

Revisión bibliográfica sobre el avance teórico y experimental de la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), 2002-2023.

Autora

Yudi Fernanda Niño Santana

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctor en Ingeniería Civil - Estructuras

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

## Dedicatoria

*A Dios, por todas las bendiciones recibidas y por llevarme de la mano durante todo este camino de transformación y crecimiento. Además, por ser la energía para mi cuerpo, alma y mente durante esta increíble etapa.*

*A mi familia, en especial a mi mamá Myri, por enseñarme a volar e iniciar en un lugar diferente; a mi papá Leo, por ser ejemplo de trabajo y esfuerzo; a mi hermano y a mis hermanas, especialmente a Ledys, por ser fuente de inspiración para continuar y brindarme el apoyo más fuerte durante toda la carrera.*

*A mis amigos, Ana, Ceci y Andrés, por su tiempo, sus detalles y los momentos compartidos; llenaron mis días de su alegría y constante apoyo.*

*A mi jefe, Rubby Torres, por su cariño y consejos, su inigualable amor me permitió disfrutar mi estancia como auxiliar.*

*A la profe Judith Navarro Gómez, por impulsar mi interés en las energías renovables a través de sus increíbles clases.*

*A mis amigos en México, Martha, Deyanira, Laura, Janeth, Amaranta, Karen, Kevin, a los chicos de la iglesia y las demás personas que conocí y me acompañaron durante mi estadía en la Ciudad de México, por hacer mis días felices desde su amabilidad e interés en enseñarme su cultura.*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Civil, por formar mi perfil profesional en los diferentes espacios académicos, personales y sociales. Asimismo, por ser vínculo de internacionalización al enriquecer el crecimiento de los estudiantes a través del programa de intercambio académico, en particular con la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual me permitió consolidar los conocimientos base para realizar este proyecto de grado.

A mi director, el profesor Oscar Javier Begambre Carrillo, por aceptar ser mi guía en el desarrollo de este trabajo de grado enmarcado en un área diferente a la de su experiencia, además, por su tiempo e interés en obtener excelentes resultados.

A la profesora, Ruth Maritza Navas, por su tiempo y acompañamiento durante la elaboración del trabajo de grado, en especial, por su disposición para aportar ideas y estrategias de redacción y oralidad.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo general .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
2. Marco teórico .....	13
2.1 Antecedentes .....	13
2.2 Bases teóricas .....	17
2.3 Marco conceptual .....	22
3. Marco metodológico .....	25
3.1 Diseño de la revisión .....	26
3.2 Búsqueda y recuperación de la información .....	27
3.3 Análisis de la información .....	28
3.4 Selección de la información .....	29
3.5 Condensación de la información .....	30
4. Resultados .....	32
4.1 Categorías de los tipos de BIPV y eficiencia de los módulos reportados .....	32
4.2 Clasificación de variables .....	35
4.3 Clasificación de los softwares de modelación .....	39
4.4 Ventajas y desventajas de la implementación de BIPV .....	42
5. Conclusiones .....	44
6. Recomendaciones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	47

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Categorías de los BIPV y eficiencia de los módulos de la configuración .....	33
Tabla 2 Clasificación de las variables de los BIPV .....	36
Tabla 3 Clasificación de softwares para modelar los BIPV .....	40

**Lista de figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Mejora de la eficiencia de las células de investigación de tecnologías fotovoltaicas desde 1975.....	16
Figura 2 Evolución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	18
Figura 3 Tipos de radiación solar.....	24
Figura 4 Esquema metodológico de la revisión.....	26
Figura 5 Mapa de redes de las palabras claves de la búsqueda unificada.....	29
Figura 6 Mapa de redes de términos en función del título y resumen de la bibliografía.....	30
Figura 7 Mapa de redes de términos en función del tiempo en escala de calor.....	31

## Glosario

**BAPV:** el término en inglés es “building applied photovoltaics”, se presenta cuando se tienen sistemas o un sistema fotovoltaico sobre el tejado o con un soporte que es usualmente en estructura metálica.

**BIPV:** el término en inglés es “building integrated photovoltaics”, estos sistemas deben estar integrados al edificio, en pocas palabras significa que le proporcionan al edificio mínimo dos funciones, por ejemplo, reemplazar la cubierta con sistemas que además generen electricidad o sustituir el vidrio común de las ventanas con sistemas de integración fotovoltaica, esto sirve como fuente de electricidad y barrera o aislante del exterior e interior con fin térmico.

**Eficiencia energética:** entiéndase como el objetivo de utilizar la menor energía y recursos posibles para realizar una actividad o suplir una necesidad.

**Energía:** “es un medio que utiliza el ser humano de maneras diversas para satisfacer necesidades y alcanzar objetivos deseados, es decir, no es un fin en sí mismo” (Semarnat, s.f., p.4).

**Fuentes no renovables de energía:** son recursos naturales limitados, por lo que una vez que se agoten, no podrán sustituirse.

**Fuentes renovables de energía:** son aquellas que, por su capacidad de regeneración natural y cantidad, en relación con los consumos que los humanos puedan hacer de ellas, son inagotables.

**Sistema *off grid* solar:** sistemas aislados o en isla, cuyo elemento esencial es la batería, su objeto es el almacenamiento y es un factor crítico en la rentabilidad de este sistema, debido a su alto coste.

**Sistemas *on grid* solar:** sistemas conectados a la red pública de distribución de electricidad, por eso no requieren elementos de almacenamiento, pero, sí medidores para conocer la cantidad de electricidad producida y la requerida de la red

## Resumen

**Título:** Revisión bibliográfica sobre el avance teórico y experimental de la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), 2002-2023 \*

**Autor:** Yudi Fernanda Niño Santana \*\*

**Palabras Clave:** BIPV, energía fotovoltaica integrada en edificios, energía solar, revisión, variables, softwares, ODS, edificios.

**Descripción:** Los BIPV son una alternativa eficiente para la generación de electricidad in situ a partir de la energía solar, utilizando los componentes del propio edificio, por esto el éxito de implementación de los BIPV está en manos del diseñador al modelar, evaluar y analizar el rendimiento del tipo de sistema elegido en el contexto local en etapas tempranas. La revisión incluye: casos de estudio para clasificar el tipo de sistema, según el grado de integración logrado; las variables, según el nivel de control alcanzado; los softwares, dependiendo de la vinculación al flujo de trabajo bajo la metodología Building Information Modeling (BIM), y las ventajas y desventajas reportadas. Los resultados demuestran que el 45 % de los BIPV se implementan cumpliendo dos funciones, además, se observó que el 30 % de las variables tiene nivel de control bajo en los ámbitos ambientales y económicos. Finalmente, se presentan 6 herramientas para integrar en la metodología de los diseños arquitectónico, estructural y energético de los proyectos verticales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil - Estructuras.

### Abstract

**Title:** Literature review on the theoretical and experimental progress of the adaptation of Buildings Integrated Photovoltaic (BIPV), 2002-2023\*

**Author(s):** Yudi Fernanda Niño Santana \*\*

**Key Words:** BIPV, building integrated photovoltaics, solar energy, review, attributes, software, ODS, buildings.

**Description:** BIPV are an efficient alternative for on-site electricity generation from solar energy, utilizing the building's own components. Consequently, the success of BIPV implementation depends on the designer's ability to model, evaluate, and analyze the performance of the chosen system within the local context at early stages. The review includes case studies to classify the type of system based on the degree of integration achieved; variables, according to the level of control attained; software tools, depending on their integration with the Building Information Modeling (BIM) workflow; and reported advantages and disadvantages. The results show that 45% of BIPV systems are implemented with dual functions. Additionally, it was observed that 30% of the variables have a low level of control in environmental and economic aspects. Finally, six tools are presented for integration into the methodology of architectural, structural, and energy design for vertical projects.

---

\* Degree Work

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil - Estructuras.

## Introducción

El mundo enfrenta un impacto significativo debido a tres factores principales: el calentamiento global, a la escasez de recursos naturales y al aumento de población con hábitos originados por la era digital. Estos factores han modificado drásticamente los ciclos naturales del planeta. Para responder a la creciente demanda, las industrias han actuado con rapidez y en gran cantidad, sin embargo, las emisiones de carbono han aumentado al punto de convertirse en un objetivo de reducción global, a partir del Protocolo de Kyoto y luego del Acuerdo de París (Naciones Unidas, 1998) (Naciones Unidas, 2015a) para equilibrar o minimizar las consecuencias originadas. A lo anterior se le han sumado los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan vincular todos los sectores con el propósito de lograr desarrollo sostenible para cada país (Naciones Unidas, 2015b), los objetivos 7 y 9 focalizan la energía de fuente renovables en ciudades resilientes, es decir, como mencionaron Choi et al. (2022) los edificios también deben prepararse para la adaptación al creciente cambio climático mejorando la resiliencia.

El sector de la construcción reporta diferentes impactos ambientales como los mencionados por Roodman como citó López (2021), la construcción y operación de los edificios consume el 40% de la energía total, el 16% de agua dulce extraída, es responsable del 25% del procesamiento de madera y consume el 40% de los materiales extraídos como la arena y grava para la elaboración del concreto, sin dejar de lado el impacto asociado a la industria siderúrgica en la transformación del acero; tras todo esto se genera por encima de un 1/3 de las emisiones CO<sub>2</sub> globales debido a la quema de combustibles fósiles para suplir todos sus procesos.

Ante esta situación surge la necesidad de transformar procedimientos constructivos acostumbrados para adaptar el diseño, sobre todo en etapas tempranas e implementar el

autoconsumo de energía del edificio a ejecutar. Esto refleja la evolución de la transición energética en la que se trabaja mundialmente. Por esto, se parte de dos premisas: la densificación de ciudades y la adopción de estilos de vida respetuosos con el medio ambiente por los residentes (Bambara et al., 2021). Adicionalmente, las remodelaciones y los nuevos edificios deben considerar el enfoque urbano definido en los planes de urbanización y además considerar el contexto histórico (Xiang et al., 2021) para favorecer la integración visual y el aspecto estético.

El concepto de edificio ha cambiado, D'ambrosio et al. (2021) lo definen como un componente que consume, produce, almacena. y suministra energía dentro de un sistema energético más amplio, por esto los BIPV responden como una alternativa de suministro de electricidad in situ, buscando diseñar edificios energéticamente positivos, es decir, producen más energía de la que demanda y, de esta manera aportar en la creación de comunidades y/o por qué no ciudades autosostenibles como un sistema de cooperación de las partes.

Los BIPV son sistemas integrados al edificio, en pocas palabras significa que le proporcionan al edificio mínimo dos funciones, por ejemplo, reemplazar la cubierta con sistemas que además generen electricidad o sustituir el vidrio común de las ventanas con sistemas fotovoltaicos, esto sirve como fuente de electricidad y barrera o aislante del exterior e interior con fin térmico.

Desde la Ingeniería Civil se responde como actor esencial en el diseño y ejecución de edificios, por esto, la revisión se centra en precisar los avances teóricos de la implementación de los BIPV en los antecedentes y, los avances prácticos extraídos como cumplimiento al esquema metodológico descrito para definir los 34 casos de estudio incluidos, con el propósito de conocer el grado de integración alcanzado, las variables, las herramientas y algunos aspectos prácticos en la implementación de estos sistemas; todo lo anterior para adquirir el conocimiento en cuanto a

funcionamiento, diseño e instalación de estos sistemas bajo la metodología BIM, garantizando así una evaluación integral del diseño estructural, energético y arquitectónico de cualquier proyecto vertical.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Realizar una revisión bibliográfica sobre el avance teórico y experimental de la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), 2002-2023.

### **1.2 Objetivos específicos**

Categorizar los tipos de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), hallados en la literatura especializada.

Clasificar las variables reportadas para la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV).

Clasificar los softwares propuestos en la literatura para modelar, diseñar y visualizar los Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV).

Tabular la eficiencia del o los tipos de módulos reportados de la implementación de BIPV.

Identificar ventajas y desventajas de la implementación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV).

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Antecedentes**

La instalación de los sistemas BIPV en el mundo tuvo auge a inicios de los años noventa, las primeras clasificaciones se centran con base en el lugar de ubicación de los sistemas en el edificio, Jelle (2015) creó cinco tipos de sistemas: sistemas estándares en techo; sistemas semitransparentes en claraboyas, en sistemas de sombreado y en ventanas o fachadas

semitransparentes; sistemas de revestimiento (externos); sistemas de tejas solares tanto en techos planos como en techos inclinados y los sistemas de láminas flexibles para techos planos; además Kuhn et al. (2020) realizaron un análisis de las posibles opciones de diseño, donde representaron de manera sencilla y práctica las maneras de diseño para integrar los sistemas fotovoltaicos en techo y fachadas, que no es más que sistemas basados en la primera clasificación presentada, de hecho, esta clasificación se ha mantenido tras los años de evolución de esta tecnología. Sin embargo, los sistemas dispuestos en techos se han llevado a instalarlos como sistemas Building Addobed Photovoltaics (BAPV) cuyo costo es menor (Jelle, 2015) (Hongxing & Yutong, 2007) (Akbarinejad et al., 2023), son más sencillos de ubicar y bajo condiciones de altas temperaturas tienen mejor rendimiento.

Los BIPV se consideran una tecnología reciente al estar en una etapa intermedia (Akbarinejad et al., 2023) porque hay barreras que no se han logrado traspasar como es el caso de la consolidación de redes lo suficientemente robustas y multidisciplinarias en conocimiento, habilidades y diversidad de sistemas de comercialización para lograr con éxito la instalación (Jelle, 2015) (Attoye et al., 2017) (Zhong et al., 2019), es por ello que se apuesta a la coordinación de todos los profesionales y el propietario en las etapas de planificación iniciales de un proyecto con flujos de trabajo eficientes a través de herramientas o softwares adecuados y trabajo colaborativo de acuerdo con la metodología BIM (Jakica, 2017) (Kuhn et al., 2020) (Akbarinejad et al., 2023) (Zhou & Herr, 2023).

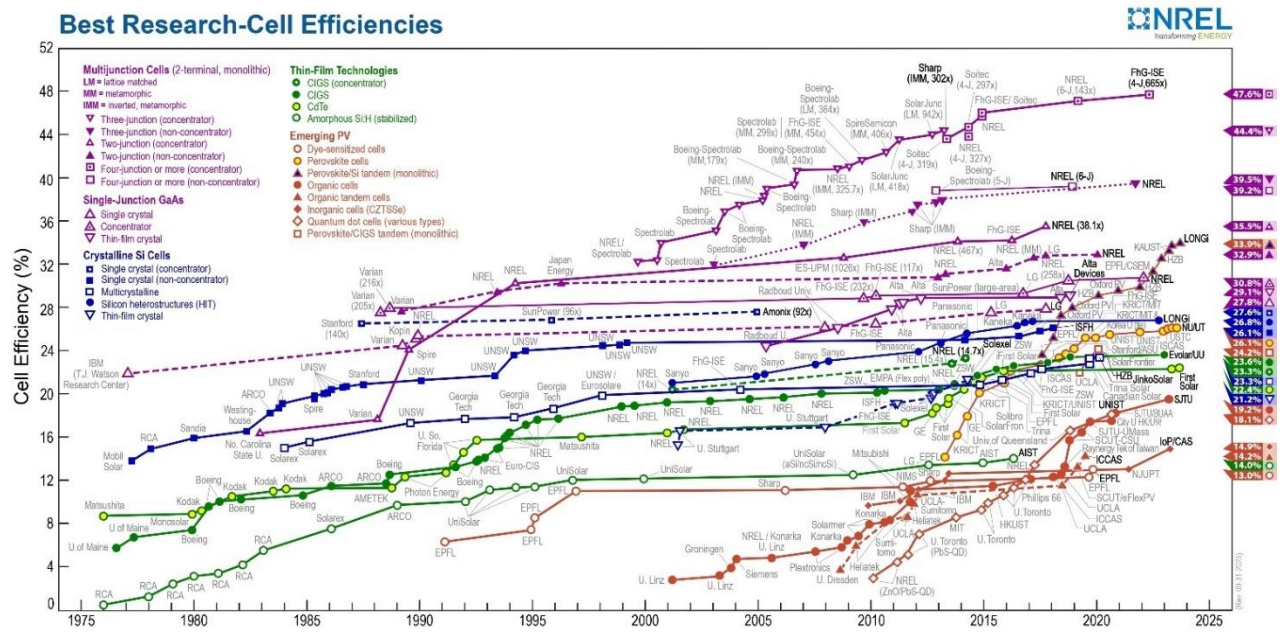
Otra barrera es la estética, esta se ha trabajado desde la diversificación en colores, transparencia y si es una tecnología rígida o flexible para garantizar una unificación visual que cumplan con los planes de desarrollo de las ciudades, con los deseos del propietario y con el diseño arquitectónico del edificio principalmente las fachadas. Por esto Basher et al. (2023) proporcionan

una recopilación de la gama de colores disponibles para sistemas BIPV como el gris, verde, azul, naranja, rojo, rosa y una opción que sigue en estudio para crear imágenes con micropatrón. Además, detallan las diferentes células solares o dispositivos en cuanto a las características de transparencia y eficiencia bajo ejemplos de aplicación de los BIPV.

La eficiencia de las células es la variable técnica que limita el rendimiento de los sistemas (Azadian & Radzi, 2013) (Jelle, 2015) (Attoye et al., 2017) (Biyik et al., 2017) (Sánchez-Pantoja et al., 2018) (Osseweijer et al., 2018) (Zhong et al., 2019) (Ghosh et al., 2020) (Kuhn et al., 2020) (Liu et al., 2022) (Mangherini et al., 2023) (Li et al., 2023) (Akbarinejad et al., 2023) (Zarate-Perez et al., 2023)(Basher et al., 2023) (Reddy et al., 2024), esto se ha convertido en el verdadero desafío de los institutos o laboratorios, en la figura 1 se observa la eficiencia alcanzada al año 2023 de los datos reportados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), se ilustra el comportamiento de cada uno de los tipos células o celdas solares en el marco de 48 años; es importante reconocer que al industrializar las celdas la eficiencia de operación será menor a la presentada en la figura 1.

Figura 1

Mejora de la eficiencia de las células de investigación de tecnologías fotovoltaicas desde 1975.



Nota: NREL (2023) presenta gráficamente las eficiencias confirmadas para células investigadas desde el año 1975, donde se demuestra el avance en la eficiencia con fines fotovoltaicos.

Así mismo, de la anterior figura se extraen algunos tipos de celdas que se emplean usualmente en los BIPV: la celda solar Graetzel o célula solar sensibilizada por colorante (DSSC, DSC o DYSC); las células fotovoltaicas orgánicas (OPV) con 19,2% de eficiencia reportada por SJTU, una universidad en China; las células solares de perovskita que son las que tienen la principal apuesta tanto en el mercado como en la instalación, se han creado dos tipos las células simples y las *tándem* con Silicio (Si) con una eficiencia de 26,1% y 33,9% respectivamente; las tecnologías de película delgada como las CIGS que son elaboradas de elementos químicos como el Selenio, Galio, Indio y Cobre, la eficiencia alcanzada de CIGS fue 23,6% y CdTe, que surge del compuesto Teluro de Cadmio con 22,4% en First Solar una empresa en Estados Unidos. A manera general, han surgido nuevas células como combinación o superposición tipo sándwich de

células ya existen con el objetivo de maximizar la eficiencia y otra forma es a partir de los concentradores solares luminiscentes (LSC) que aprovecha la reflexión de los rayos solares y se concentran en la célula.

Finalmente, el clima y la ubicación del edificio es un reto por esto se han creado clasificaciones como la Köppen-Geiger en cinco tipos de climas y, a diferencia de otras clasificaciones presenta una subcategorización con treinta clases en función de la temperatura y las precipitaciones, esto es relevante ya que en los casos de estudio realizados se expresa la necesidad de personalizar tanto los diseños, las políticas y los manuales, todo debe ser local para garantizar una adecuada rentabilidad bajo la premisa de ser flexibles para permitir la adaptabilidad (Li et al., 2023) (Akbarinejad et al., 2023) (Zarate-Perez et al., 2023). Reddy et al. (2024) presentan tres casos particulares en Japón, China y Bangladesh en India con porcentajes del 33%, 18% y 30-61% respectivamente, este porcentaje representa la cantidad de energía que llega a ser de autoconsumo, que no es más que la cantidad de energía que será capaz de generar el sistema luego de la instalación, con esto se explora cómo el porcentaje de consumo es netamente propio de cada proyecto.

## **2.2 Bases teóricas**

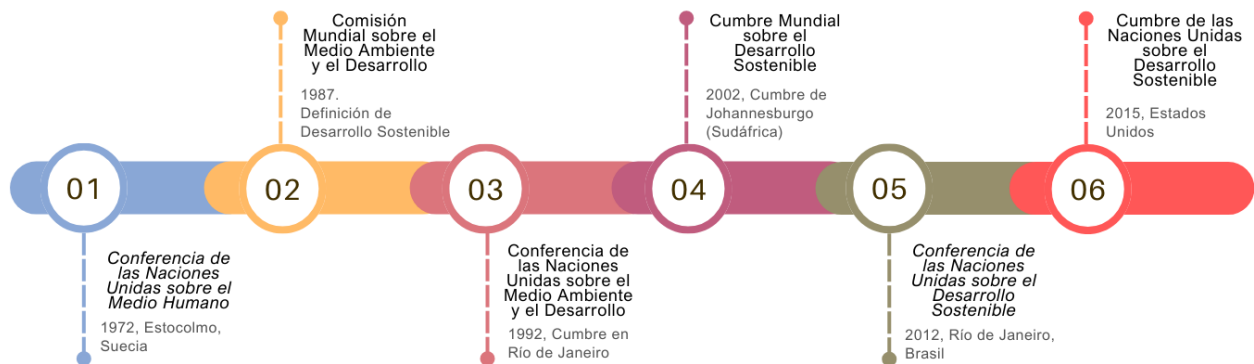
El propósito principal de mencionar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es precisar desde cuándo se habla de compromisos que la sociedad debe asumir para trabajar de la mano del medioambiente y beneficiar la economía; lo que involucra a cada individuo en el planeta desde su área de desempeño, sobre todo desde la Ingeniería Civil en el sector de la construcción, cuna del diseño y ejecución de proyectos verticales.

En la figura 2 se presenta la línea del tiempo de las 6 conferencias o cumbres que se detallará en este apartado. La evolución inicia al tener criterios o principios hasta objetivos, su

diferencia radica en que los primeros son guía mientras los últimos tienen naturaleza de cumplimiento.

## Figura 2

### *Evolución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*



*Nota:* Línea del tiempo para hacer seguimiento de las conferencias o cumbres llevadas a cabo para la creación de los ODS u Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En primer lugar, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano llevada a cabo en Estocolmo, Suecia en el año 1972, se convirtió en el primer llamado a actuar por el medioambiente, en el informe se precisa: “Hemos llegado a un momento de la historia en que debemos orientar nuestros actos en todo el mundo atendiendo con mayor cuidado a las consecuencias [...]. Por ignorancia o indiferencia podemos causar daños inmensos e irreparables al medio [medioambiente]” (Naciones Unidas, 1973, p. 3). Como resultado de este encuentro se crean 26 criterios o principios, en algunos de estos se menciona la importancia de la planificación urbana, un aspecto relevante en la distribución de recursos y la calidad de vida de los habitantes. Pero, no se habla de recursos no renovables y de la importancia de encontrar recursos alternativos, sin saber que un año más tarde se presentaría la Crisis del Petróleo, el punto de partida en búsqueda de fuentes alternativas de energía.

En segundo lugar, en el año 1987 se creó el informe Brundtland o Nuestro Futuro Común, en este se define lo que hoy se conoce como desarrollo sostenible: “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones para satisfacer las propias” (Naciones Unidas, 1987, p. 23). Por lo anterior, cabe mencionar que son necesidades esenciales porque las necesidades de este siglo son diferentes debido a las circunstancias y muchas de ellas han sido creadas, lo que implica mayor demanda de recursos que son limitados.

En tercer lugar, la Cumbre de la Tierra como es conocida la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo fue celebrada en 1992 en la ciudad de Río de Janeiro en Brasil, estuvo motivada por los 20 transcurridos desde la Conferencia de Estocolmo y, en ella se establecieron 27 principios. Otro aspecto clave como resultado de las reuniones realizadas es la Declaración de Río de Janeiro o Agenda 21, esta contiene 40 capítulos organizados en 4 secciones, en el capítulo 5 se tratan temas acerca de la dinámica demográfica y la sostenibilidad, donde el incremento de la población es un factor detonante hacia el cambio de la oferta de las industrias.

El incremento de la población y de la producción en el mundo combinado con modalidades de consumo insostenibles ha impuesto una presión cada vez más fuerte sobre la capacidad que tiene el planeta de sostener la vida, y ha afectado el empleo de la tierra, el agua, el aire, la energía y otros recursos (Naciones Unidas, 1992, p. 8).

Por consiguiente, las condiciones ideales de comodidad y confort para los habitantes de las ciudades que son las más propensas a concentrar grandes poblaciones disminuye afectando el precio, la calidad y la cantidad de servicios a los que pueden acceder, algo que es visible desde siempre con el acceso a la energía, cuyo servicio no es para todos, sino que existen personas que aún no cuentan con el servicio en el siglo XXI.

Los convenios de diversidad biológica y sobre el Cambio Climático de la Cumbre de la Tierra dieron origen a la creación del Protocolo de Kyoto (1997) cuyo propósito es disminuir los gases de efecto invernadero (GEI) generados por las actividades humanas, específicamente reducir el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en el planeta (Naciones Unidas, 1998), este se evalúa como la cantidad de gramos que cada actividad produce; la importancia de los GIE en la actualidad radica en son los responsables del efecto invernadero, es decir, del aumento de la temperatura al interior del planeta por acumulación excesiva de estos en la atmósfera, fenómeno que contribuye al Calentamiento Global.

En cuarto lugar, la Cumbre de Johannesburgo o Río + 10 celebrada en 2002 en Sudáfrica, donde se comprometen en hacer una evaluación del avance en torno al Programa o Agenda 21. Uno de los resultados de esta conferencia radica en la vinculación del sector privado a actuar, generando alianzas y lazos de trabajo entre el gobierno, los empresarios y la sociedad. Se mencionan incentivos sobre todo a las pequeñas y medianas empresas con el objeto de mejorar sus procesos de producción, buscando así que sean sostenibles. Desde esta perspectiva, las políticas de sostenibilidad, la alta demanda u otros factores naturales como la actividad sísmica caso específico del sector de la construcción, obliga a los sectores y a las empresas a tomar medidas de cambio y transformación de sus procesos, y la invitación a trabajar con la tecnología e integrando avances sostenibles en sus proyectos.

Integrar consideraciones relativas a la energía —como la eficiencia energética y la accesibilidad económica y física— en los programas socioeconómicos, especialmente en las políticas de los sectores que son consumidores importantes de energía, y en la planificación, gestión y conservación de infraestructuras consumidoras de energía de larga

vida útil, como las del sector público, el transporte, la industria, la agricultura, la urbanización, el turismo y la construcción (Naciones Unidas, 2002, p. 23).

Sin embargo, se no habló de objetivos hasta el año 2012 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible o Río + 20 llevada a cabo en Río de Janeiro, tiene como título El futuro que queremos “*The future we want*”, dejando como base que el desarrollo sostenible no es una opción ya que se cuenta son una sola Tierra, la producción y el consumo deben ser sostenibles para garantizar vidas dignas. “We reaffirm our support for the implementation of national and subnational policies and strategies, based on each country's development circumstances and aspirations, that use an appropriate energy mix to meet development needs, including through increased use of renewable energy sources” (United Nations, 2012, p. 25). En este informe por primera vez se mencionan las energías renovables, siendo energías obtenidas por recursos renovables como la energía solar a partir del sol, eólica a partir de las corrientes de aire, geotérmica del calor emitido del magma volcánica, oceánica de las diversas maneras que actualmente se genera, como es la de gradiente salino o mareomotriz y biomasa de los residuos orgánicos.

En últimas, como resultado de la Cumbre de 2015 se aprobó la agenda: Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, donde se detallan los 17 ODS (Naciones Unidas, 2015b), a continuación, se presentan los objetivos que rigen la implementación de BIPV:

Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.

Objetivo 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

Se trata entonces de unificar la energía y la construcción en el marco de proyectos que le proporcionen a los ocupantes acceso a energía a partir de fuentes renovables, es este caso solar a través de los Sistema de Energía Fotovoltaica Integrada, y edificios resientes, entendiéndose por, construcciones que se adapten a las circunstancias del mundo actual.

Finalmente, durante la Conferencia de París sobre el Cambio Climático (COP 21) se adoptó el Acuerdo de París relacionado al Calentamiento Global (como el mencionado Protocolo de Kyoto), uno de sus objetivos era limitar en un 2% el aumento de calentamiento y para lograrlo se debía trabajar en evitar liberar  $CO_2$  a la atmósfera (Naciones Unidas, 2015a). Pese a esto, las temperaturas del planeta han superado ya esa barrera, algo que trajo consigo implicaciones muy grandes a nivel mundial y, en Colombia junto con el Fenómeno del Niño que vive el país en la actualidad está siendo obligatorio actuar por disminuir ese tercio de emisiones de  $CO_2$  producto de la construcción y vincular la energía solar a los edificios para invertir la matriz de energía que este tiene, cuya base principal es la energía obtenida por las hidroeléctricas.

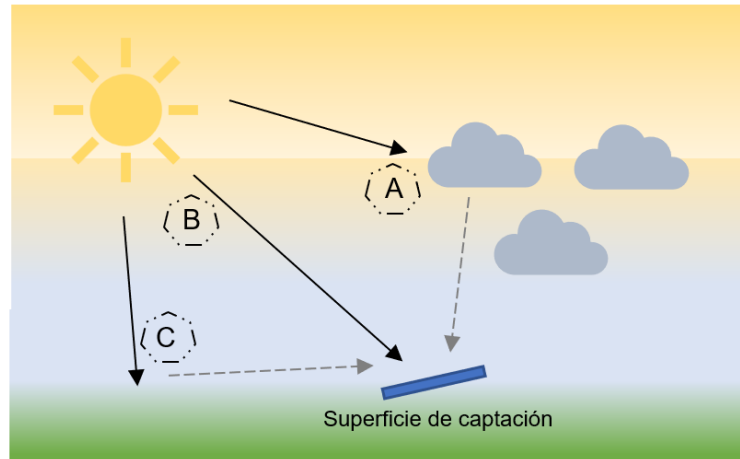
Además, la ley de conservación de la energía y la segunda ley de la termodinámica son los fundamentos teóricos que permiten comprender el funcionamiento de estos sistemas, la primera define que “la energía total no aumenta ni disminuye. La energía se puede transformar de una forma a otra, y transferir de un objeto a otro, pero la cantidad total permanece constante” (Giancoli, 2009) y, la segunda ley expone sobre la entropía: “la entropía del Universo aumenta en todos los procesos reales” (Serway & Jewett Jr., 2022), es decir, que al ocurrir procesos reales (irreversibles), existe una dispersión de la energía.

### **2.3 Marco conceptual**

Una vez más se habla de transición energética mundial, salvo que en este caso se trata específicamente de obtención de energía de fuentes no renovables a renovables. A continuación,

se exponen algunos conceptos relacionados a la energía solar, cuyo recurso es en esencia el sol, un recurso inagotable, capaz de generar energía a través de la luz que este produce; la luz es una onda electromagnética que emite energía, y esto no es más que radiación solar, sin embargo, el sol es intermitente lo que sugiere aprovechar la radiación mientras haya luz.

El planeta recibe radiación de tres maneras: en la figura 3 se aprecia la radiación solar directa (B), difusa (A) y reflejada (C) en una sistema o superficie de captación, que es el elemento que convierte la luz para producir electricidad. Un aspecto importante de la radiación difusa son las nubes, ellas actúan como barrera o superficie reflectante, ocasionando que menor cantidad de luz llegue a la superficie, debido a esto la nubosidad es un factor crítico al evaluar la productividad de un sistema en especial de los módulos monocristalinos y policristalino de Silicio, conocidas como las celdas solares de primera generación. Adicionalmente, han surgido celdas de segunda y tercera generación con características y propiedades en función de diferentes elementos o compuestos como el Selenio, Galio, Teluro de Cadmio e Indio para mejorar la productividad eléctrica, la productividad se entiende como la cantidad de [Wh], es decir, la unidad de energía generada.

**Figura 3***Tipos de radiación solar*

*Nota:* Representación de los tres tipos de radiación solar que aprovecha la superficie de captación para la generación de electricidad.

Para responder la pregunta de cómo un elemento electrónico es capaz de transformar ondas en energía es indispensable comprender el comportamiento de los electrones, que son partículas de un material con carga negativa, estos saltan o se mueven para dar lugar a los fotones, fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico, los fotones son las partículas que transportan la energía al material por medio de las ondas electromagnéticas.

Los materiales deben ser semiconductores y tienen el papel más importante específicamente en lo relacionado a la eficiencia energética, variable determinante sobre todo en la cantidad de paneles o módulos necesarios para suplir la demanda requerida, de otro modo, es un porcentaje que refleja la cantidad de luz solar que se convierte en electricidad al incidir en las celdas, cabe anotar que un panel o módulo es un arreglo de varias celdas solares, esto significa que cuanto mayor sea su eficiencia de las celdas mejor productividad tendrá; debido esto la

investigación se realiza en torno a incremento de la eficiencia de la celda, a mayor eficiencia y menos costo del material, el mercado de paneles o sistemas fotovoltaicos será rentable.

Los BIPV se componen de paneles o módulos de diferentes generaciones cuyo fin es generar electricidad in situ para solventar la demanda eléctrica de un edificio cuidando el medioambiente, la sociedad y buscando la rentabilidad económica para todas las partes, ubicados en techos, fachadas, ventanas, parapetos o barandillas o como elementos de sombreado. Es así como el diseño de estos sistemas requiere de múltiples variables como la eficiencia del módulo tipo, las condiciones climáticas (nubosidad, temperatura y la humedad) y la radiación solar y, para integrarlas con éxito se utilizan softwares de rendimiento energético, un ámbito que ha tomado fuerza con el diseño bioclimático y que ahora se vincula para el diseño energético del mismo proyecto. El análisis bioclimático busca adaptar el edificio en cuanto a espacios, materiales y orientación a las condiciones del medioambientales para disminuir cargas eléctricas generadas bajo dos conceptos principales como es la iluminación y ventilación natural.

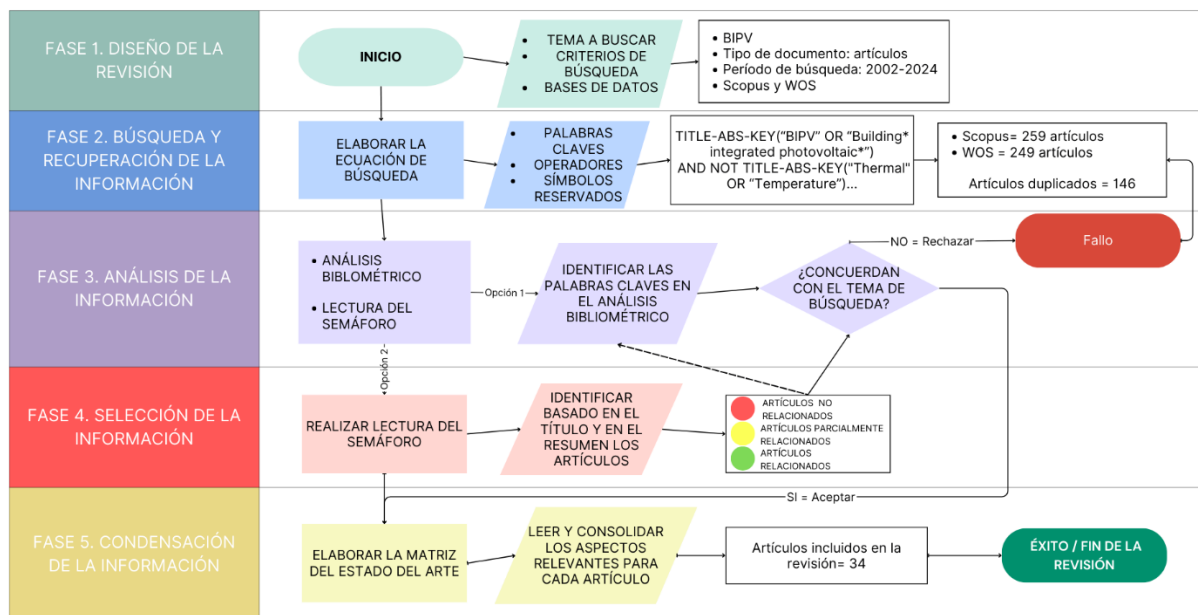
### **3. Marco metodológico**

La presente investigación, de tipo descriptiva y documental, se desarrolló bajo un diseño no experimental de carácter transversal. En el proceso investigativo se emplearon técnicas como el análisis bibliométrico, al ser uno de los métodos claves para medir objetivamente los indicadores de actividad y de impacto de las publicaciones académicas (Agarwal et al., 2016); según Escorcía Otálora y Poutou Piñales (2008) “la bibliometría se define como una subdisciplina de la cienciometría que proporciona información sobre los resultados del proceso investigador, el volumen, la evolución, la visibilidad y la estructura.” (p.237).

En la Figura 4 se presenta el procedimiento realizado para elaborar la revisión bibliográfica: fase (1) diseño de la revisión, fase (2) búsqueda y recuperación de la información, fase (3) análisis de la información, fase (4) selección de la información y fase (5) condensación de la información. De este diagrama se destaca la importancia de la fase 2, al convertirse en la etapa crítica de la revisión, es decir, a partir de allí se garantiza o no el éxito de la revisión, por lo anterior se propuso el análisis bibliométrico como el primer criterio de aceptación de los artículos en función de las palabras claves.

**Figura 4**

*Esquema metodológico de la revisión*



*Nota:* Esquema desarrollado para ejecutar la revisión bibliográfica.

### 3.1 Diseño de la revisión

Esta fase corresponde a la etapa inicial de la revisión, para abordar el tema de estudio: BIPV, se propusieron dos preguntas para dar solución en la investigación:

- ¿Cuál es el avance teórico de la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), 2002-2023?

- ¿Cuál es el avance experimental de la adaptación de Sistemas de Energía Eléctrica Fotovoltaica Integrada en Edificios (BIPV), 2002-2023?

Así mismo, se definieron los siguientes parámetros de delimitación: el tipo de documento seleccionado fue los artículos, debido al incremento de artículos científicos publicados como de la calidad de las investigaciones (Hechos y cifras : Publicaciones, 2017) y, el período de análisis: 2002 - 2024, se tomó como año de inicio el 2002 porque a partir de ese año se recuperó producción científica, además, no se excluyen en la búsqueda los artículos con fecha de publicación de año 2024 porque son artículos recibidos por las revistas al año 2023 y, se reconocen con información imprescindible para el cierre de la investigación. Otro aspecto importante es el área de la investigación, se excluyeron áreas de materiales, química, termodinámica y las demás no asociadas en esencia a ingeniería y energía. Y, hay que resaltar que se recuperó de la búsqueda únicamente aquella información con acceso abierto, convirtiendo lo anterior en una limitación de la revisión.

### **3.2 Búsqueda y recuperación de la información**

Las bases de datos utilizadas fueron: Scopus y Web of Science (WoS), bases académicas disponibles para la comunidad universitaria en la biblioteca en la página de la Universidad Industrial de Santander – UIS y, se completan logrando amplio alcance de información. (Universidad de Valladolid, 2022)

La ecuación de búsqueda se utiliza para expresar de la forma más exacta posible las necesidades de información del usuario (Codina, 2017), se elabora a partir de las guías oficiales de búsqueda de las bases de datos, donde se especifican los elementos que la componen: palabras claves, operadores y símbolos reservados.

La ecuación de búsqueda para recuperar la información fue: TITLE-ASB-KEY (“BIPV” OR “Building\* integrated photovoltaic\*” OR “PV”) AND NOT TITLE-ABS-KEY (“Thermal” OR “Temperature”), los términos de búsqueda estuvieron en el idioma inglés debido a que la investigación de BIPV se ha centrado en este idioma y por ende fue elegido idioma de búsqueda de los artículos. Partiendo de todos los criterios de búsqueda mencionados se recuperaron 259 artículos de Scopus y 249 artículos de WoS, de los cuales 146 eran artículos duplicados. La fecha de recuperación de la información fue el 14/04/2024.

### **3.3 Análisis de la información**

Por medio de análisis bibliométrico se identificaron las palabras clave y los principales temas de investigación en el campo de BIPV de los artículos recuperados, en Bibliometrix R (Massimo Aria and Corrado Cuccurullo, 2017), específicamente en su librería biblioshiny de manera individual se identificaron las principales palabras claves para los artículos de Scopus fueron: “*building integrated photovoltaic, solar power generation y photovoltaic system*”, mientras que de WoS fueron: “*performance, design, energy y bipv*”, además se unificaron las bases de datos. A través de VOSviewer (Nees Jan van Eck & Ludo Waltman, 2010), en la Figura 5, se observa las principales palabras resultado de agrupar los artículos recuperados: “building integrated photovoltaic, bipv y solar power generation) con ocurrencia de 107,103 y 78 respectivamente, con ello se aceptaron los 360 artículos para la investigación.

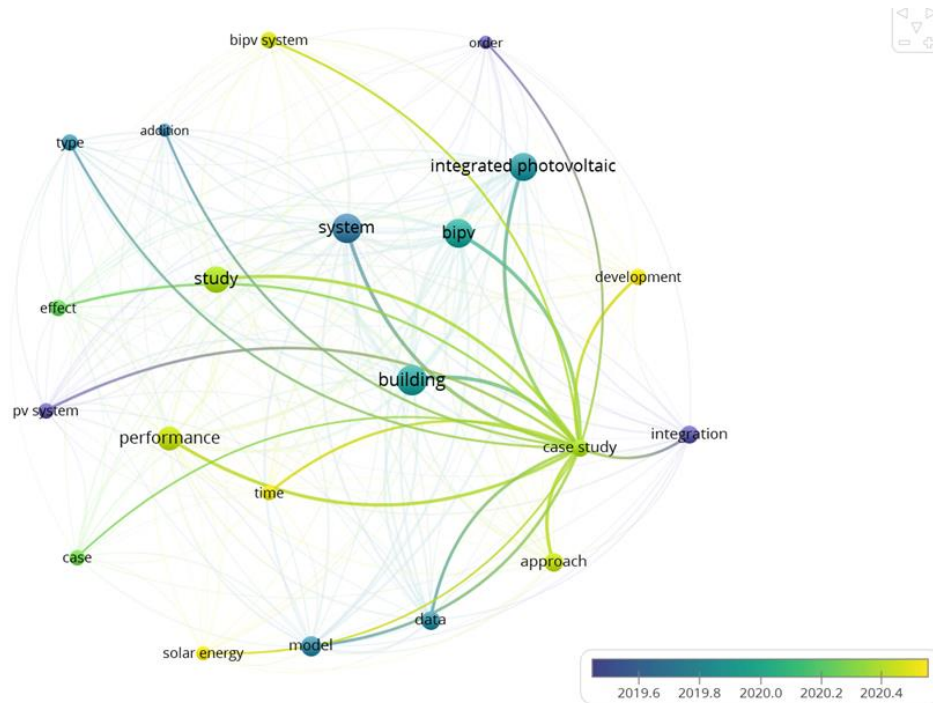




estudio de la implementación o adaptación de sistemas integrados de energía fotovoltaica en edificios son la base de información de la revisión.

### Figura 7

*Mapa de redes de términos en función del tiempo en escala de calor*



*Nota:* Elaboración a través de VOSviewer.

Finalmente, con el fin de consolidar la lectura de cada uno de los artículos y facilitar la redacción de la revisión, se empleó una matriz del estado de arte, siendo la herramienta de acceso directo a los artículos recuperados de las fases anteriores, de este modo se crearon categorías para identificar la información asociada a los objetivos de la investigación, focalizando los 34 artículos incluidos en la revisión.

## **4. Resultados**

### **4.1 Categorías de los tipos de BIPV y eficiencia de los módulos reportados**

Los resultados del primer objetivo de estudio relacionado con categorías de los tipos de sistemas y el cuarto donde se requiere tabular la eficiencia del o los módulos de la configuración se presentan en la tabla 1, cuya clasificación se basó en la capacidad de cumplir dos funciones o más como categoría alta, en categoría media los sistemas acoplados con una función y baja para los sistemas en techos que suelen ser implementados como sistemas BAPV debido a que las cubiertas no suelen ser reemplazadas por estos sistemas, excepto en el caso de tejas solares. Se aclaran dos casos particulares: los sistemas instalados en fachadas se toman como categoría alta cuando son acristalados o sustituyen muros, para los adaptados de forma externa se consideran en categoría baja; los dispositivos de sombreados que disminuyen cargas térmicas y generan electricidad se categorizan como nivel alto. Esta clasificación es visual en conjunto con la descripción reportada en el caso de estudio.

Elinwa et al. (2017) presentan un caso particular en el cual se integran sistemas en ventanas, barandas, dispositivos de sombreado y en el techo, la categoría se tomó como alta debido a que el 52% de la energía generada corresponde a las localizaciones diferentes al techo.

Martín-Chivelet et al. (2018) enseñan el detalle constructivo de una fachada ventilada, es decir, por medio de un elemento de anclaje a la fachada original hormigón que permite un mayor rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Este caso se clasifica como categoría baja al comportarse de manera similar a los sistemas BAPV.

**Tabla 1***Categorías de los BIPV y eficiencia de los módulos de la configuración*

Cita	Eficiencia [%]	Localización			Residencial	Comercial	Grado de integralidad		
		Techo	Fachada	Otros			Alto	Medio	Bajo
(De Santoli et al., 2010)	-			X	X		X		
(Saber et al., 2014)	13.7 pSi	X	X	X		X		X	
(Aste et al., 2016)	10.3 mSi	X				X			X
(Gašparović et al., 2016)	-	X	X		X	X			X*
(Xu et al., 2017)		X				X			X
(Elinwa et al., 2017)	12.0	X	X	X			X		
(Schregle et al., 2018)	-	X				X			X
(Martín-Chivelet et al., 2018)	-		X			X			X
(Deltenre et al., 2019)	13.5			X					X
(Najjar et al., 2019)	-	X	X						X*
(Lobaccaro et al., 2019)	22,17 y 16	X	X	X	X			X*	
(Al-Janahi et al., 2020)	-	X				X			X
(Corti et al., 2020)	-	X	X	X	X			X*	
(Ahmed et al., 2021)	-	X	X			X	X*		
(Bambara et al., 2021)	-	X			X				X

(Shi et al., 2021)	18.3 mSi 16.0 pSi	X				X		X
(Vahdatikhaki et al., 2022)	18.0		X			X		X*
(Choi et al., 2022)	-	X			X*			X
(Long et al., 2022)	-			X	X		X	
(Alomari et al., 2023)	-	X	X	X	X		X	
(Göksu & Zorer Gedik, 2023)	11.0			X		X	X	
(Jin et al., 2023)	19.1 pSi	X	X		X			X*
(Perwez et al., 2023)	20.4 mPERC	X	X			X		X*
(Ismaeil & Sobaih, 2023)	-		X			X		X*
(Ożadowicz & Walczyk, 2023)	9.76		X			X*		X
(Yang et al., 2023)	-		X			X		X*
(Barrutieta et al., 2023)	-	X	X			X		X
(Abouelaziz & Jouane, 2024)	-	X*				X		X*
(Chen et al., 2024)	-	X		X	X			X*

*Nota:* La localización de “otros” se refiere usualmente a dispositivos de sombrados o baranda o parapetos. El símbolo “\*” significa que el artículo no contaba con la suficiente descripción o forma de visualización para clasificar adecuadamente el tipo de sistema. Además, el símbolo “-” indica que el valor o dato no se reporta.

Los artículos como caso de estudio que no realizaron un análisis de adaptación de BIPV específicamente son: (K. W. Lee et al., 2021), (Xiang et al., 2021), (R. Lee et al., 2022) y (Attoye et al., 2022), por tanto, no se categorizan ni hay reporte de eficiencia del módulo fotovoltaico.

D'ambrosio et al. (2021) exponen fichas técnicas de los catálogos de productos y casos de estudio BIPV que desarrollaron. Además, menciona como en Italia el mayor porcentaje de aplicaciones lo tiene el sector administrativo asociado al comercial mientras que en toda Europa es en el sector residencial; para confirmar la distribución en los casos de estudio se discriminó según el sector al que pertenece el edificio que se evaluó y como resultado se obtuvo que el 27% corresponde al sector residencial, una cifra baja al considerar la indispensable participación de este sector para disminuir la demanda de electricidad de fuentes no renovables.

Como resultado de la categorización se encontró que el 45% de los BIPV se implementan cumpliendo dos funciones, en la mayoría de los casos como sustitución de muros y vidrio en ventanas o barandillas. A pesar de que la búsqueda se centró en sistemas BIPV no se alcanza de manera adecuada una verdadera integración dentro de la edificación y, esto se convierte en el reto que debe enfrentar el sector de la construcción al incluirlos como elementos de doble propósito sobre todo en ventanas, muros cortina, barandillas o parapetos, dispositivos de sombreado como estrategia tanto activa como pasiva y en el techo, esta última se debe incluir para alcanzar un mayor porcentaje de autoconsumo.

Como segundo aspecto relevante de la tabla 1 se enfoca en que únicamente el 38% de los casos de estudio presenta la eficiencia de los módulos dentro de los artículos publicados, como se ha mencionado anteriormente, cuanto mayor sea su eficiencia menor será el área de captación necesaria para producir la misma cantidad de energía porque el área disponible es desde siempre una limitación de implementación de los sistemas fotovoltaicos.

#### **4.2 Clasificación de variables**

Las variables que gobiernan el diseño de los BIPV se enfocan en cuatro ámbitos: el económico, ambiental, estético y técnicos, los parámetros técnicos se enmarcan en las

características propias de la edificación y del módulo en sí mismo. A partir de los casos presentados se desarrolló una clasificación según el grado de control logrado a través de softwares o el conocimiento tanto teórico como experimental de los profesionales que conforman el proyecto. En la tabla 2 se presenta la asignación de la categoría correspondiente para las 46 variables halladas en el conjunto de casos de estudio incluidos en la revisión.

La clasificación no discrimina si es una edificación nueva, es decir, se pueden controlar desde antes muchas de las variables o si es una remodelación, caso presentado en la mayoría de los casos reportados. Por ende, estas variables se dejaron en categoría media.

La variable BOS (Balance of System) corresponde al equilibrio de todo el sistema, es decir, de cada uno de los componentes que hacen parte de la instalación de los sistemas fotovoltaicos, por ejemplo, los inversores que son el elemento más crítico. Además, la variable regulaciones de construcción con BIPV hace énfasis en la importancia de conocer tanto los requisitos como las limitaciones al decidir integrar estos sistemas en el proyecto con el fin de seguir adecuadamente los códigos y normas en pro de la seguridad y confort de los ocupantes.

**Tabla 2**

*Clasificación de las variables de los BIPV*

ÁMBITO	VARIABLE	CATEGORÍA
TÉCNICO	Ubicación del edificio	<b>BAJO</b>
	Orientación del edificio	<b>ALTO</b>
	Geometría del edificio - Forma	<b>MEDIO</b>
	Ángulo de inclinación del módulo	<b>ALTO</b>
	Orientación del módulo	<b>ALTO</b>
	Sombra	<b>BAJO</b>
	Área disponible del edificio	<b>MEDIO</b>
	Tiempo de operación	<b>MEDIO</b>
	Período de análisis	<b>ALTO</b>
	Distancia de sombreado	<b>ALTO</b>

	Eficiencia del módulo	<b>MEDIO</b>
	Tipo de sistema	<b>ALTO</b>
	Cantidad de módulos	<b>ALTO</b>
	Localización del módulo	<b>ALTO</b>
	Tamaño del módulo	<b>MEDIO</b>
	PR (Performance Ratio)	<b>MEDIO</b>
	Radiación solar total alcanzada	<b>MEDIO</b>
	Índice y/o Rendimiento fotovoltaico	<b>MEDIO</b>
	Generación de electricidad	<b>MEDIO</b>
	Demanda de electricidad	<b>BAJO</b>
	R (Tasa de degradación del rendimiento)	<b>ALTO</b>
	BOS (Balance of System)	<b>ALTO</b>
	Factor de emisión de la red	<b>MEDIO</b>
	Construcción y puesta en marcha	<b>ALTO</b>
	Mano de Obra (MO) calificada	<b>ALTO</b>
	WWR (Window Wall Ratio)	<b>MEDIO</b>
	Relación de superficie construida (FAR)	<b>MEDIO</b>
	Regulaciones de construcción con BIPV	<b>MEDIO</b>
<b>AMBIENTAL</b>	Radiación solar	<b>BAJO</b>
	Temperatura exterior - ambiente	<b>BAJO</b>
	Nubosidad	<b>BAJO</b>
	Clima o condiciones ambientales	<b>BAJO</b>
	Toxicidad de los materiales	<b>BAJO</b>
	Reciclaje al final de la vida útil	<b>MEDIO</b>
<b>ECONÓMICO</b>	Inversión inicial	<b>ALTO</b>
	Costo de O&M	<b>MEDIO</b>
	Precio de la electricidad	<b>BAJO</b>
	Subsidio gubernamental	<b>BAJO</b>
	Comercio de emisiones de CO2	<b>BAJO</b>
	Tarifa de alimentación (TiR)	<b>BAJO</b>
	Tasa de descuento (r)	<b>BAJO</b>
	Tasa de inflación (g)	<b>BAJO</b>
	Presupuesto del proyecto	<b>ALTO</b>
<b>ESTÉTICO</b>	Diseño bioclimático	<b>ALTO</b>
	Luminancia reflejada máxima	<b>ALTO</b>
	Vinculación a la planificación urbana	<b>ALTO</b>

*Nota:* Esta tabla presentada cada una de las 46 variables para lograr con éxito la adaptación de los BIPV.

Las variables de toxicidad y reciclaje al final de la vida útil del sistema, aunque no se reportan en los casos de estudio se incluyen con el fin de examinar los BIPV según la evaluación de la cuna a la tumba (*from cradle to grave*), cuyo propósito es que los edificios sean sostenibles, por ello se debe garantizar que de inicio a fin los materiales sean ubicados adecuadamente para cuidar tanto la salud de la población como el equilibrio del suelo.

Entre las variables más influyentes se encuentran el efecto de la sombra que está en categoría media y la orientación de los módulos fotovoltaicos en categoría alta, según Vahdatikhaki et al. (2022) al controlar adecuadamente estas dos variables se logra un 47% de mejora en el rendimiento de los módulos y con ello la generación de electricidad lo que a su vez disminuye el tiempo de retorno de inversión otorgando viabilidad al proyecto.

Según el nivel de control alcanzado en el diseño de estos sistemas se observó que el 30% de las variables tiene nivel de control bajo, estas se encuentran en los ámbitos ambientales y económicos, de estos ámbitos el más sencillo de revisar es el económico cuyo promotor es el gobierno. Las variables con nivel de control medio corresponden al 33% y el 37% de las variables se logra un nivel de control alto. Para mejorar el nivel de control de las variables técnicas cuyo nivel de control es medio se debe diseñar el edificio bioclimáticamente, con lo anterior y sumando la integración de políticas públicas por parte del gobierno e investigación por parte de las universidades para resolver detalles o aspectos constructivos al hacer un manual se estimaría cerca de un 80% de control para la implementación de estos sistemas.

### **4.3 Clasificación de los softwares de modelación**

La modelación 3D bajo la metodología BIM en los proyectos de construcción es la etapa más importante para la etapa de factibilidad del proyecto y para ello es indispensable contar con los datos y con las mejores herramientas de trabajo colaborativo, su propósito es optimizar procesos para eliminar errores en la etapa de construcción logrando disminuir el tiempo y favoreciendo la calidad y rentabilidad.

El objetivo de clasificar las herramientas es conocer si es posible modelar los BIPV en el diseño arquitectónico y exportarlos o trabajar de manera colaborativa con los diseños estructurales y el diseño MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*), el diseño de las instalaciones y redes eléctricas es el que va a tener mayor implicación debido a la localización de estos sistemas. En general, el proyecto se evaluará correctamente sí y solo sí se tienen en cuenta el o los accesos para el mantenimiento de los BIPV, el proceso constructivo de los componentes que reemplazan la envolvente del edificio que a su vez afectan las cargas a resistir del sistema estructural y como se mencionó, la distribución de las redes eléctricas en el proyecto. En la tabla 3 se relaciona la clasificación resultante de la investigación en función de si es posible o no trabajar bajo esta metodología, específicamente si permite la exportación de modelos en formato IFC y/o gbXML, respondiendo a la Estrategia Nacional BIM 2020-2026.

**Tabla 3***Clasificación de softwares para modelar los BIPV*

SOFTWARE	Propósito				Trabaja bajo la metodología BIM	Cita
	Modelación 3D	Generación eléctrica	Dimensionamiento fotovoltaico	Otro		
<u>AutoCAD</u>			x		NO	(Alomari et al., 2023)
<u>BIMSOLAR</u>		x	x		SI	(Abouelaziz & Jouane, 2024)
<u>CityGML</u>	x				NO	(Vahdatikhaki et al., 2022)
<u>DesingBuilder</u>				x	SI	(Göksu & Zorer Gedik, 2023)
<u>DIALux</u>				x	SI	(Ahmed et al., 2021)
<u>EASYSOLAR</u>		x	x		NO	(Abouelaziz & Jouane, 2024)
<u>Ecotect</u>		x			NO	(Shi et al., 2021)
<u>Energy Plus</u>		x			NO	(Saber et al., 2014) (Perwez et al., 2023)
<u>FreeCAD</u>		x			NO	(Yang et al., 2023)
<u>Grasshopper</u>		x			NO	(Long et al., 2022) (Jin et al., 2023)
<u>H2RES</u>				x	NO	(Gašparović et al., 2016)
<u>HOMER</u>			x		NO	(Deltenre et al., 2019)
<u>Load Profile Generator</u>		x			NO	(Corti et al., 2020)
<u>PV*SOL</u>		x			NO	(Najjar et al., 2019)

<u>PVGIS</u>	x			NO	(Abouelaziz & Jouane, 2024)
<u>PVsyst</u>	x			NO	(Göksu & Zorer Gedik, 2023) (Ismaeil & Sobaih, 2023)
<u>Radiance</u>			x	NO	(Xu et al., 2017) (Schregle et al., 2018)
<u>Revit Autodesk</u>	x	x	x	SI	(Yang et al., 2023) (Vahdatikhaki et al., 2022) (Alomari et al., 2023)
<u>Rhinoceros</u>	x			NO	(Yang et al., 2023) (Jin et al., 2023) (Choi et al., 2022) (Schregle et al., 2018)
<u>SketchUp</u>	x			SI	(Saber et al., 2014)
<u>BIM 360</u>	x			SI	(Elinwa et al., 2017)
<u>Solar GIS</u>			x	NO	(Alomari et al., 2023)
<u>Solar Pro</u>	x			NO	(K. W. Lee et al., 2021)
<u>TRINSYS</u>	x			NO	(Saber et al., 2014) (Bambara et al., 2021)

*Nota:* Se relaciona el propósito del programa reportado en la modelación de los casos de estudio.

Para determinar o evaluar algunas de las variables mencionadas en el anterior apartado como: la demanda eléctrica, la generación eléctrica y la radiación solar de los BIPV se requieren softwares especializados; por ello se resaltan las metodologías utilizadas por Jin et al. (2023), Long et al. (2022), Choi et al. (2022) y Lobaccaro et al. (2019) al unificar la mayoría de variables; quienes emplearon Rhinoceros para modelación 3D y su complemento Grasshopper (GH) que alberga herramientas como Ladybug y/o Honeybee para simular la potencia solar al ser herramientas de modelado energético, de hecho Honeybee nace de Energy Plus, el software más potente de modelado energético que también fue empleado en las metodologías reportadas. Sin

embargo, Rhinoceros usualmente es el primer programa en el ciclo de evaluación y no permite trabajar bajo la metodología BIM.

Revit es por excelencia el software más utilizado en el trabajo colaborativo y el más versátil a la hora de trabajar con otros softwares por el tipo de formato que facilita exportar, como es el caso del formato “gbXML” que es compatible con Energy Plus y con formato “DWG” afín a Rhinoceros o por medio de Rhino.Inside para facilitar su interoperabilidad, lo cual significa que al utilizar Revit como programa fuente de la geometría del edificio o dentro de la metodología mencionada permitiría acoplar el proyecto a la metodología BIM.

Un caso de estudio en particular presenta el método BIM-AITIZATION desarrollado por Abouelaziz & Jouane (2024) es un trabajo conjunto de la inteligencia artificial (IA) y los principios de automatización, este método se enfoca en predecir la generación de electricidad de manera más efectiva frente a BIMSOLAR y PVGIS con ayuda de la red neuronal artificial (ANN) y la red neuronal convolucional (CNN), tecnologías que aportan a gestión más sostenible de los edificios.

Bajo la clasificación se obtuvo que el 33% de las herramientas computacionales utilizadas en los casos de estudio trabajan bajo la metodología BIM, estas son: Revit, SketchUp, BIMSOLAR, Software BIM, DesingBuilder y DIALux, por tanto, estos deben ser los programas que se deben integrar en la metodología de los diseños arquitectónico, estructural y energético de los proyectos verticales.

#### **4.4 Ventajas y desventajas de la implementación de BIPV**

La implementación de estos los BIPV se ha evaluado en diferentes casos de estudio, en esta investigación se apreciaron las siguientes ventajas y desventajas durante la etapa de evaluación antes de ser instalados o después de un período de operación.

Las ventajas surgidas de los casos de estudio incluidos fueron:

- El comportamiento del perfil de demanda energética del sector comercial coincide con la capacidad de generación de los BIPV, debido a que se realiza en las horas de sol, por tanto, el consumo se hace directo sin recurrir a un sistema off grid (Barrutieta et al., 2023).
- La ventilación de los sistemas PV instalados en los techos permite aumentar el rendimiento de los módulos al disminuir la temperatura del módulo ante las temperaturas ambientales extremas, lo cual significa que no hacen parte de los BIPV sino de los BAPV (Ożadowicz & Walczyk, 2023).
- Los sistemas BIPV instalados en fachadas, en ventanas o como dispositivos de sombra le permiten al edificio cumplir el 100% del autoconsumo, reconociendo la menor disponibilidad de radiación solar, por ende, menor generación eléctrica (Barrutieta et al., 2023).
- Los BIPV implementados bajo metodología BIM se logran acaparar en el presupuesto global del proyecto (Ahmed et al., 2021).
- Disponer de los sistemas BIPV en los edificios permite subir de categoría en la actual certificación como edificio sostenible (Ismaeil & Sobaih, 2023).

En el marco de la modelación de los sistemas BIPV en edificios surgieron desventajas como:

- Los modelos del sector urbano de estudio aún presentan dificultades debido a los reflejos de superficies lo que impide representar con exactitud la geometría de cada uno de los componentes (Abouelaziz & Jouane, 2024).

- Las condiciones climáticas propias del lugar dependen en gran medida de la latitud, por consiguiente, el diseño debe ser personalizado y específico, razón por la cual se deben realizar estudios locales de radiación solar (Göksu & Zorer Gedik, 2023).
- Determinar con el menor error la generación de energía fotovoltaica enfrenta una crisis al tener softwares que sobreestiman hasta en un 50% (Abouelaziz & Jouane, 2024).
- El perfil del sector residencial presenta unos picos de consumo que no coinciden con el perfil de generación, por tanto, requiere de baterías dentro de la evaluación de los sistemas si se busca el autoconsumo y, convierte los edificios en puntos vulnerables de rentabilidad (Barrutieta et al., 2023).
- La toxicidad de los materiales de fabricación de los sistemas fotovoltaicos es un riesgo del cual no se es consciente, una brecha que se minimiza con el reciclaje y disposición adecuada al final de la vida útil.
- Las grietas de los módulos fotovoltaicos no son vivibles a escala humana y puede provocar incendios (K. W. Lee et al., 2021), por tanto, la instalación y el monitoreo de las condiciones reales de los sistemas disminuye el riesgo de incendios manteniendo el rendimiento.

## 5. Conclusiones

Un proyecto vertical tendrá eficiencia energética si se diseña arquitectónicamente bajo el diseño bioclimático y energéticamente su matriz tiene como fuentes los recursos renovables, garantizando seguridad, confort y adaptabilidad ante las situaciones ambientales.

Los BIPV aún no alcanzan de manera adecuada una verdadera integración dentro de la edificación, esto se convierte en el reto que debe enfrentar el sector de la construcción al incluirlos

como elementos de doble propósito sobre todo en ventanas, muros cortina, barandillas o parapetos, en el techo y en dispositivos de sombreado como estrategia activa o pasiva.

Para mejorar el nivel de control de las variables técnicas, cuyo nivel de control es medio, se debe diseñar el edificio bioclimáticamente, con lo mencionado anteriormente y considerando la integración de políticas públicas por parte del gobierno, así como la investigación realizada por las universidades para abordar detalles o aspectos constructivos en la elaboración de manuales, se estima que se podría alcanzar un control alto cercano al 80% en la implementación de estos sistemas.

Los softwares Revit, SketchUp, BIMSOLAR, Software BIM, DesingBuilder y DIALux son especialmente adecuados para centrar la información de los arquitectónico, estructural y energético de los proyectos verticales. El éxito de implementación de los BIPV está en manos del diseñador al modelar, evaluar y analizar el rendimiento del tipo de sistema elegido en el contexto local.

Los edificios residenciales deben apostarle a incluir BIPV y consolidar comunidades autosostenibles, registrando sus aciertos y desaciertos, para crear hojas de ruta más claras y prácticas, con el propósito de minimizar el impacto ambiental y ante todo garantizar seguridad energética para sus ocupantes.

## **6. Recomendaciones**

Para las próximas investigaciones sobre los BIPV se recomienda:

- Revisar la modelación con Revit de un caso de estudio debido a la importancia de tener el vecindario o los edificios cercanos en el impacto de sombra que estos generan en los BIPV implementados en el proyecto vertical de estudio.

- Evaluar una serie de softwares que logren diseñar un proyecto vertical con diseños arquitectónico, estructural y energético, es decir, enmarcado totalmente en la metodología BIM.
- Encontrar soluciones prácticas para el mantenimiento de los BIPV con restricciones en el uso de agua,
- Crear mapas solares locales como herramienta informativa con el propósito de reconocer fácilmente el recurso solar disponible del edificio o zona de ubicación.
- Diseñar mayor cantidad de edificios residenciales como casos de estudio de implementación de los BIPV para facilitar la creación de manuales constructivos y de adaptación.

### Referencias Bibliográficas

- Abouelaziz, I., & Jouane, Y. (2024). Photogrammetry and deep learning for energy production prediction and building-integrated photovoltaics decarbonization. *Building Simulation*, 17(2), 189–205. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1089-y>
- Agarwal, A., Durairajanayagam, D., Tatagari, S., Esteves, S. C., Harlev, A., Henkel, R., Roychoudhury, S., Homa, S., Puchalt, N. G., Ramasamy, R., Majzoub, A., Ly, K. D., Tvrda, E., Assidi, M., Kesari, K., Sharma, R., Banihani, S., Ko, E., Abu-Elmagd, M., . . . Bashiri, A. (2016). Bibliometrics: tracking research impact by selecting the appropriate metrics. *Asian Journal of Andrology*, 18(2), 296-309. <https://10.4103/1008-682X.171582>
- Ahmed, M. O., Madkor, A. K., Makeen, P., Betelmal, S. E. I., Hassan, M. M., Abdelsamee, M. M., Ayman, A., El-Adly, M. H., Nessim, A., & Abdullatif, S. O. (2021). Optimizing the artificial lighting in a smart and green glass building-integrated semi-transparent photovoltaics: A multifaceted case study in Egypt. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 17, 118–127. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.12>
- Akbarinejad, T., Machlein, E., Bertolin, C., Lobaccaro, G., & Salaj, A. T. (2023). Enhancing the deployment of solar energy in Norwegian high-sensitive built environments: challenges and barriers—a scoping review. *Frontiers Media SA*. <https://10.3389/fbuil.2023.1285127>
- Al-Janahi, S. A., Ellabban, O., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Technoeconomic feasibility study of grid-connected building-integrated photovoltaics system for clean electrification: A case study of Doha metro. *Energy Reports*, 6, 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.192>

- Alomari, K., AlTal, B., & Ayadi, O. (2023). The Efficiency of Using of Solar Cells on the Multistory Residential Buildings in Jordan (Housing Building as a Case Study). *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(6), 1833–1839. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180618>
- Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2016). The first Italian BIPV project: Case study and long-term performance analysis. *Solar Energy*, 134, 340–352. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.010>
- Attoye, D. E., Aoul, K. A. T., & Hassan, A. (2022). Mandatory Policy, Innovations and the Renewable Energy Debate: A Case Study on Building Integrated Photovoltaics. *Buildings*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/buildings12070931>
- Attoye, D. E., Tabet Aoul, K. A., & Hassan, A. (2017). A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials. MDPI AG. <https://10.3390/su9122287>
- Azadian, F., & Radzi, M. A. M. (2013). A general approach toward building integrated photovoltaic systems and its implementation barriers: A review. Elsevier BV. <https://10.1016/j.rser.2013.01.056>
- Bambara, J., Athienitis, A. K., & Eicker, U. (2021). Decarbonizing local mobility and greenhouse agriculture through residential building energy upgrades: A case study for Québec. *Energies*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/en14206820>
- Barrutieta, X., Kolbasnikova, A., Irulegi, O., & Hernández, R. (2023). Decision-making framework for positive energy building design through key performance indicators relating geometry, localization, energy and PV system integration. *Energy and Buildings*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113442>

- Basher, M. K., Nur-E-Alam, M., Rahman, M. M., Alameh, K., & Hinckley, S. (2023). Aesthetically Appealing Building Integrated Photovoltaic Systems for Net-Zero Energy Buildings. Current Status, Challenges, and Future Developments—A Review. In *Buildings* (Vol. 13, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings13040863>
- Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., Essah, E., Oliveira, A. C., Del Caño, T., Rico, E., Lechón, J. L., Andrade, L., Mendes, A., & Atlı, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. Elsevier BV. <https://10.1016/j.jestch.2017.01.009>
- Chen, Y., Li, W., & Wang, X. (2024). An Investigation into the Risk Assessment of Building-Integrated Photovoltaic Residential Project Development Utilizing the DEMATEL-ANP Methodology: A Chinese Case Study. *Buildings*, 14(3), 623. <https://doi.org/10.3390/buildings14030623>
- Choi, Y., Kobashi, T., Yamagata, Y., & Murayama, A. (2022). Assessment of Waterfront Office Redevelopment Plan on Optimal Building Arrangements with Rooftop Photovoltaics: A Case Study for Shinagawa, Tokyo. *Energies*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15030883>
- Codina, L. (2017, -10-28T07:30:32+00:00). Ecuaciones de búsqueda: qué son y cómo se utilizan en bases de datos académicas ·1: operadores booleanos. Lluís Codina. Retrieved Mar 26, 2024, from <https://www.lluiscodina.com/ecuaciones-de-busqueda-bases-datos-operadores-booleanos/>
- Corti, P., Capannolo, L., Bonomo, P., Berardinis, P. De, & Frontini, F. (2020). Comparative Analysis of BIPV Solutions to Define Energy and Cost-Effectiveness in a Case Study. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153827>

- D'ambrosio, V., Losasso, M., & Tersigni, E. (2021). Towards the energy transition of the building stock with BIPV: Innovations, gaps and potential steps for a widespread use of multifunctional PV components in the building envelope. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212609>
- De Santoli, L., Fraticelli, F., & Fornari, F. (2010). Planning the integration of new technologies for sustainability: Case study of a school building's restoration project in Rome. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 128, 423–434. <https://doi.org/10.2495/ARC100361>
- Deltenre, Q., De Troyer, T., & Runacres, M. C. (2019). Techno-economic comparison of rooftop-mounted PVs and small wind turbines: A case study for Brussels. *IET Renewable Power Generation*, 13(16), 3142–3150. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0032>
- Elinwa, U. K., Radmehr, M., & Ogbaba, J. E. (2017). Alternative energy solutions using BIPV in apartment buildings of developing countries: A case study of North Cyprus. *Sustainability (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/su9081414>
- Escorcía Otálora, T. A., & Poutou Piñales, R. A. (2008). Análisis bibliométrico de los artículos originales publicados en la revista *Universitas Scientiarum* (1987-2007)
- Gašparović, G., Kilkis, S., Krajačić, G., & Duić, N. (2016). Campus and community micro grids integration of building integrated photovoltaic renewable energy sources: Case study of Split 3 area, Croatia - Part A. *Thermal Science*, 20(4), 1135–1145. <https://doi.org/10.2298/TSCI151203080G>
- Ghosh, A., Jiri, J., & Kleme. (2020). Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review. Elsevier BV. <https://10.1016/j.jclepro.2020.123343>

- Göksu, A. U., & Zorer Gedik, G. (2023). The effect of CIS BIPV as a shading device on building life cycle energy performance. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 575–593. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2217943>
- Hechos y cifras: Publicaciones. (2017, -07-05T09:56:47+00:00). Hechos y cifras: Publicaciones. UNESCO. Retrieved Mar 27, 2024, from <https://es.unesco.org/node/275053>.
- Hongxing, Y., & Yutong, L. (2007). Potential of building-integrated photovoltaic applications
- Ismaeil, E. M. H., & Sobaih, A. E. E. (2023). Evaluating BIPV Façades in a Building Envelope in Hot Districts for Enhancing Sustainable Ranking: A Saudi Arabian Perspective. *Buildings*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/buildings13051110>
- Jakica, N. (2017). State-of-the-art review of solar design tools and methods for assessing daylighting and solar potential for building-integrated photovoltaics. Elsevier BV. <https://10.1016/j.rser.2017.05.080>
- Jelle, B. P. (2015). Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways. MDPI AG. <https://10.3390/en9010021>
- Jin, S., Zhang, H., Huang, X., Yan, J., Yu, H., Gao, N., Jia, X., & Wang, Z. (2023). Solar Energy Utilization Potential in Urban Residential Blocks: A Case Study of Wuhan, China. *Sustainability*, 15(22), 15988. <https://doi.org/10.3390/su152215988>
- Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2020). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). Elsevier BV. <https://10.1016/j.enbuild.2020.110381>
- Lee, K. W., Lee, H. M., Lee, R. Da, Kim, D. S., & Yoon, J. H. (2021). The impact of cracks in BIPV modules on power outputs: A case study based on measured and simulated data. *Energies*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/en14040836>

- Lee, R., Lee, H., Kim, D., & Yoon, J. (2022). Performance evaluation of flexible CIGS modules based on operational data under outdoor conditions. *Energy Science and Engineering*, 10(2), 292–307. <https://doi.org/10.1002/ese3.1040>
- Li, Y., Mao, Y., Wang, W., & Wu, N. (2023). Net-Zero Energy Consumption Building in China: An Overview of Building-Integrated Photovoltaic Case and Initiative toward Sustainable Future Development. MDPI AG. <https://10.3390/buildings13082024>
- Liu, Z., Guo, Z., Chen, Q., Song, C., Shang, W., Yuan, M., & Zhang, H. (2022). A review of data-driven smart building-integrated photovoltaic systems: Challenges and objectives. Elsevier BV. <https://10.1016/j.energy.2022.126082>
- Lobaccaro, G., Lisowska, M. M., Saretta, E., Bonomo, P., & Frontini, F. (2019). A methodological analysis approach to assess solar energy potential at the neighborhood scale. *Energies*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/en12183554>
- Long, W., Chen, X., Ma, Q., Wei, X., & Xi, Q. (2022). An Evaluation of the PV Integrated Dynamic Overhangs Based on Parametric Performance Design Method: A Case Study of a Student Apartment in China. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137808>
- López, L. V. (2021). *Sustentabilidad y desarrollo sustentable: origen, precisiones conceptuales y metodología operativa (3a ed.)*. México: Trillas, reimp.2022.
- Mangherini, G., Diolaiti, V., Bernardoni, P., Andreoli, A., & Vincenzi, D. (2023). Review of Façade Photovoltaic Solutions for Less Energy-Hungry Buildings. MDPI AG. <https://10.3390/en16196901>

- Martín-Chivelet, N., Gutiérrez, J. C., Alonso-Abella, M., Chenlo, F., & Cuenca, J. (2018). Building retrofit with photovoltaics: Construction and performance of a BIPV ventilated façade. *Energies*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/en11071719>
- Massimo Aria and Corrado Cuccurullo. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Naciones Unidas. (1973). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. (). Nueva York: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n73/039/07/pdf/n7303907.pdf?token=3Q7eSkRtHZEWKktNB8&fe=true>
- Naciones Unidas. (1987). Informe de la Comisión Brundtland sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (). [https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/CMMA-D-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMA-D-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- Naciones Unidas. (1992). Programa 21 [Abstract]. [https://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/a21\\_summary\\_spanish.pdf](https://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/a21_summary_spanish.pdf)
- Naciones Unidas. (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (). <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Naciones Unidas. (2002). Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. (). Johannesburgo (Sudáfrica): <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n02/636/96/pdf/n0263696.pdf?token=4gH4ijSbPIcT4hZRwF&fe=true>

- Naciones Unidas. (2015a). Paris Agreement Spanish. ().  
[https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish.pdf)
- Naciones Unidas. (2015b). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. ().  
<https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n15/291/93/pdf/n1529193.pdf?token=OwM100fZYdo6MzAFAm&fe=true>
- Najjar, M. K., Qualharini, E. L., Hammad, A. W. A., Boer, D., & Haddad, A. (2019). Framework for a systematic parametric analysis to maximize energy output of PV modules using an experimental design. *Sustainability* (Switzerland), 11(10).  
<https://doi.org/10.3390/su11102992>
- Nees Jan van Eck, & Ludo Waltman. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- NREL. (2023, Best Research-Cell Efficiency. Retrieved Apr 28, 2024, from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- Osseweijer, F. J. W., Van Den Hurk, L. B. P., Teunissen, E. J. H. M., & Van Sark, Wilfried G J H M. (2018). A comparative review of building integrated photovoltaics ecosystems in selected European countries. Elsevier BV. <https://10.1016/j.rser.2018.03.001>
- Ożadowicz, A., & Walczyk, G. (2023). Energy Performance and Control Strategy for Dynamic Façade with Perovskite PV Panels—Technical Analysis and Case Study. *Energies*, 16(9).  
<https://doi.org/10.3390/en16093793>

- Perwez, U., Shono, K., Yamaguchi, Y., & Shimoda, Y. (2023). Multi-scale UBEM-BIPV coupled approach for the assessment of carbon neutrality of commercial building stock. *Energy and Buildings*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113086>
- Reddy, V. J., Hariram, N. P., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Pathway to Sustainability: An Overview of Renewable Energy Integration in Building Systems. MDPI AG. <https://10.3390/su16020638>
- Saber, E. M., Lee, S. E., Manthapuri, S., Yi, W., & Deb, C. (2014). PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings. *Energy*, 71, 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.115>
- Sánchez-Pantoja, N., Vidal, R., & Pastor, M. C. (2018). Aesthetic impact of solar energy systems. Elsevier BV. <https://10.1016/j.rser.2018.09.021>
- Schregle, R., Renken, C., & Wittkopf, S. (2018). Spatio-temporal visualisation of reflections from building integrated photovoltaics. *Buildings*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/buildings8080101>
- Semarnat. (s.f.). Valoración de Activos Ambientales en el supuesto caso de explotación de gas shale en los 24 municipios pertenecientes a la Cuenca de Burgos del estado de Coahuila. <https://docplayer.es/11965600-Valoracion-de-activos-ambientales.html>
- Serway, R. A., & Jewett Jr., J. W. (2022). Introducción a la Física II. Oscilaciones y ondas mecánicas, Termodinámica, Luz y óptica, Física moderna (1 ed.). Cengage. <https://www-ebooks7-24-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/stage.aspx?il=&pg=&ed=>
- Shi, K., Li, C., & Koo, C. (2021). A techno-economic feasibility analysis of mono-si and poly-si photovoltaic systems in the rooftop area of commercial building under the feed-in tariff scheme. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094709>

United Nations. (2012). Report of the United Nations Conference on Sustainable Development. ().

Rio de Janeiro, Brazil:

<https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n12/461/64/pdf/n1246164.pdf?token=YG5prcOlIK6K8qScds&fe=true>

Universidad de Valladolid. (2022, -06-13T08:48:30+00:00). Web of Science y Scopus, las fuentes de los rankings universitarios | Rank UVA. Retrieved Mar 26, 2024, from <https://rank.uva.es/2022/06/13/web-of-science-y-scopus-las-fuentes-de-los-rankings-universitarios/>.

Vahdatikhaki, F., Salimzadeh, N., & Hammad, A. (2022). Optimization of PV modules layout on high-rise building skins using a BIM-based generative design approach. *Energy and Buildings*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111787>

Xiang, C., Matusiak, B. S., Røyset, A., & Kolås, T. (2021). Pixelization approach for façade integrated coloured photovoltaics-with architectural proposals in city context of Trondheim, Norway. *Solar Energy*, 224, 1222–1246. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.079>

Xu, R., Wittkopf, S., & Roeske, C. (2017). Quantitative evaluation of BIPV visual impact in building retrofits using saliency models. *Energies*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/en10050668>

Yang, R. J., Imalka, S. T., Wijeratne, W. M. P., Amarasinghe, G., Weerasinghe, N., Jayakumari, S. D. S., Zhao, H., Wang, Z., Gunarathna, C., Perrie, J., Liu, C., & Wakefield, R. (2023). Digitalizing building integrated photovoltaic (BIPV) conceptual design: A framework and an example platform. *Building and Environment*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110675>

- Zarate-Perez, E., Grados, J., Rubiños, S., Grados-Espinoza, H., & Astocondor-Villar, J. (2023). Building-integrated photovoltaic (BIPV) systems: A science mapping approach. American Institute of Mathematical Sciences (AIMS). <https://10.3934/energy.2023052>
- Zhong, B., Hei, Y., Jiao, L., Luo, H., & Tang, J. (2019). Technology Frontiers of Building-integrated Photovoltaics (BIPV): A Patent Co-citation Analysis. Oxford University Press (OUP). <https://10.1093/ijlct/ctz068>
- Zhou, Y., & Herr, C. M. (2023). A Review of Advanced Façade System Technologies to Support Net-Zero Carbon High-Rise Building Design in Subtropical China. MDPI AG. <https://10.3390/su15042913>