



*Ministerio de Educación,
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Mendoza
Especialización En Desarrollo Sustentable Del Hábitat Humano*

ANÁLISIS DE LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AL EDIFICIO DE LA UNIVERSIDAD

Alumno: Ing. Germán Rodolfo Henderson

Director: Dr. Ing. Alejandro Pablo Arena

Mendoza, 22 de agosto 2023.

Contenido

1. Introducción	3
2. Marco teórico	5
3. Metodología	7
3.1. Caso de estudio	7
3.2. Eficiencia del alero	9
3.3. Estudio térmico	11
3.4. Análisis de la generación de energía.....	11
4. Resultados	11
4.1. Eficiencia del alero	11
4.2. Estudio térmico	13
4.3. Análisis de la generación de energía.....	14
5. Conclusiones.....	15
Referencias.....	16

Tabla de figuras

Figura 1	Demanda de energía primaria más secundaria por sectores en Argentina.	3
Figura 2	Vista desde la terraza.	4
Figura 3	Vista desde el exterior de la facultad.	4
Figura 4	Flujo energético entre el Sol, la atmósfera y el suelo.	5
Figura 5	Planta de aulas afectadas por la sombra de los aleros fotovoltaicos.	7
Figura 6	Disco utilizado por los usuarios para conocer la inclinación de los módulos e información adicional.	8
Figura 7	Resultados de la medición de sombras con SunEye 210.	9
Figura 8	Vista en corte del alero fotovoltaico para los meses de julio y diciembre.	11
Figura 9	Mapa de calor para las temperaturas ambiente de la Ciudad de Mendoza.	11
Figura 10	Trayectorias solares con las zonas de estrés térmico y el área de sombreado.	12
Figura 11	Rendimientos alcanzados por los aleros para frío (<i>EPF</i>), calor (<i>EPC</i>) y rendimiento global (<i>EG</i>).	12
Figura 12	Vista 3D del modelo cargado a EnergyPlus.	13
Figura 13	Generación de energía para los diferentes meses del año.	14
Figura 14	Aportes energéticos generados a partir de las estrategias pasivas y activas.	14

Análisis de la integración de un sistema fotovoltaico al edificio de la Universidad

1. Introducción

Se ha podido observar en las últimas décadas un crecimiento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que ha provocado un aumento en la temperatura promedio anual en la Tierra, lo que es conocido como calentamiento global. Las fuentes emisoras de GEI son muchas, sin embargo, se puede observar una estrecha relación con el consumo de energía primaria [1].

Esta relación entre las emisiones y el consumo de energía tienen su causa en la forma en la que se genera la energía eléctrica (basada en una matriz fósil), en la forma en la que utilizamos el combustible fósil para el transporte y la globalización de productos, que requieren consumir energía eléctrica y en forma de calor para la producción en masa, entre otras [1].

En la figura 1 se puede ver una distribución del consumo total de energía primaria en la Argentina. El transporte es el responsable del consumo del 31% de la energía primaria demandada, seguida por el sector residencial con un 25% y la industria con un 24%. En menores escalas se tiene al sector agropecuario con un 7%, al comercial y público con un 8% y a los no energéticos con un 6% [2]. En general, gran parte de estos consumos son realizados en un hábitat construido, como edificios o viviendas.

Es impensable mantener los niveles de calidad de vida de la sociedad moderna sin prescindir del consumo de energía, motivo por el cual se busca constantemente la implementación de estrategias que logren una reducción en las emisiones de GEI. Entre estas se pueden mencionar a la eficiencia energética y la producción de energía a partir de fuentes renovables de bajas emisiones.

Con relación a la eficiencia energética en edificios, la utilización de estrategias pasivas de climatización permite disminuir el consumo de energía para mantener los ambientes en niveles adecuados de confort térmico [3], [4]. Este tipo de estrategias son implementadas desde que la humanidad tiene historia [5] y se encuentran presentes en los códigos de construcción de las diferentes ciudades. Sin embargo, estos códigos y estrategias deben ser adaptadas a los climas cambiantes de las diferentes regiones por causa del calentamiento global [6].

Por otra parte, luego de la invención y producción global del aire acondicionado y el acceso a grandes cantidades de energía a través de la electricidad se les ha prestado menor atención a estas estrategias que, sin el uso de energía auxiliar, mejoran el confort de los edificios.

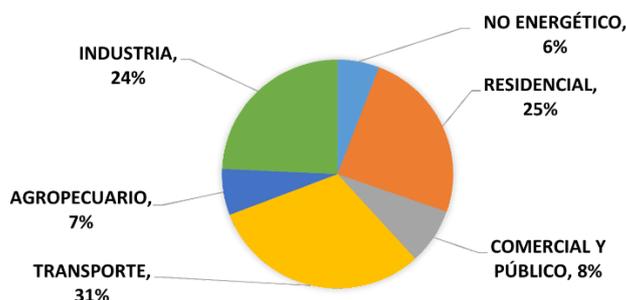


Figura 1. Demanda de energía primaria más secundaria por sectores en Argentina.

En la actualidad, el aumento del costo de la energía y la problemática ambiental del cambio climático han puesto de nuevo en un papel muy importante al uso de la energía solar como fuente principal de

energía. En edificios, no solo a través de las estrategias pasivas de climatización [7]–[11], sino que también a través de estrategias activas, como la generación distribuida de energía eléctrica con generadores fotovoltaicos [12]–[14] y el calentamiento de agua sanitaria con colectores solares [15]. De esta manera se integra la eficiencia energética y la generación de energía en edificios de una manera armónica y sinérgica.

Una integración con mayor profundidad de estas dos se da cuando la instalación fotovoltaica tiene un doble propósito, realizando aplicación o integración edilicias. La primera es más sencilla, ya que se utilizan los componentes estándares de grandes instalaciones solares. La segunda suele ser más costosa ya que se realizan modelos especiales fotovoltaicos con el objetivo de que reemplacen material de construcción [16]. Para profundizar en el concepto de estas definiciones y la necesidad de su uso en el hábitat construido se puede consultar [17].

La integración o aplicación de fotovoltaico a edificios en India ha comenzado a crecer en el año 2015 por políticas de uso de energías renovables, encontrando hoy numerosas instalaciones que generan energía eléctrica limpia [18]. En todos los países han comenzado a existir estas tecnologías. Sin embargo, no siempre se hace de la manera correcta. En Noruega, por ejemplo, se han detectado rendimientos promedios bajos de las instalaciones fotovoltaicas aplicadas o integradas a edificios por la mala planificación de las instalaciones y no prever las sombras de objetos circundantes [19].

Desde una perspectiva local, la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza (UTN-FRM) posee una instalación fotovoltaica integrada a su edificio como se puede ver en las figuras 2 y 3, la cual es una de las primeras instalaciones fotovoltaicas integradas de la provincia. Esta se presenta con los módulos fotovoltaicos dispuestos como aleros en las ventanas de aulas. La estrategia aquí fue reducir la carga térmica de las aulas en la época de verano y transformar esa energía radiante que se bloqueó en energía eléctrica a través de los módulos fotovoltaicos [20].

Estos tipos de instalaciones representan retos mayores para su análisis. No solo se debe evaluar la generación de energía eléctrica como en una instalación fotovoltaica estándar, sino que deben ser consideradas las consecuencias de su integración, relacionadas con el reemplazo de material y el efecto térmico que la instalación produce.

1.1. Objetivos

La evaluación de la integración de la instalación fotovoltaica realizada en la UTN-FRM merece una atención particular, debido a que es necesario evaluar los efectos de generación de energía y los de la generación de sombras para la reducción de la carga térmica en las aulas. Es por ello por lo que en este trabajo se propuso como objetivo general determinar la efectividad de la integración edilicia del sistema fotovoltaico de la UTN-FRM.

Para alcanzar este objetivo, se definieron otros específicos que permitirán evaluar con mayor profundidad cada una de las aristas intervinientes. Por un lado, un objetivo específico es la evaluación del alero como tal, un dispositivo que busca bloquear la radiación solar en épocas de calor, pero que permite su paso en épocas de frío. El rendimiento de este dispositivo está asociado de esta manera a las temperaturas que se finalmente se alcanzan en el interior del edificio. Es por ello por lo que otro objetivo específico es la evaluación térmica de las aulas afectadas por los aleros fotovoltaicos.

Por otro lado, analizar la generación de energía eléctrica es un objetivo fundamental para este poder determinar la efectividad global del sistema. Para este último objetivo, se cuenta con la información de generación de energía real del sistema provista por el Grupo Cliope – Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable de la UTN-FRM.



Figura 2. Vista desde la terraza.



Figura 3. Vista desde el exterior de la Facultad.

Además, se propuso verificar en este trabajo la precisión de una simulación de la instalación fotovoltaica, con el objeto de conocer con que fidelidad se puede estudiar la factibilidad de un proyecto a partir de estas herramientas.

El trabajo es organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 parte se presenta un breve marco teórico, que permite comprender los conceptos básicos que se necesitan para entender el desarrollo del trabajo. Luego, en el capítulo 3 se desarrolla la metodología, donde se explica en detalle el caso de estudio con el que se trabajó y se desarrollan los métodos para el estudio de la eficiencia del alero, para el estudio térmico del edificio y para el cálculo de la efectividad de la simulación de la generación de energía eléctrica. Finalmente, aquí también se presenta cómo se evaluó la efectividad de la integración. El capítulo 4 presenta los resultados principales obtenidos y se abre camino al capítulo 6, en el cual se realizó un análisis crítico de estos.

2. Marco teórico

El sol es una esfera de materia gaseosa caliente, con una temperatura de 5 777 K, que se encuentra en una fusión continua e irradia energía hacia el espacio de manera relativamente constante. Esta energía es alcanzada por la Tierra en el exterior de la atmósfera e ingresa a través de esta hasta llegar a la superficie [21].

La energía que llega a la superficie exterior de la atmósfera se la conoce como radiación extraterrestre, y esta toma un valor conocido como la constante solar de 1367 W/m^2 . Esta es modificada por las condiciones atmosféricas al ingresar a la tierra y es donde se producen los efectos de absorción y dispersión de la radiación [21]. Los valores habituales de cada uno de estos efectos se pueden visualizar en la figura 4, incluyendo también la reflexión de la radiación producida por los objetos ubicados en la superficie terrestre, disponiendo de solo un 27% del total en forma de radiación directa, un 18% como radiación difusa y un 5% como reflejada. Esta última puede variar según el albedo del sitio y en general todas varían según las condiciones climáticas de la región observada.

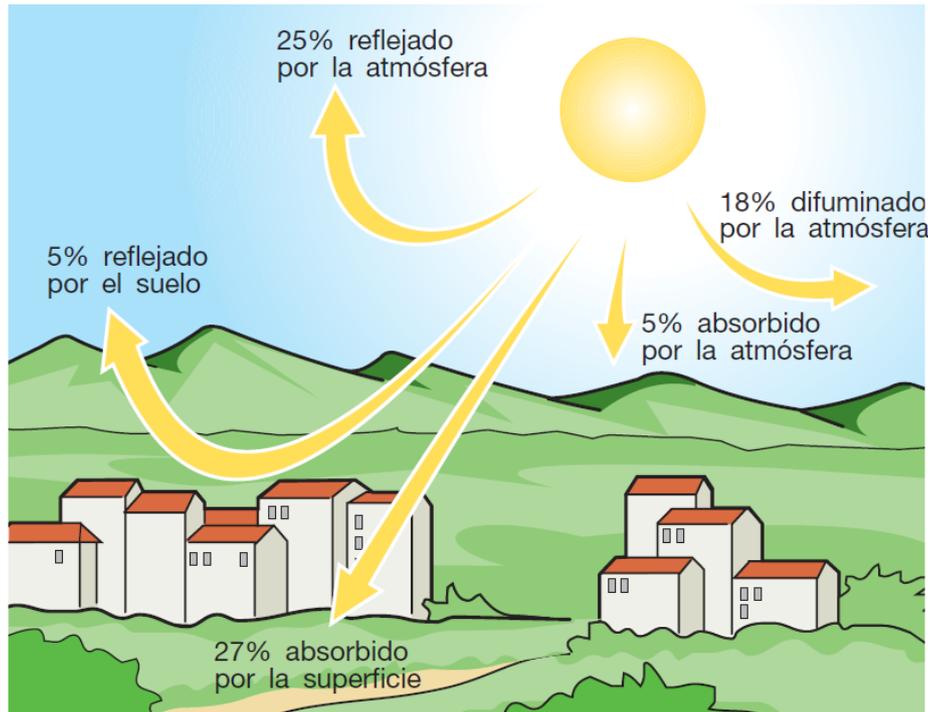


Figura 4. Flujo energético entre el Sol, la atmósfera y el suelo [22].

De esta manera, la radiación solar total o global que llega a un elemento en la superficie de la Tierra se puede escribir de una manera sencilla como la suma de todas estas componentes, tal como se muestra en la ecuación (1) [21].

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Aquí I es la radiación total que llega a un plano horizontal, I_T es la radiación total que llega a un plano inclinado un ángulo β , I_b la directa, I_d la difusa y ρ_g es el albedo del terreno. Además, R_b se puede definir como se indica en la ecuación (2).

$$R_b = \frac{\text{Radiación total en la superficie inclinada}}{\text{Radiación total en el plano horizontal}} \quad (2)$$

La ecuación (1) nos indica de esta manera cómo afectan los diferentes componentes al efecto invernadero dentro de edificios provocado por la radiación solar. Se puede observar que, dependiendo de la inclinación de la superficie, para un ángulo habitual de las ventanas a 90° los valores de la radiación difusa y reflejada toman valores de 0,5, y esta última multiplicada además por un factor de albedo, que en general toma valores cercanos a 0,3. Por este motivo, la radiación solar directa es la que mayor influencia tiene en el calor dentro de edificios.

Un balance térmico para un sistema abierto en estado estacionario puede escribirse como la sumatoria de todas las energías que ingresan y salen de este e igualándolas a cero, por el principio de conservación de la energía. De esta manera, se puede escribir la ecuación (3), en donde se ha tenido en cuenta la ganancia solar Q_s , la ganancia interna Q_i , las ganancias (o pérdidas) por conducción Q_c , las ganancias (o pérdidas) por ventilación Q_v , las ganancias (o pérdidas) por infiltraciones Q_{inf} , las ganancias (o pérdidas) por sistemas mecánicos Q_m y las pérdidas por enfriamiento evaporativo Q_e .

$$\Delta E|_{sis} = 0 = Q_s + Q_i \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_{inf} \pm Q_m - Q_e \quad (3)$$

Aquí se puede observar como el aporte de calor por la radiación solar es considerado y, dependiendo de cada caso, su aporte puede ser o no significativo en el resultado final del balance térmico del edificio.

Por otro lado, también se puede hablar de la energía solar para la generación fotovoltaica, en donde la de mayor influencia es la componente directa, al igual que para los balances térmicos. Por este motivo es que en general se quiere que los módulos apunten de manera perpendicular a la dirección del sol, para poder maximizar la producción de energía eléctrica. Los módulos fotovoltaicos son capaces de transformar la energía solar en energía eléctrica con rendimientos actuales superiores al 15,6% [23].

Sin embargo, tanto para la producción de energía eléctrica como para el cálculo del balance térmico en edificios, es necesario poder contemplar las sombras que generan objetos cercados sobre las superficies del edificio y de los módulos fotovoltaicos. Para su evaluación se debe realizar un estudio de las geometrías de los objetos y la trayectoria solar del sol durante el año, pudiendo evaluar a través de una carta solar y una máscara de sombras las sombras existentes [21].

3. Metodología

La metodología utilizada en el trabajo se puede dividir en 4 partes más una adicional en donde se presenta el caso de estudio. De esta manera tenemos este capítulo organizado de la siguiente manera. Primero se presenta una descripción del caso de estudio sobre el cual se ha trabajado. En la segunda parte de la metodología se introduce el método utilizado para el cálculo del rendimiento de los aleros como elementos pasivos. Luego, en la tercera parte se introduce la metodología para cuantificar los beneficios térmicos de los aleros y su transformación a unidades de energía eléctrica necesaria para la climatización. Finalmente, en la cuarta parte se indica el método utilizado para la cuantificación de la energía eléctrica aportada por los módulos fotovoltaicos.

3.1. Caso de estudio

La Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza posee una instalación fotovoltaica integrada al edificio. La integración fue realizada al reemplazar el uso de aleros convencionales por estos, que son capaces de captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica [20].

Los aleros fotovoltaicos son seis, en donde cada uno de ellos está compuesto por dos módulos fotovoltaicos SolarWorld modelo SW-240-poly, que poseen una potencia de 240 W nominales y un rendimiento del 14,61%. Los 12 módulos así distribuidos se conectan eléctricamente en serie a un inversor AEG-PV2800 de 2,8 kW de potencia, aportando energía al sistema eléctrico de la universidad. Los aleros se encuentran en las ventanas de la fachada norte del edificio, correspondientes a aulas de la universidad, con el objetivo de, además, proyectar sombras en 6 aberturas de 5 aulas, con el objeto de disminuir la carga térmica ocasionada por la incidencia solar en épocas de elevadas temperaturas. En la figura 5 se puede visualizar un plano de planta del edificio de la universidad, en donde se pueden observar los aleros fotovoltaicos.

Por otra parte, estos tienen la capacidad de realizar un seguimiento estacional del sol, al modificar el ángulo de inclinación de manera manual a través de un sistema mecánico, para lo cual se los ha provisto de un disco que permite al usuario saber la inclinación de los módulos. Una imagen del disco se puede ver en la figura 6.

Adicionalmente, se han colocado en cada curso placas indicando la inclinación que se le debe dar a los aleros cada mes para optimizar la producción de energía eléctrica. Estos valores son los que aquí se indican en la tabla 1.

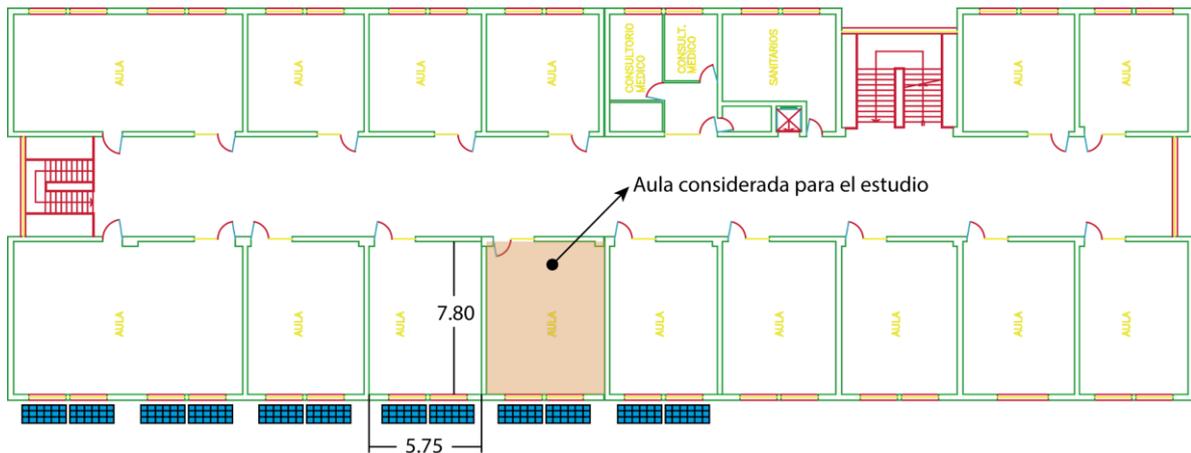


Figura 5. Planta de aulas afectadas por la sombra de los aleros fotovoltaicos.

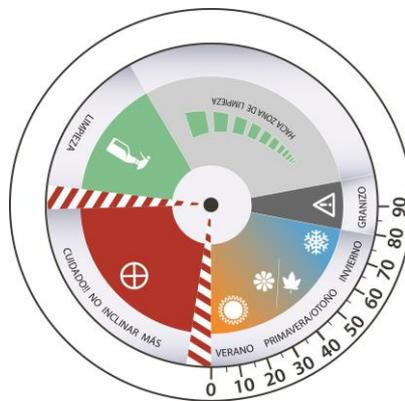


Figura 6. Disco utilizado por los usuarios para conocer la inclinación de los módulos e información adicional.

Tabla 1. Inclinación de los paneles (β) para cada mes.

Mes	Inclinación
Enero	10
Febrero	15
Marzo	25
Abril	35
Mayo	50
Junio	55
Julio	55
Agosto	50
Septiembre	40
Octubre	30
Noviembre	20
Diciembre	10

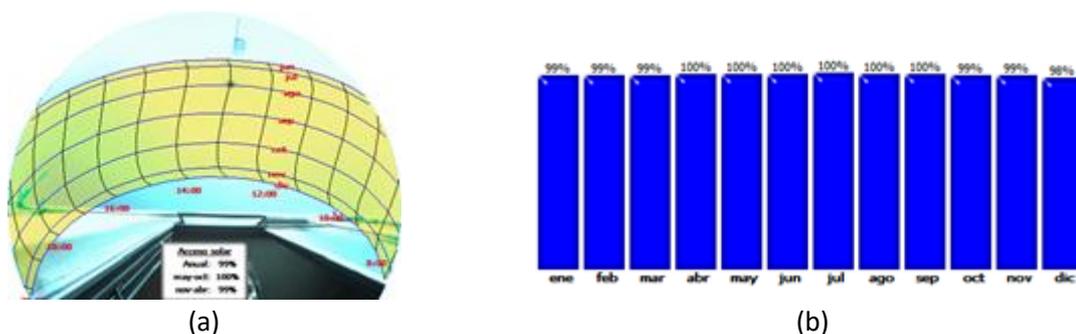


Figura 7. Resultados de la medición de sombras con SunEye 210.

Además de los elementos propios del edificio, es importante considerar los efectos de los elementos circundantes en la proyección de sombras sobre los elementos a modelar. Para ello se utilizó SunEye 210 de Solarmetric, un instrumento que proyecta las trayectorias solares y las superpone a una imagen de gran angular. Esto permite reconocer los bloqueos de la radiación directa en el punto de estudio. Los resultados se pueden visualizar en las figuras 7 (a) y (b), en donde se puede observar una obstrucción del sol mínima.

El acceso al sol en promedio es del 99,42% para todo el año, contando con su peor acceso al sol en diciembre, donde se baja a un valor del 98%. Claramente estos valores son muy elevados y se puede considerar como una simplificación del caso de estudio que no hay sombras en el sitio considerado.

Para todos los cálculos se utilizó la base de datos meteorológica provista por el Grupo Cliope – Energía, Ambiente y Desarrollo Sustentable. Esta fue obtenida por el programa Meteororm versión 7.3 de Meteotest, que incluye los datos necesarios de radiación, temperatura y velocidad de viento para realizar los cálculos en el trabajo.

3.2. Eficiencia del alero

Para el análisis de la eficiencia del alero se utiliza una gráfica de trayectoria solar del sitio de emplazamiento de la instalación y se le superpone una máscara de sombras, tal como se sugiere en [21]. Sin embargo, este método es sugerido para aleros fijos, donde el ángulo de obstrucción generado es constante. En nuestro caso tenemos aleros que cambia su inclinación, por lo que el ángulo de obstrucción cambiará cada vez que esta cambie, lo cual sucede periódicamente cada un mes.

Haciendo un análisis en profundidad de lo que sucede con el alero al cambiar de inclinación, se puede demostrar que la rotación del alero para un seguimiento estacional no introduce grandes cambios en la proyección de sombras dentro del aula. Esto se puede visualizar en la figura 8, donde se ve que la disposición del alero genera una obstrucción que prácticamente se mantiene constante para las inclinaciones utilizadas en un régimen de operación normal. Para poder evaluar esto debemos trazar una recta desde el punto inferior de la ventana (el punto más alejado de las obstrucciones) y el extremo más alejado del alero desde la pared. Por otra parte, se trazan también la radiación solar para cada mes. Para considerar la dirección se toma el mediodía solar del día tipo del mes.

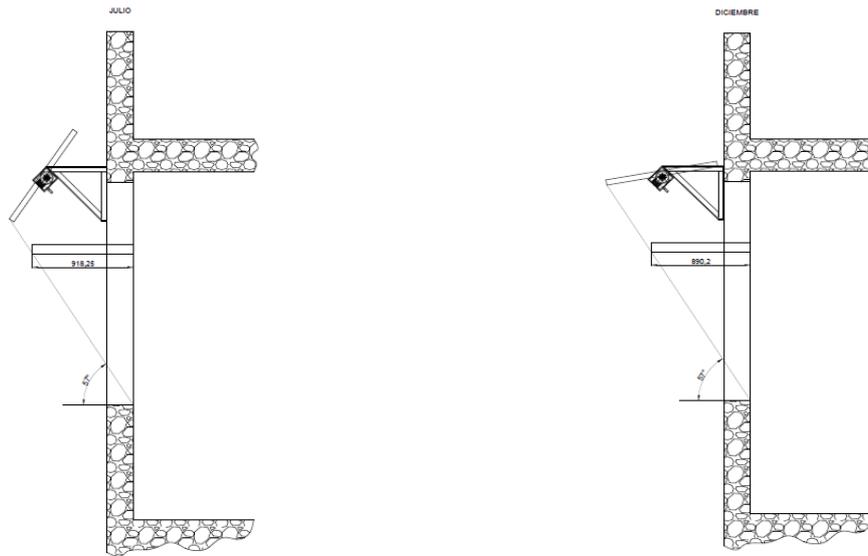


Figura 8. Vista en corte del alero fotovoltaico para los meses de julio y diciembre.

Adicionalmente se establecen en la misma gráfica zonas de estrés térmico que permitirán saber si el alero cumple la función de bloquear la radiación solar directa cuando hay estrés térmico por calor y permitirle ingresar al edificio cuando hay estrés térmico por frío.

A partir de esto, resulta necesario conocer en qué momentos del año se considera que hay estrés térmico en la provincia de Mendoza. Para ello se utiliza el método propuesto por Auliciems y Szokolay (2007) [24], que calcula la temperatura neutra T_n mediante la ecuación (4), que utiliza la temperatura media T_m .

$$T_n = 17.6 + 0.31 \times T_m \quad (4)$$

A partir de establecer la temperatura neutra, se puede establecer una zona de confort como un entorno de la temperatura neutra, que viene dado por la ecuación (5).

$$T_n - 2.5 \text{ a } T_n + 2.5 \quad (5)$$

Los periodos de calor requieren el bloqueo de la radiación directa, mientras que en los períodos de frío se busca que la radiación directa penetre en los ambientes, es decir que los aleros no bloqueen la radiación directa en las ventanas.

Las eficiencias del alero, distinguidas como Eficiencia del Período de Calor EPC , la Eficiencia del Período de Frío EPF y la Eficiencia Global EG , se calculan a partir de las ecuaciones (6) a (8). En ellas, los factores T_f y T_c se refieren a la cantidad de horas en que se produce estrés térmico, de frío o de calor respectivamente; K representa la cantidad de horas en que existe estrés de calor y es bloqueado por el alero y L la cantidad de horas que el alero no bloquea las zonas de estrés de frío.

$$EPC = 1 - \left(\frac{K}{T_c}\right) \quad (6)$$

$$EPF = \frac{L}{T_f} \quad (7)$$

$$EG = \left(\frac{T_f}{T_f + T_c}\right) \times EPF + \left(\frac{T_c}{T_f + T_c}\right) \times EPC \quad (8)$$

3.3. Estudio térmico

Para la cuantificación de los beneficios térmicos de los aleros se realiza una simulación en EnergyPlus versión 9.6 del aula indicada en la figura 5. Con el modelo se realiza una simulación sin los aleros y se evalúa el uso de energía necesaria para mantener el confort térmico dentro del aula y, luego, se realiza la misma simulación con los aleros incluidos y se comparan los resultados obtenidos. De esta manera se pueden conocer los beneficios energéticos (térmicos) del uso de los aleros.

Para poder transformar estos requerimientos térmicos en requerimientos de energía eléctrica, ya que se considerará que los espacios son climatizados por este tipo de energía, es necesario tener en cuenta los rendimientos de los equipos termodinámicos que se utilizarán. Esto se realiza a partir de las ecuaciones (9) y (10), que indican los coeficientes de desempeño para extraer o suministrar el calor necesario al ambiente a partir de un dispositivo mecánico que opera en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, respectivamente [25].

$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}} \quad (9)$$

$$COP_{HP} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}} = 1 + COP_R \quad (10)$$

A partir de la simulación en EnergyPlus se pueden conocer los valores de Q_L y Q_H , mientras que los COP pueden ser obtenidos de las fichas técnicas de esta clase de equipos. En este trabajo se consideró un $COP_{HP} = 3$ por ser un valor habitual y conservador para la operación de bombas de calor que utilizan como fuente caliente el aire frío exterior [25]. De esta manera, se determina para el equipo de refrigeración un $COP_R = 2$.

3.4. Análisis de la generación de energía

La instalación fotovoltaica cuenta con un inversor AEG-PV2800, el cual posee un medidor de energía inyectada a la red. Estas mediciones se encuentran disponibles y serán utilizadas para el trabajo. Se poseen mediciones desde octubre del 2015 hasta octubre del 2021, las cuales serán promediadas para evaluar los ahorros energéticos en el ciclo de vida de la instalación.

Además, se realiza un modelo en el programa System Advisor Model (SAM) del Laboratorio de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) para verificar la precisión de la simulación y comprobar si se pueden utilizar los modelos simulados para realizar predicciones en otros proyectos futuros.

4. Resultados

4.1. Eficiencia del alero

Siguiendo la metodología planteada, se define la temperatura neutra para la Ciudad de Mendoza como $T_n = 23,24 \text{ }^\circ\text{C}$ y así el rango de confort a las temperaturas comprendidas entre los $20,74 \text{ }^\circ\text{C}$ y los $25,74 \text{ }^\circ\text{C}$. Con estos valores y analizando la temperatura a lo largo del año, la que se puede visualizar en la figura 9, donde se han representado en escala de color las temperaturas del sitio, se pueden obtener las horas totales de estrés por frío y por calor. Estas resultan en $T_f = 5344 \text{ h}$ y $T_c = 1708 \text{ h}$ para las horas de frío y calor respectivamente.

Realizando una máscara de sombras para un alero que se encuentra a $56,5^\circ$ y superponiendo las zonas de estrés por frío y por calor en una carta solar, se puede observar el efecto del alero en las aberturas, tal como se lo indica en la figura 10. El ángulo considerado para la proyección de sombras del alero es resultado de promediar la proyección para cada inclinación adoptada por el alero fotovoltaico durante el año.

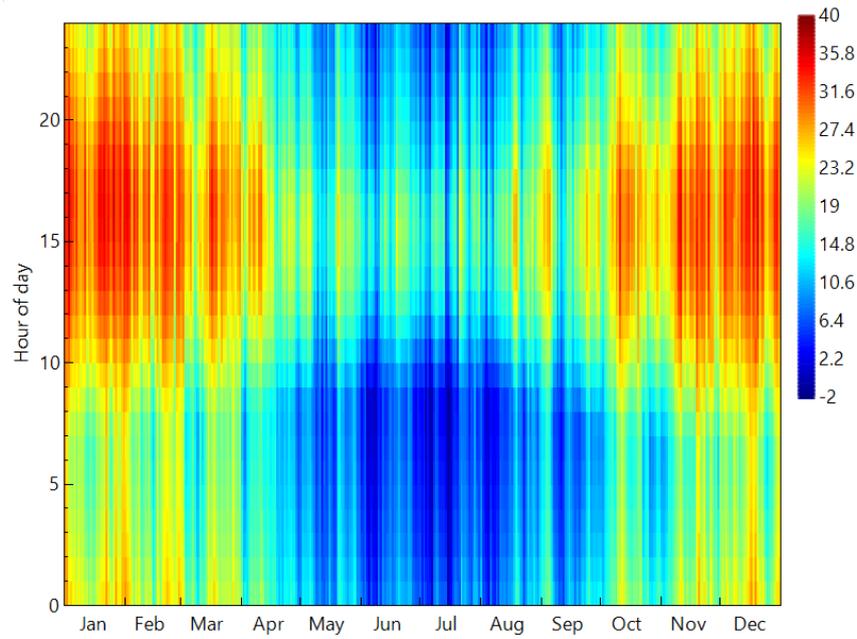


Figura 9. Mapa de calor para las temperaturas ambiente de la Ciudad de Mendoza.

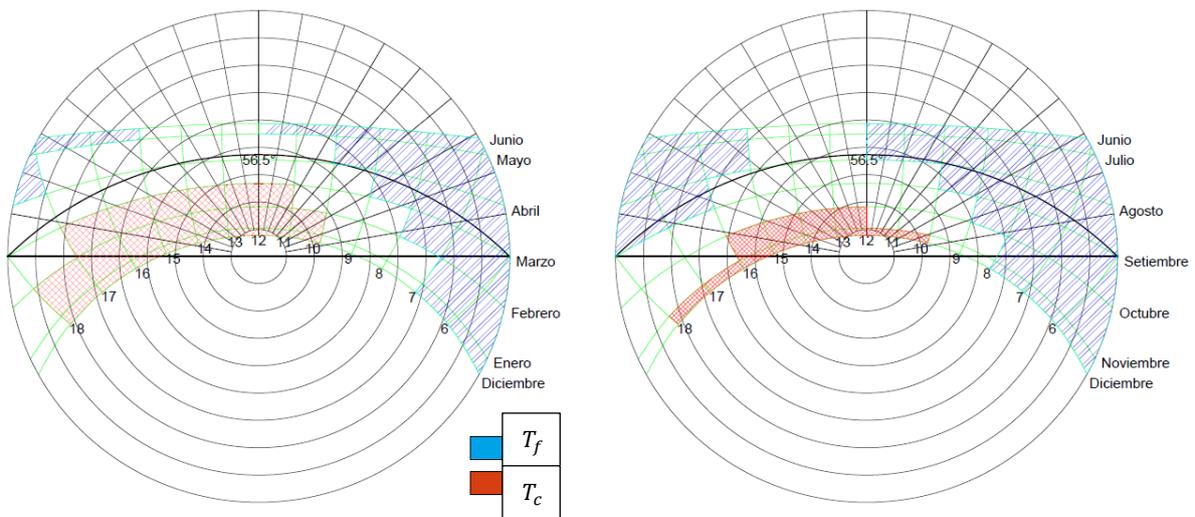


Figura 10. Trayectorias solares con las zonas de estrés térmico y el área de sombreado.

A simple vista, se puede observar como la sombra proyectada por los aleros funciona bien para reducir la carga térmica en las aulas. Sin embargo, también se observa como en gran parte del año se encuentra bloqueando al sol en momentos donde es requerido el ingreso de radiación. La cantidad de horas que el alero bloquea al sol cuando hay estrés térmico por frio es $L = 1042$, mientras que la cantidad de horas que hay estrés térmico por calor y el alero no bloquea al sol es $K = 0$. De esta manera, los rendimientos obtenidos son: $EPC = 100\%$, $EPF = 19\%$ y $EG = 39\%$.

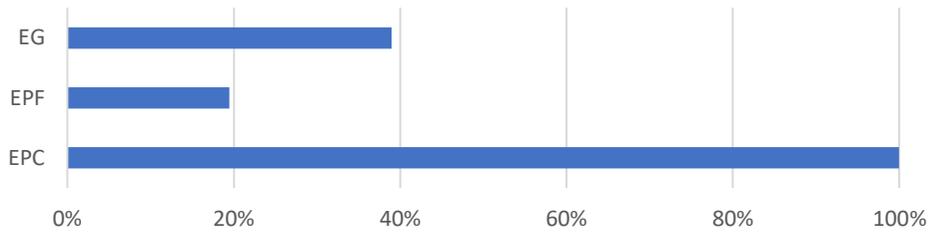


Figura 11. Rendimientos alcanzados por los aleros para frio (*EPF*), calor (*EPC*) y rendimiento global (*EG*).

4.2. Estudio térmico

Para el estudio térmico se realizó un modelo en EnergyPlus versión 9.6. La geometría fue realizada con el programa SketckUp y exportada a través del Plugin de OpenStudio para este programa. Una imagen del modelo se puede observar en la figura 12, en donde se puede apreciar el aula con sus aberturas en el muro norte y el alero (en este caso con ángulo de inclinación nulo y con una dimensión equivalente al comportamiento promedio del mismo para las diferentes inclinaciones).

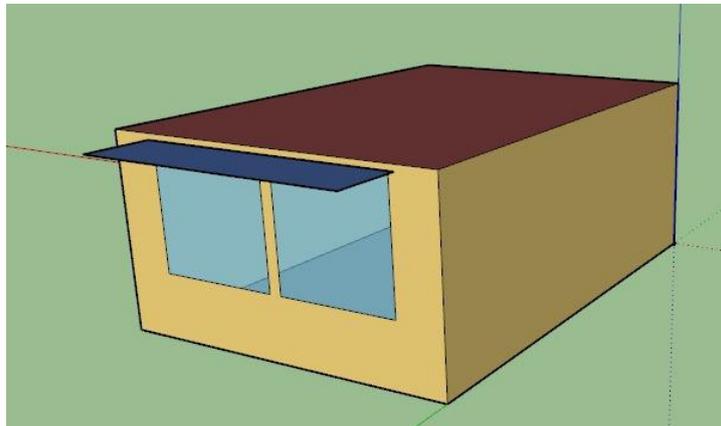


Figura 12. Vista 3D del modelo cargado a EnergyPlus.

Los resultados obtenidos para el aula singular considerada en la simulación se pueden ver en la tabla 2. Allí se puede observar que para el caso de la simulación sin alero fueron que se necesitan 2 223 kWh anuales para refrigeración y 6 747 kWh anuales para calefacción para mantener al aula en una situación de confort.

Tabla 2. Requerimientos de energía térmica para la climatización de un aula en los casos con y sin alero y los ahorros alcanzados por la estrategia.

	Simulación con alero	Simulación sin alero	Ahorros alcanzados
Energía necesaria para calefacción [kWh](Año)	7909	6747	-1162
Energía necesaria para refrigeración [kWh](Año)	1482	2223	741
Energía total para climatización [kWh](Año)	9391	8970	-421

Tabla 3. Requerimientos de energía térmica para la climatización de las 5 aulas afectadas por los aleros, en los casos con y sin alero y los ahorros alcanzados por la estrategia.

	Simulación con alero	Simulación sin alero	Ahorros alcanzados
Energía necesaria para calefacción [kWh](Año)	47455	40480	-6975
Energía necesaria para refrigeración [kWh](Año)	8891	13338	4447
Energía total para climatización [kWh](Año)	56345	53818	-2528

Por otra parte, para el caso con alero los resultados fueron de 1 482 kWh y 7 909 kWh para refrigeración y calefacción anual, respectivamente.

Como se puede observar, los resultados coinciden con los obtenidos en el apartado anterior, donde se puede observar un aumento en la necesidad de energía para calefaccionar y una disminución en el requerimiento energético para la refrigeración de las aulas.

Los resultados obtenidos a través de la simulación del aula en EnergyPlus corresponden a los valores energéticos que habría que adicionar o sustraer para lograr una temperatura de confort, pero no los que realmente consumiría un equipo mecánico en forma de electricidad. Es por ello por lo que es necesario establecer una equivalencia a la demanda de energía eléctrica que se necesitaría realmente. Además, de esta manera se podrán sumar los resultados energéticos del análisis térmico y de la generación fotovoltaica, la cual es determinada en el siguiente apartado.

Tal como se indicó en la metodología, y considerando valores de $COP_R = 2$ y $COP_{HP} = 3$, obteniendo los resultados indicados en la tabla 4, en donde se puede apreciar el aporte del sistema fotovoltaico, el requerimiento de electricidad para calefacción y el requerimiento de electricidad para refrigeración.

Tabla 4. Resultados obtenidos de energía eléctrica necesaria para climatización.

	Con sombra	Sin sombra	Ahorros
Energía necesaria para calefacción [kWh](Año)	15 818	13 493	-2 325
Energía necesaria para refrigeración [kWh](Año)	4 445	6 669	2 223
Energía total para climatización [kWh](Año)	20 264	20 162	-101

Se puede observar que la conversión a energía eléctrica requerida mejora los resultados obtenidos, esto es por la mejor eficiencia del sistema de bomba de calor en comparación con la eficiencia del aire acondicionado cuando funcionan en el mismo ciclo y con las mismas fuentes de temperatura.

4.3. Análisis de la generación de energía

La generación de energía de la instalación fotovoltaica varía año a año, lo cual es propio de este tipo de sistemas que dependen de las condiciones climáticas estocásticas como lo es la radiación solar, temperatura y viento. Las mediciones de energía muestran una desviación estándar promedio de 40 kWh para cada mes y una desviación estándar para la generación anual de energía de 191,5 kWh.

El modelo realizado en SAM presenta un comportamiento que se acerca al promedio de los 6 años de mediciones, con un error en la generación de energía anual del 4% y errores mensuales que se

encuentran en el rango de -24% al 18%. Estos resultados pueden apreciarse en la figura 13, donde se pueden visualizar los datos medidos y los simulados. De esta manera, la generación de energía anual asciende en promedio a 4610 kWh.

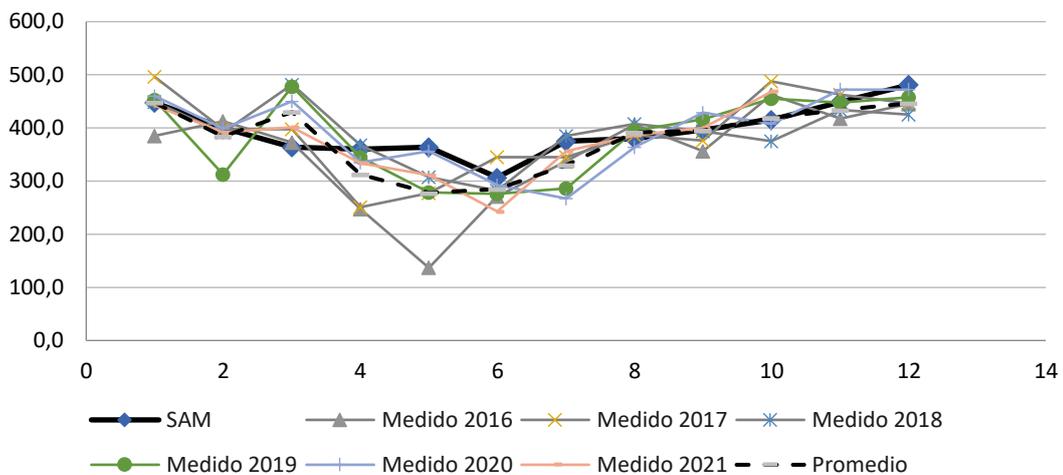


Figura 13. Generación de energía para los diferentes meses del año.

Los resultados finales de requerimientos de energía, generación y energía neta de la instalación ya integrada se pueden ver en la figura 14, donde se puede apreciar la gran incidencia de la generación fotovoltaica.



Figura 14. Aportes energéticos generados a partir de las estrategias pasivas y activas.

5. Conclusiones

En el trabajo se realizaron los estudios de rendimiento de los aleros fotovoltaicos integrados al edificio de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza y se cuantificaron de manera aproximada a través de un modelo del edificio en EnergyPlus las necesidades térmicas de climatización antes y después de la aplicación de la estrategia pasiva. Se ha podido observar que hay una relación estrecha entre los resultados encontrados, lo cual era esperado, siendo el primer método más sencillo y con una interpretación más holística de lo que sucede a partir de colocar un alero en una ventana. El segundo método es más complejo de utilizar, pero da resultados numéricos más precisos.

Se encontró que las condiciones no mejoran luego de la aplicación de los aleros, ya que, si bien se logra una reducción de la carga térmica en la época de calor, las sombras generadas en la época de frío tienen una incidencia mayor. Por este motivo, los beneficios netos, desde el punto de vista térmico de la instalación, son negativos. Sin embargo, es necesario realizar mediciones que contemplen el uso y la ocupación de estas aulas para poder visualizar los beneficios reales de la integración.

Con respecto a la generación de energía fotovoltaica, se pudo observar un comportamiento de la simulación con SAM con una desviación del 4% anual en comparación a los datos medidos. Las

diferencias encontradas se pueden asignar a las variabilidades normales del clima, a los desajustes en la operación de regular el ángulo de los paneles mes a mes, a la limpieza de la superficie de los módulos y a otros. Sin embargo, se concluye en que utilizar un modelo para el estudio de proyectos es factible, ya que los errores encontrados son realmente bajos.

La generación de energía fotovoltaica encontrada se puede suponer igual a la que se hubiese generado con una instalación convencional en el techo de la universidad con un sistema de seguimiento estacional que logre la regulación del ángulo de incidencia mes a mes. Por este motivo, no se presentan diferencias en la generación de energía en este trabajo.

Finalmente, podemos concluir que la instalación como aleros fotovoltaicos en la UTN-FRM no aporta grandes beneficios de integración desde el punto de vista energético. Desde el punto de vista social, es un gran aporte a las primeras contribuciones en la provincia de una integración de tecnología fotovoltaica a un edificio, a la cercanía para la comunidad de la universidad a instalaciones de este tipo y a la comunidad científica, ya que permite avanzar en estudios en esta línea de investigación.

Referencias

- [1] D. Dodman, “Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories,” *Environment and Urbanization*, vol. 21, no. 1, pp. 185–201, 2009, doi: 10.1177/0956247809103016.
- [2] Secretaría de Energía, “Balance Energético Nacional de la República Argentina, año 2019.,” <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>, 2020.
- [3] R. Yao, V. Costanzo, X. Li, Q. Zhang, and B. Li, “The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region,” *Journal of Building Engineering*, vol. 15, pp. 298–310, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.11.012.
- [4] G. Elshafei, S. Vilcekova, M. Zelenakova, and A. M. Negm, “Towards an adaptation of efficient passive design for thermal comfort buildings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/su13179570.
- [5] S. M. Mofidi, “Passive architectural cooling principles for arid climates,” in *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*, Sep. 2007, pp. 674–677.
- [6] M. Zune, L. Rodrigues, and M. Gillott, “Vernacular passive design in Myanmar housing for thermal comfort,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101992.
- [7] M. K. Singh, S. Mahapatra, and S. K. Atreya, “Solar passive features in vernacular architecture of North-East India,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2011–2022, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.05.009.
- [8] A. N. Tombazis and S. A. Preuss, “Design of passive solar buildings in urban areas,” *Solar Energy*, vol. 70, no. 3, pp. 311–318, 2001.
- [9] J. Morrissey, T. Moore, and R. E. Horne, “Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 568–577, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.08.013.

- [10] P. Littlefair, “Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2, pp. 303–326, 1998.
- [11] R. v. Ralegaonkar and R. Gupta, “Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8. pp. 2238–2242, Oct. 2010. doi: 10.1016/j.rser.2010.04.016.
- [12] J. L. Silveira, C. E. Tuna, and W. D. Q. Lamas, “The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20. Elsevier Ltd, pp. 133–141, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.054.
- [13] P. K. S. Rathore, D. S. Chauhan, and R. P. Singh, “Decentralized solar rooftop photovoltaic in India: On the path of sustainable energy security,” *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 297–307, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.049.
- [14] M. S. Adaramola, S. S. Paul, and O. M. Oyewola, “Assessment of decentralized hybrid PV solar-diesel power system for applications in Northern part of Nigeria,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 19, no. 1, pp. 72–82, 2014, doi: 10.1016/j.esd.2013.12.007.
- [15] J. Shi *et al.*, “Solar water heating system integrated design in high-rise apartment in China,” *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 19–26, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.10.018.
- [16] Í. P. dos Santos and R. Rüther, “The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil,” *Energy and Buildings*, vol. 50, pp. 290–297, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.052.
- [17] A. Ghosh, “Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building’s skin: A comprehensive review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 276. Elsevier Ltd, Dec. 10, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123343.
- [18] P. Reddy, M. V. N. Surendra Gupta, S. Nundy, A. Karthick, and A. Ghosh, “Status of BIPV and BAPV system for less energy-hungry building in India-a review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 7. MDPI AG, Apr. 01, 2020. doi: 10.3390/app10072337.
- [19] A. G. Imenes, “Performance of BIPV and BAPV installations in Norway,” in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Nov. 2016, vol. 2016-November, pp. 3147–3152. doi: 10.1109/PVSC.2016.7750246.
- [20] A. P. Arena, M. N. Funes, and G. R. Henderson, “Análisis energético de aleros fotovoltaicos instalados en el edificio de la UTN Facultad Regional Mendoza,” Sep. 2015.
- [21] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [22] Asea Brown Boveri S.A., *Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 10. Plantas fotovoltaicas*. Barcelona, 2011.
- [23] A. Zdyb and S. Gulkowski, “Performance assessment of four different photovoltaic technologies in Poland,” *Energies*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13010196.
- [24] A. Auliciems and S. v. Szokolay, *Thermal Comfort*, 2nd ed. Brisbane: PLEA Notes, 2007.
- [25] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, 7th ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2012.