después de la instalación del sistema. Por otra parte, el techo interior no presentó cambios significativos. El análisis termodinámico mostró que antes de la instalación de módulos FV, la ganancia de calor en los días elegidos en promedio fue de 18.16 Wh/m² y después de la instalación obtuvo un promedio de 2.94 Wh/m². **Conclusión:** Se obtuvo una reducción del 83.8% en la ganancia de calor total a través del techo del edificio.

ABSTRACT. Introduction: Limited considerations have been given to the indirect benefits provided by rooftop photovoltaic systems. The study aim was to analyze the influence of rooftop-mounted photovoltaic (PV) modules on the thermal load of an industrial building in Choloma, Honduras. **Methods:** The study was performed by installing temperature sensors on the exterior and interior faces of the warehouse roof of an industrial building before and after the installation of a photovoltaic system. The information recorded by the sensors was used in a thermodynamic model to determine the heat transfer and heat gain. **Results:** The exterior roof temperature showed an average reduction of 9.29 °C after the installation of PV modules. Additionally, the maximum exterior roof temperature decreased 14.6 °C after the PV system installation. Conversely, the interior ceiling did not present significant changes. The thermodynamic analysis showed that before the installation of PV modules, the average heat gain on the chosen days was 18.16 Wh/m², while it obtained an average of 2.94 Wh/m² after the installation. **Conclusion:** A reduction of an 83.8% in the total heat gain was obtained through the warehouse roof.

1. Introducción

En Honduras se ha apostado a la utilización de energías renovables y se ha proyectado que para 2038, se llegará a un 80% de la matriz energética utilizando generación renovable (BID-Invest, 2018). Cabe mencionar que la energía solar fotovoltaica se encuentra entre las alternativas no

convencionales más prometedoras en el país y en los últimos años han aumentado las instalaciones fotovoltaicas gracias a la “Ley de promoción a la generación de energía eléctrica con recursos renovables.” Actualmente, Honduras cuenta con una potencia instalada de energía solar fotovoltaica de 481.9 MW correspondientes al 17.9% de 2.6 GW de capacidad total instalada en el país (ENEE, 2018). La energía solar fotovoltaica expone su mayor beneficio

¹ Autor correspondiente: indirachoa98@gmail.com, Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE), San Pedro Sula, Honduras

Disponible en <https://doi.org/10.5377/innovare.v9i2.10207>

© 2019 Autores y UNITEC. Este es un artículo de acceso abierto según licencia <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

cuando se utiliza para autoconsumo, representando un ahorro económico en la facturación eléctrica. Adicionalmente, existe el beneficio ambiental, ya que este tipo de instalaciones no emite CO₂ a la atmósfera durante la fase de generación.

Las bondades de la energía solar no solo se limitan a factores ambientales y económicos; se ha estudiado que también existen beneficios indirectos que van más allá del impacto positivo en el bolsillo y en el medio ambiente. Según un estudio realizado en la Universidad de California, las instalaciones sobre techo de módulos fotovoltaicos solares brindan beneficios en la carga térmica de los edificios. Se descubrió que al instalarse módulos fotovoltaicos en una parte del techo del laboratorio de la Universidad se reducía anualmente la carga de enfriamiento en un 38% (Domínguez et al., 2015).

Las instalaciones fotovoltaicas sobre techo brindan mayores beneficios cuando existe una separación entre el techo y el módulo solar que permite evitar el sobrecalentamiento proporcionando ventilación (Gargallo, 2011). Así mismo, en otro estudio realizado en 2001 se desarrolló un modelo de simulación para investigar el rendimiento térmico y eléctrico de los techos fotovoltaicos, donde se discutió que la inclinación, la separación entre el módulo y el techo y la superficie son factores claves para el rendimiento térmico del edificio (Yang et al., 2001). Estas investigaciones no toman en cuenta tejados que cuentan con aislamiento en el interior, sin embargo, se ha estudiado que en un tejado con aislamiento la ganancia y pérdida de calor del techo se vuelve casi estable cuando el tamaño del aislamiento se aproxima a $4 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ (Odeh, 2011).

El objetivo de este estudio es el análisis de la variación de la carga térmica de un edificio industrial ubicado en el norte de Honduras para dos escenarios: sin módulos fotovoltaicos y con módulos fotovoltaicos instalados sobre su techo. El análisis pretende identificar si los módulos fotovoltaicos brindan beneficios indirectos reduciendo la carga térmica del edificio.

2. Métodos

Para el análisis del estudio se realizó lo siguiente: primero, se instalaron sensores que registraron los datos de la temperatura ambiente y temperatura exterior e interior del techo del edificio de estudio, antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos del 29 de octubre al 08 de noviembre del 2018; segundo, se extrajo la información del software “Logtag Analyzer” (<https://www.logtag-recorders.com/es/software/>) de los registradores de temperatura y se clasificó por escenario; tercero se utilizó la información obtenida de los sensores para realizar un modelo termodinámico, con el fin de calcular la transferencia de calor y la ganancia de calor ganado en el techo por metro cuadrado. A continuación, se describen las

características del edificio de estudio, arreglo solar y medidores de temperatura.

2.1. Descripción general del edificio industrial

El edificio utilizado corresponde a una maquila textilera ubicada en Choloma, Honduras donde la irradiación promedio anual es de 5.2 kWh/m^2 (Solargis, 2017). El edificio cuenta con módulos solares en distintas áreas de los techos. Sin embargo, se utilizó como área de estudio el techo de Aluzinc calibre 26 con aislamiento R-19 en el interior del área “Raw Chip Storage”, que está destinada a la descarga y almacenamiento de materia prima para la maquila, funcionando como bodega principal.

La bodega no cuenta con aire acondicionado. Es un espacio abierto debido a que las compuertas ubicadas en la parte frontal deben ser lo suficientemente grandes para la introducción de cajas con materia prima. Estas compuertas permanecieron abiertas durante los días de estudio debido a que el edificio se encontraba en construcción.

2.2. Descripción del arreglo solar 1

Se encuentran instalados 522 módulos fotovoltaicos con un área de aproximadamente $1,132 \text{ m}^2$. Los módulos utilizados son de la marca Jinko Solar, cada uno de 325 Wp , proporcionando 169.65 kWp de potencia instalada total en DC.

2.3. Descripción del arreglo solar 2

Los tres sensores de temperatura que se utilizaron son de la marca Logtag del modelo TRIX-8, con un rango de medición entre -40°C a 85°C y con una capacidad de 8,000 lecturas. Fueron programados para registrar las temperaturas en un intervalo de medida de cinco minutos. Por una parte, uno de los sensores de temperatura estuvo ubicado en la lámina de Aluzinc en el exterior a 8.50 metros del suelo. Otro de los sensores se instaló en el interior a 8.30 metros del suelo y se encontró adherido al aislamiento térmico. Un tercer sensor se ubicó cerca del área estudio y se utilizó para medición de la temperatura ambiente.

2.4. Descripción del arreglo solar 3

En dos escenarios se registró datos de temperatura mediante sensores ubicados en el techo exterior, techo interior y ambiente del edificio. Estos datos de temperaturas brindaron los siguientes perfiles:

1. Temperatura de techo exterior sin módulos fotovoltaicos.
2. Temperatura de techo exterior con módulos fotovoltaicos.

3. Temperatura de techo interior sin módulos fotovoltaicos.
4. Temperatura de techo interior con módulos fotovoltaicos.
5. Temperatura Ambiente

La Figura 1 (lado izquierdo) muestra el escenario de registro de temperatura sin módulos fotovoltaicos. Se observó los sensores de temperatura donde uno se encuentra

ubicado en la parte exterior del techo a 8.50 metros del suelo, mientras que un segundo sensor se encontró ubicado en el interior del techo adherido al aislante térmico R-19 por la parte interna del edificio.

La Figura 1 (lado derecho) muestra el escenario de registro de temperatura con módulos fotovoltaicos. Ahora, el sensor en la parte exterior se encontró cubierto por los módulos solares ya instalados.

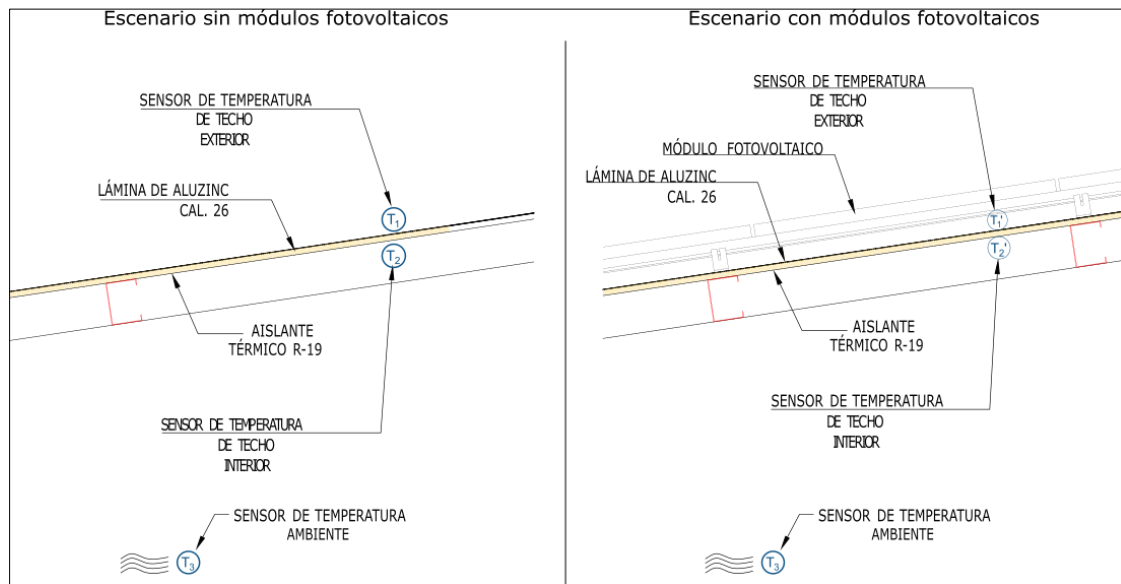


Figura 1. Escenarios de medición. Fuente: Elaboración propia.

2.5. Monitoreo

Las mediciones de temperatura se realizaron entre el 29 de octubre y 19 noviembre del 2018 (exceptuando los domingos). Los sensores estuvieron programados para registrar datos cada cinco minutos desde las 11:00 a.m. a 4:00 p.m. Cabe resaltar, que varios días de estudio se vieron afectados por lluvias, ya que los sensores no eran resistentes al agua. Por ende, se retiraron temporalmente.

Se monitorearon los sensores de temperatura durante el 29 de octubre y 19 de noviembre por sensibilidad a lluvias. Se llevó un registro diario de las horas de instalación y desinstalación de los sensores sobre techo y ambiente, desinstalados diariamente entre 4:00 p.m. y 5:00 p.m. mientras que el sensor de techo interior estuvo instalado durante los 21 días de estudio.

2.6. Modelo termodinámico por conducción en el techo

El techo del edificio estuvo compuesto por lámina de Aluzinc calibre 26 de tipo trapezoidal donde se encontraron instalados los módulos fotovoltaicos y en su interior el techo

se encontró cubierto por aislante térmico R-19. Con esta información, se llevó a cabo un modelo termodinámico del comportamiento de la transferencia de calor por conducción en el techo antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos.

2.7. Transferencia de calor

El modelo termodinámico se realizó basándose en la ecuación (1), la cual resulta de una reacomodación de la Ley de Fourier de la conducción de calor como analogía al flujo de corriente eléctrica. En este caso, las unidades fueron por unidad de área (Cengel, 2007).

$$\dot{Q}/A = \frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{in}}}{R_c} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (1)$$

Donde \dot{Q}/A es la densidad de flujo de calor en W/m^2 , T_{ext} la temperatura de techo exterior [$^{\circ}\text{C}$], T_{in} la temperatura de techo interior [$^{\circ}\text{C}$], R_c es la resistencia térmica por contacto en [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$]. La ecuación (1) responde a la transferencia estacionaria y unidimensional de calor por conducción a través de un cuerpo compuesto, en este caso, una lámina de

zinc con aislante térmico. La transferencia de calor a través de techos y paredes se consideró como transitoria, especialmente en época de verano donde la radiación y la temperatura presentan grandes variaciones durante el día (Ramgopal, 2019). Sin embargo, por motivos de simplicidad, el presente modelo consideró la transferencia de calor por conducción como estable.

El modelo termodinámico se desarrolló considerando una red de resistencias térmicas de todos los componentes que intervienen en el tejado. Esta red de resistencias la implementa la Ley de Fourier como una analogía a la Ley de Ohm. Las resistencias térmicas descritas se consideraron en ambos escenarios.

- R₁ Resistencia térmica del Aluzinc.
- R₂ Resistencia térmica del aislamiento.
- R₃ Resistencia térmica del aire interior.

Para la R₁, se consideró como 0.00 m²·°C/W, para R₂ se tomó el valor 1.88 m²·°C/W. Finalmente, R₃ se tomó como valor 0.16 m²·°C/W (ICANZ, 2014). Los datos obtenidos del modelo fueron en W/m² y correspondieron a la transferencia de calor cada cinco minutos (debido a que se cuentan con las lecturas de temperaturas en este intervalo). Sin embargo, fue necesario también calcular la ganancia de calor en el techo. Para esto, se usó la ecuación (2).

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \text{ [Wh/m}^2\text{]} \quad (2)$$

2.8. Transferencia de calor en edificios

El edificio contó con dos fuentes de ganancia de calor: internas y externas. Las internas se dividieron entre las personas, equipos y la luminaria y las externas en las ventanas, paredes, el techo y el suelo. Según un estudio en Australia, en promedio, la ganancia de calor en la envolvente correspondió a un 48.7% de las ventanas, 33.5% del techo, 9.7% de las paredes exteriores, 7.8% de infiltración y 0.4% del suelo (Kwan & Guan, 2015).

Es probable que el techo, al ser la superficie del edificio con mayor exposición a la radiación solar, contribuyó a la mayor ganancia de calor del edificio. Es por esto, que se trató de minimizar las ganancias de calor por radiación solar de diferentes maneras (Lubis & Koerniawan, 2017) como el uso de aislamiento térmico, el cual tiene la función de atrapar el aire en pequeños huecos, ya que al ser un mal conductor impide que se formen corrientes de convección y reduce la conducción.

3. Resultados

3.1. Resultados de medición de la temperatura

El registro de temperatura ambiente en la zona se mantuvo en un promedio de 30 ° C entre las 11:00 a.m. y

4:00 p.m. Se presentaron temperaturas mínimas de 20.5 ° C debido a lluvias y climas helados en el mes de noviembre y máximas de 36.8 ° C.

La temperatura interna del tejado tuvo un promedio total de 29.84 ° C con una temperatura mínima de 24.4 ° C y máxima de 35.8 ° C. Sin embargo, clasificando los datos en antes y después de instalación, la temperatura mantuvo un promedio de 38.17 ° C antes de la instalación de módulos fotovoltaicos y de 28.88 ° C después de la instalación.

La temperatura externa del techo tuvo un promedio de 33.79 ° C con una temperatura mínima de 21.8 ° C y máxima de 53.2 ° C. Clasificando los datos en antes y después de instalación de módulos fotovoltaicos, la temperatura máxima antes de instalación fue de 53.2 ° C y después de instalación fue de 38.6 ° C.

3.2. Resultados por escenario: sin módulos fotovoltaicos y con módulos fotovoltaicos

Los resultados anteriores corresponden a los 21 días que se llevó a cabo el estudio. Sin embargo, se eligieron cuatro diferentes días entre el 29 de octubre y 19 de noviembre del 2018 para un análisis más detallado. Dos de los días seleccionados pertenecen al escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos sobre techo y los dos restantes al escenario con instalación de módulos fotovoltaicos sobre techo. La selección de estos días se basó en las temperaturas del ambiente; se seleccionaron los que contaban con temperaturas del ambiente similares.

Los días seleccionados para el escenario sin módulos fotovoltaicos fueron el 29 y el 31 de octubre del 2018. Para el escenario con módulos fotovoltaicos instalados, se eligieron los días 8 y 10 de noviembre del 2018. Estos días contaron con temperaturas promedio de ambiente entre 31° C y 32° C como muestra el Cuadro 1.

La temperatura de techo exterior reflejó cambios significativos después de la instalación de módulos fotovoltaicos. Antes de la instalación mostraba un promedio de 38.17 ° C y después un promedio de 28.88 ° C. Esta variación representa una reducción de 9.3 ° C siendo en porcentaje un 24.3% en el techo del edificio. Las temperaturas máximas a las que llegó el sensor de techo exterior también representaron cambios considerables. Antes de la instalación se contó con temperaturas máximas de 53.2 ° C y después de la instalación de 38.6 ° C. Esta disminución representó una reducción de 14.6 ° C, siendo en porcentaje un 27.4%.

El Cuadro 1 resume los promedios de los cuatro días elegidos para ambos escenarios. El cuadro muestra que los mayores cambios se reflejaron en el techo exterior. Esto se debió a que la radiación solar no estaba incidiendo directamente en el Aluzinc, sino en los módulos solares. Por otra parte, la temperatura de techo interior no presentó cambios considerables. Lo mismo se pudo observar en la Figura 2 donde se representan los días 29 de octubre y 8 de noviembre del 2018.

Cuadro 1

Promedios de temperatura según escenario: con módulos fotovoltaicos y sin módulos fotovoltaicos

Escenarios	Sin módulos fotovoltaicos		Con módulos fotovoltaicos	
	oct.-29	oct.-31	nov.-8	nov.-10
Temperatura de techo exterior	37.3	38.5	32.7	33.2
Temperatura de techo interior	31.5	32.2	31.7	31.9
Temperatura ambiente	31.2	31.2	32.1	31.7

El análisis termodinámico de la Ley de Fourier por conducción proporcionó gráficas de transferencia de calor en el techo en $[W/m^2]$ y la integración de los datos proporcionó el calor o energía térmica total transferida en $[Wh/m^2]$ durante el delta tiempo analizado de 11:00 a.m. a 4:00 p.m.

Cuadro 2

Transferencia y ganancia de calor según escenario: sin módulos fotovoltaicos y con módulos fotovoltaicos

Escenarios	Sin módulos fotovoltaicos		Con módulos fotovoltaicos	
	Oct-29	Oct-31	Nov-8	Nov-10
Máxima transferencia de calor	7.21 W/m^2	7.11 W/m^2	1.08 W/m^2	1.67 W/m^2
Ganancia de calor	17.56 Wh/m^2	18.76 Wh/m^2	2.53 Wh/m^2	3.35 Wh/m^2

La Figura 3 muestra la transferencia de calor en el techo para los cuatro días elegidos según escenario. Los picos y valles se reflejaron, ya que la fórmula estuvo sujeta a las temperaturas sobre techo exterior y esto presentó variaciones en las lecturas. El Cuadro 2 muestra los resultados del análisis termodinámico.

4. Discusión

Se observó que la temperatura de techo exterior para el 29 de octubre (sin módulos fotovoltaicos) contó con variaciones durante las lecturas. Esto se puede atribuirse a variaciones en la irradiancia por nubosidad y/o a corrientes de viento durante las lecturas de los sensores. Por otra parte, la temperatura de techo exterior del 8 de noviembre (con módulos fotovoltaicos) no contó con picos y valles y se mantuvo en un rango similar a la temperatura de techo interior. Esto último puede confirmar, que la variación de las

lecturas en el techo exterior del escenario sin módulos, se debió a variaciones de irradiancia y/o vientos. Ahora como el sensor se encontró debajo del módulo, las nubes no lo afectaron y las corrientes de viento las recibió el módulo fotovoltaico.

Se observó que la reducción en el techo exterior fue del 24.3% para la temperatura promedio antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos, mientras que la temperatura máxima tuvo una reducción del 27.4%. Un estudio similar hecho en verano del 2012 en el edificio de una Universidad en Agrinio, Grecia mostró diferencias de temperaturas de hasta $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre un techo expuesto y uno con sombra fotovoltaica, especialmente a la 1:00 p.m. de la tarde. Mientras que lo contrario sucedió al llegar la noche, donde el techo expuesto mostró temperaturas más frías que el techo con módulos.

El estudio mostró que este efecto se dio por la mayor pérdida de radiación de onda larga en la superficie expuesta del techo y un mayor enfriamiento durante la noche en comparación con la parte sombreada. La razón de un enfriamiento más rápido fue el aumento del factor de vista del cielo (SVF) del techo expuesto, lo que mostró que la instalación de módulos fotovoltaicos también posee propiedades aislantes (Kapsalis & Karamanis, 2015).

El registro de temperaturas sobre techo interior no presentó cambios después de la instalación. Se mantuvo estable y en coincidencia con la temperatura ambiente, como se observó en el Cuadro 1. Esto es probablemente por el aislamiento térmico R19 en el techo. Un estudio en Francia reveló que el espesor y la calidad del aislamiento jugaron un papel clave en la prevención de la ganancia de calor en viviendas o edificios donde a partir de ciertos valores de aislamiento, las temperaturas exteriores no jugaron un rol importante en la transmisión de calor a través del techo (Biwolea et al., 2008).

Algunos estudios han comparado el efecto del aislamiento térmico versus la instalación sobre techo de módulos fotovoltaicos, con el objetivo de identificar cuál presenta mayores beneficios. Un modelo indicó una reducción del 65% en la carga de enfriamiento a través de un techo de una vivienda con módulos fotovoltaicos instalados en comparación a otra sin módulos fotovoltaicos, pero con una resistencia térmica R-16 (Yang et al., 2001).

El análisis termodinámico mostró que antes de la instalación de módulos fotovoltaicos la ganancia de calor en los días elegidos fue mayor que después de la instalación.

Considerando un promedio de $18.16\text{ }Wh/m^2$ antes de la instalación de módulos fotovoltaicos, tomando en cuenta los días elegidos (29 y 31 de octubre) y un promedio de $2.94\text{ }Wh/m^2$, tomando en cuenta los dos días elegidos para el escenario después de los módulos (8 y 10 de noviembre), la ganancia de calor representó una reducción del 83.8%. Tomando en consideración que aproximadamente un 33.5% de la ganancia de calor de un edificio proviene del techo (Kwan & Guan, 2015), la ganancia de calor total a través del edificio, por la instalación de módulos fotovoltaicos

disminuyó en un 28.1%. Estos porcentajes se estimaron a partir de una implicación de la Ley de Fourier. Sin embargo, el uso de otros modelos matemáticos más especializados tomando en cuenta condiciones limitantes pueden brindar resultados más acertados (Kapsalis et al., 2014). Sin embargo, el uso de otros modelos matemáticos más especializados tomando en cuenta condiciones limitantes pueden brindar resultados más acertados (Kapsalis et al., 2014). Los módulos fotovoltaicos llegan a ser realmente beneficiosos para el ahorro de energía, no solo por su

beneficio económico al ser incorporados sobre techos o incluso en fachadas tipo BIPV (Ban-Weiss et al., 2013), sino también porque de acuerdo a los cálculos anteriores, el sombreado que ocasiona en el techo de edificaciones contribuye a la reducción del consumo de energía y confort térmico, siendo que el techo es uno de los componentes que más calor aporta en un edificio (Barron-Gafford et al., 2016).

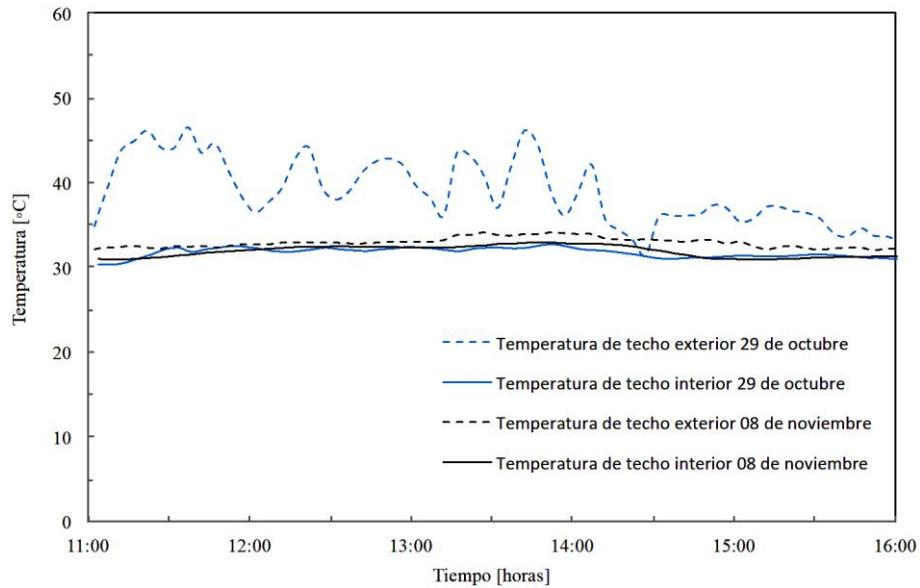


Figura 2. Temperaturas en días promedio en escenario sin módulos fotovoltaicos (29 de octubre) y con módulos fotovoltaicos (8 de noviembre). Fuente: Elaboración propia.

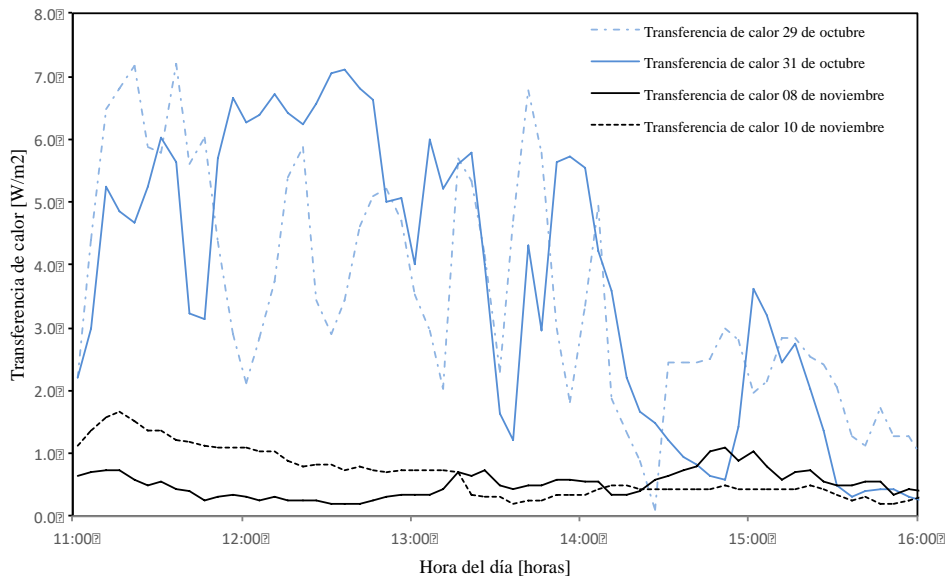


Figura 3. Transferencia de calor [W/m²] en el techo para escenarios sin módulos fotovoltaicos (29 y 31 de octubre) y con módulos fotovoltaicos (8 y 10 de noviembre). Fuente: Elaboración propia.

Los módulos fotovoltaicos llegan a ser realmente beneficiosos para el ahorro de energía, no solo por su beneficio económico al ser incorporados sobre techos o incluso en fachadas tipo BIPV (Ban-Weiss et al., 2013), sino también porque de acuerdo a los cálculos anteriores, el sombreado que ocasiona en el techo de edificaciones contribuye a la reducción del consumo de energía y confort térmico, siendo que el techo es uno de los componentes que más calor aporta en un edificio (Barron-Gafford et al., 2016).

Un estudio en China mostró los efectos de la sombra de los módulos fotovoltaicos en el valor máximo de ganancia de calor a través de un techo plano e inclinado, reduciéndose en un 67.1% y 59%, respectivamente. Por otra parte, la carga de enfriamiento y la carga diaria total del techo plano se redujo en un 72.2% y 77.4%, mientras que en el techo inclinado se redujo un 61.5% y 69.4%, respectivamente (Wang et al., 2017). Lo anterior significa que los beneficios del sombreado en techo causan reducciones significativas en las cargas de enfriamiento en comparación a cuando el techo se encuentra expuesto. Dichos cálculos, no se alejan de la realidad del estudio simplificado que se llevó a cabo en nuestro edificio.

A pesar de los beneficios mostrados para la instalación sobre techo de módulos fotovoltaicos, no ocurre lo mismo para plantas fotovoltaicas a gran escala instaladas sobre terreno. Un estudio mostró que se forma un “efecto isla” en plantas a gran escala donde las temperaturas, comparadas a terrenos cercanos a la zona, eran mucho más elevadas. Se tiene la hipótesis que ocurre debido a una transición efectiva en cómo la energía interactúa en una instalación fotovoltaica versus un ecosistema natural (Barron-Gafford et al., 2016).

El modelo termodinámico del estudio se simplificó al no tener registro de la temperatura de la superficie exterior y posterior del módulo. Por tanto, la red de resistencias térmicas no tomó en cuenta los coeficientes por convección y radiación (Domínguez et al., 2015), ni la resistencia térmica que ofrece el hueco que se forma entre el módulo solar fotovoltaico y el techo (Gargallo, 2011). Se debe tomar en cuenta que, si en el interior del recinto de análisis se encuentran instalados los inversores del generador fotovoltaico, estos generarán calor y disminuirá el efecto producido por los módulos fotovoltaicos. Esto debería de investigarse a fondo.

En el presente estudio no se tomó la temperatura del ambiente en el interior de la bodega debido a que no se contó con la cantidad suficiente de registradores de temperatura. Solamente se tomó la temperatura ambiente de la zona de estudio (Choloma, Honduras) donde los resultados presentaron que fue de alrededor de 30 °C. Sin embargo, la temperatura al interior del recinto es una variable importante que sí se encuentra considerada en otros estudios y es tomada en cuenta para la red de resistencia del modelo

termodinámico (Peng & Yang, 2016). Adicionalmente, el uso de un software de simulación energética en edificios como TRNSYS incrementaría la precisión del estudio (Farah et al., 2016).

5. Conclusión

Se mostró que los módulos fotovoltaicos disminuyeron hasta un 24.3% la temperatura en el techo exterior de los edificios. Por otra parte, el análisis termodinámico reflejó una disminución en la ganancia de calor a través del techo del 83.8% por la instalación de módulos fotovoltaicos y una reducción de un 28.1% en la ganancia total del edificio. Lo anterior significa que, de contar con condiciones ideales y de no existir aislamiento térmico en el interior del edificio, los módulos influyeron en la carga térmica del edificio por la disminución de temperatura en el techo exterior. Lo anterior representó un valor agregado a las ofertas o instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos.

6. Contribución de los autores

Los autores participaron en la recolección de datos, la revisión de la literatura, el análisis de datos, y redacción del manuscrito final.

7. Reconocimientos

Los autores agradecen a Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE) por su apoyo en la investigación permitiendo usar uno de sus proyectos en construcción como caso de estudio.

8. Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

9. Referencias Bibliográficas

- Ban-Weiss, G., Wray, C., Delp, W., Ly P., Akbari, H., & Levinson, R. (2013). Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building. *Energy & Buildings*, 56 (56). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.032>
- Barron-Gafford, G., Minor, R., Allen, N. et al. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports* 6, 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- BIDInvest. (2018, junio). Energías Renovables para América Latina y el Caribe. Obtenido de <https://idbinvest.org/es/publications/energias-renovables-para-america-latina-y-el-caribe-honduras-energia-solar>
- Biwole, P. H., Woloszyna, M., & Pompeo, C. (2008). Heat transfers in a double skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy & Buildings*, 40(8), 1487-1497. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.004>

- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico.* (3a ed.). McGraw-Hill Interamericana. Obtenido de https://www.ucursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf
- Domínguez, A., Kleissl, J., & Luvall, J. (2015). Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. *Solar Energy*, 85(9), 2244-2255.
- ENEE. (2018). Boletín de datos Estadísticos Octubre 2018. Obtenido de: <http://www.enee.hn/planificacion/2018/boletines/Boletin%20Estadistico%20Octubre%202018.pdf>
- Farah, S., Whaley, D., & Saman, W. (2016). Simulation of rooftop photovoltaic shading using TRNSYS. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 674-678. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984037>
- Gargallo, G. (2011). Effect of ventilation in a photovoltaic roof. Obtenido de www.ht.energy.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/2011/EFFECT_OF_VENTILATION_IN_A_PHOTOVOLTAIC_ROOF_Guillem.pdf
- ICANZ. (2016). *Insulation Handbook. Part 1 Thermal Performance, total R-Value Calculation for typical building applications.* Obtenido de <https://icanz.org.au/wp-content/uploads/2016/12/Insulation-Handbook-Part-1-Thermal-Performance-Version-3-December-2016.pdf>
- Kapsalis, V., & Karamanis, D. (2015). On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand. *ELSEVIER*, 108, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.016>
- Kapsalis, V., Vardoulakis, E., & Karamanis, D. (2014). Simulation of the cooling effect of the roof-added photovoltaic panels, *Advances in Building Energy Research*, 7:1, 41-54. <https://doi.org/10.1080/17512549.2014.890534>
- Kwan, Y., & Guan, L. (2015). *Design a Zero Energy House in Brisbane, Australia.* ELSEVIER, 121, 604-611. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1046>
- LogTag Recorders. (s.f.) TRIX-8/TRIX-16. Obtenido de <https://www.logtag-recorders.com/en/hardware/trix-8/>
- Lubis, I., & Koerniawan, M. (2018). Reducing heat gains and cooling loads through roof structure configurations of a house in Medan. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 152. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/152/1/012008>
- Odeh, S. (2018). Thermal Performance of dwellings with rooftop PV panels and PV/thermal collectors. *Energies*, 11(7), 1879. <https://doi.org/10.3390/en11071879>
- Peng, C., & Yang, J. (2016). The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment. *Hindawi* 2016(2), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2016/9020567>
- Ramgopal, M. (s.f.). Cooling and heating loads calculations. Obtenido de <https://nptel.ac.in/courses/112105129/pdf/R&AC%20Lecture%2035.pdf>
- Sol-R-Eclipse. (s.f.). Specifications Sheet. Obtenido de <https://iiproducts.com/sol-r-eclipse/>
- Solargis (2019). Solar resource maps of Honduras: Global Horizontal Radiation. Obtenido de <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/honduras>
- Wang, Y., Wang D., & L. Yanfeng. (2017). Study on Comprehensive Energy-saving of Shading and Photovoltaics of Roof Added PV Module. *ELSEVIER*, 132, 598-603. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.672>
- Yang, H., Zhu, Z., Burnett, J., & Lu, L. (2001). A simulation Study on the energy performance of photovoltaic roofs. *ASHRAE Transactions*, 107, 129-135. <http://hdl.handle.net/10397/10770>.