

Analysis of the energy production of photovoltaic facades integrated in BIPV buildings.

Kevin Vera¹, Julia Salvatierra¹, and Juan Lata-García² and Nino Vega²

^{1,3}Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, kverad@est.ups.edu.ec, asalvatierram1@est.ups.edu.ec, jlatag@ups.edu.ec, nvega@ups.edu.ec

Abstract—In developing countries, there has been an increase in the use of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in recent years. This technology is relatively new in Latin America as opposed to other countries in Europe and has not had a major impact on the building generation market, its architectural flexibility, which allows the use of different types of colored solar cells, makes it attractive for improving the aesthetics of buildings and providing demand savings. Using photovoltaic systems integrated into the building envelope instead of traditional materials can contribute to on-site energy production. Therefore, the objective of this work is to evaluate the energy production of different types of semi-transparent solar panels. For this purpose, the PVSite Photovoltaic Performance Analysis Program, a simulation tool for photovoltaic system integration, was used. The results show that in general, the last months of the year have a lower production, while the maximum production is achieved in March with a semi-crystalline panel from the manufacturer Onyx X6 producing 673.85 kWh.

Keywords-- Building, BIPV, photovoltaic, facade, radiation, production.

I. INTRODUCCIÓN

La energía fotovoltaica integrada en edificios (BIPV) es una forma eficiente de producir energía renovable en el sitio mientras cumple con los requisitos del edificio y proporciona una o más funciones en la pantalla climática del edificio. Estos sistemas de energía renovables incluyen muchas soluciones dependiendo cual sea su aplicación, en las últimas décadas se ha observado el desarrollo e implementación de los BIPV (Boulding Integrated Photovoltaics) transparentes en edificios cristalinos, una de las características de esta tecnología es que desarrolla la luz natural y la convierte en iluminación [1].

Los sistemas fotovoltaicos son actualmente una de las carreras tecnológicas de mayor desarrollo dinámico. Al observar los datos anuales sobre las nuevas instalaciones que surgen en edificios, se puede ver que la tendencia se está duplicando. Significa el hecho de que el número de nuevas instalaciones casi se duplica con cada año que pasa. En los edificios, el espacio en la azotea disponible para la energía solar fotovoltaica (PV) puede no ser suficiente para hacer una contribución importante en el suministro de energía renovable del edificio. Los requisitos relacionados con el módulo BIPV y el rendimiento del sistema afectan el consumo de energía del edificio, incluido el rendimiento eléctrico [2].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

En la figura 1 se observa los tipos de tecnología solar fotovoltaica que ha sido utilizado a través del tiempo, en la actualidad se cuenta con tres tipos de generaciones, siendo la primera ampliamente utilizada con fines de generación eléctrica, la segunda y tercera se emplea para la integración fotovoltaica.

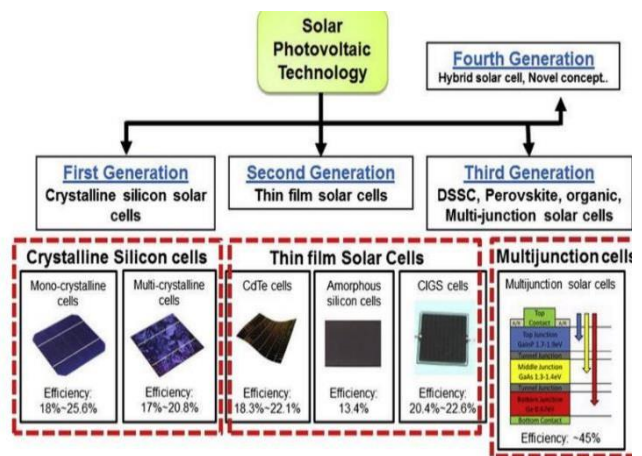


Fig.1 Tecnología solar fotovoltaica

Investigaciones realizadas han mostrado que los edificios de mediana y gran altura son idóneos para incorporar energía fotovoltaica (PV) en la fachada como en el techo debido a las nuevas aplicaciones de integración fotovoltaicas en edificios (BIPV). El principal problema de este sistema es que su rendimiento disminuye a medida que aumenta la temperatura de la celda solar.

Al analizar los datos anuales, se puede observar que la tendencia en el número de nuevas instalaciones se está duplicando. Esto significa que el número de instalaciones nuevas casi se duplica cada año. Aunque los edificios pueden tener espacio en el techo disponible para paneles solares fotovoltaicos (PV), este espacio puede no ser suficiente para contribuir significativamente al suministro de energía renovable del edificio [3].

La forma y la ubicación del edificio son elementos fundamentales que afectan la demanda de energía y el rendimiento térmico de los edificios, así como la intensidad de la radiación solar recibida y el consumo total de energía la latitud del lugar juega un rol importante al momento de conocer la radiación que llega a la envolvente de la edificación como el sombreado. Por lo tanto, estos factores son cruciales y pueden ser considerados uno de los mayores desafíos a la hora

de diseñar edificios eficientes y sostenibles.

En las instalaciones BIPV, es necesario utilizar módulos de tecnología de integración fotovoltaica que sean multifuncionales. Estos módulos no solo deben generar energía eléctrica, sino que también deben cumplir con todos los requisitos de las fachadas convencionales, como protección contra los fenómenos meteorológicos y un buen aislamiento térmico y acústico.

BIPV tiene una baja penetración en el mercado fotovoltaico general. Sin embargo, la tecnología fotovoltaica está madura y el equilibrio costo/rendimiento está mejorando constantemente. Se debe fomentar la integración en los edificios más allá de los proyectos de demostración o educativo. Más que proporcionar energía eléctrica, BIPV puede mejorar y satisfacer una imagen del edificio. BIPV hace una declaración sobre arquitectura innovadora, así como el diseño de ingeniería.

Para lograr una economía baja en carbono y un menor consumo de energía convencional, la generación de energía renovable se ha vuelto beneficiosa. A nivel mundial se ha logrado observar una rápida necesidad de fuentes de energía renovables, especialmente durante la última década.

La evaluación del potencial energético real de las instalaciones BIPV en ciudades, se debe evaluar una gran cantidad de edificios. Esto requiere un método rápido, pero suficientemente preciso para calcular la superficie disponible, la radiación solar en el área bajo investigación de sombreado, la potencia resultante y el rendimiento eléctrico anual.

II. ESTUDIO BIPV

El Sistema BIPV es una solución arquitectónica innovadora para generar energía en edificios. Además de contribuir al ahorro energético, ofrece beneficios ambientales, seguridad, estética arquitectónica, rendimiento económico y viabilidad. En este contexto, las ventanas BIPV se centran en el uso de acristalamiento fotovoltaico semitransparente (STPV) que se integra en las ventanas de los edificios.

Estas ventanas tienen un efecto fotovoltaico que convierte la radiación solar en electricidad útil, al mismo tiempo que reduce la ganancia de calor solar y la iluminación en el interior del edificio. La lógica detrás del BIPV, se destaca de su contraparte de Building Applied Photovoltaic (BAPV) ya que encaja armoniosamente en la estructura del edificio. En el mundo de la arquitectura, la apariencia refinada y final (estética) de un edificio es tan importante como su función [3].

Hay varias normas que regulan el uso de paneles solares y vidrios fotovoltaicos, incluyendo las normas IEC (International Electrotechnical Commission) y UL (Underwriters Laboratories). También hay una amplia bibliografía disponible en línea y en libros de texto sobre este tema, que puede ayudar a obtener se requiere obtener detalles adicionales acerca del pasado y la evolución de la tecnología fotovoltaica. Para cuantificar el impacto visual de las instalaciones fotovoltaicas, se realizó una evaluación de la

visibilidad, que calcula la exposición visual de una instalación fotovoltaica simulada a los espectadores objetivo en función de la "línea de visión"[4].

A. Ventanas BIPV

Las ventanas BIPV de un solo componente acristalamiento se refieren a ventanas equipadas con una sola capa de vidrio solar transparente, el acristalamiento fotovoltaico consta de dos paneles de vidrio con una serie de células solares de película delgada encapsuladas entre los dos paneles de vidrio [5], en la figura 2 se observa la integración en un edificio de la Universidad de Chipre.



Fig. 2 Edificio BIPV en la Universidad de Chipre.

En los últimos 20 años, el 57% de las investigaciones estudiadas multicriterio en proyectos y planificación de energías renovables tomando en cuenta los criterios relacionados con la generación de energía, a conocer, 'eficiencia', 'capacidad instalada' y 'producción de energía'. Además, el 'impacto visual' se considera en los criterios sociales y representa el estudio relacionado. Para facilitar la evaluación de los sistemas de fachadas BIPV en las certificaciones de edificios sostenibles [6].

La evaluación de la posibilidad para integrar sistemas fotovoltaicos en los edificios, se suelen realizar simulaciones para determinar la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de los edificios a lo largo del año. Con esta información, se pueden generar mapas solares que muestran la cantidad de energía solar disponible en diferentes áreas de la superficie de los edificios. Estos mapas solares son útiles para determinar las áreas del edificio que tienen un potencial de captación solar mayor y son más adecuadas para la integración de sistemas fotovoltaicos, en su mayoría acompañados de una evaluación de la idoneidad de las superficies que tienen los edificios para la integración fotovoltaica con referencia al umbral mínimo de irradiación [7].

Si bien la mayoría de los estudios se limitan a los techos, el análisis del potencial solar también se ha extendido a las fachadas verticales de los edificios en base a simulaciones 3D [8], convencionalmente, la evaluación del impacto visual de BIPV se realizó en base a la suposición de que la introducción de BIPV afecta negativamente la calidad estética del edificio y

el contexto circundante. Por lo tanto, las aplicaciones BIPV homogéneas compatibles con los materiales de construcción típicos se proponen como las propuestas de diseño óptimas [4], [9]. Los módulos BIPV tienen características especiales en comparación con los módulos fotovoltaicos estándar para cumplir mejor con los requisitos arquitectónicos y de construcción. La estructura del módulo BIPV más simple consiste en un laminado fotovoltaico resultante de la unión de capas.[10].

Existe un enorme potencial de mercado para el rendimiento BIPV en todo el mundo. Ya se ha desarrollado el mercado en la mayor parte de las naciones de Europa, es decir, Francia, Suiza, Alemania, Italia y España [10]. El desarrollo general de BIPV en los últimos años está aumentando y alcanzó aproximadamente 2000 MW de instalación hasta la fecha.

B. Aplicación BIPV

Estudios presentados tiene como objetivo la simulación y la validación de pruebas experimentales de sistemas fotovoltaico integrado en edificios (BiPV) de doble piel junto con material de cambio de fase (PCM) implementado en fachadas sensibles al clima. En el trabajo los autores comparan las reacciones de respuesta térmica y la producción de electricidad de dos fachadas BiPV (con y sin capa de PCM) por medio del método de simulación de energía de edificios (BES) donde se revela la complejidad de las predicciones del rendimiento del sistema fotovoltaico. La validación del trabajo se lleva a cabo por medio del software computacional EnergyPlus, los resultados obtenidos a través de la simulación, experimentación, calorimetría y las pruebas dinámicas se analiza de forma exhaustivamente. Los resultados obtenidos muestran que la mejor concordancia se encuentra en los datos PCM basados en calorimetría de triple capa (3LC), aumentando la producción de electricidad a un máximo 4,8 % cuando existe una disminución de 10 al 14 K en la temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico.

La aplicación de vidrios fotovoltaico tiene una visibilidad que se define como uno de los factores principales para evaluar el impacto visual de BIPV. Es un factor que se debe considerar al elegir esta tecnología, y puede ser una cuestión importante en términos de estética y de integración con el diseño arquitectónico de un edificio [11].

La visibilidad de los paneles solares BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) depende en gran medida de su diseño y de la forma en que se integran en un edificio. En general, tenemos dos tipos de paneles solares BIPV: los paneles opacos y los paneles traslúcidos.

Los paneles solares opacos se utilizan como revestimiento de fachada o cubierta y no permiten la transmisión de la luz. Estos paneles son visibles desde el exterior del edificio y pueden ser de un color o textura que se integre con el diseño arquitectónico [12].

Los paneles solares opacos suelen ser de color oscuro y se utilizan como un elemento de fachada para generar

electricidad a partir de la radiación solar. A menudo se integran en el diseño arquitectónico de la fachada para crear una apariencia uniforme y estética. Estos paneles son una buena opción cuando no se desea permitir la entrada de luz a través de la fachada, pero aún se quiere aprovechar la energía solar.

Los paneles solares traslúcidos son una opción interesante en la arquitectura solar, ya que realiza una transmisión parcial de la luz. Se utilizan comúnmente en ventanas o techos luminosos y pueden tener un diseño que los haga casi transparentes. Estos paneles permiten una moderada visibilidad a través de ellos, lo que los hace ideales para ciertas aplicaciones arquitectónicas. Estos paneles pueden ser casi transparentes y permiten una visibilidad moderada a través de ellos, dependiendo de su diseño [12].

Además, estos paneles pueden aprovechar la luz solar y generar electricidad, lo que los convierte en una solución atractiva para la eficiencia energética de los edificios

En algunos climas, se considera que los paneles solares cristalinos pueden servir como una fachada opaca dinámica al integrarse en edificios, estos paneles no solo evitan una transferencia acelerada de calor, sino que también generan electricidad para las cargas conectadas en el edificio.

III. ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO BIPV

A. Edificio que analizar

Para el análisis se tomó como ejemplo a un bloque de la Universidad Politécnica Salesiana, sede de Guayaquil en el campus centenario que tiene las siguientes coordenadas - 2.2201494, -79.886, este cuenta con una estructura de 4 plantas y una terraza y tiene como particularidad una fachada medida útil para los paneles solares de 40m x 7.6 m lo que nos brinda un excelente diámetro para continuar con la simulación.



Fig.3 Edificio bajo estudio de la Universidad Politécnica Salesiana.

B. Análisis Ambiental

Los gobiernos y entidades de investigación buscan nuevas soluciones para reducir el consumo energético en edificios, en este caso en particular podemos implementar el sistema BIPV en un edificio estudiantil ya que este demanda un alto consumo de electricidad cada mes, aumentado su

demanda en los meses de noviembre a febrero, el proyecto se basa en brindar una solución para bajar el consumo total de energía y reducir las emisiones contaminantes de CO2 que provocan el efecto invernadero todo esto sin afectar la estructura del edificio

Las fachadas están expuestas a diferentes temperaturas y diferentes velocidades de viento. Simulando el flujo de viento alrededor del edificio y extrayendo resultados de la presión y la velocidad, el coeficiente de presión para cada módulo se calcula de la siguiente manera:

$$C_p = \left(\frac{P - P_0}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho_0 * V_0^2} \right) \quad (1)$$

Donde:

P = presión del viento sobre el módulo,

P0=presión

ρ0=densidad

V0 = Velocidad uniforme

C. Análisis Eficiencia Energética En Iluminación

Para la generación de energía a través de fuentes renovables, respecto a lo que dicta la norma de construcción NEC-11, se debe respetar con lo que está establecido en la norma ISO 8995-1 que dicta que los niveles de iluminación en zonas de trabajo que se aplica en áreas de trabajo de edificios, industrias, oficinas biblioteca, museos, espacios de circulación, garajes, hospitales, etc. Dejando aparte a aquellas edificaciones con un bajo nivel de luminancia.

La eficiencia energética de una instalación respecto a la iluminación de una zona se determina mediante el Valor de Eficiencia de la instalación VEEI(W/m2) por cada 100m lux y se mide mediante la siguiente fórmula:

$$VEE = \frac{P_t * 100}{S_i * E_{hm}} \quad (2)$$

Donde:

Pt= Potencia total instalada en iluminación. [W]

Si=Superficie iluminada [m2]

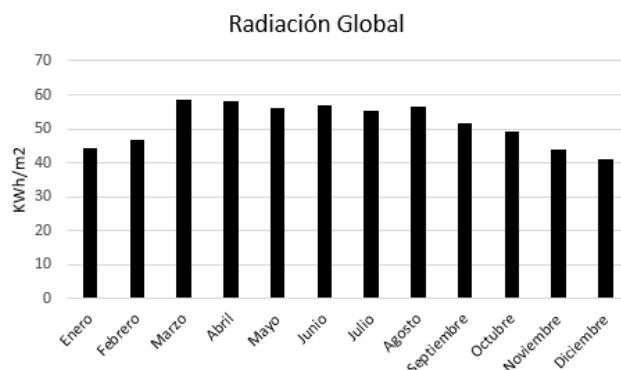
Ehm= Iluminancia media horizontal mantenida [lux]

D. Datos meteorológicos

Uno de los datos más importantes y que tienen una gran influencia en el edificio y su entorno, es la radiación solar que es una energía emitida por el sol a través de ondas electromagnéticas, la unidad de medida se expresa por

[W/m2], [vatios por metro cuadrado].

La radiación solar global que llega al edificio se muestra en la figura 4, donde se observa que entre los meses de marzo a agosto del año 2022 se presenta mayor irradiancia en el edificio, llegando a su valor pico en el mes de marzo de 58,426



kwh/m2.

Fig. 4 Valores de radiación mensual.

La radiación global es el valor utilizado para los cálculos de dimensionamiento fotovoltaico, con la finalidad de conocer el rendimiento y evaluación económica de la implementación, la sumatoria de la radiación directa y la radiación difusa da como resultado el valor de radiación global a continuación, se describe el concepto de cada uno.

Radiación directa

Es una pequeña fracción de radiación proveniente directamente en línea recta desde el sol en forma de ondas o fotoelectrones y una trayectoria bien definida, es poco probable la captura de los fotoelectrones debido a que en la trayectoria se encuentran partículas de polvos suspendidas que evitan el libre paso de la misma

Depende de tres factores: latitud, día del año y hora del día. Este tipo de radiación es la que se observa en varios portales web de uso informativo.

Radiación difusa

Es otra fracción que llega sin trayectoria definida, como resultado de la absorción, dispersión y reflexión ocasionados por gases de efecto invernadero y aerosoles encontrados en el ambiente.

E. Módulos utilizados en la simulación

El Módulo Onyx solar x5 es un módulo de silicio cristalino (C-Si), vidriado de tipo transparente con una medida de 910 x 1280 x 13,8mm de espesor, una característica principal de este tipo de vidriado es que tiene un 80% de visibilidad.

La generación que podemos conseguir con este tipo de vidriado es de 153 Wp/ m2 que varía de acuerdo con la temperatura del módulo y la radiación del lugar definido.

EL Módulo Onyx solar x6 es un módulo de silicio cristalino (C-Si), es un vidriado de tipo transparente con una

medida de 2250 x 760 x 13,8 mm, el acristalamiento de este módulo es de 6 mm de espesor, el peso neto de este módulo es de 30kg/m2 con una opacidad del 50%, con este tipo de modulo podemos conseguir una generación de 126 Wp/m2.

Se puede calcular la generación de energía de cada módulo, si se conoce sus características por medio de la siguiente formula

$$Pe = 244 \left[1 - \frac{0.42}{100} (Tpv - 298) \right] \quad (3)$$

Donde:

Tpv= temperatura del módulo tomando en cuenta quevaría según datos climáticos.

Cada uno de los módulos opera con una temperatura diferente en función de su ubicación dentro de la fachada. Los módulos que se encuentra ubicadas en las esquinas del edificio se comportan a bajas temperaturas, mientras que los que están en el centro de la fachada, su temperatura es más alta.

Sin embargo, se produce una mayor variación de temperatura entre los módulos de la fachada de media altura en comparación con la fachada de gran altura, bajo las mismas condiciones atmosféricas.

IV. PROCEDIMIENTO DE LA SIMULACIÓN

Para la simulación se procede a utilizar el software PVsits, el primer paso es la importación del modelado en 3D del edificio a utilizar respetando las medidas, en la figura 4 Se muestra el modelado en 3D con el software Sketchup 8. Se ha diseñado de forma exacta la estructura del edificio a simular, la parte frontal como se muestra en la figura 3 es de vidrio, el cual va a ser reemplazado por vidrio fotovoltaico como se muestra en la figura 5.

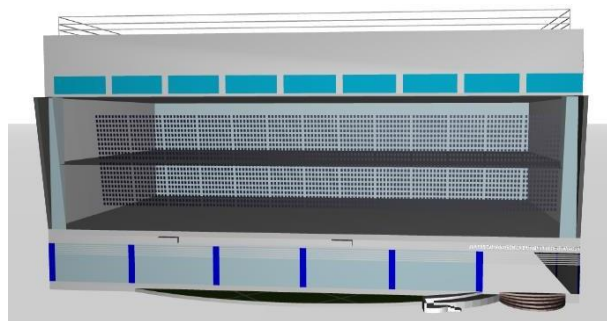


Fig. 5 Fachada del edificio F de la UPS en 3D

Con la descarga de los datos meteorológicos y la ubicación exacta y en tiempo real donde se encuentra el edificio se da comienzo a la simulación dando como resultado una visualización del edificio con respecto al sol en diferentes horas del día, seleccionando el tipo y cantidad de módulos e inversores, el encadenamiento de estos se lo realiza de forma automática o manual. Para la primera simulación se realiza

con paneles Onyx solar X5 de 433 Wp, cuyo voltaje máximo es de 52.4 V y su corriente máxima es de 0.9A, el inversor de modelo Eathon Phoenixtec es de 1,1 kWp, cuyo voltaje máximo en Dc 450V, su corriente máxima en DC es de 5A con una eficiencia del 90%. El primer diseño está conformado por 28 paneles transparentes, se encuentran conectado 4 ramales de 7 paneles en serie y un inversor de 1.1 KW.

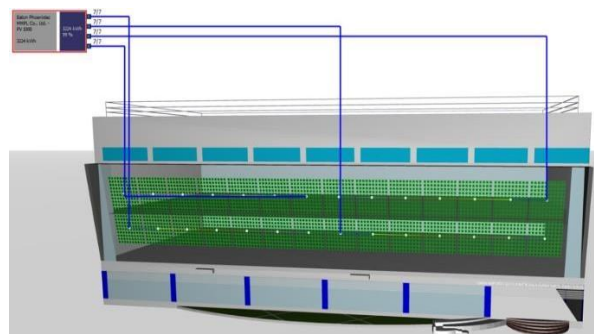


Fig. 6 Conexión de paneles X5 e inversor Eathon Phoenixtec con conexión a la red

La potencia que entrega esta simulación es de 12.1 y el rendimiento total de 265.9 kWh/kWp, su producción es de 226 kWh mientras que la producción autoconsumo es de 2999 kWh, en la figura 7 podemos observar la producción total si utilizamos el panel Onix sola X5.



Fig. 7 Producción de energía mensual Onysx X5

Para la segunda simulación se lo realiza con paneles Onyx solar X6 de 299 Wp, cuyo voltaje máximo es de 218V y su corriente máxima es de 1.4A, el inversor de Centro solar AG es de 2,250 kWp, cuyo voltaje máximo en Dc 950V, su corriente máxima en DC es de 9A con una eficiencia del 90%.

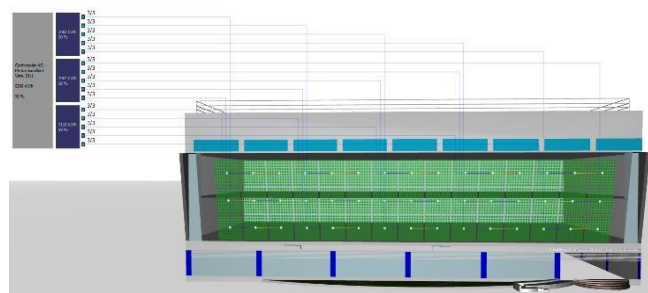


Fig. 8 Conexión de paneles X6 e inversor Centro solar AG con

El segundo diseño está conformado por 45 paneles transparentes, que se encuentran conectado 15 ramales de 3 paneles en serie y un inversor de 5.250 kW.

La potencia que entrega la simulación es de 13.5kWp y el rendimiento total de 466.8 kWh/kWp, su producción es de 6281 kWh mientras que la producción autoconsumo es de 0 kWh, en la figura 9 podemos observar la producción total si utilizamos el panel Onix sola X6.



Fig. 9 Producción de energía mensual Onysx X6

La comparación de datos según la producción de cada sistema BIPV simulado para la fachada del edificio de biblioteca, se muestra en la figura 10 para cada mes.

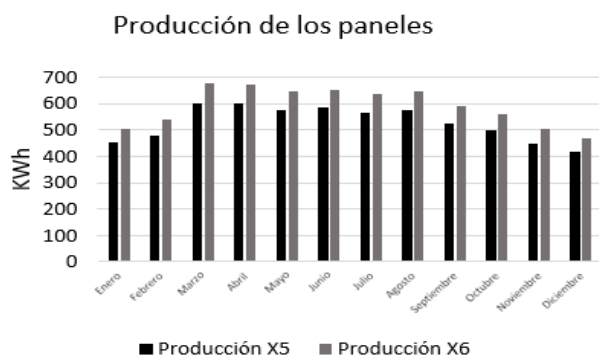


Fig. 10 Comparativa de producción de energía mensual

Mes	Producción X5 [kWh]	Producción X6 [kWh]
Enero	450,843	504,07
Febrero	479,068	537,164
Marzo	601,496	675,725
Abril	600,569	673,856
Mayo	575,035	644,825
Junio	583,482	653,182
Julio	566,547	635,541
Agosto	576,071	647,587
Septiembre	526,502	591,605
Octubre	499,949	561,237
Noviembre	448,121	501,53
Diciembre	419,315	469,124

En la tabla 1 se detalla los valores exactos para cada mes, el peor mes es en diciembre para los dos tipos de paneles y es debido a una menor irradiancia.

I. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la BIPV puede reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, es importante evaluar los costos y beneficios de esta tecnología antes de su implementación.

La integración de paneles fotovoltaicos en la fachada de los edificios, conocida como fachadas integradas en BIPV, presenta ventajas adicionales, como la capacidad de proporcionar sombra y protección solar, reducir el impacto ambiental y mejorar la estética de los edificios. La BIPV también puede ser una solución ideal para edificios de mediana y gran altura que tienen una superficie limitada de techo disponible para la instalación de paneles solares convencionales. Sin embargo, es importante destacar que la implementación de la tecnología BIPV en la fachada de los edificios presenta desafíos técnicos y estéticos que deben ser abordados para garantizar su éxito a largo plazo.

Para el caso de estudios en el edificio “F” utilizado como biblioteca en la Universidad Politécnica Salesiana campus Centenario se demostró que con el panel Onyx Solar X6 obtenemos una producción de 6591,376 kWh anualmente y con una producción de autoconsumo de 0 kWh a diferencia del panel Onyx Solar X5 que su producción es menor, pero su eficiencia es la misma. En conclusión, las fachadas integradas en BIPV son una opción prometedora para la producción de energía renovable en edificios de mediana y gran altura.

REFERENCIAS

- [1] “IEEE Xplore Full-Text PDF:” <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9300837&tag=1> (accessed Dec. 05, 2022).
- [2] D. H. W. Li, T. N. T. Lam, W. W. H. Chan, and A. H. L. Mak, “Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings,” *Appl Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 722–729, May 2009, doi: 10.1016/J.APENERGY.2008.08.009.
- [3] T. Wladyslaw, “Historia de la estética III: la estética moderna (1400- 1700),” 2004.
- [4] Maciej Serda *et al.*, “Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza,” *Uniwersytet śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2013, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [5] W. Liao and S. Xu, “Energy performance comparison among see-through amorphous-silicon PV (photovoltaic) glazings and traditional glazings under different architectural conditions in China,” *Energy*, vol. 83, pp. 267–275, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.02.023.
- [6] T. Schuetze, W. Willkomm, and M. Roos, “Development of a Holistic Evaluation System for BIPV Façades,” *Energies 2015, Vol. 8, Pages 6135-6152*, vol. 8, no. 6, pp. 6135–6152, Jun. 2015, doi: 10.3390/EN8066135.
- [7] J. Kanters, M. Wall, and E. Kjellsson, “The Solar Map as a Knowledge Base for Solar Energy Use,” *Energy Procedia*, vol. 48,

pp. 1597–1606, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2014.02.180.

- [8] A. Walch, R. Castello, N. Mohajeri, and J. L. Scartezzini, “Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty,” *Appl Energy*, vol. 262, p. 114404, Mar.2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.114404.
- [9] C. S. Polo López and F. Frontini, “Energy Efficiency and Renewable Solar Energy Integration in Heritage Historic Buildings,” *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1493–1502,
- [10] Ensslen, and D. H. Neuhaus, “Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV),” *Energy Build.*, vol. 231, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110381.
- [11] S. Jeong *et al.*, “Performance analysis of coloured BIPV systems depending on reliability of irradiance data,” *Microelectronics Reliability*, vol. 138, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114704.
- [12] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar, “Recent advancement in BIPV product technologies: A review,” *Energy and Buildings*, vol. 140. Elsevier Ltd, pp. 188–195, Apr. 01, 2017. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.015.