



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PRÁCTICA PROFESIONAL

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA TÉRMICA EN UN EDIFICIO INDUSTRIAL CON

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS SOBRE SU TECHO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERO EN ENERGÍA

PRESENTADO POR:

21541207

INDIRA ALEJANDRA OCHOA MEJÍA

ASESOR: HÉCTOR FERNANDO VILLATORO FLORES

CAMPUS SAN PEDRO SULA;

MAYO, 2019

AGRADECIMIENTO

A mi madre y padre, Oneyda Mejía y Roberto Ochoa, sin su sacrificio, apoyo y amor este paso importante en mi vida académica no sería posible.

A mis hermanos y hermanas, quienes siempre se han sentido orgullosos de mí y me han brindado su ayuda y apoyo durante mis años de universidad.

A Fernando Canales, quien me apoyó incondicionalmente durante la carrera impulsándome a ser mejor con su amor y paciencia.

A mis amigos, Ivis Rodríguez y Marlon Perdomo, quienes me brindaron su amistad y apoyo en los momentos más necesarios.

Al Ing. Héctor Villatoro, a quien admiro y agradezco por sus enseñanzas y por abrirme las puertas en ICCE.

Al equipo del Departamento Solar, ICCE: Julio Barahona, Aliane Castillo y Marjorie Alvarado, por su apoyo y ayuda durante mi práctica profesional.

DEDICATORIA

Esta obra está dirigida a mis padres quienes con mucho esfuerzo me han apoyado en esta etapa académica y sin quienes este logro no sería posible.

RESUMEN

La presente investigación analiza el beneficio indirecto de la instalación de módulos solares fotovoltaicos sobre techo en un edificio industrial en el norte de Honduras. Mediciones de temperatura del ambiente de la zona y superficies del techo; cara externa e interna, antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos se realizaron mediante el uso de registradores de temperatura. Las temperaturas medidas del techo exterior e interior fueron utilizadas para un modelo termodinámico de transferencia de calor por conducción basándose en la ley de Fourier de conducción de calor.

Los resultados muestran que la temperatura de techo exterior presenta los mayores cambios con una reducción de 9.29 °C (24.3%) en la temperatura promedio cuando los módulos fotovoltaicos están presentes. Por otra parte, la temperatura del interior del techo no se vio afectada por la instalación de los módulos ya que cuenta con aislamiento térmico.

Un análisis de deltas de temperaturas refleja que el diferencial promedio entre la temperatura ambiente y temperatura de techo exterior se redujo 5.82 °C (86.1%) y el delta de temperatura entre el techo exterior y el interior se redujo en un 4.97 °C (83.8%) después de la instalación de módulos fotovoltaicos. Sin embargo, el delta de temperatura entre el techo interior y ambiente no presentó cambios significativos después de la instalación de módulos fotovoltaicos. El análisis termodinámico proporcionó la ganancia de calor antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos; en el escenario anterior a la instalación de módulos fotovoltaicos se obtuvo una ganancia de calor promedio de 18.16 Wh/m² y después de la instalación una ganancia de calor promedio de 2.94 Wh/m² representando una reducción del 83.8%. De acuerdo a un estudio en Australia, la ganancia de calor en el techo representa un 33.5% del calor total ganado en la envolvente de un edificio, por tanto, este porcentaje de reducción representa una reducción del 28.1% en la carga térmica del edificio.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO CONTEXTUAL	5
2.1 Generalidades De La Empresa (donde se desarrolló la PP).....	5
2.1.1. Misión	5
2.1.2. Visión	6
2.2 Descripción Del Departamento/Unidad	6
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
3.1 Antecedentes	7
3.2 Definición del Problema	7
3.3 Preguntas de investigación	7
3.4 Justificación	8
3.5 Hipótesis	8
IV. OBJETIVOS	9
4.1 Objetivo General.....	9
4.2 Objetivos Específicos	9
V. MARCO TEÓRICO	10
5.1 Energía solar fotovoltaica.....	10
5.2.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	11
5.2 Descripción instalación solar fotovoltaica	13
5.2.1 Módulo solar fotovoltaico	14
5.2.1 Inversores.....	16
5.2.1 Baterías.....	17

5.3	Energía fotovoltaica en techos.....	17
5.4	Energía fotovoltaica en Honduras	18
5.3	Termodinámica	20
5.4	Transferencia de calor	21
5.4.1	Transferencia de calor por conducción.....	22
5.4.2	Transferencia de calor por convección	24
5.4.3	Transferencia de calor por radiación	25
5.5.	Transferencia de calor en edificios	25
5.5.1	Carga térmica.....	25
VI.	METODOLOGÍA.....	27
6.1	Descripción general del edificio industrial.....	27
6.2	Descripción del arreglo solar	29
6.3	Mediciones de Temperatura	32
6.3.1	Instalación de Registradores de datos de temperatura	36
6.3.2.	Sensor de temperatura de techo interior.....	37
6.3.2	Sensor de temperatura de techo exterior.....	37
6.3.3	Sensor de temperatura ambiente	38
6.3.2	Monitoreo	38
6.4	Modelo termodinámico por conducción en el techo.....	39
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
7.1.	Registros de temperatura.....	41
7.1.1	Temperatura Ambiente.....	41
7.1.2	Temperatura de techo interior	41

7.1.3. Temperatura de techo exterior	41
7.2. Discusión de resultados de los sensores de temperatura	42
7.2.1. Escenario sin módulos fotovoltaicos	42
7.2.2. Escenario con módulos fotovoltaicos.....	45
7.3 Análisis de diferenciales de temperatura de techo exterior e interior	48
7.4 Resultados del análisis termodinámico.....	51
7.4.1. Escenario sin módulos fotovoltaicos	51
7.4.2. Escenario con módulos fotovoltaicos.....	53
VIII. CONCLUSIONES.....	55
IX. APLICABILIDAD	58
X. RECOMENDACIONES	59
XI. CONOCIMIENTOS APLICADOS.....	60
XII. VALORACIÓN DE LA PRÁCTICA	61
XIII. BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Porcentajes de capacidad instalada en Honduras por tipo de generación eléctrica para el año 2018. (100% = 2.6 GW).....</i>	<i>2</i>
<i>Ilustración 2. Logo de Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE)</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 3. Instalación fotovoltaica autónoma con sistema de almacenamiento.</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 4. Instalación fotovoltaica conectada a red sin sistema de almacenamiento.....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 5. Módulo solar monocristalino.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 6. Módulo solar policristalino.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 7. Instalación solar en Austria con módulos thin film.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 8. Instalación solar fotovoltaica sobre techo.</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 9. Planta solar fotovoltaica ENERBASA ubicada en Choluteca.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 10. Planta solar fotovoltaica Cohessa ubicada en Nacaome, Valle.....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 11. Promedio de ganancia de calor en un edificio en Australia.</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 12. Vista aérea del edificio industrial.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 13. a. Vista frontal del edificio. b. Interior del Raw Chip Storage.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 14. Vista de planta e isométrico del edificio industrial. *Unidades en metros.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 15. Escenario de medición de temperatura sin módulos solares fotovoltaicos. *Unidades en metros</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 16. Escenario de medición de temperatura con módulos solares fotovoltaicos. *Unidades en metros</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 17. Instalación de sensores mediante plataforma telescópica Genie.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 18. Medición de distancia para instalación de sensor de temperatura de techo exterior.</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 19. Red de resistencias de techo exterior.....</i>	<i>40</i>

<i>Ilustración 20. Gráfico de temperaturas el día 29 de octubre del 2018, sin instalación de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 21. Gráfico de temperaturas el día 31 de octubre del 2018, sin instalación de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 22. Gráfico de temperaturas el día 08 de noviembre del 2018, con instalación de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 23. Gráfico de temperaturas el día 10 de noviembre del 2018, con instalación de módulos fotovoltaicos.....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 24. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 29 de octubre (escenario sin módulos fotovoltaicos).</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 25. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 31 de octubre (escenario sin módulos fotovoltaicos).</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 26. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 08 de noviembre (escenario con módulos fotovoltaicos).</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 27. Transferencia de calor [W/m²] el 10 de noviembre (escenario con módulos fotovoltaicos).</i>	<i>54</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del arreglo solar objeto de estudio.....	30
Tabla 2. Características de sensores de temperatura LogTag.....	36
Tabla 3. Alturas de instalación de los sensores de temperatura.....	36
Tabla 4. Resistencias térmicas del modelo termodinámico.....	40
Tabla 5. Temperatura mínima, promedio y máxima entre los 21 días de estudio.....	42
Tabla 6. Temperatura mínima, promedio, y máxima el 29 de octubre del 2018 sin módulos fotovoltaicos.....	43
Tabla 7. Temperatura mínima, promedio y máxima el 31 de octubre del 2018 sin módulos fotovoltaicos.....	45
Tabla 8. Temperatura mínima, promedio y máxima el 08 de noviembre del 2018 con módulos fotovoltaicos.....	46
Tabla 9. Temperatura mínima, promedio y máxima el 10 de noviembre del 2018 con módulos fotovoltaicos.....	47
Tabla 10. Tabla resumen de promedio de temperatura según escenario.....	48
Tabla 11. Promedio de deltas de temperaturas del 29 de octubre del 2018 (escenario sin módulos fotovoltaicos).....	49
Tabla 12. Promedio de deltas de temperaturas del 31 de octubre del 2018 (escenario sin módulos fotovoltaicos).....	49
Tabla 13. Promedio de deltas de temperaturas del 08 de noviembre del 2018 (escenario con módulos fotovoltaicos).....	50
Tabla 14. Promedio de deltas de temperaturas del 10 de noviembre del 2018 (escenario con módulos fotovoltaicos).....	51
Tabla 15. Tabla resumen de transferencia de calor y ganancia de calor según escenario.....	54

I. INTRODUCCIÓN

La implementación de las energías renovables para la generación de electricidad resulta imprescindible para el bienestar del planeta. Poco a poco han ganado protagonismo en las matrices energéticas mundiales y han superado a las plantas generadoras a base de combustibles fósiles en países como Costa Rica, que para 2014 ya contaba con una matriz energética modelo con más del 95% a base de energías renovables junto a un mínimo de energía térmica como respaldo energético (ICE, 2015). Así mismo, Honduras ha superado a los combustibles fósiles y más de la mitad de su matriz energética es a base de recursos renovables, proponiéndose para 2038 alcanzar un 80% de generación renovable (BIDInvest, 2018). Ecuador también se encuentra dentro de la apuesta a las energías renovables y para 2017 disponía de una matriz energética a base de recursos renovables mayor al 60%. (Cuesta, 2019). Estos son solo algunos ejemplos de cómo la energía eólica, solar, hídrica, geotérmica y la biomasa se han apoderado de los sectores energéticos en los últimos años.

La energía solar fotovoltaica se encuentra entre las alternativas no convencionales más prometedoras. Ha tomado fuerza debido a su rápida instalación en el tejado de residencias, edificios, fachadas y sobre suelo. Honduras ha sido uno de los países que le ha apostado a la energía solar y en los últimos años se han aumentado las instalaciones fotovoltaicas en el país 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) como lo muestra la Ilustración 1; sin embargo, estos datos aluden sólo a plantas solares fotovoltaicas generadoras que le venden energía a la empresa estatal y no a instalaciones sobre tejados para autoconsumo.

Las instalaciones sobre techo también se han hecho notar en el sector comercial e industrial de Honduras quienes la utilizan para autoconsumo. Universidades, maquilas, colegios y restaurantes ya se han percatado de las bondades de este recurso renovable y poco a poco han ido aumentando las instalaciones en el país.

El mayor beneficio de la energía solar fotovoltaica es que cuando se utiliza para autoconsumo, representa un ahorro económico en la facturación eléctrica del cliente. Los módulos solares captan la radiación solar durante el día convirtiéndola en energía eléctrica, abasteciendo el consumo diario de las instalaciones evitando el uso de energía de la red y reduciendo el gasto mensual en la factura. Además del beneficio económico, también existe el beneficio ambiental, ya que este tipo de instalaciones no emite CO₂ a la atmósfera durante la fase de generación. Sin embargo, para la fabricación y transporte de los equipos que forman parte del sistema fotovoltaico sí hay emisiones de gases de efecto invernadero asociadas.

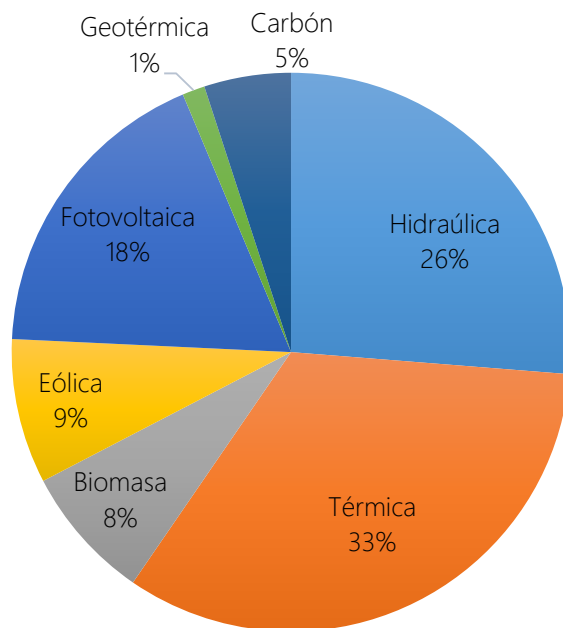


Ilustración 1. Porcentajes de capacidad instalada en Honduras por tipo de generación eléctrica para el año 2018. (100% = 2.6 GW)

Fuente de la imagen: Creación propia basada en (ENEE, 2018).

Las bondades de la energía solar fotovoltaica no se limitan a estos factores; se ha estudiado que 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 solares fotovoltaicos en una parte del techo del laboratorio

de la Universidad de California se reducía anualmente la carga de enfriamiento en un 38% (Domínguez, Jan Kleissl, & Jeffrey Luvall, 2015). Este estudio se llevó a cabo en un techo parcialmente cubierto de módulos solares fotovoltaicos en un laboratorio de la universidad y mediante una cámara térmica se observó que las temperaturas debajo de la parte cubierta fueron de 2.5 K menores a las del techo descubierto. Este tipo de instalaciones 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, un grupo de investigadores desarrolló un modelo de simulación para investigar el rendimiento térmico y eléctrico de los techos fotovoltaicos, donde se discute que la inclinación, la separación entre el módulo y el techo y la superficie son factores claves para el rendimiento térmico del edificio (Yang, Z., Burnett, & Lu, 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).

La presente investigación analiza el efecto en la carga térmica de un edificio industrial después de la instalación de módulos solares fotovoltaicos sobre su techo. La investigación se realizó mediante la instalación de sensores de temperatura en el cara exterior e interior del techo del edificio y en el ambiente durante 21 días entre los meses de octubre y noviembre del 2018 en una ventana de tiempo de 11:00 am a 4:00 pm. Los registros de temperatura se llevaron a cabo partiendo de dos escenarios, antes de la instalación de módulos fotovoltaicos y después de la instalación de estos. Primero, los registradores proporcionaron las temperaturas de los días de estudio y se procedió a analizar la información mediante la creación de gráficos diarios. Para el análisis, se seleccionaron cuatro gráficos; dos para el escenario sin módulos fotovoltaicos y dos para el escenario con módulos fotovoltaicos, la selección se basó en la comparación de la temperatura ambiente y se eligieron los días con temperaturas ambiente similares con variación promedio máxima de 1°C . Segundo, se realizó un modelo termodinámico de la transferencia de calor por conducción en el techo del edificio mediante la ley de Fourier de conducción de calor donde se obtuvo la densidad de transferencia de calor por unidad de área [W/m^2] y se integró para obtener la energía transferida [Wh/m^2] de 11:00 am a 4:00 pm.

La presente investigación se divide en las secciones a continuación,

La sección III contiene la información relacionada a la empresa (Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos) y la unidad (Departamento Solar) donde se realizó la práctica profesional que originó la investigación. Por otra parte, La sección IV plantea, define y justifica el problema principal de la investigación.

La Sección V proporciona la teoría necesaria para la comprensión de la metodología y resultados de la investigación basándose en dos temas principales, energía solar fotovoltaica y transferencia de calor. Seguidamente, la sección VI contiene la metodología y detalla el proceso llevado a cabo para responder las preguntas de investigación mediante la descripción e ilustración del lugar donde se realizó la investigación, así como el análisis termodinámico realizado para la obtención de resultados plasmados en la sección VII. La sección VII contiene los resultados divididos en dos escenarios; con y sin módulos fotovoltaicos instalados. Finalmente, la sección VIII contiene las conclusiones y limitaciones de la investigación.

Las secciones restantes contienen la aplicabilidad, recomendaciones y conocimientos aplicados de la investigación.

II. MARCO CONTEXTUAL

2.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA (DONDE SE DESARROLLÓ LA PP)

Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE) inició como una empresa consultora en 1990 fundada por el Ing. Arnaldo Martínez. El éxito obtenido en sus inicios en el sector industrial proporcionó confianza para expandir sus servicios a otros sectores productivos como el comercial, telecomunicaciones y energía. Sus servicios se extienden a proyectos en Sistemas eléctricos de alta, media y baja tensión, sistemas mecánicos, telecomunicaciones, automatización, control y proyectos solares.

En 2013, ICCE aportó su experiencia en diseño y construcción de subestaciones y líneas de transmisión para dos plantas de generación de energía a base de biomasa de 18 MW cada una, y con esto se construye por primera vez en Honduras, subestaciones aisladas tipo GIS. Al mismo tiempo se comienza a diseñar y construir líneas de transmisión de 69kV a 230 kV.

ICCE es una empresa proveedora servicios de ingeniería electromecánica, consultoría, diseño, construcción y gestión de proyectos para los sectores energéticos, industrial, comercial y gubernamental en la región centroamericana.(ICCE, s.f.)



Ilustración 2. Logo de Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE)

Fuente de la imagen: (ICCE)

2.1.1. MISIÓN

“Ser la empresa líder en proveer servicios y productos de ingeniería electromecánica, que satisfagan las necesidades y expectativas de nuestros clientes.” (ICCE, s.f.)

2.1.2. VISIÓN

“Suministrar servicios y productos electromecánicos en el mercado nacional y extranjero, de acuerdo a las necesidades del cliente, con recurso humano altamente motivado y capacitado; aplicando tecnología de punta y mejorando continuamente nuestros procesos, enfocados a una atención personalizada y de satisfacción del cliente y sus necesidades.” (ICCE, s.f.)

2.2 DESCRIPCIÓN DEL DEPARTAMENTO/UNIDAD

La idea de una división solar dentro de ICCE se remonta al 2011, mediante un proceso investigativo con un consultor holandés para impulsar el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica. En 2015 ICCE decide instalar su propio sistema de generación solar sobre techo para cubrir el 30% de la demanda de sus oficinas principales, este proyecto tuvo como finalidad introducir y poner en práctica el proceso de construcción y puesta en marcha de un sistema solar fotovoltaico.

Como primer proyecto, en 2016, ICCE solar instaló 1.493 MW_p en un edificio industrial en Choloma, Honduras y seguidamente se les otorga un nuevo proyecto de 406.40 kW_p en una universidad privada, en la ciudad San Pedro Sula, Honduras.

A partir de estos proyectos la división solar perteneciente al Departamento de Energía de ICCE ha crecido y se le han otorgado importantes proyectos fotovoltaicos en distintas partes del país.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 ANTECEDENTES

El departamento solar en Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE) se encarga de participar en licitaciones y ofertas de sistemas fotovoltaicos en el área comercial e industrial del país. Es importante como ofertante presentarle al cliente todos los beneficios que puede obtener de un sistema fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica brinda beneficios ambientales al tratarse de una energía limpia y renovable que no contamina la atmósfera emitiendo gases de efecto invernadero durante la fase de generación. Así mismo, brinda beneficios económicos a los clientes ya que permite reducir gran parte de la factura eléctrica. Sin embargo, existen otros beneficios que se han estudiado en menor medida como el efecto que provocan sobre el techo que son instalados por la sombra que brindan.

3.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en 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 temperatura en el interior del edificio.

3.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Disminuye la carga térmica en el interior de un edificio al instalarse sobre su techo módulos fotovoltaicos?
2. ¿Cuánto disminuye la carga térmica en el interior de un edificio al instalarse sobre su techo módulos fotovoltaicos?

3.4 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación nace como iniciativa del departamento solar de Ingenieros Consultores y Constructores Electromecánicos (ICCE) quienes se encuentran interesados en conocer los beneficios de instalar módulos solares sobre techos, esto con la intención de brindarle a sus clientes información más exacta sobre la rentabilidad económica de un generador fotovoltaico, no solo tomando en cuenta el ahorro directo de consumir la energía generada por el generador solar fotovoltaico, sino también el beneficio indirecto de la reducción de la carga térmica del edificio.

3.5 HIPÓTESIS

La carga térmica del edificio industrial disminuirá por la instalación de módulos fotovoltaicos instalados sobre su techo.

IV. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de módulos fotovoltaicos instalados sobre techo en la variación de la carga térmica en el interior de un edificio para identificar beneficios indirectos por este tipo de instalación.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Registrar datos de temperatura ambiente en un edificio en el norte de Honduras utilizando sensores de temperatura.
2. Registrar datos de temperatura de la cara exterior e interior del techo del edificio para dos escenarios: (1) sin módulos fotovoltaicos en su techo y (2) con módulos fotovoltaicos en su techo.
3. Realizar un modelo termodinámico para determinar la tasa de transferencia de calor por unidad de área [W/m^2] y la cantidad de calor [Wh/m^2] ganado en el techo.

V. MARCO TEÓRICO

La presente investigación se centra en dos temas principales, energía solar fotovoltaica y transferencia de calor en superficies. La relación de estos temas se presenta por la intención de descubrir cómo la instalación de módulos solares fotovoltaicos sobre techo influye en la carga térmica de un edificio industrial. La explicación de ambos temas resulta crucial para la comprensión de la metodología y resultados que se presentaran en las secciones siguientes. El marco teórico tendrá la función de explicar los aspectos más relevantes de estos temas. Primero describiendo el funcionamiento de la energía solar fotovoltaica y sus componentes, seguidamente se explicarán las formulas y principios detrás de la transferencia de calor y finalmente se describirá la relación entre la energía solar fotovoltaica y la transferencia de calor.

5.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable que aprovecha la luz solar para convertirla en electricidad mediante el uso de materiales semiconductores como el silicio y el galio convertidos en células solares que captan la radiación electromagnética del sol y la convierten en energía en corriente directa. Los inicios de aplicación se remontan a la década de los 50's para la industria aeroespacial, brindando energía a satélites. Actualmente su aplicación es amplia en bombas de agua, techos de comercios, industrias y viviendas y sobre suelo para autoconsumo o venta a empresas de energía eléctrica.

La energía solar aprovecha la radiación del sol mediante dos modalidades, energía solar térmica y energía solar fotovoltaica. La primera, utiliza la radiación solar para calentar un fluido y la segunda utiliza la radiación para la generación de energía eléctrica.

La energía solar fotovoltaica fue descubierta mediante el efecto fotovoltaico en 1839 por el científico francés Alexandre-Edmond Becquerel mientras realizaba un experimento con una pila electrolítica. El efecto fotovoltaico consiste en la generación de un diferencial de potencial en la unión de dos materiales distintos (semiconductores) al incidir radiación electromagnética sobre ellos. (Smets, Jager, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016)

Para 1880, ya se desarrollaban las primeras celdas solares hechas de silicio inicialmente producidas por W.G. Adams y R.E. Day. Sin embargo, contaban con una baja eficiencia de alrededor del 1%. En 1904, Albert Einstein hace público un artículo sobre el efecto fotovoltaico "Heurística de la generación y conversión de la energía", dicho artículo tomaba en cuenta que el efecto fotovoltaico está muy relacionado con el efecto fotoeléctrico, el cual ocurre cuando partículas de luz llamadas fotones inciden sobre un material y liberan electrones. (Dómine & Niro, 2013)

En 1954 se fabricó la primera celda de tipo industrial de silicio monocristalino por laboratorios Bell. Actualmente el silicio sigue siendo el material semiconductor para la elaboración de las células fotovoltaicas sin embargo se utilizan otros materiales como el arseniuro de galio, di seleniuro de indio y cobre y el telurio de cadmio. (Bogado, 2011)

5.2.1 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar dependiendo de su conexión en:

1. Sistemas autónomos
2. Sistemas conectados a la red.
3. Híbridos

Estas aplicaciones varían según las preferencias del cliente o el lugar donde se realice la instalación. En lugares remotos donde aún no se cuenta con energía eléctrica es común que se utilicen sistemas autónomos ya que resulta una alternativa más rápida y económica que la instalación de líneas de distribución. A este tipo de instalación se le puede integrar el uso de baterías que se cargan durante el día mediante los módulos solares fotovoltaicos y por la noche se utiliza la energía almacenada para abastecer las viviendas. La ilustración 3 muestra el diagrama de conexión de un sistema autónomo con baterías.

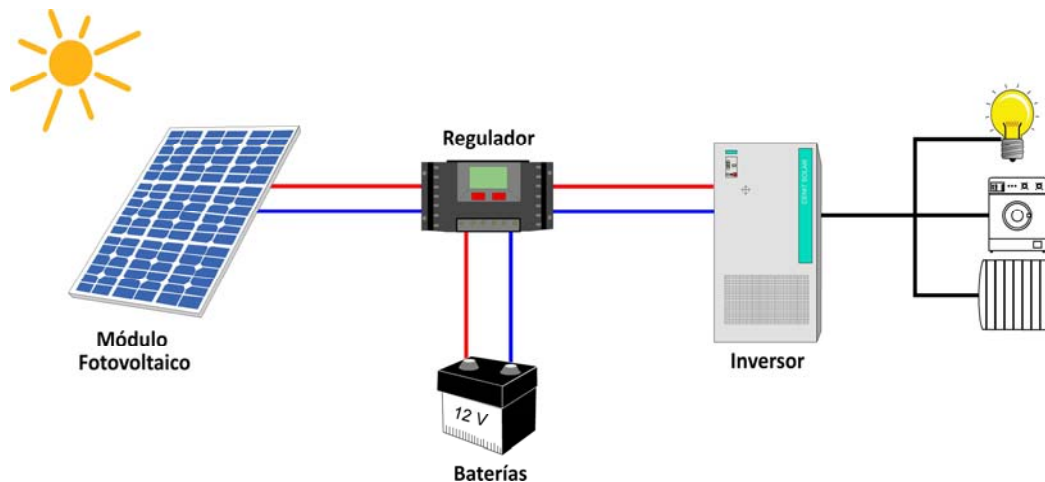


Ilustración 3. Instalación fotovoltaica autónoma con sistema de almacenamiento.

Fuente de la imagen: (ElectroRinux, s.f.)

La característica principal de los módulos solares fotovoltaicos es que solo producen electricidad durante el día ya que funcionan por la incidencia de luz solar. La cantidad de energía generada es proporcional a la irradiación solar que incide sobre la superficie del módulo fotovoltaico, por lo que para utilizar el sistema en la noche se debe hacer uso de un sistema de almacenamiento de energía (Abella, s.f.). Sin embargo, las instalaciones aisladas también pueden realizarse sin sistemas de acumulación dependiendo de las preferencias y necesidades. Por otra parte, las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de igual manera pueden o no utilizar el sistema de acumulación. La ilustración 4 muestra el diagrama de conexión de un generador fotovoltaico con conexión a red sin baterías, este tipo de sistema solo genera energía durante el día y por la noche las instalaciones hacen uso de la energía proveniente de la red eléctrica.

Existen también los sistemas híbridos que se componen de módulos solares acompañados de otra alternativa de generación de energía. Este tipo de sistemas requiere de mayores consideraciones que los autónomos y conectados a red. Una de las configuraciones más comunes incluye el sistema fotovoltaico con sistemas de almacenamiento más generador diésel.

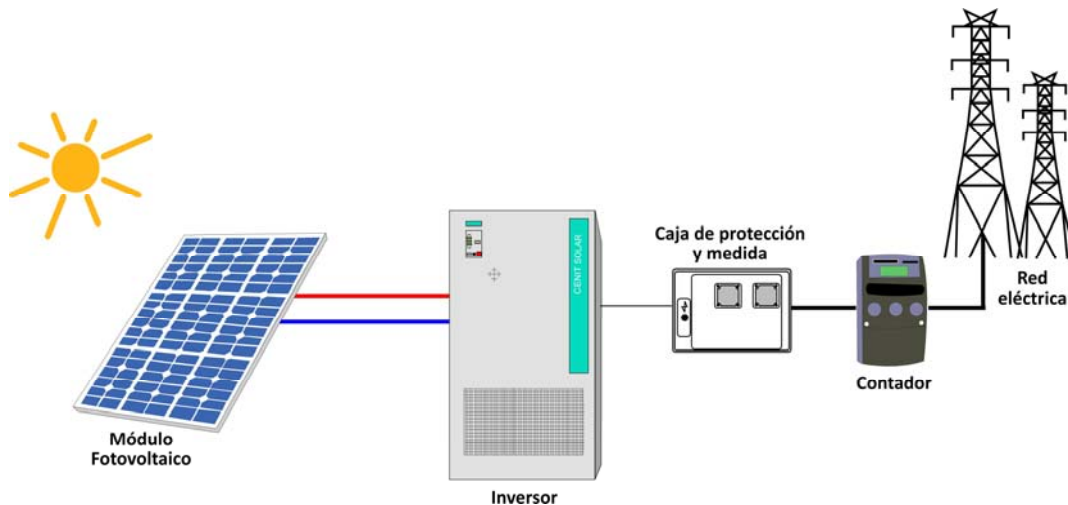


Ilustración 4. Instalación fotovoltaica conectada a red sin sistema de almacenamiento.

Fuente de la imagen: (CenitSolar, s.f.)

5.2 DESCRIPCIÓN INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

Una instalación fotovoltaica cuenta con distintos componentes para proveer energía eléctrica a un edificio o a la red a la que se encuentra conectada. Las instalaciones pueden ser desde pequeñas y simples hasta grandes y complejas. Algunas aplicaciones simples se componen del módulo solar y una carga. Por ejemplo, para una bomba de agua que se utilizará solo durante el día. Sin embargo, pueden ser complejas para granjas solares de varios MW contando con miles de módulos, y gran cantidad de inversores, cables, soportería y accesorios.

Los componentes auxiliares de una instalación fotovoltaica son llamados “balance del sistema” conocido por sus siglas en inglés como BOS.

La cantidad de componentes necesarios dependerá del tipo de sistema que se cuente (autónomo o conectado a red) (Smets, Jager, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016).

Algunos de estos componentes son:

1. Estructura.
2. Cableado.
3. Protecciones.
4. Canalizaciones.

5. Cajas combinadoras.

5.2.1 MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

El módulo solar fotovoltaico es el elemento comercial ya acabado. Se encuentra compuesto en su interior de células fotovoltaicas compuestas de silicio monocristalino o policristalinos, silicio amorfo y entre otros materiales. Las células fotovoltaicas se encuentran en una configuración de serie-paralelo determinada. De la misma manera se instalan los módulos en configuraciones serie-paralelo para alcanzar voltajes y corrientes deseadas según la instalación. (Fernandez, 2009)

La clasificación de módulos fotovoltaicos se divide de la siguiente manera:

1. Silicio Monocristalino
2. Silicio Policristalino
3. Capa Fina o thin film

Los módulos fotovoltaicos monocristalinos constan de un cristal de silicio caracterizado por su color azul oscuro y su forma circular/hexagonal como se observa en la ilustración 5. Se considera que el módulo monocristalino es el más eficiente, sin embargo, también el más costoso. Su eficiencia de conversión puede llegar al 20%. Se fabrica utilizando silicio puro y sometido a un complejo proceso de crecimiento de cristales. Tiene una vida útil mínima de 25 años; sin embargo, puede durar hasta 50 años con un cuidado adecuado, tomando en cuenta que su eficiencia disminuye con los años. (Pereira, s.f.). Este tipo de módulos suele ser útil cuando el espacio es un problema ya que su eficiencia los convierte en un módulo más pequeño por watt disponible. A pesar de sus ventajas, para 2012 la venta de estos no superaba la de los módulos policristalinos. (Zipp, 2012)



Ilustración 5. Módulo solar monocristalino.

Fuente de la imagen: (Zipp, 2012)

Los módulos fotovoltaicos policristalinos difieren de los monocristalinos en que no se forma una red cristalina en todo el material; la cristalización está formada por pequeñas partículas que no reflejan la luz uniformemente. Este tipo de módulo fotovoltaico cuenta con un tono de azul más claro y cuenta con rendimientos de 12-15% y una durabilidad de 25 años. (Pereira, s.f.) La ilustración 6 muestra un módulo FV policristalino.



Ilustración 6. Módulo solar policristalino.

Fuente de la imagen: (CanadianSolar, s.f.)

Los módulos "thin film" o capa fina se comenzaron a fabricar con el objetivo de reducir los procedimientos que conlleva la cristalización. Estos módulos se construyen con materiales como: silicio amorfo, telurio de cadmio, arseniuro de galio y diseleniuro de cobre en indio.

Se observa en la ilustración 7 una instalación residencial con módulos thin film, estos cuentan con un color oscuro y una sola capa de material en el interior, diferentes del monocristalino y policristalino que cuentan con cuadros. Este tipo de módulos suele ser de menor costo y mayor absorción sin embargo son de menor rendimiento por lo que para utilizarlos se debe instalar el doble de área para la misma potencia que los módulos monocristalinos. (Pereira, s.f.).

5.2.1 INVERSORES

Los inversores se encargan de convertir la energía eléctrica en corriente directa proveniente de los módulos fotovoltaicos a energía eléctrica en corriente alterna mediante características compatibles de voltaje y frecuencia a la red de distribución. (GrupoNAP, s.f.) El inversor puede o no ser necesario dependiendo de la instalación; si se pretende utilizar equipos en corriente continua, su uso no es necesario y una de sus funciones principales es el seguimiento del punto máximo de potencia.



Ilustración 7. Instalación solar en Austria con módulos thin film.

Fuente de la imagen: (Fronius, Reifnitz, s.f.)

5.2.1 BATERÍAS

Las baterías en una instalación fotovoltaica se encargan de acumular energía producida por los módulos solares fotovoltaicos que no está siendo aprovechada por la instalación con el objetivo de ser utilizada durante la noche. Las baterías se clasifican en dos tipos, ciclo bajo y ciclo profundo. Las primeras están diseñadas para suplir corriente durante un corto tiempo y no tienen la capacidad de descargarse profundamente, usualmente son utilizadas para los automóviles. Las segundas se encuentran diseñadas para ser descargadas hasta un 80% de su capacidad y son las utilizadas para los sistemas solares (Energía Solar, 2017). Este tipo de baterías se clasifican de la siguiente manera:

1. Baterías de ácido-Plomo
2. Líquidas – Electrolito líquido
3. Baterías AGM – Absorption Glass Mat
4. Baterías de litio

5.3 ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN TECHOS

La aplicación de la energía fotovoltaica se puede apreciar en techos de industrias, comercios y viviendas que la aprovechan para autoconsumo. Este tipo de aplicación es una alternativa para el ahorro económico en la factura de energía eléctrica.

La instalación de módulos sobre techo es relativamente sencilla, con el uso de rieles y otros accesorios de instalación llamados end clamps, mid clamps y L-feet, que se ensamblan en tejados de zinc, tejas y shingle y dan soporte a los módulos fotovoltaicos quienes se encargan de proveer electricidad durante el día.

Debido a que la instalación de módulos sobre techo suele ser de las más comunes actualmente, se ha identificado un efecto producido gracias a la instalación de estos. A parte de proveer los beneficios ambientales y económicos ya conocidos, también se cree que la sombra que producen en el tejado tiene un efecto positivo en la carga térmica de los edificios. Esta investigación pretende comprobar este efecto.



Ilustración 8. Instalación solar fotovoltaica sobre techo.

Fuente de la imagen: (Fronius, Playa del Carmen, s.f.)

5.4 ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN HONDURAS

La energía solar fotovoltaica en Honduras ha logrado éxito en granjas solares que le venden energía a la empresa estatal y en tejados de comercios e industrias que la aprovechan para autoconsumo y lograr reducir los altos cobros en la factura eléctrica mensual. Este éxito se ha logrado gracias a la ley de promoción a la generación de energía eléctrica con recursos renovables 70-2007 la cual presenta incentivos de exoneración de impuestos para la introducción de materiales y equipos para generación renovable. (Tribunal Superior de Cuentas, s.f.)

Según el boletín estadístico de la empresa estatal de energía (ENEE), Honduras cuenta con 18 plantas generadoras de energía solar fotovoltaica que le venden energía al estado y forman parte de la capacidad instalada en el país. Entre las 18 plantas, conforman 481.9 MW de potencia instalada. Entre estas, se encuentran:

1. Enerbasa con 24 MW de potencia AC instalada.
2. Marcovia con 35 MW de potencia AC instalada.

3. Cohessa con 50 MW de potencia AC instalada.
4. Soposa con 50 MW de potencia AC instalada.
5. Prodersa con 25 MW de potencia AC instalada.

Estas son algunas de las más grandes plantas fotovoltaicas en el país ubicadas en el sur en Choluteca y Valle.

La ilustración 9 muestra la planta fotovoltaica ENERBASA ubicada en Choluteca. Esta planta cuenta con una capacidad instalada de 24.156 MW_{DC} y tiene la capacidad de suministrar 41 GWh anuales a 750,000 hogares. La construcción de la planta culminó en Mayo 2015 convirtiéndose en el primer parque solar fotovoltaico en Honduras en unirse al Sistema Interconectado Nacional (Enerbasa, s.f.).

La ilustración 10 muestra la planta fotovoltaica Cohessa, con una potencia instalada DC de 72.072 MW ubicada en Nacaome en la aldea Agua Fría. Esta central entró en operaciones en junio del 2015 entregando anualmente 132 GWh. (Cohessa, s.f.)



Ilustración 9. Planta solar fotovoltaica ENERBASA ubicada en Choluteca.

Fuente de la imagen: (Enerbasa, s.f.)



Ilustración 10. Planta solar fotovoltaica Cohessa ubicada en Nacaome, Valle.

Fuente de la imagen: (Cohessa, s.f.)

5.3 TERMODINÁMICA

La termodinámica se encuentra en la naturaleza ya que todas las actividades en el mundo tienen una interacción entre la energía y la materia. Es la ciencia que se encarga de estudiar la relación entre el calor y la energía analizando los efectos de los cambios de temperatura, presión, densidad, masa y volumen de un sistema. Esta rama de la física cuenta con cuatro leyes reconocidas; la ley cero de la termodinámica establece que dos cuerpos que se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, se encuentran en equilibrio entre sí. La primera ley de la termodinámica trata sobre la conservación de la energía, y establece que un sistema que intercambia calor con otro, transformará su energía interna; la segunda ley de la termodinámica trata sobre la dirección de los procesos termodinámicos y la imposibilidad de que se lleven a cabo en sentido opuesto; la tercera ley establece la imposibilidad de alcanzar una temperatura igual al cero absoluto.

5.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

La termodinámica es la ciencia encargada de estudiar sistemas en equilibrio que permiten determinar la cantidad de energía necesaria para cambiar un sistema en equilibrio a otro. Por otra parte, para estudiar la rapidez con la que ocurren los cambios de energía, existe la ciencia de la transferencia de calor, la cual complementa a la termodinámica mediante análisis para predecir la rapidez de transferencia de energía térmica. (Transferencia de Calor, 2017)

La energía puede transferirse hacia y desde una masa mediante dos mecanismos, calor y trabajo. Es calor cuando la interacción se debe a un diferencial de temperatura, de otro modo, es trabajo.

La cantidad de calor transferido es denotado mediante la letra "Q" y tiene unidades de energía, para el Sistema Internacional de Unidades es el Joule (J), entre otras, se encuentra la Caloría, Watt-hora y el BTU. Por otra parte, la tasa o razón de transferencia de calor se denota mediante \dot{Q} . El carácter (punto diacrítico) representa la derivada con respecto al tiempo y tiene unidades de Watts o J/s. (Cengel, 2007). Para determinar la cantidad de transferencia de calor durante un intervalo de tiempo se utiliza:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad [J] \quad (1)$$

El calor o energía térmica está definida como la forma en que la energía se transfiere de un sistema a otro como resultado de un diferencial de temperatura. El calor, no es un fluido, por tanto, cuando se hace referencia a expresiones como "flujo de calor" se hace referencia a la transferencia de energía térmica hacia dentro o fuera de un sistema. La expresión de "flujo" surge porque su comportamiento es similar al de un fluido en movimiento.

Los fluidos se mueven debido a fuerzas impulsoras que actúan sobre ellos, como una diferencia de presión o una diferencia de velocidad. Para el calor, esta fuerza impulsora es un diferencial de temperatura, sin esta no puede existir una transferencia de calor, la cual estrictamente ocurre del medio que posee una temperatura más alta hacia uno de temperatura más baja mediante tres mecanismos; conducción, convección y radiación. Estos tres pueden ocurrir al mismo tiempo, sin embargo, puede ocurrir que alguno predomine sobre los otros. (Cengel, 2007)

5.4.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

Cuando dos objetos o sistemas entran en contacto, las moléculas en movimiento más rápido del objeto más caliente colisionan con las moléculas en movimiento más lento del objeto más frío, transfiriendo energía que las calienta. Este modo de transferencia puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases debido a un contacto directo. En los sólidos se debe a una combinación de las vibraciones de las moléculas y al transporte de energía por parte de electrones libres mientras que en los gases y líquidos se debe a la difusión y colisiones moleculares, las moléculas con temperaturas y energías altas ceden energía mediante las colisiones a las moléculas con menor temperatura. Esta tasa de transferencia está sujeta al espesor, geometría y diferencial de temperatura del sistema como lo muestra la ecuación 2 (Cengel, 2007).

Para encontrar la tasa de transferencia de calor en estado estacionario a través de un medio se utiliza la siguiente ecuación,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica del material en unidades de $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, Δx es el espesor del material en metros, A el área en metros^2 y $T_1 - T_2$ es el diferencial de temperatura del medio más caliente al más frío en kelvin. La ecuación (2) también puede expresarse en forma diferencial,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

A la ecuación (3) se le llama ley de Fourier de conducción térmica donde dT/dx es la razón de cambio de temperatura con respecto a la ubicación x . Esta relación expresa que la conducción de calor en una dirección es proporcional al diferencial de temperatura en esa dirección. El signo negativo en la ecuación garantiza que la conducción en la dirección x sea positiva. (Cengel, 2007). Esta ecuación también puede expresarse en función del flujo de calor por tiempo y área, denominado, densidad de flujo de calor cuyas unidades son $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ o W/m^2 .

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4)$$

La conducción de calor ocurre solamente si hay diferencias de temperatura entre el medio conductor y la conducción depende del medio en el que se realice. Por ejemplo, se considera que los metales son los mejores conductores de calor por su alta conductividad térmica. Por otra parte, el aire, madera y plásticos son malos conductores de calor y se les llama aislantes.

A. Conductividad térmica

La conductividad se define como una propiedad de un material de conducir calor o electricidad, cuando tienen la capacidad de conducir calor se les llama conductividad térmica y la capacidad de conducir electricidad conductividad eléctrica.

La conductividad térmica (λ) es la capacidad de transferencia de energía cinética de un cuerpo a otro, su unidad en el Sistema Internacional es el $W/m \cdot K$ o $W/m \cdot ^\circ C$, equivalente a $J/m \cdot s \cdot K$, donde K es la temperatura en kelvin. La conducción de calor se ve relacionada a la temperatura, cambio de fase de un material, su estructura, conductividad eléctrica y convección. Entre mayor sea el valor de la conductividad mejor conductor de calor será el material, entre menor, más resistente. Por ejemplo, el diamante, la plata y el cobre se consideran buenos conductores térmicos al contar con conductividades de 2,300, 429 y 401 $W/m \cdot ^\circ C$ respectivamente. (Cengel, 2007) también estos materiales son considerados buenos conductores eléctricos.

B. Conductancia térmica

La conductancia térmica establece la medida de transferencia de energía a través materiales formados por distintas capas. Su unidad es de $W/m^2 \cdot K$ Para calcularla se toma en cuenta la conductividad del material (λ) y el espesor (e),

$$C = \frac{\lambda}{e} [W/m^2 \cdot K] \quad (5)$$

También se le define a la conductancia como la inversa de la resistencia térmica,

$$C = \frac{1}{R} \quad (6)$$

C. Resistencia térmica

La resistencia térmica se define como la capacidad de un material de oponerse al calor, siendo esta, la inversa de la conductancia. Entre mayor sea este valor, mayor resistencia al calor presenta el material.

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]} \quad (7)$$

Esta resistencia térmica por unidad de área también se le llama resistencia térmica por contacto "R_c". (Cengel, 2007)

5.4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento físico de un fluido. Este mecanismo de transferencia se da entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente en movimiento. A medida que un fluido se mueve a través de una superficie puede agregar o quitar calor. Al existir un diferencial de temperatura en el interior de un gas o líquido se producirá un movimiento y es este movimiento el que transfiere calor mediante el intercambio de moléculas frías y calientes. Este mecanismo se puede ejemplificar con una olla que esté calentando agua; la llama solamente está en contacto con la superficie de la olla, sin embargo, el agua será calentada uniformemente debido a los movimientos de las moléculas en la parte inferior de la olla, permitiendo que las partes superiores se calienten. Si no existe un movimiento del fluido, la transferencia de calor solo se producirá por conducción.

La variación de temperatura que produce un movimiento natural en un fluido es llamado convección natural. La convección forzada se da cuando el fluido es obligado a moverse, por ejemplo, mediante una bomba. La convección solo ocurre en fluidos (líquidos y gases) debido a su capacidad atómica y molecular de moverse libremente en el espacio.

La convección natural se da por una fuerza motriz producto de una diferencia de densidad en el fluido por un contacto con una superficie a diferente temperatura. La convección forzada ocurre cuando una fuerza exterior mueve al fluido sobre otra superficie a distinta temperatura. A pesar de que resulta complejo determinar la transferencia de calor por convección, se observa mediante

la ley de Newton de enfriamiento que la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura (Cengel, 2007),

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad [\text{W}] \quad (8)$$

Donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ o $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$, A es el área superficial en contacto con el fluido, T_s es la temperatura de la superficie en kelvin y T_f es la temperatura del fluido lejos de la superficie en kelvin.

5.4.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

La radiación es la transferencia de calor o energía mediante ondas electromagnéticas y a diferencia de los modos anteriores, este no necesita intervenir con el medio. Este tipo de mecanismo es el más rápido y es la manera en la que la Tierra recibe energía proveniente del sol. La tasa de transferencia de calor por radiación entre dos superficies se expresa, (Cengel, 2007),

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad [\text{W}] \quad (9)$$

Donde, ε es la emisividad de la superficie (sin unidades), σ es la constante de Steffan-Boltzmann en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, A es el área de la superficie en metros y T_s es la temperatura de la superficie en kelvin.

5.5. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EDIFICIOS

5.5.1 CARGA TÉRMICA

Un edificio cuenta con diferentes maneras de ganar y perder calor mediante su envolvente. Existen dos fuentes de ganancia de calor en los edificios, internas y externas, las internas de un edificio se dividen entre las personas, equipos y la luminaria y las externas en las ventanas, paredes, el techo y el suelo.

Según un estudio hecho por Kwan y Guan, para un edificio en Australia, en promedio, la ganancia de calor en la envolvente corresponde a un 48.7% de las ventanas, 33.5% del techo, 9.7% de la paredes exteriores, 7.8% de infiltración y 0.4% del suelo como lo muestra la ilustración 11 (Kwan & Guan, 2015). Estas partes antes mencionadas, suelen ser las responsables de la máxima

ganancia de calor en un edificio. Por otra parte, según Lubis y Koerniawan, el techo al ser la superficie del edificio con mayor exposición a la radiación solar, contribuye a la mayor ganancia de calor del edificio. Es por esto, que se trata de minimizar las ganancias de calor por radiación solar de diferentes maneras (Lubis & Koerniawan, 2017). Una de las maneras de reducir las ganancias de calor en el techo es 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.

El rendimiento térmico de un edificio está afectado por la radiación que incide sobre él que en condiciones ideales se estima que es de alrededor de $1,000 \text{ W/m}^2$. Se tiene la hipótesis que cuando se instalan módulos solares fotovoltaicos o incluso termosolares sobre techo, estos realizan la función de protección y son quienes reciben la radiación solar en lugar del techo, provocando sombra sobre este último y disminuyendo la temperatura, provocando que la ganancia de calor en el interior del recinto sea menor. Esta hipótesis es la que se pretende validar en esta investigación.

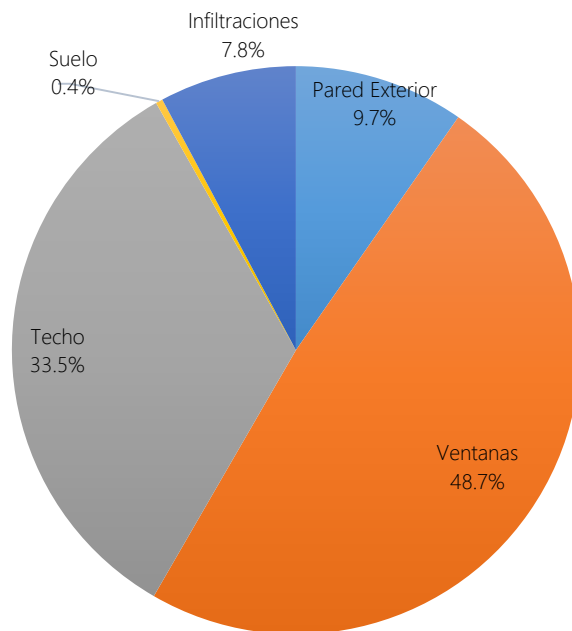


Ilustración 11. Promedio de ganancia de calor en un edificio en Australia.

Fuente de la imagen: (Kwan & Guan, 2015)

VI. METODOLOGÍA

Para analizar la influencia de módulos fotovoltaicos instalados sobre techo en la variación de la carga térmica en el interior de un edificio industrial 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 sobre su techo); segundo, se extrajo la información del software de los registradores de temperatura y se clasificó por escenario (sin módulos FV y con módulos FV); 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.

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EDIFICIO INDUSTRIAL

El edificio utilizado para realizar los estudios de la influencia de los módulos fotovoltaicos en la carga térmica corresponde a una maquila textilera ubicada en el norte de Honduras. La ilustración 12 muestra una vista aérea de la maquila con el generador fotovoltaico sobre techo ya instalado. La flecha roja en la ilustración indica la zona del edificio utilizada para la investigación.

La ilustración 13a muestra una vista frontal sobre suelo de la maquila con una flecha roja en indicando el área utilizada para el estudio. Por otra parte, la ilustración 13b muestra el interior del área utilizada. El área está nombrada como "Raw Chip Storage" y está destinada a la descarga y almacenamiento de materia prima para la maquila, en otras palabras, será la bodega principal.

El Raw Chip Storage no cuenta con aire acondicionado, sin embargo, 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. Cabe recalcar, que estas compuertas permanecieron abiertas durante los días de estudio debido a que el edificio se encontraba en construcción y se realizaban trabajos de pintura, soldadura, e instalación de equipos.



Ilustración 12. Vista aérea del edificio industrial.

Fuente de la imagen: Creación propia



Ilustración 13. a. Vista frontal del edificio. b. Interior del Raw Chip Storage.

Fuente de la imagen: Creación propia

El isométrico, la vista de planta y sección de corte del Raw Chip Storage se muestran en la ilustración 14. Así mismo, muestra un plano de referencia con un área sombreada para ubicar el Raw Chip Storage con respecto a la totalidad del edificio. A la derecha, la vista de planta muestra las dimensiones del techo del Raw Chip Storage, el cual se encuentra resaltado en verde y desde donde se realizó el corte de sección A¹-A. El corte, mostrado en la parte inferior de la ilustración muestra el ángulo de la pendiente del techo (nueve grados) y la longitud de la pendiente (42.43 metros), así como las alturas máximas y mínimas de la bodega, 13.86 y 7.56 metros respectivamente.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO SOLAR

Los módulos solares fotovoltaicos se instalaron sobre el techo del Raw Chip Storage. Este arreglo cuenta con 522 módulos fotovoltaicos de la marca Jinko Solar de 325 W_p cada uno, proporcionando 169.65 kW_{pDC} de potencia instalada.

En la Tabla 1 se describen las características más importantes del arreglo solar; cabe resaltar que estas medidas son solamente de la bodega en estudio, sin embargo, como lo muestra el isométrico de la ilustración 13, el edificio cuenta con módulos solares en distintos techos, sin embargo, se eligió el Raw Chip Storage debido a que. Al momento de la investigación, esta área del edificio no contaba con aire acondicionado y de esta manera, se esperaba que los cambios

por los módulos fueran más notorios. Por otra parte, esta área ofrecía mayor accesibilidad de instalación de los sensores al encontrarse el edificio en construcción.

Tabla 1. Características del arreglo solar objeto de estudio

Largo	Ancho	Área	Número de módulos	Tipo de módulos
59.96 m	18.50 m	1,109.26 m ²	522	JinkoSolar Policristalino, 325 W _p

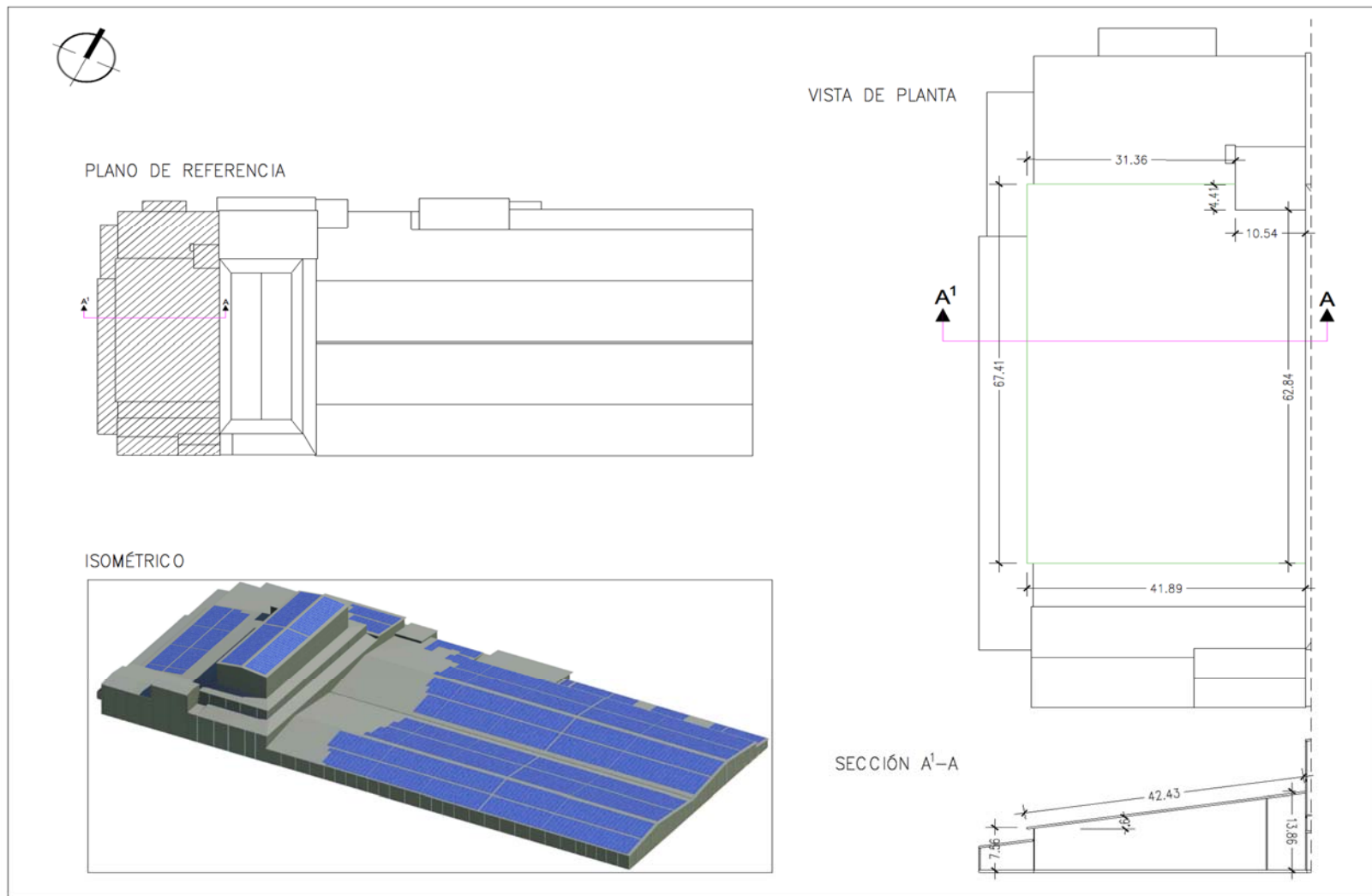


Ilustración 14. Vista de planta e isométrico del edificio industrial. *Unidades en metros.

Fuente de la imagen: Cortesía de Arq. Marjorie Alvarado, Departamento Solar, ICCE.

6.3 MEDICIONES DE TEMPERATURA

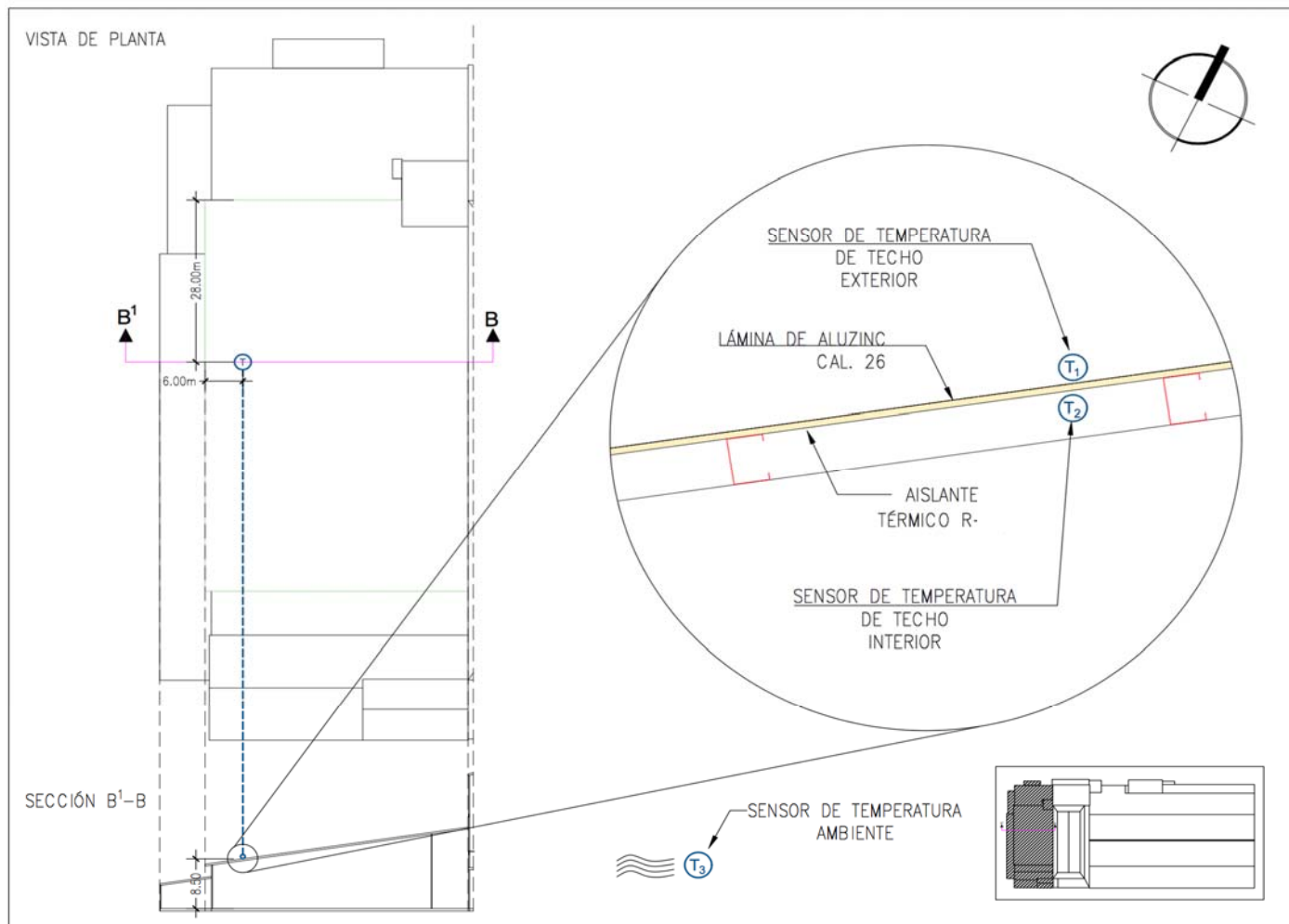
En dos escenarios se registraron datos de temperatura mediante sensores ubicados en el techo exterior, techo interior y en ambiente del edificio industrial. Estos datos de temperaturas nos brindaran los siguientes perfiles:

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 ilustración 15, muestra el escenario de registro de temperatura sin módulos fotovoltaicos. El sensor ubicado en la parte exterior del techo, se encuentra a 8.50 metros del suelo y el sensor interior bajo techo se encuentra adherido al aislante térmico por la parte interna del edificio.

La ilustración 16, muestra el escenario de registro de temperatura con módulos fotovoltaicos. Ahora, el sensor en la parte exterior se encuentra cubierto por los módulos solares ya instalados.

Las mediciones de temperatura se realizaron entre el 29 de octubre y 19 noviembre del 2018 (omitiendo las fechas domingo (4, 11 y 18 de noviembre)). Los sensores estuvieron programados para registrar datos cada cinco minutos desde las 11:00 am a 4:00 pm. Cabe resaltar que varios días de estudio se vieron afectados por las comunes lluvias de octubre y noviembre ya que los sensores no eran resistentes al agua y debían ser retirados de medición.



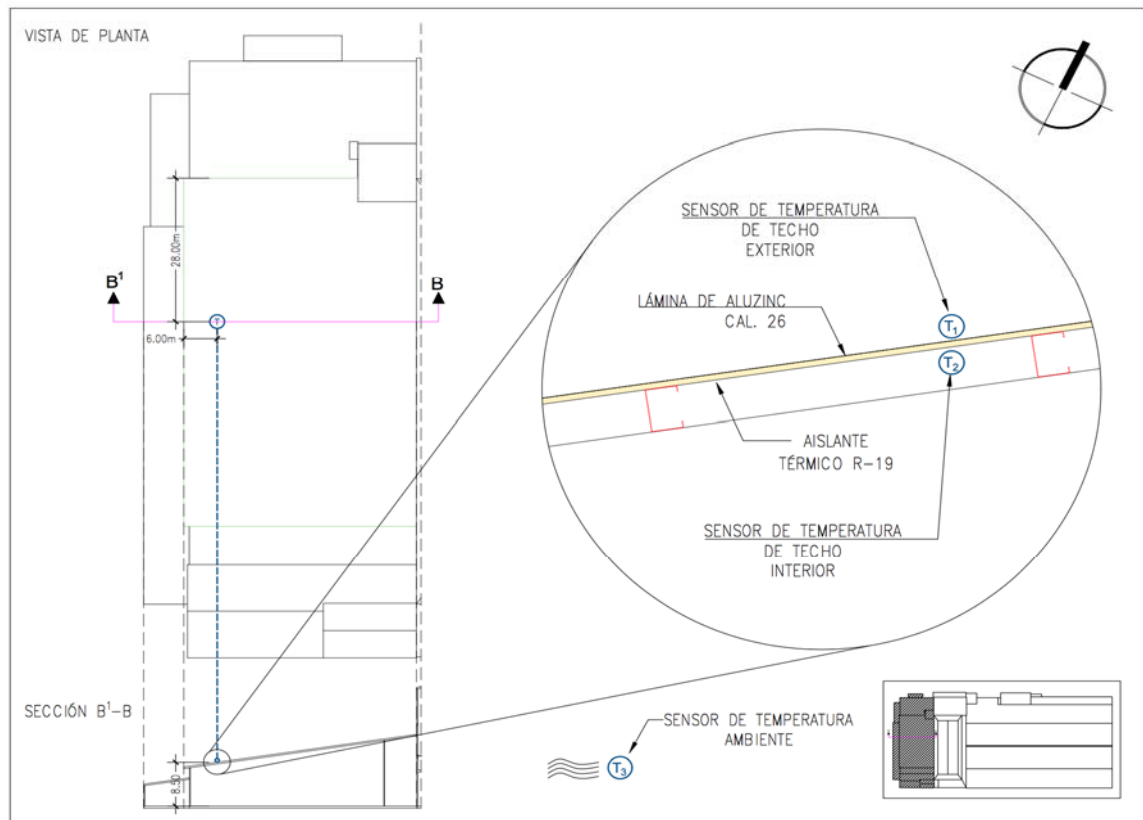


Ilustración 15. Escenario de medición de temperatura sin módulos solares fotovoltaicos.

*Unidades en metros

Fuente de la imagen: Cortesía de Arq. Marjorie Alvarado, Departamento Solar, ICCE.

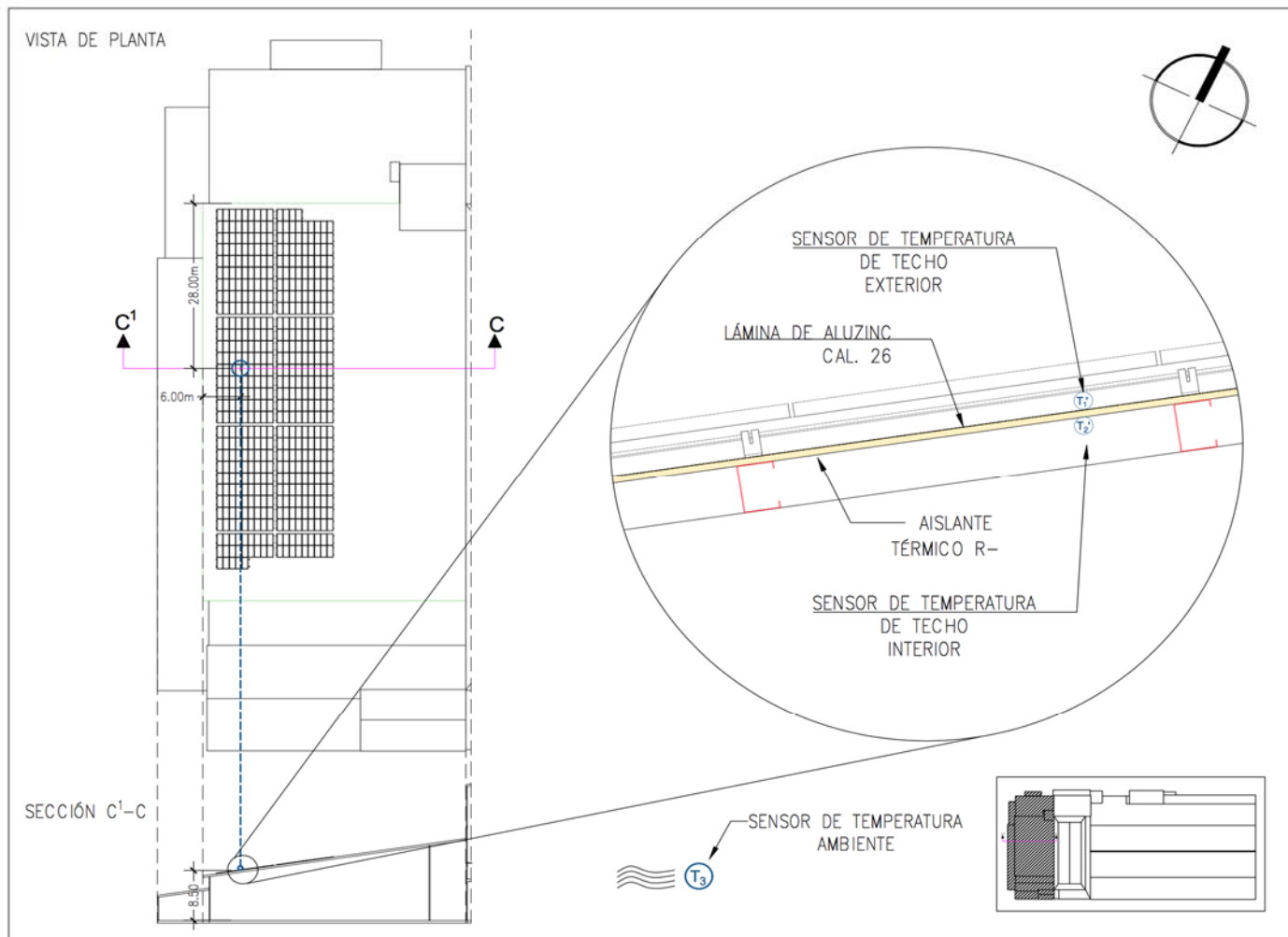


Ilustración 16. Escenario de medición de temperatura con módulos solares fotovoltaicos.

*Unidades en metros

Fuente de la imagen: Cortesía de Arq. Marjorie Alvarado, Departamento Solar, ICCE.

En la Tabla 2, aparecen las características de los sensores y la Tabla 3 contiene las alturas a las que fueron instalados.

Tabla 2. Características de sensores de temperatura LogTag

Modelo	Exactitud	Rango de medición	Capacidad (lecturas)	Intervalo de medida
TRIX-8	0.5°C para -20°C a 40°C	-40°C a 85°C	8,000	5 minutos

Tabla 3. Alturas de instalación de los sensores de temperatura

Sensor de temperatura	Altura
Temperatura techo exterior	8.50 metros
Temperatura techo interior	8.30 metros
Temperatura ambiente	3 metros

La razón por la cual el sensor de temperatura ambiente se colocó a una distancia menor a los ubicados sobre techo y bajo techo se debe a razones de seguridad y mayor exactitud de la temperatura ambiente, evitando instalarlo en zonas donde otros factores como paredes, láminas y equipos pudieran influir en las mediciones.

6.3.1 INSTALACIÓN DE REGISTRADORES DE DATOS DE TEMPERATURA

La instalación de los registradores de temperatura se comenzó el 26 de octubre del 2018. La instalación del sensor de temperatura de techo interior se llevó a cabo mediante plataformas telescópicas Genies, con la ayuda de ingenieros y técnicos encargados del proyecto. La ilustración 17 muestra la instalación del sensor de temperatura de techo interior el 26 de octubre mediante una plataforma Genie.



Ilustración 17. Instalación de sensores mediante plataforma telescópica Genie.

Fuente de la imagen: Creación propia

6.3.2. SENSOR DE TEMPERATURA DE TECHO INTERIOR

El sensor de temperatura de techo interior se instaló el viernes 26 de octubre a las 3:30 pm en el techo interior del Raw Chip Storage.

6.3.2 SENSOR DE TEMPERATURA DE TECHO EXTERIOR

El sensor de temperatura de techo exterior comenzó a recabar información el Viernes 26 de octubre a las :30 pm. La utilización de este sensor no requirió la utilización de plataformas ya que esa parte del techo cuenta un acceso mediante escaleras por dentro del edificio y con las medidas de seguridad (arnés, chaleco, casco) se podía acceder a él de manera más sencilla.

Se utilizó una cinta métrica en el interior del edificio para medir la distancia hasta el sensor de temperatura interior, seguidamente, como lo muestra la ilustración 10, se utilizó la cinta métrica sobre techo hasta alcanzar la distancia medida en el interior. Esto se realizó con la intención de hacer coincidir en el mismo punto ambos sensores de temperatura exterior e interior.



Ilustración 18. Medición de distancia para instalación de sensor de temperatura de techo exterior.

Fuente de la imagen: Creación propia

6.3.3 SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE

El sensor destinado a registrar la temperatura ambiente comenzó a recabar información el sábado 27 de octubre. Cabe mencionar que este sensor se encontraba lejos de los sensores de techo exterior e interior ya que instalarlo cerca de estos significaba alterar los resultados ya que existían láminas, paredes y equipos que emiten calor cerca de estos lugares. Se instaló en un lugar seguro y al aire libre para obtener los datos más acertados del ambiente.

6.3.2 MONITOREO

Se monitorearon los sensores de temperatura durante los días de estudio ya que son sensibles al agua y esto podía dañar la información recopilada. Los sensores sobre techo y ambiente eran desinstalados diariamente entre 4:00 pm y 5:00 pm ya que eran los más propensos a recibir lluvia mientras que el sensor de techo interior estuvo instalado durante los 21 días de estudio. Debido a la desinstalación diaria se llevó un registro diario de las horas de instalación y desinstalación de los sensores sobre techo y ambiente.

6.4 MODELO TERMODINÁMICO POR CONDUCCIÓN EN EL TECHO

El techo del edificio está compuesto por lámina de aluzinc calibre 26 de tipo trapezoidal donde se encuentran instalados 522 módulos solares fotovoltaicos. Por otra parte, el interior del techo se encuentra cubierto por aislante térmico. Para efectos de la investigación se llevará 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.

El modelo termodinámico se realizará basándose en la ecuación (10), 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 serán por unidad de área.

$$\dot{Q}/A = \frac{T_{\text{ext}} - T_{\text{in}}}{R_c} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (10)$$

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 (10) 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 por conducción se puede clasificar en estacionaria o transitoria dependiendo de la variación de la temperatura con el tiempo y unidimensional, bidimensional o tridimensional en función de las dimensiones de transferencia.

La transferencia de calor a través de techos y paredes se considera 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 considerará la transferencia de calor por conducción como estable.

El modelo termodinámico se desarrollará considerando una red de resistencias térmicas de todos los componentes que intervienen en el tejado. Esta red de resistencias lo implementa la ley de Fourier como una analogía a la ley de Ohm. Las resistencias térmicas descritas se consideraron tanto en el escenario sin módulos fotovoltaicos como en el escenario con módulos fotovoltaicos, como lo muestra la ilustración 19.

R_1 Resistencia térmica del aluzinc.

R₂ Resistencia térmica del aislamiento.

R₃ Resistencia térmica del aire interior.

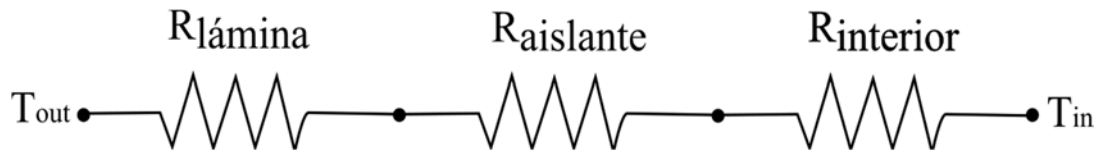


Ilustración 19. Red de resistencias de techo exterior.

Fuente de la imagen: Creación propia

Tabla 4. Resistencias térmicas del modelo termodinámico

Resistencia térmica	Valor [m ² · °C/W]	Nomenclatura R	Fuente
Resistencia térmica del techo	0.00	-	(Insulation Handbook , 2014)
Resistencia térmica del aislamiento	1.88	-	(Sol-R-Eclipse)
Resistencia térmica del aire interior	0.16	10.78	(Insulation Handbook , 2014)

Los datos obtenidos del modelo serán en W/m² y corresponderán a la transferencia de calor cada cinco minutos (debido a que se cuentan con las lecturas de temperaturas en este intervalo). Sin embargo, es necesario también calcular la ganancia de calor en el techo, para esto se usará la ecuación (11)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \text{ [Wh/m}^2\text{]} \quad (11)$$

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. REGISTROS DE TEMPERATURA

Las temperaturas de techo exterior e interior y ambiente del edificio industrial durante 21 días, desde el 29 de Octubre al 19 de Noviembre del 2018 (omitiendo los domingos 4,11 y 18 de noviembre) se recopilaron mediante el uso del software "Logtag Analyzer" de los sensores de temperatura.

En las subsecciones a continuación, se detallará en resumen las temperaturas mínimas, máximas y promedio de los tres sensores de temperatura (Ambiente, techo exterior y techo interior). Los datos de la temperatura interior y exterior se dividieron en antes y después de la instalación de módulos fotovoltaicos.

7.1.1 TEMPERATURA AMBIENTE

La temperatura ambiente durante los días de estudio mantuvo un promedio de 30 °C con una temperatura mínima de 20.5 °C y máxima de 36.8 °C.

7.1.2 TEMPERATURA DE TECHO INTERIOR

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 máxima antes de la instalación de módulos fotovoltaicos fue de 35.90 °C y después de la instalación fue de 32.9 °C.

7.1.3. TEMPERATURA DE TECHO EXTERIOR

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.

La tabla a continuación resume los datos antes mencionados.

Tabla 5. Temperatura mínima, promedio y máxima entre los 21 días de estudio.

Sensor de temperatura	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Temperatura Máxima [°C]
Temperatura de techo exterior	21.8	33.79	53.2
Temperatura de techo interior	24.4	29.84	35.8
Temperatura ambiente	20.5	30	36.8

7.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Para la discusión de resultados se eligieron cuatro gráficos de diferentes días entre el 29 de octubre y 19 de noviembre. Dos de los gráficos elegidos pertenecen al escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos sobre techo y los restantes dos al escenario con instalación de módulos fotovoltaicos sobre techo. La selección de estos gráficos 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 31 de octubre del 2018. Para el escenario con módulos fotovoltaicos instalados se eligieron los días 08 y 10 de noviembre del 2018. Estos días cuentan con temperaturas promedio de ambiente entre 31° C y 32° C. Cada gráfico cuenta con una tabla de la temperatura máxima, mínima y promedio del día elegido.

7.2.1. ESCENARIO SIN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A continuación, la ilustración 20, muestra el gráfico del 29 de octubre del 2018 perteneciente al escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos. Se puede observar que la temperatura de techo exterior cuenta con variaciones durante las lecturas, mientras que las temperaturas del techo interior y ambiente se encuentran entre rangos similares. Estas variaciones en la

temperatura de techo exterior podrían atribuirse a nubes y a corrientes de viento durante las lecturas.

La tabla 6 muestra las temperaturas: mínima, máxima, y promedio del 29 de octubre. Se observa que la temperatura ambiente tuvo un promedio de 31.2°C, la temperatura de techo exterior un promedio de 37.3°C y la de techo interior de 31.5°C. Cabe resaltar que los registros de temperatura de techo exterior alcanzan temperaturas altas con una máxima de 46.5°C.

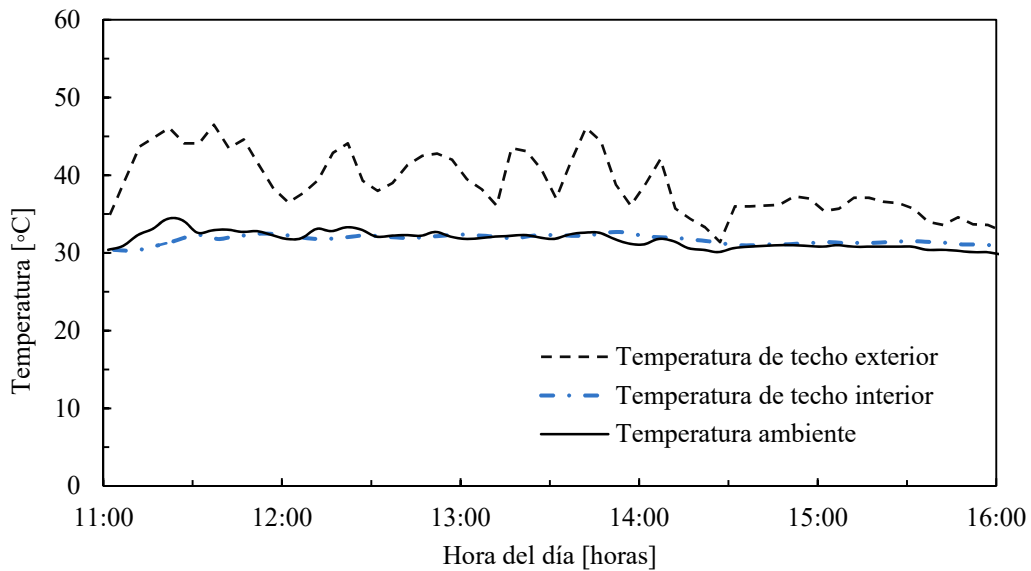


Ilustración 20. Gráfico de temperaturas el día 29 de octubre del 2018, sin instalación de módulos fotovoltaicos.

Fuente: Creación propia

Tabla 6. Temperatura mínima, promedio, y máxima el 29 de octubre del 2018 sin módulos fotovoltaicos

Sensor de temperatura	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Temperatura Máxima [°C]
Temperatura de techo exterior	27.7	37.3	46.5
Temperatura de techo interior	29.5	31.5	32.7

Temperatura ambiente	27.4	31.2	34.4
----------------------	------	------	------

La ilustración 21 muestra el segundo gráfico elegido para el escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos perteneciente al 31 de octubre del 2018. Se puede observar que la gráfica de temperatura de techo exterior cuenta con picos y valles similares, pero menos constantes en comparación al 29 de octubre.

En la tabla 7 se observa que el 31 de octubre cuenta con una temperatura máxima sobre techo mayor que la del 29 de octubre, en este caso, la máxima alcanza hasta 48.9°C y el promedio 38.5 °C. El ambiente, por su parte, tiene el mismo promedio de 31.2 °C y la temperatura sobre techo interior cuenta con un promedio de 32.2 °C.

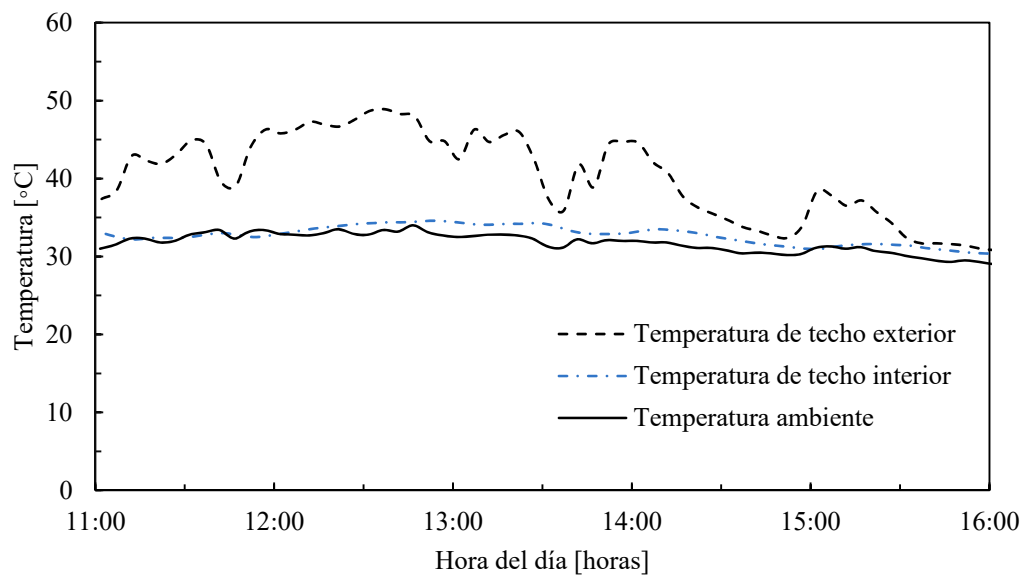


Ilustración 21. Gráfico de temperaturas el día 31 de octubre del 2018, sin instalación de módulos fotovoltaicos.

Fuente: Creación propia

Tabla 7. Temperatura mínima, promedio y máxima el 31 de octubre del 2018 sin módulos fotovoltaicos

Sensor de Temperatura	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Temperatura Máxima [°C]
Temperatura de techo exterior	27.1	38.5	48.9
Temperatura de techo interior	29.4	32.2	34.6
Temperatura ambiente	27.9	31.2	34.0

7.2.2. ESCENARIO CON MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A continuación, se presentan los gráficos del escenario con módulos fotovoltaicos instalados sobre techo que corresponden a los días 08 y 10 de noviembre del 2018.

La ilustración 22 muestra el gráfico de temperaturas el día 08 de noviembre del 2018, donde a diferencia de los gráficos de la ilustración 12 y 13, la temperatura de techo exterior no cuenta con picos y valles y se mantiene en un rango similar a las temperaturas ambiente y de techo interior, esto confirmaría que la variación de las lecturas en el techo exterior del escenario anterior se deben a nubes y vientos, ahora como el sensor se encuentra debajo del módulo las nubes no lo afectan y las corrientes de viento las recibe el módulo fotovoltaico.

La tabla 8 muestra los máximos, mínimos y promedio de temperaturas del 08 de noviembre. Se observa que con una temperatura ambiente promedio de 32.1 °C, la temperatura máxima del techo exterior llega a 30.9°C lo que representa una gran diferencia con los máximos de techo exterior de 46.5°C y 48.9°C del 29 y 31 de octubre respectivamente.

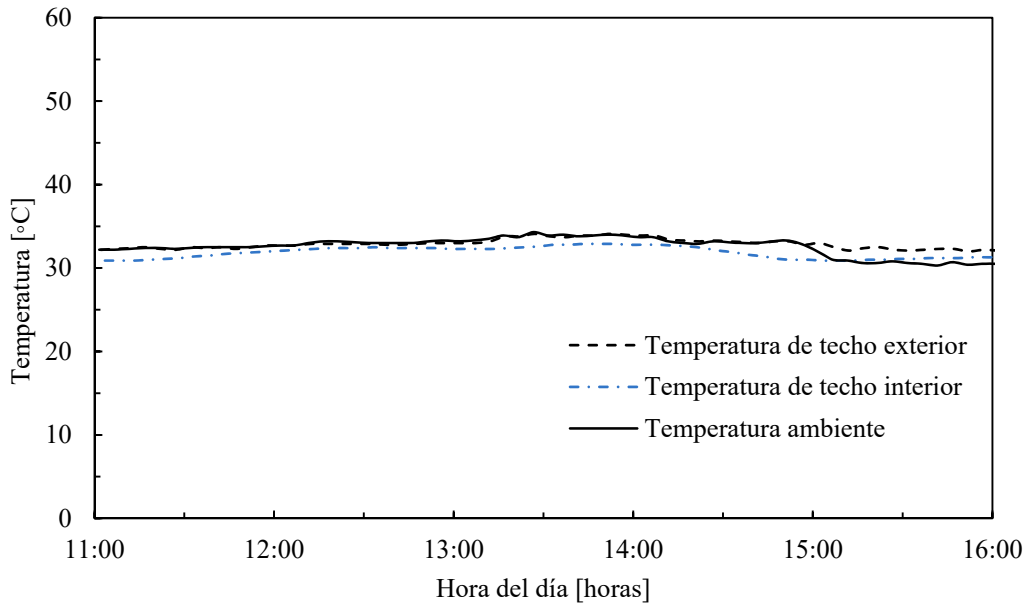


Ilustración 22. Gráfico de temperaturas el día 08 de noviembre del 2018, con instalación de módulos fotovoltaicos.

Fuente: Creación propia

Tabla 8. Temperatura mínima, promedio y máxima el 08 de noviembre del 2018 con módulos fotovoltaicos

Sensor de Temperatura	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Temperatura Máxima [°C]
Temperatura de techo exterior	30.9	32.7	34.1
Temperatura de techo interior	30.6	31.7	32.9
Temperatura ambiente	28.2	32.1	34.3

La ilustración 23 muestra el gráfico de temperaturas del 10 de noviembre de 2018, se observa que la gráfica de la temperatura de techo exterior se mantiene durante el día sin variaciones.

La tabla 9 muestra que la temperatura ambiente tuvo un promedio de 31.7°C y en este caso la temperatura máxima sobre techo es mayor que la del 08 de noviembre con 34.5°C, sin embargo, sigue existiendo una diferencia notable al escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos.

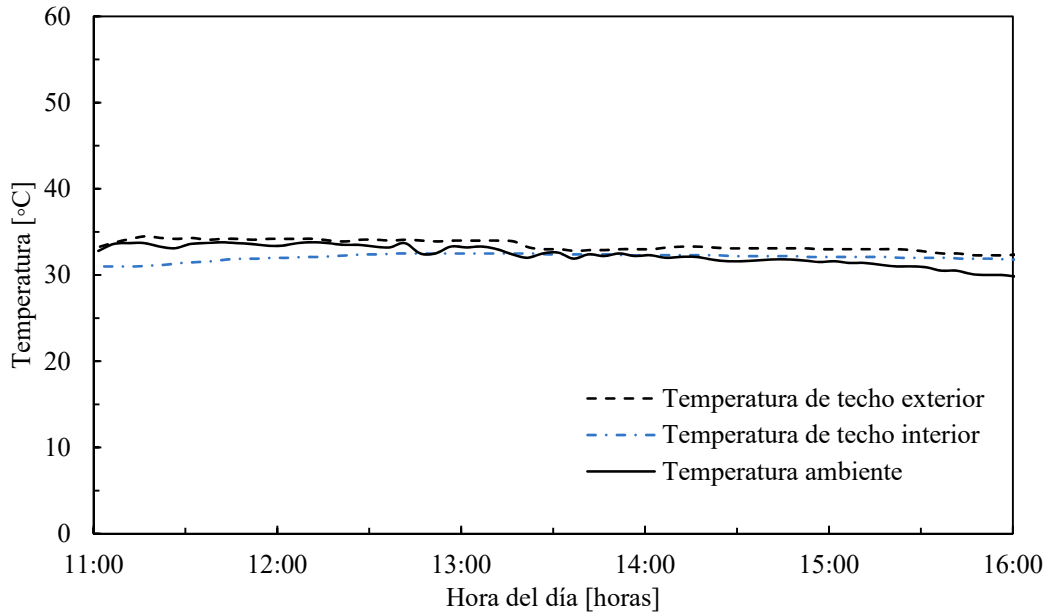


Ilustración 23. Gráfico de temperaturas el día 10 de noviembre del 2018, con instalación de módulos fotovoltaicos.

Fuente: Creación propia

Tabla 9. Temperatura mínima, promedio y máxima el 10 de noviembre del 2018 con módulos fotovoltaicos

Sensor de temperatura	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]	Temperatura Máxima [°C]
Temperatura de techo exterior	30.9	33.2	34.5
Temperatura de techo interior	30.5	31.9	32.5
Temperatura ambiente	27.8	31.7	33.8

Tabla 10. Tabla resumen de promedio de temperatura según escenario

Promedios de Temperatura según escenario [°C]				
	Sin módulos fotovoltaicos		Con módulos fotovoltaicos	
	Oct-29	Oct-31	Nov-08	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

La tabla 10 resume los promedios de los cuatro días elegidos para ambos escenarios. La tabla muestra que los mayores cambios se reflejan en el techo exterior, esto debido a que la radiación solar no estaba incidiendo directamente en el aluzinc sino en los módulos solares. La temperatura de techo interior probablemente no tuvo variación debido a que cuenta con aislante térmico.

7.3 ANÁLISIS DE DIFERENCIALES DE TEMPERATURA DE TECHO EXTERIOR E INTERIOR

Se realizaron cálculos de deltas de temperatura para cada lectura entre las 11:00 am y 4:00 pm de los cuatro días elegidos para ambos escenarios. Se realizaron los siguientes cálculos para los siguientes casos:

1. Caso 1: Diferencia de temperatura entre el ambiente y techo exterior (Temperatura ambiente – Temperatura techo exterior)
2. Caso 2: Diferencia de temperatura entre el ambiente y techo interior (Temperatura ambiente – Temperatura techo interior)
3. Caso 3: Diferencia de temperatura entre techo interior y techo exterior (Temperatura de techo exterior – Temperatura techo interior)

Las tablas 11 y 12 muestran los promedios de los cálculos para el escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos. La tabla 10 muestra los promedios del 29 de octubre, se observa que el ambiente y techo exterior presentan una diferencia de $-6.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ya que el techo exterior contaba con temperaturas mayores que las del ambiente, al estar expuesto directamente a la radiación y a las propiedades de la lámina de calentarse rápidamente. Por otra parte, el ambiente y el techo interior se mantienen en temperaturas similares durante el día con una diferencia de 1°C . Seguidamente, el techo exterior y el interior muestran una diferencia positiva de $5.87\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 11. Promedio de deltas de temperaturas del 29 de octubre del 2018 (escenario sin módulos fotovoltaicos)

Diferencial de Temperatura	Promedios [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT Ambiente-Techo Exterior	-6.15
ΔT Ambiente-Techo Interior	1
ΔT Techo Exterior-Techo Interior	5.87

La tabla 12 muestra mayores diferencias, especialmente entre el ambiente y el techo exterior con un delta promedio de -7.37°C , mientras que el promedio entre el ambiente y el techo interior se mantiene y el promedio entre techo exterior y techo interior sube a 6.31°C .

Tabla 12. Promedio de deltas de temperaturas del 31 de octubre del 2018 (escenario sin módulos fotovoltaicos)

	Promedios [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT Ambiente-Techo Exterior	-7.37
ΔT Ambiente-Techo Interior	-1
ΔT Techo Exterior-Techo Interior	6.31

En estas tablas se observa que los diferenciales de temperaturas entre el ambiente y el techo exterior (caso 1) y entre el techo exterior y el techo interior (caso 3) son elevados en comparación al ambiente y techo interior (caso 2) donde su promedio de delta es de solamente 1°C, esta mínima diferencia entre el ambiente y el techo interior se alude a que el Raw Chip Storage cuenta con aislante térmico y es una bodega amplia que permaneció con sus compuertas abiertas durante los días de medición, por lo tanto, se puede considerar que la temperatura del techo interior era aproximadamente la misma que la del ambiente.

Las tablas 13 y 14 a continuación muestran los promedios de deltas de temperaturas para el escenario con instalación de módulos fotovoltaicos. La tabla 10 muestra el promedio de deltas del 08 de noviembre donde se observa que el promedio de delta del ambiente y techo exterior es de solamente -0.64°C. El ambiente y el techo interior presentan un promedio sin diferencia de 0°C y el techo exterior y techo interior presentan una mínima diferencia de 0.97°C.

Tabla 13. Promedio de deltas de temperaturas del 08 de noviembre del 2018 (escenario con módulos fotovoltaicos)

Deltas de Temperatura	Promedios [°C]
ΔT Ambiente-Techo Exterior	-0.64
ΔT Ambiente-Techo Interior	0
ΔT Techo Exterior-Techo Interior	0.94

La tabla 14 presenta los promedios del 10 de noviembre del 2018 donde el ambiente y el techo exterior cuentan con una diferencia de -1.44°C. Por otra parte, nuevamente el ambiente y el techo interior no muestran diferencias. Sin embargo, el diferencial entre el techo exterior y el techo interior tienen un promedio de 1.31°C.

Tabla 14. Promedio de deltas de temperaturas del 10 de noviembre del 2018 (escenario con módulos fotovoltaicos)

Deltas de Temperatura	Promedios [°C]
ΔT Ambiente-Techo Exterior	-1.44
ΔT Ambiente-Techo Interior	0
ΔT Techo Exterior-Techo Interior	1.31

Los resultados de las tablas muestran que ambos escenarios cuentan con grandes diferencias en sus deltas. El delta de temperatura del ambiente y el techo exterior (caso 1) en el escenario con instalación de módulos fotovoltaicos presenta una diferencia de entre 5°C ~ 7°C menor en comparación al escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos.

En el caso 2, delta de temperatura ambiente y techo interior, el promedio en el escenario sin módulos fotovoltaicos se mantiene en 1°C y con instalación de módulos en 0°C, esta diferencia fue mínima.

Para el caso 3, delta de temperatura de techo exterior y techo interior, el escenario con módulos fotovoltaicos presenta una diferencia de aproximadamente 5°C.

7.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMODINÁMICO

El análisis termodinámico de la ley de Fourier por conducción proporcionó gráficas de transferencia de calor en el techo en [W/m²] y la integración de los datos proporcionó el calor o energía térmica total transferida en [Wh/m²] durante el delta tiempo analizado de 11:00 am 4:00 pm.

7.4.1. ESCENARIO SIN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para el 29 de octubre, la ilustración 24 muestra la transferencia de calor en el techo. Los picos y valles se deben a que la formula está sujeta a la temperaturas sobre techo exterior y esta presentaba variaciones en las lecturas debido a nubes y corrientes de viento. La máxima

transferencia de calor ocurrió a las 11:37 am con 7.21 W/m^2 . La integración de los datos tuvo como resultado una ganancia de calor de 17.56 Wh/m^2 .

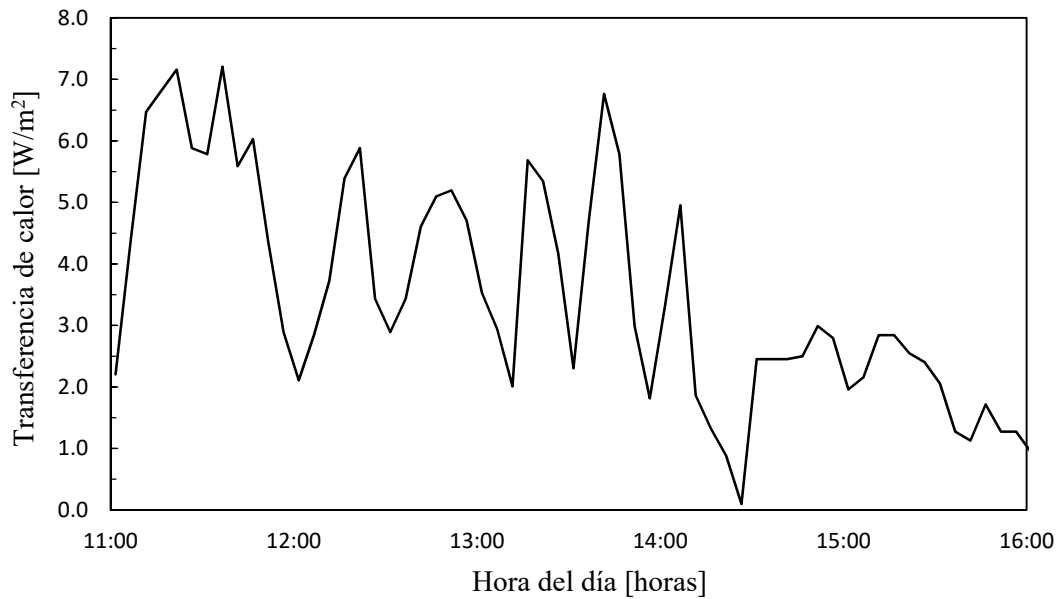


Ilustración 24. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 29 de octubre (escenario sin módulos fotovoltaicos).

Fuente: Creación propia

La ilustración 25 corresponde al segundo gráfico del escenario sin instalación de módulos fotovoltaicos el 31 de octubre y se observan de igual manera picos y valles debido a los cambios abruptos de temperatura en el techo exterior. Para este escenario la transferencia máxima ocurrió a las 12:38 pm con 7.11 W/m^2 . La integración total de los datos dio como resultado 18.75 Wh/m^2

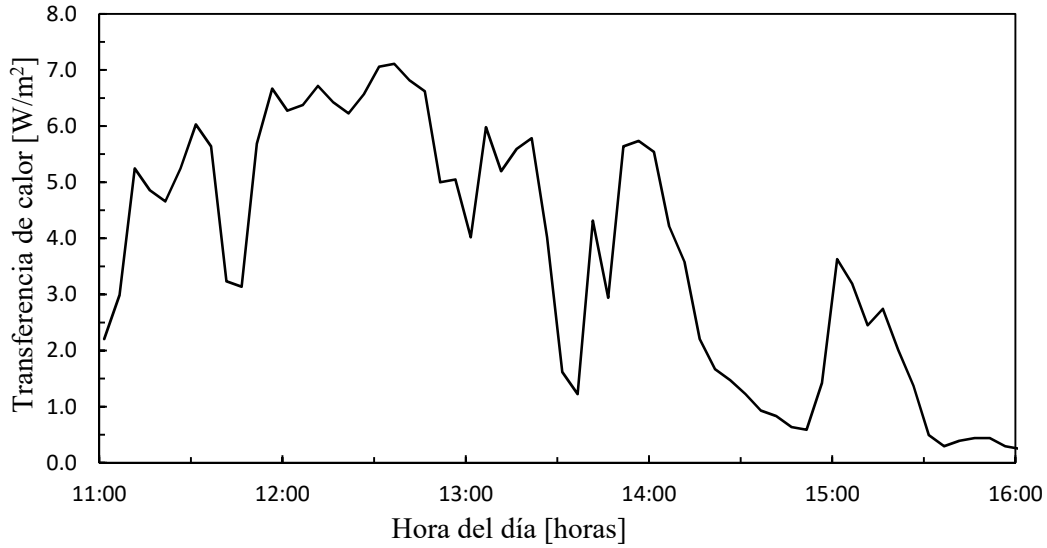


Ilustración 25. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 31 de octubre (escenario sin módulos fotovoltaicos).

Fuente: Creación propia

7.4.2. ESCENARIO CON MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A continuación, la ilustración 26 muestra el escenario con módulos fotovoltaicos el 08 de noviembre. Se observa que los picos y valles son menos frecuentes debido a que la temperatura de techo exterior no cambió abruptamente. Para este escenario, la máxima transferencia ocurrió a las 2:51 pm con 1.078 W/m². La integración dio como resultado una ganancia de calor de 2.53 Wh/m².

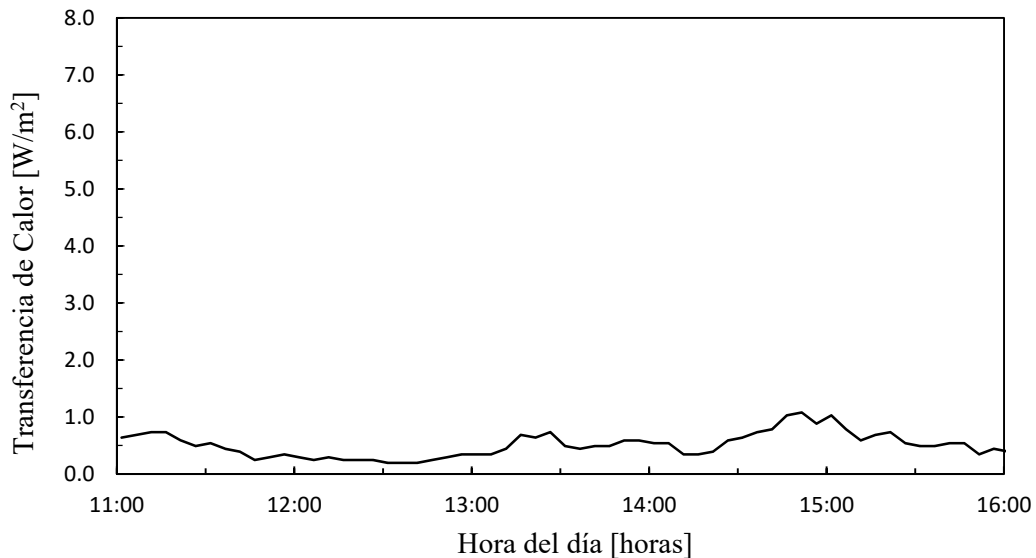


Ilustración 26. Transferencia de calor [W/m²] en el techo el 08 de noviembre (escenario con

módulos fotovoltaicos).

Fuente: Creación propia

La ilustración 27 muestra el segundo gráfico del escenario el 10 de noviembre. La máxima transferencia ocurrió alrededor de las 11:20 de la mañana con 1.67 W/m^2 , para este día la ganancia de calor fue de 3.35 Wh/m^2 .

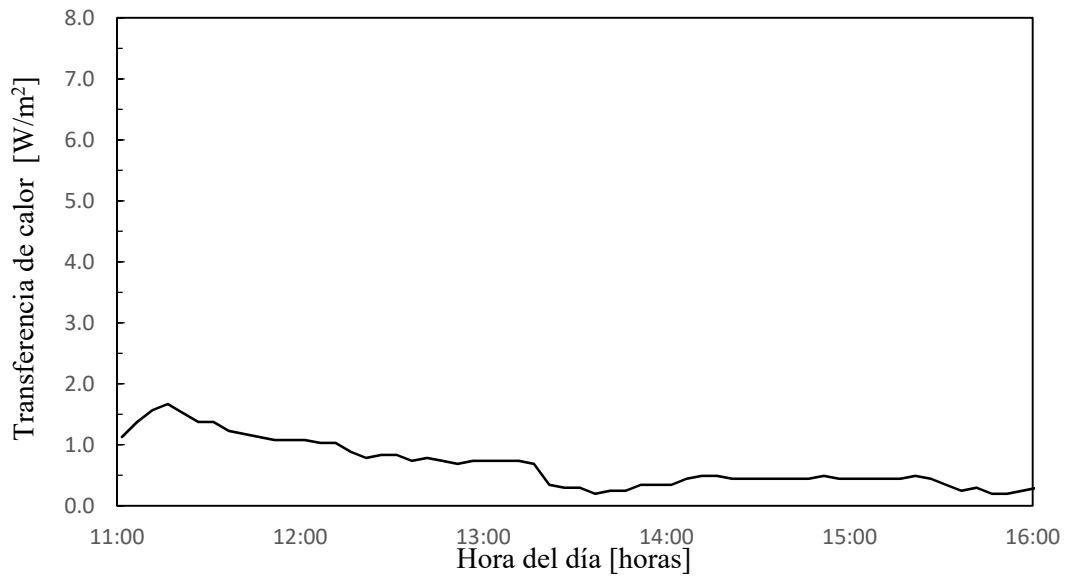


Ilustración 27. Transferencia de calor [W/m²] el 10 de noviembre (escenario con módulos fotovoltaicos).

Fuente: Creación propia

A continuación, se presenta la tabla resumen de los resultados del análisis termodinámico.

Tabla 15. Tabla resumen de transferencia de calor y ganancia de calor según escenario

Tabla resumen de análisis termodinámico				
	Sin módulos fotovoltaicos		Con módulos fotovoltaicos	
	Oct-29	Oct-31	Nov-08	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

VIII. CONCLUSIONES

Esta investigación analiza la variación de la carga térmica en un edificio con módulos fotovoltaicos instalados sobre su techo mediante el registro de temperaturas sobre el techo exterior, interior y en el ambiente entre los meses de octubre y noviembre del 2018. Las temperaturas registradas fueron utilizadas en un modelo termodinámico para determinar la transferencia de calor en el techo mediante la ley de Fourier, este modelo toma en cuenta una red de resistencias del zinc, aislante y el aire interior del edificio y las temperaturas exterior e interior del techo. El análisis reveló las conclusiones a continuación.

- El registro de temperatura ambiente en la zona de ubicación del edificio industrial se mantuvo en un promedio de 30 °C entre las 11:00 am y 4:00 pm del 29 de octubre al 19 de noviembre. Se presentaron temperaturas mínimas de 20.5 °C debido a lluvias y climas helados en el mes de noviembre.
- El registro de temperaturas de techo exterior se mantuvo en un promedio de 38.17 °C antes de la instalación de módulos fotovoltaicos y de 28.88 °C después de la instalación esto refleja una reducción de 9.3 °C, siendo en porcentaje un 24.3%.
- El registro de temperaturas sobre techo interior se mantuvo en un promedio de 31.89 °C antes de la instalación de módulos fotovoltaicos y de 32 °C después de la instalación.
- El mayor cambio se ve reflejado en las temperaturas sobre el techo exterior el cual antes de la instalación de módulos fotovoltaicos contaba con temperaturas máximas de 53.2 °C y después de la instalación de 38.6 °C esta disminución representa una reducción de 14.6 °C, siendo en porcentaje un 27.4%.
- La temperatura de techo interior no se ve afectada en gran medida por la instalación de módulos fotovoltaicos debido a que el techo del edificio contaba con aislamiento térmico.
- El análisis de deltas de temperaturas de los dos días elegidos antes de la instalación de módulos fotovoltaico refleja que el delta de temperatura entre el ambiente y el techo exterior tuvo un promedio de -6.76 °C y entre el techo exterior y el interior un promedio de 6.09 °C. Sin embargo, no se refleja variación en el delta de temperatura entre ambiente y techo interior.

- El análisis de deltas de temperaturas para los dos días del escenario después de la instalación de módulos fotovoltaicos refleja un promedio de delta entre el ambiente y techo exterior de 0.94 °C y entre el techo exterior y techo interior un promedio de 1.12 °C. Por otra parte, el delta entre el ambiente y techo interior no reflejó cambios.
- Se obtuvo una reducción del 86.1% para el delta de temperatura entre el ambiente y el techo exterior y una reducción del 81.5% para el delta de temperatura entre el techo exterior y el interior. El techo interior y ambiente no presentó cambios.
- El análisis termodinámico demostró que antes de la instalación de módulos fotovoltaicos la ganancia de calor en los días elegidos en promedio fue de 18.16 Wh/m² y luego de la instalación de los módulos fotovoltaicos obtuvo un promedio de 2.94 Wh/m². Esto representa una reducción del 83.8%.
- Se considera que el 83.8% de reducción en la ganancia de calor corresponde al 33.5% de la ganancia de calor en el techo en un edificio. Por lo tanto, de no existir aislamiento térmico la ganancia de calor se pudo haber reducido en un 28.1%.

Las limitaciones de esta tesis son las siguientes: (1) el análisis termodinámico para la transferencia de calor se consideró como estable y estacionario por motivos de simplicidad, sin embargo, la transferencia de calor en un edificio se considera como transitoria, especialmente en épocas donde la radiación y la temperatura presentan grandes variaciones durante el día. Esto incluye la utilización de otro tipo de ecuaciones diferenciales. (2) El modelo termodinámico se simplificó en gran manera al no tener registro de la temperatura de la superficie exterior y posterior del módulo solar fotovoltaico, por tanto la red de resistencias térmicas no tomó en cuenta los coeficientes por convección y radiación ni la resistencia térmica que ofrece el hueco que se forma entre el módulo solar fotovoltaico y el techo. Este tipo de análisis sí fue implementado por investigaciones como "Effects of Solar Photovoltaic Panels on Roof Heat Transfer" (Domínguez et al.,2015) , Effect Of Ventilation In A Photovoltaic Roof" (Gargallo, 2011) . (3) 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. Por tanto, esto debería de investigarse a fondo. (4) No se tomó la temperatura del ambiente en el Raw Chip Storage debido a que no se contaba con la cantidad suficiente de registradores de temperatura.

(5) No se validó la información mediante un software de simulación energética de edificios. Investigaciones como "Thermal Performance of Dwellings with Rooftop PV Panels and PV/Thermal Collectors" (Odeh, 2011), "The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment" (Peng & Yang, 2016), utilizan softwares tales como AccuRate Sustainability" y EnergyPlus respectivamente para validar sus modelos termodinámicos.

IX. APLICABILIDAD

El análisis de la variación de la carga térmica por la instalación de módulos fotovoltaicos representa un valor agregado a las ofertas de sistemas solares fotovoltaicos. El ofertante tiene la oportunidad de agregar en su oferta o licitación el beneficio indirecto que ofrece instalar los módulos solares sobre techo. El cliente interesado en un sistema solar fotovoltaico tendrá el conocimiento que aparte del ahorro económico que surge de la instalación, existe la posibilidad de que el interior de la vivienda o edificio presente un confort térmico.

X. RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de sensores de temperatura para obtener las mediciones tanto en la superficie superior como posterior del módulo solar fotovoltaico para realizar un análisis termodinámico más detallado que incluya los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación. También es recomendable contar con pirómetros y anemómetros con el fin de obtener la mayor cantidad de datos para mayor exactitud de análisis y resultados.

XI. CONOCIMIENTOS APLICADOS

El presente informe se basa en dos temas principales, energía solar fotovoltaica y transferencia de calor por conducción. Durante la carrera de Ingeniería en Energía, se cursan dos materias relacionadas a los temas de la investigación; energía termosolar y fotovoltaica y termodinámica, cursadas aproximadamente entre el segundo y tercer año de la carrera.

Se aplicaron conocimientos de energía fotovoltaica al estar presente durante toda la instalación de un sistema solar sobre techo en un edificio industrial, los conocimientos adquiridos en clase se vieron en marcha en la realidad.

Se aplicaron conocimientos de termodinámica específicamente en el área de transferencia de calor. Se aprende en termodinámica que la transferencia de calor en sistemas o cuerpos se realiza mediante tres mecanismos, conducción, convección y radiación. Durante la investigación se centró en la transferencia por conducción que se debe al contacto entre cuerpos por transferencia de energía de moléculas con mayor energía (temperaturas elevadas) a moléculas con menor energía (temperaturas bajas). Se realizó un modelo termodinámico basado en la ley de Fourier de conducción de calor con analogía al flujo eléctrico tomando en cuenta las resistencias que intervienen entre los sistemas que se analizaron (techo exterior y techo interior).

XIII. BIBLIOGRAFÍA

- Abella, M. A. (s.f.). *Sistemas Fotovoltaicos*. Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de Accesify: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf
- Acerca de nosotros: Ingenieros consultores y constructores electromecánicos*. (22 de Enero de 2019).
Obtenido de Ingenieros consultores y constructores electromecánicos:
<https://www.icceconsul.com/nosotros>
- Armstrong, S., & Hurley, W. (2010). A thermal model fot photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *ELSEVIER*, 1488-1495.
- BIDInvest. (Junio de 2018). *BID Invest*. Obtenido de Energías Renovables para América Latina y el caribe; Honduras Energía solar: <https://idbinvest.org/es/publications/energias-renovables-para-america-latina-y-el-caribe-honduras-energia-solar>
- Bogado, M. M. (2011). *Materiales y Materias Primas; Silicio*. Buenos Aires: Saavedra. Obtenido de <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/silicio.pdf>
- CanadianSolar. (s.f.). *Solar Modules*. Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de Canadian Solar: <https://www.canadiansolar.com/solar-panels/dymond.html>
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGraw-Hill.
- CenitSolar. (s.f.). *Fotovoltaica conectada a la red*. Obtenido de Cenit Solar: http://www.cenitsolar.com/fotovoltaica_red_esquema.php
- Cohessa. (s.f.). *Cohessa*. Recuperado el 21 de Febrero de 2019, de <http://www.iresa.hn/cohessa/>
- Cuesta, G. (Enero de 2019). *Universidad Técnica de Ambato*. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29170>
- Dómine, L., & Niro, N. (28 de Junio de 2013). *Sistema de Iluminación Autónomo alimentado por Energías Renovables*. Obtenido de Facultad de Ingenieria, Universidad Mar de Plata: http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/instrumentacion/trabajos/domine_niro_tesis.pdf

Domínguez, A., Jan Kleissl, & Jeffrey Luvall. (2015). Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. *Solar Energy*, 2244-2255.

ElectroRinux. (s.f.). *Energías Renovables, un paso al futuro*. Obtenido de ElectroRinux: <http://electrorinux.blogspot.com/p/introduccion.html>

ENEE. (20 de Octubre de 2018). *ENEE HN*. Obtenido de <http://www.enee.hn/planificacion/2018/boletines/Boletin%20Estadistico%20Octubre%202018.pdf>

Enerbasa. (s.f.). *Enerbasa*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <https://www.enerbasa.com/>

Energía Solar. (08 de junio de 2017). Recuperado el 11 de Febrero de 2019, de Baterías Solares: <https://solar-energia.net/definiciones/baterias.html>

Fernandez, J. (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de e-Archivo: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6037/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf

Fronius. (s.f.). *Playa del Carmen*. Recuperado el 02 de Febrero de 2019, de Fronius International: <https://www.fronius.com/en/photovoltaics/infocentre/references/mx-playa-del-carmen>

Fronius. (s.f.). *Reifnitz*. Recuperado el 21 de Febrero de 2019, de Fronius International: <https://www.fronius.com/en/photovoltaics/infocentre/references/at-reifnitz>

Gargallo, G. (2011). *Effect of ventilation in a photovoltaic roof*. Obtenido de HT Energy: http://www.ht.energy.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/2011/EFFECT_OF_VENTILATION_IN_A_PHOTOVOLTAIC_ROOF_Guillem.pdf

GrupoNAP. (s.f.). *Energía Solar Fotovoltaica*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de Amazon Web Service: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35314975/energia_solar_fotovoltaica_2e5c69a6.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1550871870&Signature=KTKOxWZF079rh9Vfk5WGUIvx2Wk%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DENERGIA_SO

- ICE, G. (2015). *Instituto Costarricense de Electricidad [CR]*. Obtenido de https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=I8SK4gG
- Insulation Handbook . (2014). *Part 1 Thermal Performance, total R-Value Calculation for typical Building Applications*.
- Kwan, Y., & Guan, L. (2015). Design a Zero Energy House in Brisbane, Australia. *ELSEVIER*, 604-611.
- LogTag Recorders*. (22 de Enero de 2019). Obtenido de <https://www.logtag-recorders.com/en/hardware/trix-8/>
- Lubis, I., & Koerniawan, M. (Noviembre de 2017). *Reducing heat gains and cooling loads through roof structure configurations of a house in Medan*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/321025884_REDUCING_HEAT_GAINS_AND_COOLING_LOADS_THROUGH_ROOF_STRUCTURE_CONFIGURATIONS_OF_A_HOUSE_IN_MEDAN
- Odeh, S. (2011). Thermal Performance of dwellings with rooftop PV panels and PV/thermal collectors. *Energies*, 1879.
- Peng, C., & Yang, J. (2016). "The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment. (A. Umar, Ed.) *Hindawi*.
- Pereira, M. (s.f.). *Energía solar fotovoltaica*. Obtenido de Construcción Sustentable: <http://www.construccion-sustentable.cl/wp-content/uploads/2015/03/Presentaci%C3%B3n-2-Energ%C3%ADa-Solar-Fotovoltaica.pdf>
- Ramgopal, M. (2019). *Cooling and heating loads calculations*. Obtenido de NPTEL: National Programme of Technology Enhance Learning: <https://nptel.ac.in/courses/112105129/pdf/R&AC%20Lecture%2035.pdf>
- Smets, A., Jager, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., & Zeman, M. (2016). *Solar Energy*. UIT CAMBRIDGE.
- Sol-R-Eclipse. (s.f.). *Specifications Sheet*. Obtenido de Sol-R-Eclipse: <https://iiproducts.com/sol-r-eclipse/>

Transferencia de Calor. (26 de febrero de 2017). Obtenido de Scribd:
<https://www.scribd.com/document/345917989/Transferencia-de-Calor>

Tribunal Superior de Cuentas. (s.f.). Recuperado el 29 de Enero de 2019, de LEY DE PROMOCIÓN A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES:
https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/Ref_art_2_ley_promocion_energia_electrica_2013.pdf

Yang, H., Z., Z., Burnett, J., & Lu, L. (2001). A simulation Study on the energy performance of photovoltaic roofs. *ASHRAE Transactions*, 129-135.

Zipp, K. (22 de Febrero de 2012). *Monocrystalline Modules 101*. Obtenido de Solar Power World:
<https://www.solarpowerworldonline.com/2012/02/monocrystalline-modules-101/>

