



**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL DESARROLLO E
IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA INTEGRADA A EDIFICIOS (BIPV) PARA
EL AVANCE DE LAS CIUDADES AMIGABLES CON EL
MEDIO AMBIENTE**

Presentado para obtener el título de:

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Jorge Luis Acevedo Aponte

Dirección:

Director: PhD, MSc Luis Fernando Mulcue Nieto

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

DEDICATORIA

Al dador de la vida, que permite que el sol salga sobre justos e injustos, a Aquél del cual el firmamento da testimonio de su gloria.

Jesucristo.

A mi esposa Dani que siempre ha sido lo mejor y ha estado ahí ayudándome

Para mi familia que siempre están luchando en la fe.

Gracia, sobre gracia.

Juan 3:16
Apocalipsis 22:12

AGRADECIMIENTOS

Al Señor Jesús por proveer todas las cosas.

A la Universidad del Rosario, al Doctor Luis Fernando Mulcúe y a la empresa NCL
Colombia por las puertas abiertas.

RESUMEN

Dentro del desarrollo continuo que presentan los diferentes sectores de consumo energético mundial, tales como el residencial, industrial y comercial, el gasto de energía aumenta progresivamente. Junto al gran crecimiento en la demanda energética que sostienen los países del mundo, especialmente aquellos que conforman las regiones más pobladas e industrialmente desarrolladas del planeta, se ha vuelto necesario y casi indispensable la eficiencia energética, ser amigable ambientalmente y realizar la implementación de las energías renovables. Su desarrollo es una constante necesaria para mantener el equilibrio entre oferta y demanda energética, la reducción de emisiones de CO₂, y el crecimiento industrial y económico que atañe a nuestra sociedad en sus diferentes grados de riqueza y desarrollo.

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes no convencionales que más se han desarrollado e implementado en el mundo, sin embargo, para algunos usuarios el no contar con un espacio adecuado o suficientemente grande para instalar los paneles o generadores solares se les ha vuelto un problema lo cual lleva incluso a desestimar la inversión de algunos proyectos.

Debido a esto, se cree pertinente y necesario, presentar una solución a este problema por medio de la energía solar fotovoltaica integrada a los edificios (BIPV, Building Integrated Photovoltaic). Para mostrar otra alternativa técnica, económicamente viable y más estética para los usuarios interesados en implementar energía solar en sus predios y a su vez aportar al avance de las ciudades amigables con el medio ambiente, donde el rendimiento energético sea eficiente y se puedan tener edificios de emisión cero.

El presente trabajo de grado de maestría busca explorar las diferentes tecnologías disponibles y en desarrollo de BIPV con el fin de analizar desde un punto de vista técnico-económico estos sistemas, para promover y avanzar en este tipo de soluciones solares; beneficiando a la sociedad en el conocimiento de nuevas tecnologías que aportan no solo a la generación eléctrica solar, sino también a la arquitectura ambientalmente sostenible.

ABSTRACT

With the continuous development of the different sectors of world energy consumption, such as residential, industrial and commercial, together with the great growth in energy demand of the countries of the world, especially those that conform the most populated and industrially developed regions of the planet, it has become necessary and almost indispensable that energy efficiency, environmental sustainability and the implementation of renewable energies are a necessary constant to maintain the balance between energy supply and demand and in turn between CO₂ emissions and the industrial and economic growth that concerns our society in its different degrees of wealth or development.

Photovoltaic solar energy is one of the most developed and implemented non-conventional sources in the world, however, for some users, not having an adequate or large enough space to install solar panels or generators has become a problem, which even leads them to dismiss the investment of some projects; Due to this, it is considered relevant and necessary to present a solution to this problem through Building Integrated Photovoltaic (BIPV), to provide another technical, economically viable and more aesthetic alternative for users interested in implementing solar energy on their buildings, which in turn contributes to the advancement of smart and sustainable cities, where energy efficiency must be efficient and zero-emission buildings are possible.

This master's degree work seeks to explore the different BIPV technologies available and under development and therefore, analyze these systems from the technical and economic points of view, in order to promote and advance a little more in this type of implementation and solar solutions; allowing society to have knowledge of new technologies that contribute not only to solar electricity generation, but also to environmentally sustainable architecture.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	8
Capítulo 5 METODOLOGÍA	18
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
6.1 Tecnologías BIPV	20
6.2 Características principales.....	23
6.3 Retos de crecimiento e implementación	25
6.4 Proyectos a nivel mundial.....	30
6.5 Análisis Energético de un sistema BIPV 10.874 kWp	33
6.6 Retos técnicos de un buen dimensionamiento para un sistema BIPV	40
6.7 Definición de un proyecto BIPV.....	42
6.8 Costos de los BIPV	43
6.8.1 Ventajas y desventajas económicas de los BIPV.....	46
6.9 Aporte de los BIPV para las ciudades amigables con el medio ambiente.....	47
Capítulo 7 CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS.....	51
APÉNDICE.....	55
ECUACIONES	55
Anexos.	A
Anexo 1. Eficiencia de Celdas según NREL	A
Anexo 2. Tabla características técnicas de las tecnologías BIPV.....	C
Anexo 3. Normas internaciones sobre PV	D
Anexo 4. Normas internaciones sobre BIPV	E
Anexo 5. Otros ejemplos de proyectos BIPV	G
Anexo 6. Resultados completos simulación BIPV Cubo de innovación CHEC	C
Anexo 7. Equipos BIPV para el Cubo de Innovación CHECH.....	E
Anexo 8. Costos de fabricación a 2020 diferentes tecnologías BIPV	F
Anexo 9. Costos proyecto residencial 4.4kWp.....	G

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Nomenclatura principales tecnologías de células para BIPV	20
Tabla 2 Características mecánicas y eléctricas de tecnologías BIPV	24
Tabla 3 Empresas de BIPV	30
Tabla 4 Características BIPV del Cubo Innovación	34
Tabla 5 Características del sistema BIPV en la Simulación	35
Tabla 6 Resultados energéticos del sistema BIPV	36
Tabla 7 Resultados energéticos del sistema BIPV vidrios a 15 grados	37
Tabla 8 Resultados energéticos del sistema BIPV ventanas al norte.....	38
Tabla 9 Resultados energéticos del sistema BIPV sin ventanas	38
Tabla 10 Resultados energéticos del sistema BIPV solo Vidrios	39
Tabla 11 Resultados energéticos del sistema BIPV solo Tejas	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Celdas de Silicio mono y policristalino.....	9
Figura 2 Muestras BIPV de Cd-Te	10
Figura 3 Edificio con BIPV en fachada	11
Figura 4 Teja solar Hantile	12
Figura 5 Clasificación células solares por generación	22
Figura 6 Diferentes paneles fotovoltaicos utilizados para la integración de edificios.....	23
Figura 7 Copenhagen International School - Dinamarca.....	31
Figura 8 Jiantao Base project China's	32
Figura 9 Edificio Genyo.....	32
Figura 10 Coca-Cola/FEMSA.....	33
Figura 11 Modelados externos e interno del Cubo de Innovación	34
Figura 12 Construcción del Cubo de Innovación	34
Figura 13 Montaje 3D simulación PVsyst Cubo de Innovación.....	35
Figura 14 Unifilar del sistema eléctrico del BIPV	36
Figura 15 Montaje 3D simulación PVsyst, vidrios del techo a 15 grados	37
Figura 16 Montaje 3D simulación PVsyst, ventanas al norte.....	38

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, marcado por una creciente demanda energética y una conciencia ambiental en expansión, las ciudades enfrentan el reto de transformarse en entornos más amigables con el medio ambiente. La transición hacia fuentes de energía renovable es crucial para reducir la huella de carbono y mitigar los efectos del cambio climático. En este sentido, la integración de tecnologías innovadoras, como los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios BIPV, (por sus siglas en inglés Building Integrated Photovoltaics), se presenta como una solución efectiva y de gran impacto.

Los sistemas BIPV ofrecen una propuesta única al combinar la generación de energía solar con la arquitectura de los edificios. A diferencia de los paneles solares tradicionales que se instalan sobre tejados o estructuras adicionales en pisos, los BIPV están diseñados para integrarse directamente en los elementos constructivos de los edificios, como fachadas, ventanas, y techos. Esto no solo optimiza el uso del espacio en entornos urbanos densamente poblados, sino que también contribuye a la estética y funcionalidad de las construcciones modernas, convirtiendo a los edificios en generadores de energía autónomos, con el poder de adquirir información técnica (voltajes, corrientes, temperaturas, energía, etc.) lista para ser gestionada eficientemente.

La importancia de los BIPV radica en su capacidad para abordar varios desafíos simultáneamente. Por un lado, permiten una reducción significativa en el consumo de energía proveniente de fuentes no renovables, contribuyendo así a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, al integrarse en la envolvente de los edificios, estos sistemas mejoran el diseño, niveles de ruido y la eficiencia energética al proporcionar aislamiento térmico adicional, lo que se traduce en una menor necesidad de calefacción y refrigeración, añadiendo a esto los beneficios por excedentes de energía.

En este trabajo de investigación, se exploran las diferentes tecnologías disponibles y en desarrollo para BIPV, analizando tanto sus características técnicas como sus retos de crecimiento. El objetivo es proporcionar una visión integral sobre cómo estas tecnologías pueden contribuir al avance de las ciudades amigables con el medio ambiente. Para ello, se realiza un análisis técnico-económico que considera aspectos como los resultados energéticos y los costos de fabricación.

Además, se presentan como ejemplos, proyectos ya instalados en México y España como muestra del avance de la implantación de sistemas BIPV en el mundo. Un ejemplo destacado es el proyecto en desarrollo "Cubo de Innovación" en Manizales, Colombia, que se ha utilizado como caso de estudio técnico por medio de simulaciones para evaluar el rendimiento y los aportes energéticos de estos sistemas.

El problema de investigación se centra en la creciente demanda energética, la necesidad de una transición energética a fuentes limpias y dar una solución a aquellos edificios que no tienen área en su techo para instalar energía solar. Para abordar esto, se ha empleado una metodología que combina el análisis del estado del arte, simulaciones en el software para proyectos solares "PVsyst" y el análisis de proyectos solares ya instalados. La tesis se estructura en capítulos que cubren desde la fundamentación teórica hasta la discusión de los resultados obtenidos en las simulaciones, dando unas recomendaciones para el dimensionamiento adecuado de proyectos solares con estas tecnologías.

Este trabajo es de gran importancia porque ofrece una visión integral que nos lleva a analizar no solo las características principales de los BIPV, sino que también a identificar los aspectos necesarios para aportar al crecimiento de las ciudades amigables con el medio ambiente. ¿Cómo podrían las ciudades transformar su infraestructura para integrar sistemas BIPV? ¿Qué obstáculos técnicos y económicos deben superarse para que los BIPV se usen de forma masiva? Este trabajo busca dar a conocer esta tecnología y demostrar que los BIPV son más que una simple alternativa a los sistemas solares convencionales.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar desde los puntos de vista técnico-económico el desarrollo y la implementación de energía solar fotovoltaica integrada a edificios (BIPV) para el avance de las ciudades amigables con el medio ambiente.

2.2 Objetivos específicos

1. Identificar las diferentes tecnologías BIPV que existen en la industria, y los principales proyectos a nivel mundial, sus características principales y retos de crecimiento.
2. Analizar los aportes energéticos de un sistema con BIPV y los retos de estos para un buen dimensionamiento, para la definición y ejecución de proyectos de este tipo.
3. Definir las ventajas y desventajas a nivel económico de los BIPV para que las ciudades sean más amigables con el medio ambiente.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El continuo crecimiento industrial y las altas demandas energéticas constituyen un reto para las fuentes generadoras en su capacidad de suplir las necesidades de todos los centros de consumo; aún las nuevas tecnologías en desarrollo y los sistemas inteligentes y automatizados exigen dentro de sus procesos de creación o ejecución mayores niveles de disponibilidad y suministro eléctrico, este reto es el que nos invita a buscar e implementar nuevos caminos de autogeneración. Los continuos aumentos en los costos de energía que se perciben a lo largo del mundo, sumado a la variabilidad en la generación de la red, afectan la confiabilidad y la estabilidad del suministro, asfixiando a su vez un poco el brazo financiero de los usuarios del sistema eléctrico.

Cuando un usuario regulado o no regulado desea entrar en el mundo de la autogeneración por medio de energías renovables y entre ellas la energía solar, se encuentra con varios retos al momento de implementar este tipo de soluciones. Por un lado, en primera instancia tenemos el tema de los costos; aunque han disminuido en los últimos años los precios de fabricación, el transporte, la ingeniería, instalación final, procesos de legalización y los propios equipos principales (paneles, inversores solares y almacenamiento) siguen teniendo un costo elevado; esto dificulta su adopción masiva, especialmente para usuarios con recursos financieros limitados. Es importante encontrar en el mercado un portafolio de productos más amplio que usen diferentes tecnologías, que reduzcan los costos por kilovatio instalado, disminuyan el consumo energético optimizando los tiempos del retorno de la inversión y generen a su vez retroactivos por su instalación.

Entre más grande es la demanda o la necesidad energética de un usuario, los sistemas de energía solar requieren una cantidad significativa de espacio físico para instalar todos los equipos, especialmente los paneles solares. Como segunda instancia, la disponibilidad de terrenos o cubiertas grandes y adecuadas es uno de esos desafíos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas, como las ciudades o centros industriales. Los edificios son

la sede de millones de empresas que, ya sean de gran o pequeña escala, tienen diferentes necesidades eléctricas, por las maquinarias industriales que usan, servidores informáticos, iluminación y todos aquellos recursos o herramientas que se necesitan para que se lleve a cabo el día a día de cada jornada laboral. Este tipo de construcciones y sedes tiene una gran limitante, ya que en cubierta el espacio es muy reducido o inclusive nulo.

Generalmente en los techos encontramos la presencia de equipos de HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), antenas de radio o de televisión y otros elementos que pueden dificultar el trabajo, la ubicación y la cantidad de módulos a instalar. Además, los paneles solares con su estructura de soporte son pesados y seguramente para muchos edificios antiguos que no tengan la fortaleza estructural necesaria para soportar este peso adicional, se requerirán evaluaciones y modificaciones estructurales importantes antes de la instalación, que podrían hacer desestimar el proyecto para más de una empresa interesada.

La desestimación de proyectos solares por causa de estos problemas también afecta el avance y la innovación que se está buscando desarrollar en las diferentes ciudades y países del mundo, impidiendo que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero, pues la generación de electricidad a partir de fuentes convencionales seguiría primando, emitiendo contaminantes al aire, como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado. Esta desestimación, no solo afecta ambientalmente, sino socialmente impacta a escuelas, hospitales y hogares que les beneficiaría ser autosostenibles o tener electricidad cuando no existe el recurso. No se debe frenar el desarrollo e implementación de estas tecnologías renovables con todos los avances que se desean en energías limpias y edificaciones certificadas con emisiones cero, lo cual también impediría que las ciudades fueran más amigables con el ambiente. Aplicaciones tecnológicas con inteligencia artificial, IoT y el análisis de datos son algunos de los principales pilares para que las ciudades sean más amigables con el medio ambiente; la energía solar, sumada a variables de este tipo podrán darnos esa diversidad, sostenibilidad energética que deseamos. Paneles, inversores, controladores, aportando información y control a redes o micro redes de

consumo, nos darán un gran avance en esta área. Son pocas las personas, ingenieros y aún arquitectos en Colombia que conocen la energía solar fotovoltaica integrada a los edificios (BIPV), como se desarrolla, funciona, implementa y los beneficios que trae. Analizando ferias de energía solar importantes en nuestro país, como Exposolar 2023 solamente 2 empresas promocionaban estas tecnologías. Un problema que conlleva a que los diferentes actores industriales o gobiernos locales, empresas, instituciones académicas y organizaciones de la sociedad civil, no impulsen nuevas tecnologías que brindarán un gran apoyo al desarrollo económico, ambiental y social.

La instalación de sistemas BIPV como parte de la estructura de los edificios es uno de los aspectos clave de estas soluciones. Al integrarse en fachadas, ventanas o cubiertas, no solo forman parte del diseño arquitectónico, sino que también permiten la generación de energía eléctrica de manera eficiente. Además de cumplir su función estructural son una solución única y renovadora en la industria y el sector económico. También existirán otros casos de común aplicación dentro de las ciudades, por ejemplo, tanto para los sistemas de movilidad urbana (bus, tren o metro) en los vidrios de sus ventanas y techos, como para sus estaciones en las cubiertas, siendo el BIPV una solución mucho más estética que los paneles convencionales. Poder mantener una estética moderna, inteligente y ambientalmente sostenible en los edificios y estructuras permite que esta tecnología sea de gran interés a nivel mundial. Refiriéndonos a la estética como al aspecto visual y al diseño arquitectónico de la estructura, que puede influir en su atractivo, armonía con el entorno y funcionalidad.

Hoy en día existen otras tecnologías de segunda y tercera generación solar como los vidrios fotovoltaicos de silicio amorfo, telururo de cadmio o perovskita, existen paneles flexibles, paneles orgánicos entre otros. Los sistemas BIPV implementan avances tecnológicos, que integralmente ayudan a que los edificios, casas, instalaciones tengan la oportunidad de ser instalaciones de emisiones cero (ZEB), autogeneren, exporten energía eléctrica y a su vez participen en micro redes inteligentes interconectadas para ayudar en la gestión energética. Los BIPV ayudan a la valorización de los predios, a la puntuación para certificaciones ambientales tipo LEED, permiten que los materiales de construcción tengan un papel activo

en un análisis de retorno económico, como fuente generadora de electricidad. Las ciudades amigables con el medio ambiente buscan aumentar la eficiencia y gestión de los recursos, mejorando la calidad de vida, adoptando soluciones tecnológicas que optimicen estos ítems. Estudiar, analizar e implementar sistemas BIPV será un paso significativo en este desarrollo.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 BIPV (Building Integrated Photovoltaics)

En la búsqueda de soluciones para abordar los desafíos del cambio climático, la creciente demanda de energía y la implementación de las energías renovables dentro de toda matriz energética de generación, la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios (Building Integrated Photovoltaics BIPV, por sus siglas en inglés) ha surgido como una estrategia y una alternativa prometedora, para dar apoyo a estos desafíos. Estos sistemas aprovechan la energía solar mediante la incorporación ya sean de paneles, vidrios, tejas, baldosas o pérgolas solares dentro de los elementos constructivos de los edificios, reemplazando los materiales de construcción convencionales en partes de las envolventes de los edificios, como ventanales, tejados o fachadas, lo que no solo genera electricidad renovable, sino que también ofrece beneficios estéticos, arquitectónicos y ambientales. En el contexto de las ciudades sostenibles, la implementación de BIPV puede desempeñar un papel crucial en la transición hacia una infraestructura urbana más limpia y eficiente [1]

Podemos tomar como una definición de BIPV la que da la norma prEN 50583:2012 "Fotovoltaica en edificios" la cual considera como un módulo fotovoltaico integrado como aquel que proporciona al menos una de las siguientes funciones: Rigidez mecánica, protección contra la intemperie, protección contra incendios, protección contra el ruido y a la vez generar energía eléctrica.

La norma establece también los principales requisitos que debe cumplir un BIPV, precisamente: Resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de incendio, higiene, salud y medio ambiente, seguridad en el uso, protección contra el ruido, ahorro de energía y retención de calor. Estas funciones y requisitos ayudan a tener un marco general de las características relacionadas con BIPV [2]. El desarrollo de la tecnología BIPV ha experimentado avances significativos en las últimas décadas. Inicialmente, los paneles

solares se instalaban como adiciones externas a los edificios, generalmente en los tejados o en piso sobre alguna estructura en aluminio, lo que limitaba su integración arquitectónica y generaba resistencia en los propietarios y diseñadores en cuanto a la estética. Sin embargo, se han logrado avances en la fabricación de materiales fotovoltaicos flexibles y semitransparentes, lo que ha permitido una integración más armoniosa con los elementos constructivos. Los paneles solares pueden ahora incorporarse en fachadas, ventanas, techos y otros componentes del edificio, lo que ofrece una mayor versatilidad en términos de diseño y aplicaciones [3]

4.2 Tecnologías BIPV y Generaciones de la Fotovoltaica

Existen varias tecnologías de células que se han ido desarrollando y aplicado como BIPV. Una primera generación fue toda la tecnología a base de silicio, módulos monocristalinos y policristalinos con eficiencias que empezaron en el 12% y actualmente están cercanos al 23% a nivel de paneles comercial, siendo esta la tecnología que más se usa nivel mundial. Sin embargo, para su aplicación con BIPV se tenía que dejar un gran espacio entre las celdas para tener algún pequeño grado de la transparencia que permitiera el paso de la luz, visualmente no eran muy estéticos y difíciles de instalar como ventana o techo. En la figura 1 tenemos una imagen representativa de esta generación.

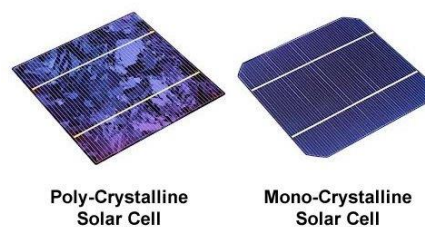


Figura 1 Celdas de Silicio mono y policristalino

Fuente: <https://www.solarlightsmanufacturer.com/monocrystalline-and-polycrystalline/?lang=es>

Una segunda generación son las de capas de películas delgadas fabricadas a base de plasma, con materiales como el Silicio-Hidrógeno (Silicio amorfo) el Cobre-Indio-Selenio (CIS) y

el Teluro de Cadmio (CdTe). El material que se usa se rocía sobre un sustrato, el cual puede ser también ser un material flexible, esta capa puede tener un espesor incluso menor a 2 μm (micrómetros) la cual estaría cubierta por dos vidrios para la creación del módulo. Esta segunda generación tiene eficiencias actualmente hasta el 17% para vidrios comerciales, ya se manejan con niveles de transparencia de hasta un 40% [4], para tener una generación eléctrica rentable, ya que a mayor nivel de transparencia menor será la generación de energía, porque esto significa tener menos películas generadoras en el sustrato. También se pueden implementar colores en los vidrios e incluso crear ahora paneles flexibles, lo cual estéticamente hace mucho más atractivo esta generación, en la figura 2 tenemos una muestra de BIPV de Cd-Te en Colombia, 2 vidrios con tamaños de 1.2m x 0.60m y 3 muestras pequeñas de 12 cm x 12 cm.

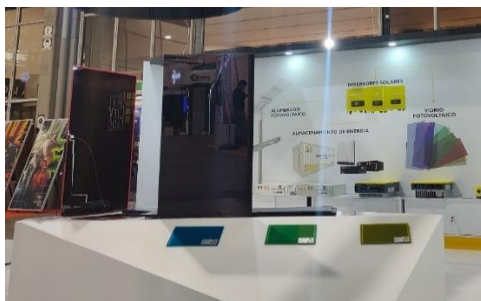


Figura 2 Muestras BIPV de Cd-Te

Fuente. El autor

Las células solares de película fina de teluro de cadmio (CdTe) son una de las tecnologías de segunda generación de energía solar más exitosas del mercado actual, su capacidad de usarla como paneles flexibles, vidrios y tejas de varios colores con diferentes niveles de transparencia le hace muy atractivo a nivel de diseño e instalación. Teniendo una eficiencia igual o superior al 18,3% [5] y con una buena respuesta espectral 1.85 eV [6], en los últimos años se han desarrollado estudios para mejorar estas respuestas espectrales y las principales características eléctricas en los módulos solares, tales como los voltajes de circuito abierto y las corrientes de corto [7] todo esto lo vuelven actualmente un semiconductor muy interesante para el mercado en la generación de módulos solares.

La tercera generación consta de los llamados paneles orgánicos y de Perovskita (PSCs, perovskite solar cells) y la cuarta generación son las células solares de puntos cuánticos (QDSSC, quantum dot solar cells) y las células solares de polímeros orgánicos. Los PSC son la tecnología más eficiente que promete una ruta de fabricación más barata y accesible para producir una eficiencia de fotoconversión, eficiencia de celda por encima del 25.2%, tienen fuerte coeficiente de absorción, que permite tener altos niveles de transparencia, una excelente mejora de la foto física-química y dinámica del excitón/carga-portador[8]

Existen diferentes tecnologías de BIPV que se van desarrollando y presentado al mercado para su integración, por el momento en el mundo apenas la generación 1 y 2 son ya comercializables, aunque son muy pocas las normativas técnicas ya establecidas en diferentes países que permitan tener una integración ordenada y correcta, que ayude en la unión arquitectónica de los generadores a los edificios y que permita alcanzar estas soluciones óptimas a nivel estético, económico y técnico que se desea. [9]

4.3 Vidrio Fotovoltaico

Uno de los tipos más comunes de BIPV es el vidrio fotovoltaico, que se utiliza en ventanas, fachadas y tragaluces. Estos paneles transparentes permiten la entrada de luz natural mientras generan electricidad a partir de la radiación solar. Otro tipo es el revestimiento fotovoltaico, que se instala en la superficie exterior de los edificios, como revestimientos de paredes o techos. Estos paneles pueden tener diferentes formas y colores para integrarse de manera estética en el diseño del edificio. Como se observa en la figura 3.

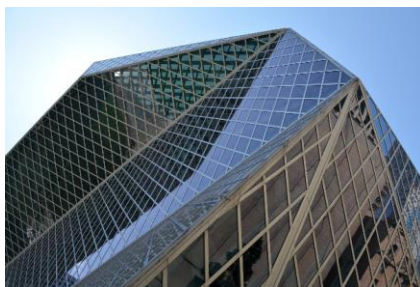


Figura 3 Edificio con BIPV en fachada

Fuente: <https://bipvglobal.com/>

En el anexo 1 encontramos los valores de eficiencias para diferentes tipos de células solares. Además, existen sistemas BIPV basados en forma tejas solares, que reemplazan las tejas convencionales en el techo. Estas tejas solares están diseñadas para ser visualmente similares a las tejas tradicionales, pero generan electricidad a partir de la radiación solar, tal como se observa en la figura 4.



Figura 4 Teja solar Hantile

Fuente: <https://bipvglobal.com/hanergy-es>

Cada teja tiene su terminal positivo y negativo DC, lo que hará que la conexión sea similar a la de un panel convencional en cuanto a las series o paralelos necesarios, donde la limitante serán los niveles de voltajes y corrientes que los inversores permiten.

4.4 Cálculo de producción de energía en sistemas BIPV

Una parte esencial para la integración de los sistemas solares BIPV son los factores técnicos que afectan la generación, por ejemplo tener una buena estimación del recurso solar, para lo cual se han desarrollado nuevos modelos que permite estimar el factor de irradiación (FI) en fachadas con sólo 2 parámetros de entrada: la latitud del lugar y el ángulo acimutal del generador fotovoltaico[10] sin dejar de lado los parámetros característicos para el dimensionamiento de los sistemas solares:

$$E_{pv} = \frac{G_a(\beta, \alpha) \cdot P_{peak} \cdot PR}{G_{STC}}$$

Ecuación 1. Energía Solar fotovoltaica producida

Donde $G_a(\beta, \alpha)$ es la irradiación solar anual sobre la superficie del generador, P_{peak} es la potencia pico fotovoltaica instalada, PR el rendimiento anual de la instalación denominado “Performance Ratio” y GSTC la irradiancia solar en condiciones estándar de medida, igual a 1kW/m^2 . Según la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), cuando publicó la norma internacional IEC 61724.

Determinar el PR depende de varios factores como la radiación solar disponible en el punto de instalación, el clima, la orientación e inclinación que tendrán los módulos, un correcto diseño del sistema, sombras y pérdidas energéticas etc, por lo cual, actualmente se han desarrollado nuevas metodologías para determinar y limitar estas pérdidas, una de ellas debidas a sombreado y orientación de las superficies construidas [11] según el CTE (Código Técnico de la Edificación, España), las pérdidas por orientación e inclinación en cualquier superficie para BIPV no pueden superar el 40% para sistemas totalmente integrados.

4.5 Pérdidas energéticas en sistemas BIPV

También existen otras pérdidas a considerar y cálculos del PR que han sido desarrollados actualmente[12] a continuación un resumen de las ecuaciones principales:

- *Pérdidas angulares de irradiación:* las cuales se pueden expresar en términos de Incidence Angular Modifier IAM,

$$f_{\alpha} = \frac{G'(\beta, \alpha)}{G(\beta, \alpha)}$$

Ecuación 2. Factor angular

Donde $G'(\beta, \alpha)$ y $G(\beta, \alpha)$ son la irradiación solar incidente sobre el generador considerando e ignorando las pérdidas angulares y por reflexión, respectivamente.

$$L_{angular} = 1 - \frac{G'_a(\beta, \alpha)}{G_a(\beta, \alpha)}$$

Ecuación 3. Pérdidas angulares de Irradiación

La ecuación 3 también puede expresarse como:

$$L_{angular} = 1 - f_{\alpha}$$

La irradiancia global horaria $G'_h(\beta, \alpha)$ incidente sobre el módulo está conformada por las contribuciones de la radiación directa $B_h(\beta, \alpha)$, difusa circunsolar $D_h^C(\beta, \alpha)$, difusa isotrópica $D_h^I(\beta, \alpha)$, y reflejada $R_h(\beta, \alpha)$; así:

$$G'_h(\beta, \alpha) = FT_B \cdot B_h(\beta, \alpha) + FT_B \cdot D_h^C(\beta, \alpha) + FT_D \cdot D_h^I(\beta, \alpha) + FT_R \cdot R_h(\beta, \alpha)$$

Donde FT_B , FT_D , FT_T son las transmitancias relativas, normalizadas por la transmitancia total a incidencia normal, y se calculan mediante las expresiones:

$$FT_B = 1 - \frac{\exp\left(-\frac{\cos \theta_s}{a_r}\right) - \exp\left(-\frac{1}{a_r}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{1}{a_r}\right)}$$

Ecuación 4. FT_B

$$FT_D = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{a_r} \left[c_1 \left(\sin \beta + \frac{\pi - \beta - \sin \beta}{1 + \cos \beta} \right) + c_2 \left(\sin \beta + \frac{\pi - \beta - \sin \beta}{1 + \cos \beta} \right)^2 \right] \right\}$$

Ecuación 5. FT_D

$$FT_R = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{a_r} \left[c_1 \left(\sin \beta + \frac{\beta - \sin \beta}{1 - \cos \beta} \right) + c_2 \left(\sin \beta + \frac{\beta - \sin \beta}{1 - \cos \beta} \right)^2 \right] \right\}$$

Ecuación 6. FT_R

Donde θ_s es el ángulo de incidencia entre los rayos solares y la normal al plano considerado, mientras que a_r y C_2 son parámetros que dependen del grado de suciedad, El valor de C_1 es $4/(3\pi)$ en todos los casos.

- *Pérdidas por temperatura*: las cuales están dadas por:

$$L_{Temperatura} = -\gamma(TOE - 25)$$

Ecuación 7. Pérdidas por temperatura

Donde TOE es la Temperatura Equivalente de Funcionamiento del generador en el periodo en cuestión, ponderada por la irradiancia incidente y γ es el coeficiente de variación del pico de potencia con la temperatura.

$$TOE = \frac{\int_{\tau} T_c \cdot G'(\beta, \alpha) \cdot dt}{\int_{\tau} G'(\beta, \alpha) \cdot dt}$$

Ecuación 8. TOE

- *Modelo para el cálculo del PR*:

$$PR = 0,0011 \left(A_1 \cdot e^{-2\left(\frac{\alpha - \alpha_0}{W}\right)^2} + A_2 \cdot e^{-2\left(\frac{\alpha + 90}{W}\right)^2} - \beta - 5 \right) + 0,117 \cdot PR_{\max}$$

Ecuación 9. Modelo cálculo de PR Mulcue

Donde:

$$A_1 = -1,1 \cdot |\varphi| + 60 \quad A_2 = -0,1 \cdot |\varphi| + 65 \quad W = -1,1 \cdot \varphi + 92 \quad \alpha_0 = -1,4 \cdot \varphi + 92$$

Siendo β el ángulo de inclinación, α el ángulo de acimut y ϕ la latitud de la ciudad, todos en grados.

4.6 Relación de BIPV y Ciudades Sostenibles

Además de la importancia de la parte técnica, la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios desempeña un papel fundamental en la construcción de ciudades sostenibles. A continuación, se presentan algunos puntos clave:

Generación de energía limpia: La instalación de BIPV permite la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles. Además, al integrarse con la red eléctrica, los edificios BIPV pueden contribuir a la estabilidad del suministro energético y la reducción del consumo de la red.

Eficiencia energética: La integración de los BIPV en los elementos constructivos, como ventanas, pérgolas y techos, puede mejorar la eficiencia energética de los edificios. Los paneles BIPV pueden actuar como aislantes térmicos adicionales, reduciendo la carga de calefacción y refrigeración, y disminuyendo así el consumo de energía.[13]

Utilización del espacio urbano: Los sistemas BIPV aprovechan los espacios verticales y horizontales de los edificios, lo que es particularmente relevante en entornos urbanos donde el espacio es limitado. Los estacionamientos solares, por ejemplo, pueden proporcionar sombra y generar energía al mismo tiempo.

Mejora estética y valor agregado: La integración de paneles solares en el diseño arquitectónico de los edificios puede mejorar su estética, brindando una apariencia moderna y sostenible. Además, los edificios BIPV pueden aumentar su valor de mercado debido a su capacidad de generación de energía y su menor huella ambiental.

Dentro del desarrollo de los BIPV y sus tecnologías se ha buscado mejorar también los modelos de dimensionamiento y simulación, para comprender mejor todos los factores que afectan el rendimiento energético, obteniendo mejores metodologías para calcular las máximas pérdidas permitidas por sombreado y por inclinación y pueden luego llegar a afectar económicamente la viabilidad de un proyecto. [14]

A pesar de los beneficios evidentes, la adopción generalizada de BIPV en ciudades sostenibles todavía enfrenta desafíos significativos. Entre ellos se encuentran los costos iniciales más altos en comparación con los sistemas fotovoltaicos convencionales, la

necesidad de estándares y regulaciones claras, y la falta de conciencia y conocimiento por parte de los profesionales de la construcción. Sin embargo, estas barreras están siendo abordadas gradualmente a través de iniciativas de investigación, políticas de apoyo y colaboraciones entre los sectores público y privado.

La integración de sistemas fotovoltaicos en edificios (BIPV) desempeña un papel esencial en el desarrollo de ciudades sostenibles. Al ofrecer una generación de energía limpia, mejorar la eficiencia energética, aprovechar el espacio urbano y agregar valor estético a los edificios, los sistemas BIPV contribuyen a la mitigación del cambio climático y a la construcción de una infraestructura urbana más sostenible. Aunque aún existen desafíos por superar, los avances tecnológicos, las políticas de apoyo y la creciente conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad están impulsando la adopción de BIPV en todo el mundo. En este sentido, se requiere una mayor investigación y colaboración entre los sectores para avanzar hacia un futuro urbano más limpio y resiliente.

Capítulo 5

METODOLOGÍA

La metodología que se implementará para solventar el objetivo general de la tesis, cumpliendo cada uno de los tres objetivos específicos y resolviendo el problema planteado con anterioridad es el siguiente:

1. *Revisión del estado del arte en energía solar, BIPV y ciudades amigables con el medio ambiente.*

Se hará una revisión del estado del arte en cuanto a energía solar, especialmente con un enfoque en BIPV ¿qué es?, avances de las tecnologías, desarrollos actuales, ¿qué hay en el mercado?, para más adelante ver los proyectos instalados y retos que tienen las tecnologías existentes, posteriormente se realizará una descripción en cuanto a la aplicación a ciudades amigables con el medio ambiente. Esta tarea se completará buscando en las principales bases de datos de investigación y fuentes académicas posibles. Una vez recopilada la información, los datos técnicos de las diferentes tecnologías para BIPV, características principales, retos y los casos de éxito de los proyectos implementados en el mundo, se procederá a hacer un análisis del impacto de esta tecnología para las ciudades amigables con el medio ambiente.

2. *Desarrollo de los elementos más importantes para el dimensionamiento solar y BIPV*

Como segundo punto, se analizarán los elementos más importantes para el dimensionamiento de un proyecto solar tipo BIPV, se hará un análisis por simulación de algún sistema modelo (teniendo en cuenta factores como generación, pérdidas, diseño y sombras), mediante el software de simulación especializado PVsyst para definir tanto los retos de este tipo de dimensionamiento como la ejecución real de un proyecto BIPV, se

analizarán los aportes energéticos y comportamiento del sistema para especificar los puntos más importantes y optimizar este tipo de dimensionamiento.

3. Análisis técnico de un sistema real en proceso

Para profundizar en los temas anteriores, se plantea analizar un caso real de una instalación con BIPV, que se está desarrollando en la ciudad de Manizales/Colombia por parte de CHEC grupo EPM, “Cubo de Innovación” proyecto solar el cual consta de 3 partes principales a integrar con BIPV: Ventanales, pérgolas (techos) y tejas solares, con tecnología CdTe de segunda generación y cristal de silicio. Se utilizará este sistema para corroborar el trabajo investigativo ya realizado. Analizaríamos los principales aspectos técnicos y los aportes energéticos, ventajas y desventajas a nivel técnico. Esto podrá darnos herramientas para cuando sea pertinente definir la posibilidad o la necesidad de instalar un proyecto de estas características. También se comparará un sistema residencial en Anapoima ya instalado y la influencia en el cambio del costo de paneles a vidrios solares.

4. Evaluación

Evaluar toda la información y los resultados obtenidos para realizar un análisis exhaustivo de las ventajas y desventajas de los sistemas BIPV a nivel técnico y económico, aplicándolo en el contexto de las ciudades amigables con el medio ambiente. Considerando los aspectos de evaluación más importantes como generación de energía, integración arquitectónica, costo, vida útil, eficiencia e impacto ambiental.

5. Conclusiones

Finalmente se construirán las conclusiones basadas en los resultados de la investigación y el trabajo hecho, respondiendo a los objetivos específicos. Teniendo en cuenta los análisis técnicos y económicos presentados en los resultados.

Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un proyecto solar tipo BIPV donde queremos usar ya sea la fachada, el techo o los ventanales como área disponible para instalación, es importante el tipo de tecnología a implementar, la selección correcta de equipos para que el proyecto técnica y financieramente sea atractivo y rentable al cliente final o al inversor principal. Se presentan a continuación las principales tecnologías BIPV que están actualmente en el mercado y en proceso de desarrollo.

6.1 Tecnologías BIPV

Las tecnologías de Building Integrated Photovoltaics (BIPV) se han desarrollado considerablemente en los últimos años, ofreciendo diversas soluciones para integrar la generación de energía solar en los elementos constructivos y arquitectónicos de los edificios.

Tabla 1 Nomenclatura principales tecnologías de células para BIPV

Nomenclatura	Definición en inglés	Definición en español
BIPV	Building integrated photovoltaic	Fotovoltaica integrada en edificios
BAPV	Building attached photovoltaic	Fotovoltaica adherida a edificios
PV	Photovoltaic	Fotovoltaico
c-Si	Crystalline silicon	Silicio cristalino
a-Si	Amorphous silicon	Silicio amorfo
TFPV	Thin film PV	Fotovoltaica de película delgada
CIGS	Copper indium gallium selenide	Diseleniuro de cobre indio galio
OPV	Organic PV	Fotovoltaica orgánica
DSC	Dye sensitive cell	Celda sensibilizada por colorante
CdTe	Cadmium telluride	Teluluro de cadmio
CdS	Cadmium sulphide	Sulfuro de cadmio

Módulos Fotovoltaicos Cristalinos:

- Silicio Monocristalino y Policristalino: Estos módulos son los más comunes y se integran en techos y fachadas, ofreciendo alta eficiencia en la conversión de energía.
- BIPV de Silicio Cristalino Coloreado: Estas versiones permiten la personalización estética mediante colores y patrones que imitan materiales de construcción tradicionales o simular estampados acorde a diseño [15].

Módulos de Capa Fina: CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio) y CdTe (Teluro de Cadmio): Estos módulos son películas delgadas flexibles, transparentes y ligeras, ideales para aplicaciones en fachadas y techos curvos. Ofrecen ventajas en términos de integración arquitectónica y peso reducido [16].

Fotovoltaicos Semitransparentes: Utiliza celdas solares incrustadas en vidrio, permitiendo la entrada de luz natural mientras genera electricidad. Es común en ventanas, pérgolas y fachadas, pueden permitir el uso de color [17].

Sistemas de Doble Piel Fotovoltaica: Consisten en una capa exterior de vidrio fotovoltaico y una capa interior de vidrio convencional, creando una cámara de aire intermedia que mejora el aislamiento térmico y acústico, a la vez que genera energía eléctrica [17].

Sistemas Fotovoltaicos Integrados en Sombras: Dispositivos de Sombreado Fotovoltaico (PVSDs): Incluyen persianas y lamas fotovoltaicas que no solo generan energía, sino que también proporcionan control solar y confort térmico.

Ventanas Fotovoltaicas Inteligentes:

- Ventanas Fotovoltaicas con Materiales Cambiantes: Incorporan materiales como el vidrio fotocromático o termo-cromático, que cambian sus propiedades de transmisión

de luz en respuesta a la intensidad de la luz solar o la temperatura, mejorando la eficiencia energética del edificio.

- Tecnologías de Impresión y Recubrimiento:

En los últimos años, han proliferado los paneles BIPV rígidos para techos y revestimientos de paredes, utilizando principalmente células de silicio cristalino (c-Si). Sin embargo, está emergiendo la integración de módulos fotovoltaicos de película delgada flexible (TFPV) en materiales de techado flexibles como tejas y membranas. El silicio amorfo (a-Si) domina en el BIPV flexible debido a su menor sensibilidad a la humedad y al aire en comparación con otros materiales TFPV. Aunque las compañías CIGS también están desarrollando módulos flexibles para aplicaciones BIPV, la tecnología de encapsulación está rezagada, retrasando el lanzamiento de productos [18].

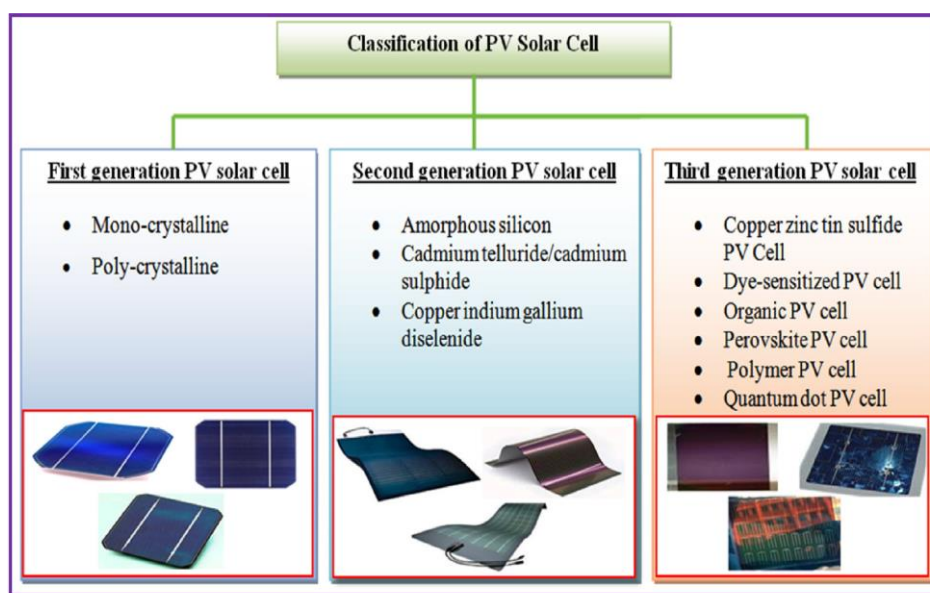


Figura 5 Clasificación células solares por generación [18]

Vidrio Fotovoltaico Impreso o Recubierto: Utilizan técnicas de impresión digital y recubrimiento para personalizar la apariencia de los módulos fotovoltaicos, permitiendo su integración estética en fachadas y otros elementos arquitectónicos.

Todas estas tecnologías representan un avance significativo en la integración de la generación de energía solar con el diseño arquitectónico, permitiendo la creación de edificios más sostenibles y eficientes energéticamente con un plus de estética y diseño.

Diferentes paneles fotovoltaicos se utilizan para diversas aplicaciones en BIPV. Los paneles pueden ser transparentes, semitransparentes, translúcidos, coloreados, estampados o flexibles. Las fachadas son preferidas para BIPV debido a su gran superficie y capacidad para permitir la entrada de luz diurna, aunque se prefieren los paneles semitransparentes para reducir la ganancia de calor solar [19].

De todas las células nombradas podemos ver la siguiente figura representativa, de las diferentes tecnologías fotovoltaicas utilizados para la integración de edificios.



Figura 6 Diferentes paneles fotovoltaicos utilizados para la integración de edificios. [19]

6.2 Características principales

En el apartado anterior nombramos las tecnologías BIPV como son conocidas y clasificadas actualmente en el mercado eléctrico, a continuación, se presenta la tabla 2 con

algunas características mecánicas y eléctricas de las tecnologías BIPV mencionadas. Tener presente estas ventajas y desventajas nos pueden ayudar a seleccionar y delimitar que tipo de modulo usar en un proyecto en etapa de planeación y análisis de factibilidad.

Tabla 2 Características mecánicas y eléctricas de tecnologías BIPV

Tecnología BIPV	Ventajas Mecánicas	Desventajas Mecánicas	Ventajas Eléctricas	Desventajas Eléctricas
Silicio Monocristalino	Alta durabilidad, resistencia a impactos	Rigidez, peso elevado	Alta eficiencia de conversión (~20%)	Costo elevado, eficiencia disminuye con altas temperaturas
Silicio Policristalino	Menor costo comparado con monocristalino, buena durabilidad	Menor eficiencia en áreas con poca luz, peso elevado.	Buen rendimiento (~15-17%)	Menor eficiencia comparado con monocristalino
CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio)	Flexible, peso ligero, puede adaptarse a superficies curvas	Menor durabilidad comparada con silicio cristalino	Buen rendimiento en baja luz, menor temperatura de coeficiente	Menor eficiencia (~10-12%), alto costo de materiales
CdTe (Telururo de Cadmio)	Bajo costo de producción, buena absorción de luz	Uso de materiales tóxicos, menor durabilidad	Eficiencia moderada (~11-13%)	Toxicidad de materiales, eficiencia moderada
Vidrio Fotovoltaico Semitransparente	Permite entrada de luz natural, estética atractiva	Menor resistencia mecánica que vidrio estándar	Genera energía mientras permite la entrada de luz	Eficiencia moderada (~8-10%), costo elevado
Doble Piel Fotovoltaica	Mejora aislamiento térmico y acústico	Complejidad en instalación, mayor peso	Mejora la eficiencia energética general del edificio	Costo elevado, menor eficiencia eléctrica individual
PVSD (Dispositivos de Sombreado)	Proporciona sombreado y confort térmico adicional	Requiere mantenimiento regular, puede ser complejo de instalar	Aumenta la eficiencia energética del edificio	Eficiencia moderada, puede requerir sistemas de seguimiento solar
Ventanas Fotovoltaicas Inteligentes	Adaptación automática a condiciones de luz y temperatura, mejora confort interno	Mayor complejidad técnica, costo elevado	Ajuste dinámico mejora eficiencia global del edificio	Menor eficiencia en comparación con módulos estáticos

Vidrio Fotovoltaico Impreso o Recubierto	Alta personalización estética, integración arquitectónica	Modificación puede afectar la eficiencia, menor durabilidad	Ofrece soluciones estéticas sin comprometer totalmente la generación	Pérdida de eficiencia debido a modificaciones estéticas
---	---	--	--	---

Fuente: [15], [16], [17], [18], [19] y [20]

En la parte mecánica, el peso es importante, ya que pesos elevados requerirán bases y perfilera más gruesas y robustas lo cual aumentaría los costos y la dificultad de la instalación. Inclusive se podría descartar un proyecto por una sobrecarga en las ventanas y fachadas. También la durabilidad o vida útil de los BIPV se debe considerar, normalmente está entre los 10, 20 o más años, lo cual es similar a la vida útil que actualmente presentan los paneles convencionales de silicio que se encuentran en el mercado. La oportunidad que tienen los BIPV de ser flexibles, curvos, tener transparencia, diferentes colores o personalización, tamaños, formas y grosores, les permite mecánicamente encontrar diferentes aplicaciones y opciones de implementación para proyectos de obras nuevas o de remodelación.

En la parte eléctrica siempre se busca la tecnología que tenga mejor eficiencia de conversión de la radiación solar a energía eléctrica, en el anexo 1 se observa los valores actuales que presentan las diferentes tecnologías de acuerdo con NREL; tener actualmente eficiencias alrededor del 19% cuando en el mercado los paneles convencionales de silicio están en 22% comprueba como estas nuevas tecnologías a base de semiconductores de CdTe, CIGS, Perovskita son más competitivas eléctricamente. En el anexo 2 se presenta una tabla resumen con los datos técnicos más relevantes en las tecnologías mencionadas.

6.3 Retos de crecimiento e implementación

La implementación y crecimiento de estas tecnologías BIPV en proyectos solares y arquitectónicos para edificios y construcciones enfrentan varios retos significativos. Estos

retos pueden categorizarse principalmente en desafíos técnicos, económicos, regulatorios y de aceptación social.

6.3.1 Desafíos Técnicos

Podemos definir que hay tres rubros principales para tener en cuenta en lo técnico.

- *Eficiencia y Rendimiento:* La eficiencia de conversión de energía de algunos tipos de BIPV sigue siendo menor en comparación con los paneles solares tradicionales (21%-23%) que son más comerciales. Aquellas tecnologías BIPV que son mayores en eficiencia son aún costosas o están en desarrollo investigativo. La integración arquitectónica también puede afectar el rendimiento, debido a las orientaciones y ángulos de instalación del BIPV la cual varía de acuerdo con la forma del edificio o construcción.
- *Integración Arquitectónica:* La integración de BIPV en edificios existentes puede ser compleja debido a la necesidad de adaptarse a las estructuras y formas arquitectónicas y a su vez mantener la estética del edificio, casa o predio.

6.3.1.1 Eficiencia de Conversión:

- *Temperatura:* Las celdas solares tienden a perder eficiencia a altas temperaturas. La eficiencia de los módulos BIPV se ve afectada negativamente al igual que los paneles convencionales. En comparación con los paneles solares tradicionales, la integración en edificios puede llevar a temperaturas operativas más altas, reduciendo la eficiencia general. Además, las condiciones reales, como la radiación solar fluctuante y la acumulación de suciedad, pueden impactar significativamente el rendimiento energético de los módulos instalados verticalmente [21].
- *Sombra y Orientación:* La eficiencia de los módulos BIPV se ve afectada negativamente también por sombras fijas o parciales, sin embargo, algunas tecnologías como por ejemplo CdTe no pierden tanta potencia como los paneles convencionales de

silicio. La orientación no óptima (que no es perpendicular a la posición del sol) de las superficies del edificio o ventanales se ven influenciadas con grados de inclinación elevados, esto es un factor clave que afecta directamente la capacidad de generación de energía eléctrica y la eficiencia del sistema.

6.3.1.2 Durabilidad y Vida Útil:

- *Materiales de Encapsulación y Condiciones Ambientales:* Los materiales utilizados para BIPV tipo vidrio, baldosa para fachada o teja generalmente usan vidrio templado; el encapsulado en sistemas BIPV debe ser duradero y resistente a las condiciones climáticas. Sin embargo, los materiales de encapsulación como EVA (etileno-vinilacetato) y PVB (polivinil butiral) que cubren las celdas o películas delgadas pueden degradarse con el tiempo, debido a la exposición a condiciones climáticas extremas (viento, lluvia, nieve, radiación UV), lo que afecta la durabilidad y el rendimiento de los módulos BIPV que puede tener un efecto adverso en su rendimiento y rentabilidad a largo plazo [22].

6.3.1.3 Integración Arquitectónica y Constructiva:

- *Compatibilidad con Diseño de Edificios:* Integrar sistemas BIPV en el diseño arquitectónico de edificios puede ser complejo, especialmente en estructuras existentes. Requiere un balance entre eficiencia energética y estética arquitectónica. La estética y el control ambiental de luz y calor que se desea incluir hacen parte del desafío ya que a veces entran en conflicto con el rendimiento energético y la máxima producción de energía [23].
- *Carga Estructural:* Los sistemas BIPV pueden añadir carga adicional a la estructura del edificio, lo que requiere evaluación estructural y posiblemente refuerzos, ya sea para techos o fachadas, aumentando los costos y la complejidad del proyecto de renovación, cuando no se ha contemplado desde un inicio la instalación de estos equipos, junto al cableado necesario y sus bandejas [24].

6.3.1.4 Desempeño Térmico:

- *Aislamiento y Ventilación:* La integración de BIPV en fachadas y techos puede afectar el desempeño térmico del edificio positiva o negativamente, puede aportar ventajas en regulación de temperatura interna, por ejemplo, los vidrios solares con cámara interna de aire o argón son una buena solución, para que exista también una buena ventilación, evitar el sobrecalentamiento y mejorar así la eficiencia energética general [25].

6.3.1.5 Interferencias Eléctricas y Conectividad:

- *Gestión de Sombra Parcial:* La sombra parcial en módulos BIPV puede causar puntos calientes y reducir significativamente la producción de energía. Las tecnologías avanzadas de gestión de sombra y optimización de paneles son esenciales para mitigar este problema, tener presente sombras generadas por la propia construcción, torres de energía y antenas de TV es importante considerarlas en la evaluación del proyecto BIPV [26].
- *Cableado:* Integrar de manera efectiva el cableado y los componentes eléctricos en la estructura del edificio sin comprometer la estética, la funcionalidad del edificio y eficiencia energética es un desafío significativo. Tener presente cuantas conexiones en serie o en paralelo se harán con los vidrios solares, baldosas, tejas o módulos puede generar un cambio importante en la forma de conectividad y en los costos.

6.3.2 Desafíos Económicos

- *Costos Iniciales:* Los costos iniciales de instalación de BIPV suelen ser más altos que los paneles solares tradicionales debido al tipo de tecnología, el nivel personalización y los materiales semiconductores específicos utilizados. Como material de construcción los BIPV pueden ser más costosos en primera instancia, sin embargo, al

largo plazo se retornará esa inversión. Ventaja que no tiene por ejemplo una ventana, baldosa o teja normal.

- *Retorno de Inversión:* En un primer análisis el retorno de inversión podría ser más prolongado debido a la menor eficiencia energética en las tecnologías BIPV y los mayores costos iniciales, esto podría disuadir a los inversionistas y propietarios de casas y edificios. En proyectos nuevos, los retornos serán muy buenos ya que desde un inicio el proyecto ha sido dimensionado para la inclusión de BIPV como elemento de construcción y de generación eléctrica, el dinero estimado en vidrios y/o baldosas normales entrará al presupuesto del vidrio solar, también al comprar mayores cantidades los costos son menores. Más adelante se presentan proyectos con un retorno menor a 3 años, esto es positivo para proyectos con vida útil de 20 años.

Por ejemplo, para 2022, el costo de los módulos fotovoltaicos constituía entre el 43% y el 77% del costo total de un sistema fotovoltaico. La tecnología utilizada en los módulos BIPV es el principal factor que influye en estos costos. Por ejemplo, el precio medio de un módulo BIPV de vidrio en Europa se sitúa aproximadamente entre 120 y 250 €/m². Otra opción es la instalación de sistemas BIPV de capa fina integrados en cubiertas, cuyo coste medio es de 134 €/m². [27]

6.3.3 Desafíos Regulatorios

- *Normativas y Estándares:* La falta de normativas y estándares específicos para BIPV en muchos países dificulta la aprobación de proyectos y el aseguramiento de la calidad. Esto incluye normas de construcción, seguridad eléctrica y eficiencia energética. En Colombia, por ejemplo, BIPV es aún un tema desconocido y con poca reglamentación, se aplica la normativa para paneles solares convencionales de acuerdo con el RETIE. Dentro de los estándares internacionales podemos tener en cuenta las dadas en el anexo 3 y 4 como referencia.

6.3.4 Desafíos de Aceptación Social

- *Conciencia y Conocimiento:* La falta de conocimiento y conciencia sobre los beneficios y capacidades de las tecnologías BIPV entre arquitectos, ingenieros y el público en general puede limitar su adopción.

6.4 Proyectos a nivel mundial

Los sistemas BIPV han ido creciendo en menor escala en comparación a las energías renovables; Asia y Europa son los lugares donde más proyectos se han desarrollado, en América latina son menores los avances que hay en esta materia. Sin embargo, existen algunos proyectos especialmente en México. A continuación, algunas empresas que están más avanzadas en esta área.

Tabla 3 Empresas de BIPV

Nombre de la Empresa	País	Página Web
Onyx Solar	España	onyxsolar.com
Polysolar	Reino Unido	polysolar.co.uk
Ertek Solar	Austria	ertek-solar.at
AGC Glass Europe	Bélgica	agc-glass.eu
Solaria Corporation	USA	solaria.com
Heliatek	Alemania	heliatek.com
Kyocera Corporation	Japón	kyocera.com
Tesla, Inc.	USA	tesla.com
Hanergy	China	https://www.hanergy.eu/
Rksolar	China	http://www.rksolar.com.cn/
BIPV Global	USA	https://bipvglobal.com/
Sunflare	USA	https://www.sunflaresolar.com/
NextCity Labs	España	https://nextcitylabs.com/global/es/

China es la gran potencia en fabricación de equipos solares, en cuanto al sector BIPV hay por lo menos 36 empresas que ya están relacionadas con BIPV en Shanghai y mercados de valores de Shenzhen, buscando investigar y comercializar este tipo de solución [28]. En el

mundo existen decenas y cientos de pequeños proyectos BIPV; a continuación, presentamos algunos ejemplos de los más grandes, en los cuales podemos observar cómo se usan BIPV en ventanas, fachada opacas, transparentes y techos. Instalaciones donde se hace sinergia con la estética y el diseño mientras se desea ahorrar energía, disminuir niveles de CO₂ y vender excedentes.

- **Copenhagen International School -Dinamarca**

Con sus 12.000 módulos personalizados (que utiliza vidrio solar azul-verde Kromatix procesos con nanotecnología y plasma) [29] inclinados individualmente que cubren cada fachada de los pisos superiores, se suministra hasta el 50% de las necesidades eléctricas de la escuela. Área Total - 6000 M², Capacidad instalada: 720 kWp, Año:2017



Figura 7 Copenhagen International School - Dinamarca

Fuente: <https://solarlab.global/project/copenhagen-international-school>

- **Jiantao Base (BIPV) project in Gaoan, in China's Jiangxi province**

Se considera el proyecto BIPV más grande del mundo, instalado por Sungrow, se espera que el parque industrial funcione con el 100% de la electricidad generada por el proyecto. 11 techos fueron cambiados en este parque industrial a BIPV, instalado en el año 2022.

Área: 665.000m²

Energía generada al año: 120 GWh

Emisiones de CO2 evitadas al año: 96.000 toneladas

Tecnología: CITIC Bo BIPV-Zhiro



Figura 8 Jiantao Base project China's

Fuente: <https://en.sungrowpower.com/newsDetail/2765/sungrow-powers-world-s-largest-bipv-project-with-a-capacity-of-120-mw-and-installed-with-sungrow-inverter-solutions>

En los siguientes proyectos observamos también el uso de toda la fachada, permitiendo ampliar la capacidad instalada en kWp y así aumentar la energía generada e inyectada.

- **Edificio Genyo -Granada España**

La fachada presenta paneles de vidrio de silicio amorfo bicolor con un grado de semi transparencia del 20% (L visión) que cubren una superficie activa total de 550 m². Este proyecto con una potencia instalada de 19,3 kWp genera 32.000 kWh de energía al año.

El retorno de la inversión fue en 3 años. Año: 2017



Figura 9 Edificio Genyo

Fuente: <https://onyxsolar.es/edificio-genyo>

Área Total - 1,062 M2

Electricidad generada en 35 años - 924.865 kWh

Emisiones de CO2 evitadas en 35 años - 620 Toneladas de CO2

- **Sede COCA-COLA/FEMSA- Monterrey México**



Figura 10 Coca-Cola/FEMSA

Fuente: <https://onyxsolar.es/sede-coca-cola-femsa>

Esta solución de fachada ventilada consiste en la integración de una doble piel de vidrio fotovoltaico cuya estructura de fijación no se aprecia desde el interior del edificio. Para ello, se diseñaron a medida 400 vidrios de grandes dimensiones de silicio amorfo de color gris oscuro y con un 20% de semi transparencia (L vision). Esta solución constructiva puede alcanzar hasta 40% de las necesidades energéticas del edificio. Año: 2014

El retorno de la inversión fue en menos de 3 años. Área total - 588 M2

Electricidad generada por año - 17.223 kWh

Emisiones de CO2 evitadas al año - 11.539 CO2

6.5 Análisis Energético de un sistema BIPV 10.874 kWp

Para analizar técnicamente un proyecto BIPV, se ha escogido realizar la simulación en PVsyst del proyecto conectado a la red “Cubo de Innovación” de la empresa CHEC del grupo EPM que se está implementando en Manizales-Colombia, el cual actualmente está en etapa de montaje del sistema y ya se construyó la estructura del edificio, este proyecto

busca crear un espacio de innovación donde se prueben diferentes tecnologías y se abra una puerta al desarrollo y la investigación.

Se utilizarán 48 tejas solares de 88 W de Cristal de Silicio (Si) y también 69 vidrios solares de 92W con 20% de transparencia de Teluro de Cadmio (CdTe) con inversores trifásicos Huawei.

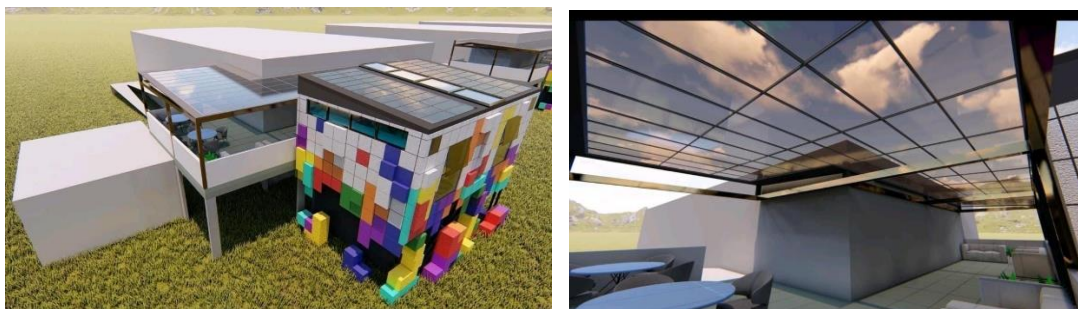


Figura 11 Modelados externos e interno del Cubo de Innovación

En la parte superior de la estructura de colores van instaladas las tejas solares y 4 vidrios como ventanas, en la parte en L van instalados los demás vidrios con transparencia como techo, lo que permitirá que dentro de la sala exista un ingreso de la luz natural, utilizando los vidrios y tejas como parte de la estructura del predio. Ver figura 11.

Tabla 4 Características BIPV del Cubo Innovación

BIPV	Tecnología	Potencia (W)	Tamaño (mm)	Peso (kg)	Transparencia	Color	Cantidad
Vidrio solar	CdTe	92	1200*600*7	12,2	20%	Gris	69
Teja Solar	Si	88	1185*480*8	8,8	0%	Negro	48



Figura 12 Construcción del Cubo de Innovación

De acuerdo con la información anterior se realiza la simulación en PVsyst.

Tabla 5 Características del sistema BIPV en la Simulación

BIPV	Tecnología	Potencia (W)	Inclinación (°)	Peso (kg)	Transparencia	Color	Cantidad
Techo	CdTe	95	0	12,2	20%	Gris	66
Ventanas	CdTe	95	90	12,2	20%	Gris	4
Tejas	Si	88	10	8,8	0%	Negro	48

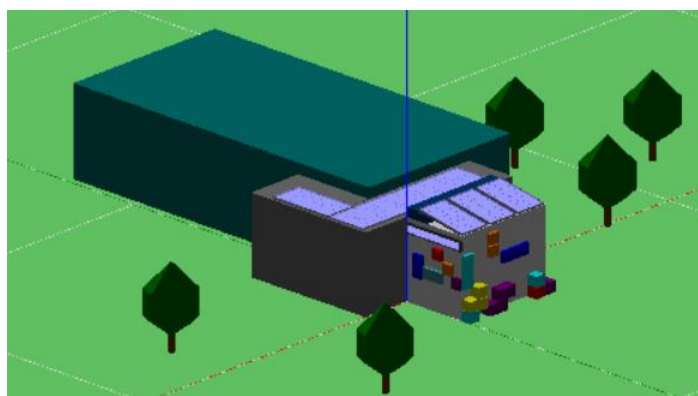


Figura 13 Montaje 3D simulación PVsyst Cubo de Innovación

Utilizando dos inversores trifásicos de Huawei SUN2000-5KTL-M1-380V de 5kW podemos independizar los vidrios y tejas; en la simulación se usa el vidrio solar de NCL-BIPV-P3-95 de 95W ya que el de 92W no se encuentra en la librería, se usan 70 vidrios para equilibrar las entradas MPPT del inversor, donde 4 vidrios se usan como ventana; las tejas solares son las NCL-BP-P-C01-B (88W) de 88W. La configuración eléctrica del sistema se define con los dos inversores en paralelo, para los vidrios se hacen 10 cadenas de 7 módulos y para las tejas 2 cadenas de 24 módulos, como se observa en el unifilar de la figura 14, dirección norte para las tejas, 10°. Capacidad total del sistema: 10.874kWp

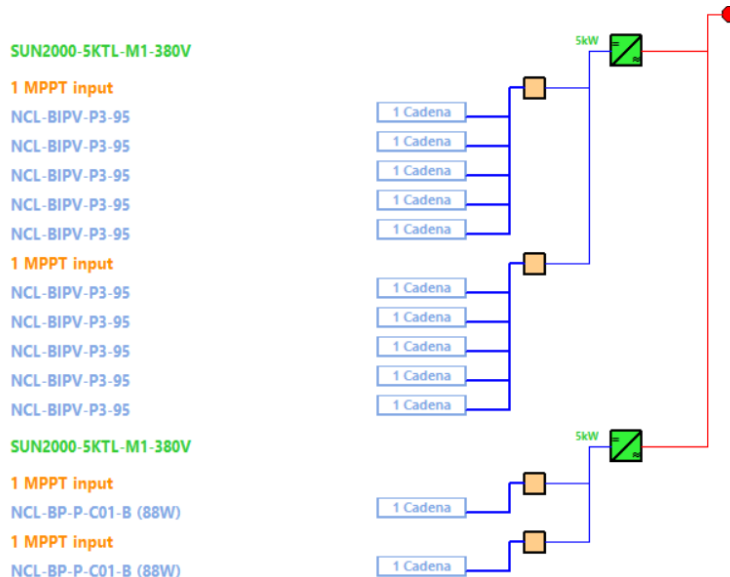


Figura 14 Unifilar del sistema eléctrico del BIPV

A continuación, se presentan los resultados energéticos más importantes de la simulación, la eficiencia de vidrios y te dejass es de 16% y 21% respectivamente, marca Nextcity labs.

Tabla 6 Resultados energéticos del sistema BIPV

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh/día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
15589	1299,08	43,30	78,43	-6,84	-3,14	-3,20

De los anteriores resultados podemos analizar que los factores que más afectan el aporte energético de la energía final a inyectar son el factor IAM -3,20%, el cual ajusta la irradiación solar capturada por los módulos según el ángulo de incidencia de los rayos solares; por lo cual, la eficiencia de captación de los vidrios disminuye cuando la luz solar incide en ángulos oblicuos, como es el caso especialmente de las ventanas. También tenemos las pérdidas por sombras cercanas que son del 3,14%, estas pérdidas se dan especialmente por la misma estructura del Cubo de Innovación, ya que los propios muros de la cubierta alcanzan a generar un poco de sombra, especialmente en los vidrios instalados en la L a 0°. Ver figura 15. Además, se tienen una pérdida FV debido a la temperatura de -6,70%, en el anexo 6 se presenta el informe completo de la simulación.

Como los BIPV hacen parte de las estructuras de los predios y se adaptan a la forma que tenga estos, generalmente van a estar influenciados por estos ángulos y sombras, los cuales tanto el diseñador del sistema solar como el arquitecto o constructor del edificio deben tener en cuenta y trabajar en conjunto para obtener el mayor rendimiento.

A continuación, presentamos otros resultados, variando la inclinación de los vidrios del techo de 0 a 15 grados, con esta inclinación el agua de la lluvia corre mejor y ayuda a limpiar los módulos, sin embargo, esto implicaría un cambio en la estructura del techo del cubo, esta zona ya no sería plana sino inclinada. Ver Figura 15.

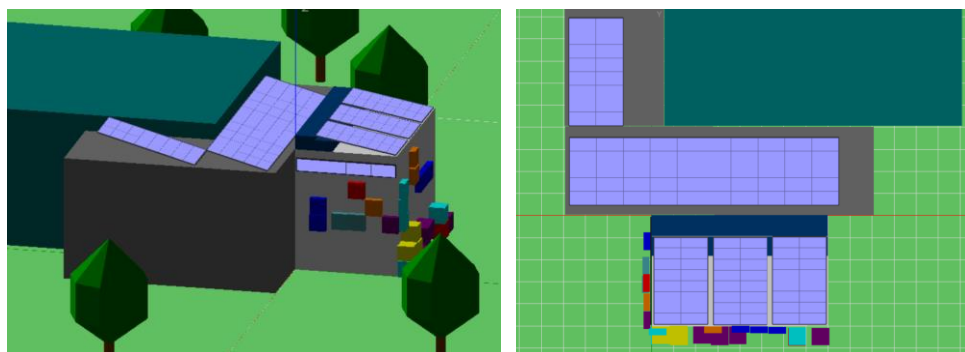


Figura 15 Montaje 3D simulación PVsyst, vidrios del techo a 15 grados

Tabla 7 Resultados energéticos del sistema BIPV vidrios a 15 grados

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh /día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
14859	1237,41	41,24	78,40	-11,18	-2,93	-3,48

Como observamos, la producción anual disminuye a 14859 kWh/año al igual que las pérdidas por sombras, ya que los vidrios tienen más altura y se evitan las sombras de los muros. Sin embargo, las pérdidas por incidencia en el módulo aumentan a 3,48% y las globales aumentan a 11,18% los cambios mínimos en la inclinación pueden ayudar al sistema a tener una mejor o un peor rendimiento energético y producir así menos energía, como en este caso.

A continuación, figura 16, variamos la posición de las 4 ventanas ya no en el lado oriente del cubo sino en el lado norte.

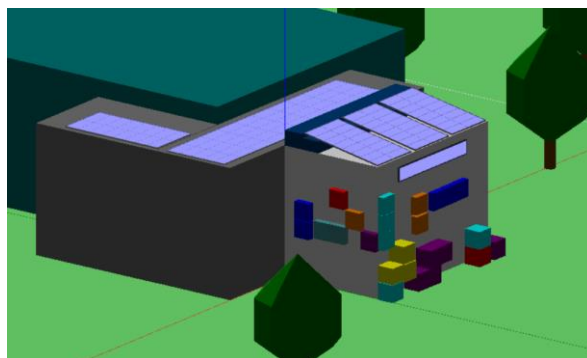


Figura 16 Montaje 3D simulación PVsyst, ventanas al norte

Tabla 8 Resultados energéticos del sistema BIPV ventanas al norte

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh/día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
15413	1284,41	42,81	78,22	-7,65	-3,32	-3,38

Con los resultados anteriores, tabla 8, podemos observar que la generación disminuye de 15589 Kwh/año a 15413 kWh/año y las pérdidas aumentan de 6,84% a 7,65%, este pequeño porcentaje se debe a que se pierde toda la ganancia que se tenía de la radiación de la mañana, al estar antes en la cara oriente del cubo. Aunque la potencia de las 4 ventanas es mínima (380W) respecto a toda la instalación, si fuera un grupo más grande o una fachada completa este aumento de pérdidas sería mucho más considerable.

Si instalamos esos 4 vidrios como techo y no como ventanas los resultados son los siguientes, como muestra la tabla 9.

Tabla 9 Resultados energéticos del sistema BIPV sin ventanas

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh/día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
16989	1415,75	47,19	80,13	-0,63	-1,30	-2,82

Vemos que hay una mejora considerable, las pérdidas globales caen a menos del 1% y el rendimiento del sistema aumenta al 80%, aumentando la producción anual de energía; sin embargo, con este cambio hay que considerar, que en muchos predios, edificios o estructuras no se tendrá más espacio en el techo, o incluso es imposible instalar en él. Por lo cual, se recurre a instalar en la fachada y en las ventanas, ganando ese espacio, el cual en edificios grandes se aprovechará de gran manera, como vimos en los proyectos presentados de las figuras 7, 9 y 10. Finalmente analizamos los vidrios y las tejas como sistemas individuales.

- Vidrios: Capacidad de 6.650 kWp

Tabla 10 Resultados energéticos del sistema BIPV solo Vidrios

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh/día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
9191	765,91	25,53	78,42	-10,17	-5,30	-3,30

- Tejas: Capacidad de 4.224 kWp

Tabla 11 Resultados energéticos del sistema BIPV solo Tejas

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh/día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
6400	533.33	17,77	78,47	-1,60	-0,02	-3,08

Aunque las dos simulaciones tienen un rendimiento (PR) similar, en el rango del 78,4% observamos que las pérdidas en vidrios son mayores tanto por incidencia solar 3,30% como por sombras cercanas 5,30% y además las pérdidas por FV debido a la temperatura en vidrios fue del 4,79% y en las tejas fue 9,28%. Este valor es importante tenerlo en cuenta, ya que estamos trabajando con materiales semiconductores Silicio (tejas) y telururo de cadmio (vidrios), por lo cual estos coeficientes de porcentaje por grado Celsius (%/°C),

influyen en el rendimiento del sistema, un aumento en la temperatura de los módulos disminuye la eficiencia del sistema. Es importante entonces la tecnología a seleccionar, pues tendrá un rendimiento diferente por su naturaleza y de acuerdo con la inclinación y posición final dentro de la estructura. En el anexo 7 se presentan imágenes de los equipos a usar físicamente en el Cubo de Innovación.

6.6 Retos técnicos de un buen dimensionamiento para un sistema BIPV

Para dimensionar adecuadamente un proyecto solar BIPV, técnicamente debemos tener en cuenta los siguientes aspectos, los cuales serán un reto con diferente grado de complejidad a afrontar según el tipo de BIPV: flexibles, rígidos, vidrios, tejas, baldosas, transparentes, con colores o por el tipo de proyecto solar (inyección, sin excedentes, aislado).

1. Ubicación y radiación solar del sitio, como en cualquier proyecto solar.
2. Espacio disponible para instalación de módulos BIPV ya sea piso, techo, fachada o ventana.
3. Fuerza estructural del techo, la fachada o marcos de la ventana, para proyectos de remodelación o si es proyecto nuevo contemplar el peso de los módulos más las canaletas, cableados y aislamientos, especialmente cuando es fachada, lo que se conoce como fachadas aisladas o ventiladas [30].
4. Estética del edificio y del entorno para que el BIPV a seleccionar sea acorde al diseño o requerimientos del sitio.
5. Posibles sombras que el propio predio, edificio o estructura genere sobre alguna zona donde se instalará o se podría instalar BIPV, por estética en estas zonas podrían instalarse vidrios, módulos o tejas normales que hacen juego, pero no generan energía solar.
6. Sombras externas por árboles, líneas de transmisión, antenas, edificios etc.
7. Definir si se desea niveles de transparencia para el paso de luz natural; a mayor nivel de transparencia menor capacidad de generación de energía [31].

8. Existen tecnologías donde el color o estampado que tiene el BIPV influye en la capacidad de generación, se debe tener en cuenta esto y verificar con el fabricante.
9. Características eléctricas de los módulos BIPV en sus voltajes de Voc y Isc, ciertas tecnologías tienen diferentes niveles a los módulos convencionales, dimensionar correctamente la configuración para cada entrada MPPT del inversor no será tan fácil, ciertas configuraciones requerirán más módulos en paralelo lo que significa más cable y materiales conectores.
10. La posición respecto al sur (para Colombia) y el grado de inclinación influyen de manera directa en el rendimiento del sistema y la producción final de energía. El ángulo de incidencia en la mayoría de los casos es definido por la misma forma del edificio. Sin embargo, si es posible se puede intentar adaptar o modificar un estos ángulos y posiciones por medio del diseño estético para mejorar así el rendimiento energético.
11. Los módulos BIPV de la mayoría de los fabricantes vienen normalmente con conectores MC4 por lo cual se podrán conectar con cualquier inversor del mercado, lo importante es respetar las corrientes, voltajes y potencia que el inversor permite a su entrada DC y que exista un equilibrio eléctrico entre las diferentes entradas MPPT.
12. Realizar todos los cálculos y si es posible crear simulaciones en PVsyst ayudará a confirmar esa promesa de valor que se le está dando al cliente de la energía que va a generar, ahorrar y/o dado el caso vender a la red.
13. En cuanto al inversor, se debe verificar la potencia máxima de entrada y salida, pero especialmente el tipo de red, si es monofásica, bifásica o trifásica, junto a los voltajes de salida AC, si son acordes a la red a la cual se va a conectar. Muchos de los inversores que llegan a Colombia son con voltaje europeo 220/380 y no 123/220V para niveles residenciales. Los voltajes en el punto de inyección se deben tener claros para comprobar si se adecuan o es necesario un transformador de acople.

14. Cumplir con todas las normas técnicas y de seguridad locales exigidas por la ley y los entes gubernamentales, como Operadores de Red, la CREG y la UPME en el caso de Colombia.

6.7 Definición de un proyecto BIPV

A la hora de definir un proyecto solar con BIPV hay tener en claro varios puntos:

1. Relación entre estética y generación eléctrica, cada una tendrá un peso y un valor de importancia diferente para cada cliente. Algunos clientes querrán solamente aprovechar su fachada, ventana, techo en vidrio y generar algo de energía en ese espacio con un diseño moderno y atractivo, otras personas preferirán módulos que tengan más potencia, sin interesarles asuntos como estética y diseño.
2. Definir el tipo de proyecto si es conectado a la red, con excedentes o aislado con almacenamiento, definir esto puede cambiar los niveles de exigencia técnica.
3. Definir si el proyecto será residencial, comercial o industrial, esto trae tanto responsabilidades como beneficios que los gobiernos otorgan.
4. Definir si se quiere optar por certificaciones ambientales tipo LEED, ya que el proyecto debe definir un enfoque más ambiental y eficiente en los recursos.
5. Los BIPV no solo ayudan a tener una estética moderna y a generar energía eléctrica, ciertos BIPV como los vidrios con cámara de aire o lisos ayudan a aislar el ruido y regular flujo de aire y la transferencia de calor [32], este es otro factor importante a la hora de definir el proyecto que va a ejecutar y los beneficios que desea obtener.
6. En proyectos de conexión a la red, se debe tener en cuenta la capacidad del transformador del punto de inyección, que el operador de red confirme que la energía a inyectar hacia la red nacional, el transformador la puede recibir. Además de esto, para Colombia si este tipo de proyectos venderá la energía sobrante, previamente deben ser certificados e inscritos ante el operador de red local.
7. Certificaciones de los módulos BIPV, cada día se van desarrollando más tecnologías de generación con diferentes fabricantes; sin embargo, para

nacionalizar la importación y legalizar la conexión de proyectos BIPV, se debe no solo contar con los certificados de conformidad de fábrica sino con los certificados nacionales de acuerdo las normas internacionales que exigen, como el RETIE para el caso de Colombia.

6.8 Costos de los BIPV

Como se habló en el capítulo 6.3.2 existen unos desafíos a nivel económico que abordar, solventar este punto será importante en la definición, adjudicación y ejecución de un proyecto BIPV, pues financieramente es importante que el proyecto también sea rentable y tenga un tiempo de retorno corto. En los ejemplos dados en el capítulo 6.4 observamos que los proyectos de la empresa Onyx, edificios Genyo en Granada España y el de Coca Cola - FEMSA en Monterrey México con fachadas BIPV tienen un retorno en menos de tres años, lo cual es muy positivo y va en concordancia con la rápida recuperación que normalmente presentan estos sistemas en pocos años[33], teniendo presente que la vida útil de los proyectos solares está entre 20 y 25 años y la tasa de retorno de proyectos solares convencionales oscila entre 5-8 años.

En cuanto a costos es importante recordar que los BIPV compiten también con elementos de construcción para fachadas, como vidrios, piedras, acristalamientos etc. hay estudios que incluso han concluido como los BIPV pueden añadir solo 2-5% del costo de una construcción, pero ser un 20% más económico que piedra pulida [34] y con el rendimiento de generación eléctrica la inversión se recupera y da ganancias. En el anexo 8 se presentan algunos costos de producción de varias tecnologías BIPV a 2020 sin tener en cuenta un margen de ganancia y costos asociados a transporte, seguros y nacionalización, encontramos por ejemplo precios como: Cristal de silicio entre 0.4-0.5 €/W, película delgada de CIGS cercano a 0.55 €/W y película delgada de CdTe 0.50€/W. De acuerdo a datos de la empresa Nextcity labs quienes fabrican en china vidrios y tejas solares en Si y CdTe y distribuyen en Colombia, los costos FOB (Free on Board, entregando el producto en fábrica) a 2023 para productos certificados y cantidades a partir de 200 unidades estaban

alrededor de los USD \$71 para las tejas de 88W de silicio y a USD 85\$ para los vidrios de 95W de telururo de cadmio como los instalados en el Cubo de Innovación de la CHEC; ósea, cada teja costaría unos 284000\$ y cada vidrio 340000\$, sin tener presentes costos asociados a transportes, seguros y nacionalización. Estos costos pueden disminuir según la cantidad de unidades compradas, llegando a costos incluso de USD 65\$ por teja y a USD 80 \$ por vidrio.

De acuerdo con los datos dados por la CHEC el costo final los equipos, según negociaciones y acuerdos entre compañías fue de 672237\$ cada teja y de 668000\$ cada vidrio en pesos colombianos, entregando los equipos en Colombia. Si comparamos solamente los precios uno a uno entre estos precios, con un panel convencional de silicio monocristalino, dentro de ese rango podríamos adquirir un panel solar con potencias entre 500W - 600W las cuales son mayores a los 88W de las tejas o los 95W de los vidrios, sin embargo, cabe recordar que los BIPV traen además el ahorro adquirido en materiales de construcciones como vidrios para ventanas o techos o baldosas para fachada, costos que se ahorran en presupuesto de construcción y entran al presupuesto para compra de los módulos BIPV, por ejemplo un vidrio templado de 1200 x 600 x 7 mm vale en promedio 120000\$ por unidad[35] además de los beneficios de confort y estética. Debido a esto es normal encontrar en la literatura que los costos de BIPV se midan en metro cuadrado. Al estudiar un sistema BIPV como material de revestimiento, es importante analizar si es factible cubrir solamente ciertas caras o si es necesario todo el edificio para compensar los costos y tener ingresos por inyección.[36] es importante resaltar que un proceso de renovación saldría más costoso que un proyecto de construcción nueva. Ya que se deben ajustar o crear nuevas bases, marcos, soportería y generalmente se debe crear toda una nueva fachada para que la estética sea equilibrada.

En el anexo 9 se presenta un ejemplo de costos reales de un proyecto on grid residencial: San Isidro del Lago de 4,4kWp con 8 paneles convencionales y el cambio en costos si se hubiese hecho con vidrios solares.

Algunos puntos cruciales para tener en cuenta en los costos de los módulos BIPV son:

1. *Tecnología por usar:* Los costos son diferentes si compramos vidrios solares de silicio amorfo, telururo de Cadmio o si compramos paneles flexibles u otro modulo BIPV, definir la tecnología es importante no solo en características técnicas sino económicas, ya que para ciertas tecnologías podrían requerirse también más equipos o cableado, lo que se traduce en costos.
2. *Cantidad de productos:* Una vez definida la tecnología es importante considerar el tamaño en kWp del proyecto, pues para proyectos pequeños será más costoso comprarlos, ya que la mayoría de BIPV son fabricados y personalizados por diseño (color, tamaño, forma y grosor deseado) saldrá más económico comprar por cantidades grandes, y por tanto el proyecto más rentable; por el momento no es rentable para proyectos muy pequeños, ver ejemplo económico de proyecto de 4.4kWp San Isidro – Anapoima del anexo 9.
3. *Nivel comercial del producto:* No todas las tecnologías tienen un desarrollo de producción y comercio avanzado y madurado en el mercado donde existan varios competidores ofertando, como en el caso de los paneles convencionales monocristalinos y policristalinos de silicio que a 2019 el 90% de producción de módulos solares eran de este tipo y apenas un 5% de películas finas como Cadmio, CIGS, y a-Si [37]. Productos BIPV menos comerciales son más costosos; día a día surgen nuevas tecnologías que buscan ser más eficientes eléctricamente, con buenas características de personalización, sin embargo, hasta no llegar a un nivel comercial expandido en varios países, serán tecnologías costosas y de difícil adquisición.
4. *Certificaciones:* Contar con productos certificados en calidad, seguridad y con estándares internacionales serán más costosos que productos que llegan al mercado, pero no están amparados por certificados de entes competentes.

6.8.1 Ventajas y desventajas económicas de los BIPV

Ventajas económicas de los BIPV

1. *Ahorros en Materiales de Construcción:* Los BIPV pueden reemplazar materiales de construcción tradicionales, lo que puede reducir los costos generales de construcción y del proyecto solar.
2. *Reducción en los Costos de Energía:* Los usuarios finales pueden beneficiarse de una reducción significativa en sus facturas de electricidad, y en algunos casos, generar ingresos adicionales vendiendo el exceso de energía a la red local.
3. *Incentivos Gubernamentales:* Existen en varios países diversos incentivos y políticas gubernamentales para la implementación de energías renovables que ayudan a promover y mejorar la rentabilidad de los proyectos.

Desventajas económicas de los BIPV

1. *Altos Costos Iniciales:* El costo inicial elevado es una barrera significativa para muchos usuarios, especialmente en mercados donde la electricidad convencional es barata o está subsidiada. Proyectos pequeños en capacidad instalada serán más costosos y, además, generarán poca energía afectando el retorno económico por el bajo ahorro energético.
2. *Pequeño Mercado:* La falta de oferta y empresas distribuidoras hace difícil la adquisición de equipos con precios económicos, además de los costos por transporte y nacionalización por la importancia necesaria.
3. *Falta de Apoyo Político Específico:* Aunque existen políticas de apoyo para la energía fotovoltaica en general, son pocas las que están específicamente diseñadas para BIPV, lo que puede limitar su adopción y expansión en algunos mercados, es importante enfatizar no solo en las políticas energéticas y ambientales que influyen en el sector, sino también en las sociales con políticas de inversión. [38]

6.9 Aporte de los BIPV para las ciudades amigables con el medio ambiente.

Las ciudades enfrentan el desafío de reducir su huella de carbono mientras satisfacen las crecientes demandas energéticas, los BIPV ofrecen una solución innovadora de autogeneración al integrar la generación de energía solar directamente en la envolvente de los edificios. Esta integración no solo maximiza el uso del espacio urbano limitado, sino que también contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes de energías convencionales, aportando energía limpia a la matriz energética y reduciendo los costos de consumo, especialmente cuando se tuvo una afectación socio económica mundialmente como la pandemia que elevó las tarifas energéticas.[39]

Además, los BIPV pueden desempeñar un papel crucial en la modernización de las infraestructuras urbanas, haciendo que las ciudades sean más resilientes y autosuficientes en términos energéticos. Al generar energía localmente, se reducen las pérdidas por transmisión y se mejora la eficiencia del sistema energético urbano. Para las ciudades amigables con el medio ambiente, los BIPV se integran fácilmente con los otros sistemas de gestión y eficiencia energética, permitiendo un control y optimización en tiempo real del uso de estas. La urbanización, el análisis de datos y la digitalización con el internet de las cosas se entrelazan cada vez más en el desarrollo de las ciudades y los países para utilizar tecnologías innovadoras y mejorar los servicios urbanos y la calidad de vida de los ciudadanos. [40] En resumen, los BIPV son una herramienta esencial para avanzar hacia ciudades más verdes, eficientes y sostenibles, optimizar el uso de la energía generada por los BIPV durante las horas pico, cuando los precios de la electricidad de la red son más altos ayuda a gestionar no solo la producción de energía, sino también el consumo, adaptándonos dinámicamente a las fluctuaciones de precios y demanda. [41]

Los sistemas BIPV juegan un papel crucial en la evolución hacia ciudades amigables con el medio ambiente y sostenibles, proporcionando una gestión operativa más eficiente de los nuevos materiales de construcción. Gracias a los BIPV, los administradores y responsables tanto de la parte técnica como de la formulación de políticas urbanas pueden

acceder a nuevas tecnologías, que dan información precisa y en tiempo real, lo que les permite optimizar la gestión energética y tomar así decisiones más informadas para un excelente desarrollo urbano.

Las micro redes eléctricas que gestionan local y remotamente los recursos que estas fuentes solares suministran; utilizando el análisis de datos, sistemas de comunicación y la inteligencia artificial, se aportará a la adopción masiva de los BIPV, permitiendo además que los predios se valoricen más por la tecnología implantada y la capacidad de estas de garantizar confiabilidad eléctrica. Al integrar estos sistemas en la infraestructura de la ciudad en edificios, estaciones y sectores de la movilidad no solo se mejora la eficiencia energética [42] sino que también se amplía el portafolio de productos eficientes para construcción, se refuerza la sostenibilidad ambiental con edificios de emisión cero. También se impulsan la innovación de nuevos servicios urbanos auto generadores que fortalecen así la economía local.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de la energía solar fotovoltaica integrada en edificios (BIPV) se ha convertido en una solución clave para avanzar hacia las ciudades amigables con el medio ambiente. A lo largo de esta investigación, se ha demostrado que la integración de BIPV no solo representa una alternativa para la generación de energía renovable, sino que también ofrece beneficios estéticos, arquitectónicos y medioambientales.

Uno de los principales hallazgos de esta tesis fue la identificación de las diversas tecnologías BIPV disponibles y en desarrollo. Estas tecnologías, han mostrado avances importantes en términos de eficiencia, flexibilidad y aplicaciones arquitectónicas. La variedad de soluciones BIPV permite su adaptación a diferentes tipos de edificaciones, desde viviendas residenciales, edificios, hasta grandes complejos industriales. Lo que amplía el rango de posibilidades para su implementación, contribuyendo también a la certificación de edificios como estructuras de cero emisiones, agregando un valor significativo desde el punto de vista ambiental y social.

El análisis técnico realizado con el proyecto "Cubo de Innovación", ha resaltado la importancia e influencia que tienen para los BIPV factores como la eficiencia de conversión, sombras, inclinación, posición de los módulos, y la integración arquitectónica en la energía total generada por un proyecto. Técnicamente es importante resaltar que como parte de la estructura integrada tienen la capacidad de actuar no solo como generadores de energía si no a la vez como aislantes térmicos y de ruido ayudando a mejorar la eficiencia energética general de los predios. Poder instalar vidrios, tejas, baldosas solares con diferentes colores, formas, grosores y niveles de transparencia es otra ventaja estética considerable que no tienen otros elementos de construcción. La investigación ha puesto en evidencia que, aunque los sistemas BIPV han mejorado considerablemente sus características en la historia; todavía enfrentan desafíos significativos en el área técnico-

comercial, especialmente al no tener suficiente oferta en el mercado y precios competitivos, como se vio en el ejemplo del proyecto San Isidro en Anapoima.

Desde el punto de vista económico, el estudio ha señalado que, aunque los costos iniciales de fabricación de módulos BIPV son más elevados que los paneles fotovoltaicos tradicionales, la inversión se justifica especialmente para proyectos grandes por la reducción del costo de las unidades, beneficios en ahorro de materiales de construcción, mayor ahorro energético, valorización de las propiedades y mayor venta de energía; beneficios que materiales de construcción común no ofrecen. Recalcando que, para proyectos pequeños, aún no es viable este tipo de implementación ya que el precio inicial incluso llega a doblar el de un proyecto con paneles solares convencionales.

Finalmente, se concluye que la implementación de BIPV es un paso crucial en la optimización de los techos, fachadas y ventanas debido al espacio limitado que tienen ciertos edificios y construcciones. Nuestro futuro depende en gran medida, de la capacidad para integrar soluciones energéticas de este tipo, promoviendo así un entorno más inteligente y renovable para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, impulsando la innovación y el fortalecimiento económico.

REFERENCIAS

- [1] B. Petter Jelle, C. Breivik, y H. Drolsum Røkenes, «Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 100, pp. 69-96, may 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2011.12.016.
- [2] M. Pellegrino, G. Flaminio, y G. Graditi, «Testing and Standards for new BIPV products», en *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria: IEEE, nov. 2013, pp. 8127-8132. doi: 10.1109/IECON.2013.6700492.
- [3] J. Ajayan, D. Nirmal, P. Mohankumar, M. Saravanan, M. Jagadesh, y L. Arivazhagan, «A review of photovoltaic performance of organic/inorganic solar cells for future renewable and sustainable energy technologies», *Superlattices Microstruct.*, vol. 143, p. 106549, jul. 2020, doi: 10.1016/j.spmi.2020.106549.
- [4] Nexcity Labs, «Brochure Vidrio Fotovoltaico empresa NCL». octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://nextcitylabs.com/global/es/ciudades-inteligentes/>
- [5] J. H. Yun, E. S. Cha, B. T. Ahn, H. Kwon, y E. A. Al-Ammar, «Performance improvement in CdTe solar cells by modifying the CdS/CdTe interface with a Cd treatment», *Curr. Appl. Phys.*, vol. 14, n.º 4, pp. 630-635, abr. 2014, doi: 10.1016/j.cap.2013.11.036.
- [6] Y. Feng *et al.*, «Coevaporated Cd_{1-x}Mg_xTe thin films for CdTe solar cells», *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 13-20, ene. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.139.
- [7] E. Artegianni *et al.*, «Effects of CdTe selenization on the electrical properties of the absorber for the fabrication of CdSexTe_{1-x}/CdTe based solar cells», *Sol. Energy*, vol. 227, pp. 8-12, oct. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.08.070.
- [8] A. Roy, A. Ghosh, S. Bhandari, S. Sundaram, y T. K. Mallick, «Perovskite Solar Cells for BIPV Application: A Review», *Buildings*, vol. 10, n.º 7, p. 129, jul. 2020, doi: 10.3390/buildings10070129.
- [9] L. Mulcué-Nieto y L. López, «NUEVOS APORTES AL DISEÑO DE EDIFICIOS FOTOVOLTAICOS PARA CIUDADES SOSTENIBLES», 2016, pp. 85-107.
- [10] L. F. Mulcué-Nieto y L. Mora-López, «A novel methodology for the pre-classification of façades usable for the decision of installation of integrated PV in buildings: The case for equatorial countries», *Energy*, vol. 141, pp. 2264-2276, dic. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.150.
- [11] L. F. Mulcué-Nieto y L. Mora-López, «Methodology to establish the permitted maximum losses due to shading and orientation in photovoltaic applications in buildings», *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 37-45, ene. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.088.
- [12] L. F. Mulcué-Nieto y L. Mora-López, «A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries», *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 423-442, sep. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.04.030.
- [13] A. Taşer, B. K. Koyunbaba, y T. Kazanasmaz, «Thermal, daylight, and energy potential of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems: A comprehensive review of effects and developments», *Sol. Energy*, vol. 251, pp. 171-196, feb. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2022.12.039.

- [14] L. F. Mulcué Nieto, «Desarrollo de herramientas para el dimensionamiento y simulación de sistemas fotovoltaicos en Colombia. Aplicación a la ciudad de Manizales, Caldas», masterThesis, Universidad Internacional de Andalucía, 2014. Accedido: 6 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.unia.es/handle/10334/3206>
- [15] M. Pelle, E. Lucchi, L. Maturi, A. Astigarraga, y F. Causone, «Coloured BIPV Technologies: Methodological and Experimental Assessment for Architecturally Sensitive Areas», *Energies*, vol. 13, n.º 17, p. 4506, sep. 2020, doi: 10.3390/en13174506.
- [16] Y. Li, L. Li, W. Deng, D. Zhu, y L. Hong, «Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Development Knowledge Map: A Review of Visual Analysis Using CiteSpace», *Buildings*, vol. 13, n.º 2, p. 389, ene. 2023, doi: 10.3390/buildings13020389.
- [17] S. Shi y N. Zhu, «Challenges and Optimization of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) Windows: A Review», *Sustainability*, vol. 15, n.º 22, p. 15876, nov. 2023, doi: 10.3390/su152215876.
- [18] A. K. Shukla, K. Sudhakar, y P. Baredar, «A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system», *Energy Build.*, vol. 128, pp. 99-110, sep. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.077.
- [19] M. R. Cibi y S. Manikandan, «Concise overview of BIPV systems and its future scope», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1130, n.º 1, p. 012033, abr. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1130/1/012033.
- [20] A. C. Lazaroiu, M. Gmal Osman, C.-V. Strejoiu, y G. Lazaroiu, «A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality», *Sustainability*, vol. 15, n.º 23, p. 16297, nov. 2023, doi: 10.3390/su152316297.
- [21] O. H. AL-Zoubi, H. Al-Tahaineh, R. A. Damseh, A. H. AL-Zubi, A.-S. A. Odat, y B. Shboul, «Evaluating the real-world performance of vertically installed bifacial photovoltaic panels in residential settings: empirical findings and implications», *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 19, pp. 386-442, ene. 2024, doi: 10.1093/ijlct/ctad138.
- [22] T. Akbarinejad, E. Machlein, C. Bertolin, G. Lobaccaro, y A. T. Salaj, «Enhancing the deployment of solar energy in Norwegian high-sensitive built environments: challenges and barriers—a scoping review», *Front. Built Environ.*, vol. 9, p. 1285127, oct. 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1285127.
- [23] D. E. Attoye, K. A. Tabet Aoul, y A. Hassan, «A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials», *Sustainability*, vol. 9, n.º 12, p. 2287, dic. 2017, doi: 10.3390/su9122287.
- [24] H. Gholami, H. Nils Røstvik, y K. Steemers, «The Contribution of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) to the Concept of Nearly Zero-Energy Cities in Europe: Potential and Challenges Ahead», *Energies*, vol. 14, n.º 19, p. 6015, sep. 2021, doi: 10.3390/en14196015.
- [25] I. Solar, «SI-ESF-M-BIPV-CT», Transmitancia térmica (Ug). Accedido: 3 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.solarinnova.net/es/productos/fotovoltaica/modulos/bipv/vidrio->

- vidrio/monocristalinos/100-es/productos/fotovoltaica/modulos/bipv/150-si-esf-m-bipv-ct#transmitancia-t%C3%A9rmica-ug
- [26] C. Lee, H. Lee, M. Choi, y J. Yoon, «Performance Evaluation and Prediction of BIPV Systems under Partial Shading Conditions Using Normalized Efficiency», *Energies*, vol. 12, n.º 19, p. 3777, oct. 2019, doi: 10.3390/en12193777.
- [27] sagadmin, «How much does really BIPV cost?», Metsolar Blog. Accedido: 3 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://metsolar.eu/blog/how-much-does-really-bipv-cost/>
- [28] Y. Zhang y Z. Zuo, «Development trend forecast and investment prospect analysis of BIPV: Analysis of stock data based on 36 BIPV Companies in Shanghai and Shenzhen stock markets», en *2021 2nd International Conference on Big Data Economy and Information Management (BDEIM)*, Sanya, China: IEEE, dic. 2021, pp. 298-302. doi: 10.1109/BDEIM55082.2021.00067.
- [29] xawill, «Kromatrix PV Modules», Kromatrix. Accedido: 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://demo.kromatrix.com/pv-modules/>
- [30] E. Ozkalay, G. Friesen, A. Fairbrother, C. Ballif, y A. Virtuani, «Monitoring the Operating Temperatures of Modules in Open-Rack and Typical BIPV Configurations», en *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA: IEEE, jun. 2021, pp. 2023-2026. doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518494.
- [31] A. K. Shukla, K. Sudhakar, y P. Baredar, «Recent advancement in BIPV product technologies: A review», *Energy Build.*, vol. 140, pp. 188-195, abr. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.015.
- [32] B. Norton *et al.*, «Enhancing the performance of building integrated photovoltaics», *Sol. Energy*, vol. 85, n.º 8, pp. 1629-1664, ago. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.004.
- [33] «Pavlakis et al. - 2022 - The social and environmental impact of building in.pdf».
- [34] R. J. Yang y P. X. W. Zou, «Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy», *Int. J. Constr. Manag.*, vol. 16, n.º 1, pp. 39-53, ene. 2016, doi: 10.1080/15623599.2015.1117709.
- [35] «Vidrio Templado Incoloro en Bogota | Vidrios y Vitrolit», Vidrios & Vitrolit. Accedido: 10 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://vitrolit.com/productos/vidrio-templado-incoloro/>
- [36] H. Gholami y H. N. Røstvik, «Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe», *Energy*, vol. 204, p. 117931, ago. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117931.
- [37] J. Román, A. Ramos, y J. Salom, «Review of Transparent and Semi-Transparent Building-Integrated Photovoltaics for Fenestration Application Modeling in Building Simulations», 2022.
- [38] H. Gholami, H. N. Røstvik, y D. Müller-Eie, «Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: Case studies evaluation», *Energy Build.*, vol. 203, p. 109461, nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109461.
- [39] X. Qian, M. Chen, F. Zhao, y H. Ling, «An assessment framework of global smart cities for sustainable development in a post-pandemic era», *Cities*, vol. 150, p. 104990, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cities.2024.104990.

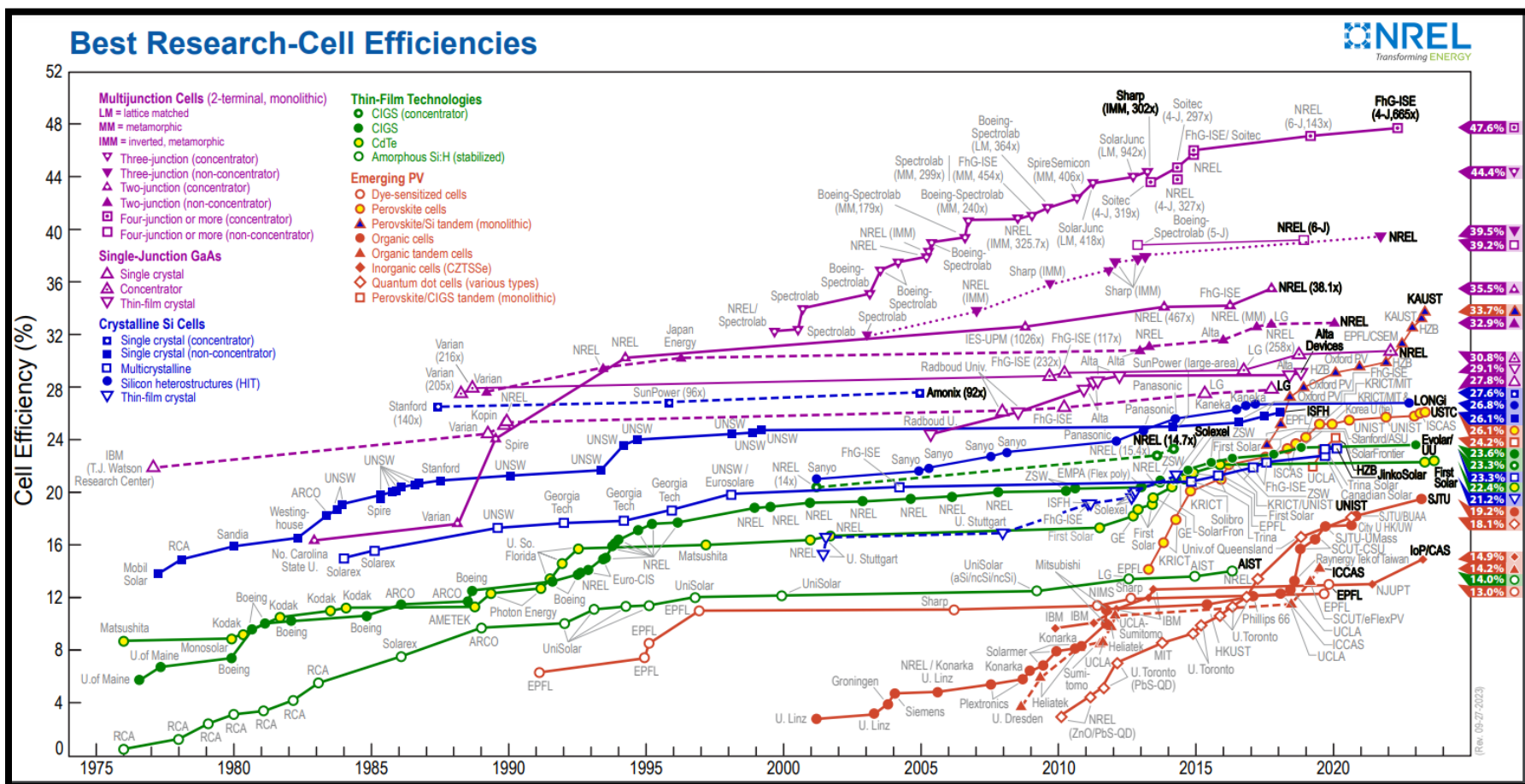
- [40] J. J. Peralta Abadía, C. Walther, A. Osman, y K. Smarsly, «A systematic survey of Internet of Things frameworks for smart city applications», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 83, p. 103949, ago. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.103949.
- [41] M. J. Kalani y M. Kalani, «Controlling the energy supply and demand of grid-connected building integrated photovoltaics considering real-time electricity prices to develop more sustainable and smarter cities», *Optik*, vol. 300, p. 171629, abr. 2024, doi: 10.1016/j.ijleo.2024.171629.
- [42] A. Shankar, K. Vijayakumar, B. C. Babu, y A. Durusu, «Smart LED Lighting System for Energy Efficient Industrial and Commercial LVDC Nanogrid Powered Buildings with BIPV», en *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Istanbul, Turkey: IEEE, sep. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203067.
- [43] «Best Research-Cell Efficiency Chart». Accedido: 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

APÉNDICE**ECUACIONES**

Ecuación 1. Energía Solar fotovoltaica producida.....	12
Ecuación 2. Factor angular	13
Ecuación 3. Pérdidas angulares de Irradiación	13
Ecuación 4. <i>FTB</i>	14
Ecuación 5. <i>FTD</i>	14
Ecuación 6. <i>FTR</i>	14
Ecuación 7. Pérdidas por temperatura	15
Ecuación 8. TOE.....	15
Ecuación 9. Modelo cálculo de PR Mulcue.....	15

Anexos.

Anexo 1. Eficiencia de Celdas según NREL



Fuente: [43]

Anexo 2. Tabla características técnicas de las tecnologías BIPV

Tecnología BIPV	Durabilidad (años)	Resistencia a Impactos (J)	Costo del kW por m ² (USD)	Peso por kW (kg)	Nivel de Absorción de Luz (%)	Nivel de Transparencia Permitido (%)	Nivel de Personalización Permitido	Nivel de Flexibilidad Permitida	Nivel de Aislamiento Térmico y de Ruido (R-value)	Disponibilidad Comercial
Silicio Monocristalino	> 20	> 5	150-250	15-20	> 80	< 20	Limitado a tamaños y formas estándar	Rigidez total, no flexible	0.5-1.0	Alta
Silicio Policristalino	10 a 20	2 a 5	120-200	15-20	> 80	< 20	Limitado a tamaños y formas estándar	Rigidez total, no flexible	0.5-1.0	Alta
CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio)	10 a 20	< 2	140-230	8 a 12	60-80	20-40	Variación en colores y formas disponibles	Alta flexibilidad, adecuada para superficies curvas	< 0.5	Moderada
CdTe (Teluro de Cadmio)	< 10	< 2	90-160	8 a 10	60-80	20-40	Variación en colores y formas disponibles	Alta flexibilidad, adecuada para superficies curvas	< 0.5	Moderada
Vidrio Fotovoltaico Semitransparente	< 10	< 2	250-400	12 a 16	60-80	> 40	Totalmente personalizable	Flexibilidad limitada	> 1.0	Moderada
Doble Piel Fotovoltaica	> 20	> 5	180-280	20-30	> 80	20-40	Variación en colores y formas disponibles	Rigidez total, no flexible	> 1.0	Moderada
PVSD (Dispositivos de Sombreado)	> 20	> 5	100-180	10 a 15	60-80	> 40	Totalmente personalizable	Alta flexibilidad, adecuada para superficies curvas	> 1.0	Moderada
Ventanas Fotovoltaicas Inteligentes	> 20	> 5	200-300	12 a 20	60-80	> 40	Totalmente personalizable	Alta flexibilidad, adecuada para superficies curvas	> 1.0	Baja
Vidrio Fotovoltaico Impreso o Recubierto	10 a 20	2 a 5	220-350	12 a 20	60-80	> 40	Totalmente personalizable	Alta flexibilidad, adecuada para superficies curvas	> 1.0	Moderada
Celdas Orgánicas (OPV)	< 10	< 2	80-150	5 a 8	< 60	> 40	Totalmente personalizable	Muy Alta	< 0.5	Baja
DSSC	< 10	< 2	100-180	5 a 8	< 60	> 40	Totalmente personalizable	Muy Alta	< 0.5	Baja
Perovskita	10 a 20	2 a 5	80-150	8 a 12	> 80	> 40	Totalmente personalizable	Alta	0.5-1.0	Baja
Celdas Tandem	10 a 20	2 a 5	100-200	10 a 15	> 80	> 40	Totalmente personalizable	Alta	0.5-1.0	Baja

Referencias de la tabla: [15], [16], [17], [18], [19], [20], [23], [32], [34], [37], Anexo 1

Anexo 3. Normas internaciones sobre PV

Norma Internacionales	Alcance/Observaciones
IEC 61215	Módulos fotovoltaicos terrestres de silicio cristalino: Calificación de diseño y aprobación de tipo.
IEC 61646	Módulos fotovoltaicos (PV) terrestres de película delgada: Calificación de diseño y aprobación de tipo.
IEC 61277	Sistemas generadores de energía fotovoltaica (PV) terrestres.
IEC 61345	Prueba de UV para módulos fotovoltaicos (PV).
IEC 61829	Medición in situ de las características I-V del conjunto de fotovoltaicos de silicio cristalino (PV).
IEC 61701	Prueba de corrosión por niebla salina de módulos PV.
IEC 62759	Prueba de transporte de módulos PV.
IEC 62782	Prueba de carga mecánica dinámica de módulos PV.
IEC 62716	Prueba de corrosión por amoníaco de módulos PV.
IEC 62804	Prueba de durabilidad de voltaje del sistema para módulos de silicio cristalino.
IEC 61730-1	Calificación de seguridad de módulos fotovoltaicos - Parte 1: Requisitos de construcción.
IEC 61730-2	Calificación de seguridad de módulos fotovoltaicos - Parte 2: Requisitos de construcción.
IEC 61853-1	Medición de rendimiento de irradiancia y temperatura y calificación de potencia, que describe los requisitos para evaluar el rendimiento del módulo fotovoltaico en términos de calificación de potencia (vatios) en una gama de irradiancias y temperaturas.
IEC 61853-2	Respuesta espectral, ángulo de incidencia y mediciones de temperatura de funcionamiento del módulo, que describe los procedimientos de prueba para medir el efecto de la variación del ángulo de incidencia y el espectro de luz solar, así como la estimación de la temperatura del módulo a partir de la irradiancia, la temperatura ambiente y la velocidad del viento.
IEC 61853-3	Calificación de energía de los módulos fotovoltaicos, que describe los cálculos para las calificaciones de energía (vatios-hora) de los módulos fotovoltaicos.
IEC 61853-4	Define los períodos de tiempo estándar y las condiciones meteorológicas que se pueden utilizar para calcular las calificaciones de energía.
UL 1703	Norma UL de seguridad para módulos y paneles fotovoltaicos de placa plana.

Referencia de la tabla: [31]

Anexo 4. Normas internaciones sobre BIPV

Norma Internacional	Alcance/Observaciones
EN 410	Vidrio en la construcción: Determinación de las características luminosas y solares del acristalamiento.
EN 356	Vidrio en la construcción: Vidrio de seguridad: Prueba y clasificación de resistencia contra ataques manuales.
EN 673	Vidrio en la construcción: Determinación de la transmitancia térmica (valor U): Método de cálculo.
EN 572-1	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 1: Definiciones y propiedades físicas y mecánicas generales.
EN 572-2	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 2: Vidrio flotado.
EN 572-5	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 5: Vidrio modelado.
EN 572-8	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 8: Tamaños suministrados y finales.
EN 572-9	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 9: Evaluación de conformidad/Norma de producto.
EN 1748-1-1	Vidrio en la construcción: Productos básicos especiales: Vidrios borosilicatados: Parte 1-1: Definición y propiedades físicas y mecánicas generales.
EN 1748-2-1	Vidrio en la construcción: Productos básicos especiales: Vidrios cerámicos: Parte 2-1 Definiciones y propiedades físicas y mecánicas generales.
EN 1748-1-2	Vidrio en la construcción: Productos básicos especiales: Vidrios borosilicatados: Parte 1-2: Evaluación de conformidad/Norma de producto.
EN 1748-2-2	Vidrio en la construcción: Productos básicos especiales: Vidrios cerámicos: Parte 2-2: Evaluación de conformidad/Norma de producto.
EN 13024-1	Vidrio en la construcción: Vidrio de seguridad borosilicatado térmicamente endurecido: Parte 1: Definición y descripción.
EN 13024-2	Vidrio en la construcción: Vidrio de seguridad borosilicatado térmicamente endurecido: Parte 2: Evaluación de conformidad/Norma de producto.
EN 12600	Vidrio en la construcción: Prueba de péndulo: Método de prueba de impacto y clasificación para vidrio plano.
EN 1288-1	Vidrio en la construcción: Determinación de la resistencia a la flexión del vidrio: Parte 1: Fundamentos de la prueba del vidrio.
EN 1288-2	Vidrio en la construcción: Determinación de la resistencia a la flexión del vidrio: Parte 2: Prueba de anillo doble coaxial en especímenes planos con grandes áreas de prueba.

F

EN 1288-3	Vidrio en la construcción: Determinación de la resistencia a la flexión del vidrio: Parte 3: Prueba con especímenes soportados en dos puntos (prueba de flexión en cuatro puntos).
EN 1288-4	Vidrio en la construcción: Determinación de la resistencia a la flexión del vidrio: Parte 4: Prueba de vidrio en forma de canal.
EN 1288-5	Vidrio en la construcción: Determinación de la resistencia a la flexión del vidrio: Parte 5: Prueba de anillo doble coaxial en especímenes planos con pequeñas áreas de prueba.
EN 14449	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Evaluación de conformidad/Norma de producto.
ISO 3585	Vidrio borosilicatado 3.3: Propiedades.
ISO 16293-1	Vidrio en la construcción: Productos básicos de vidrio silicato de cal sodada: Parte 1: Definiciones y propiedades físicas y mecánicas generales.
ISO 12543-1	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 1: Definiciones y descripción de las partes componentes.
ISO 12543-2	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 2: Vidrio laminado de seguridad.
ISO 12543-3	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 3: Vidrio laminado.
ISO 12543-4	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 4: Métodos de prueba de durabilidad.
ISO 12543-5	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 5: Dimensiones y acabado de bordes.
ISO 12543-6	Vidrio en la construcción: Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad: Parte 6: Apariencia.
ASTM C1172	Especificación estándar para vidrio arquitectónico laminado.
ASTM F1233	Método de prueba estándar para materiales y sistemas de acristalamiento de seguridad.

Referencia de la tabla: [31]

Anexo 5. Otros ejemplos de proyectos BIPV



Planta de Heineken en Meoqui, Chihuahua, México

Fuente: <https://onyxsolar.es/heineken>

Área: 2.365 M²

Electricidad generada en 35 años - 862.273 kWh

Emissiones de CO₂ evitadas en 35 años - 578 Toneladas de CO₂



Donington Park Farmhouse Hotel – Midlands England

Fuente: <https://www.polysolar.co.uk/projects-technology/donington-park-farmhouse-hotel>

Área: 100 m²

Capacidad instalada: 8kWp,

Vidrios: 20% transparencia



Grammar School in Melbourne – Australia

Fuente: <https://onyxsolar.com/geoff-handbury-hub>

Los lucernarios integran 37 unidades de vidrio de Silicio amorfo con un tamaño estándar de 1.245x635 mm y un 20% de transparencia.

Área Total - 29 M2

Electricidad generada en 35 años - 37.840 kWh

Emissiones de CO2 evitadas en 35 años - 25 Toneladas de CO2. Se espera que la instalación reduzca la demanda de

climatización en un 52%, con un periodo de recuperación inferior a dos años y permita recuperar hasta 55 veces la inversión en un periodo de 30 años.



Bristol & Bath Innovation Science Park Solar Canopy

Fuente: <https://www.polysolar.co.uk/projects-technology/bristol-bath-innovation-science-park-solar-canopy>

Bristol and Bath Science Park -England

Área total - 117 M2

Potencia instalada: 10.37 kWp

Emissiones de CO2 evitadas al año – 6 CO2

Anexo 6. Resultados completos simulación BIPV Cubo de innovación CHEC



Proyecto: CUBO INNOVACIÓN

Variante: Simulación Original Cubo Innovación Techo, Tejas y Ventanas

PVsyst V7.3.1

VC5, Fecha de simulación:
06/08/24 00:43
con v7.3.1

Resultados principales

Producción del sistema

Energía producida

15589 kWh/año

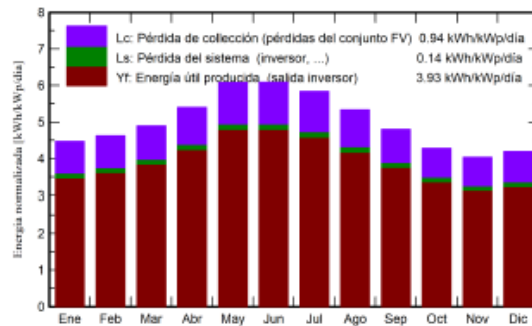
Producción específica

1434 kWh/kWp/año

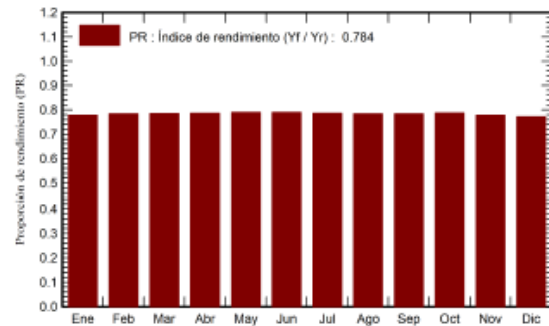
Proporción de rendimiento (PR)

78.43 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh
Enero	176.0	63.28	18.45	138.8	128.1	1218
Febrero	151.4	65.28	18.66	129.5	120.6	1145
Marzo	166.9	74.65	18.69	151.9	142.5	1344
Abril	165.7	66.92	18.33	162.1	153.3	1434
Mayo	179.3	70.88	18.68	188.6	178.4	1671
Junio	169.3	60.14	18.41	182.7	172.6	1617
Julio	170.8	64.53	18.83	181.0	171.4	1599
Agosto	167.0	67.95	18.79	165.3	156.6	1459
Septiembre	150.9	71.41	18.23	144.2	135.3	1273
Octubre	148.9	69.50	18.06	132.8	124.0	1179
Noviembre	147.1	66.04	17.80	121.1	111.6	1064
Diciembre	169.0	61.75	18.29	130.1	119.4	1137
Año	1962.2	802.31	18.44	1827.9	1713.8	16139

Legendas

GlobHor Irradiación horizontal global

DiffHor Irradiación difusa horizontal

T_Amb Temperatura ambiente

GlobInc Global incidente plano receptor

GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados

EArray Energía efectiva a la salida del conjunto



Proyecto: CUBO INNOVACIÓN

Variante: Simulación Original Cubo Innovación Techo, Tejas y Ventanas

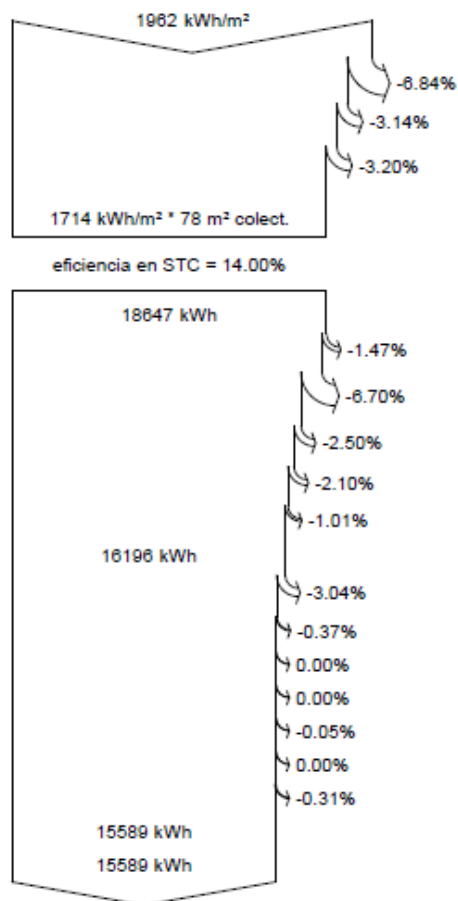
PVsyst V7.3.1

VC5, Fecha de simulación:

06/08/24 00:43

con v7.3.1

Diagrama de pérdida



Irradiación horizontal global

Global incidente plano receptor

Sombreados cercanos: pérdida de irradiancia

Factor IAM en global

Irradiancia efectiva en colectores

Conversión FV

Conjunto de energía nominal (con efic. STC)

Pérdida FV debido al nivel de irradiancia

Pérdida FV debido a la temperatura.

Pérdida calidad de módulo

Pérdidas de desajuste, módulos y cadenas

Pérdida óhmica del cableado

Energía virtual del conjunto en MPP

Pérdida del inversor durante la operación (eficiencia)

Pérdida del inversor sobre potencia inv. nominal

Pérdida del inversor debido a la corriente de entrada máxima

Pérdida de inversor sobre voltaje inv. nominal

Pérdida del inversor debido al umbral de potencia

Pérdida del inversor debido al umbral de voltaje

Consumo nocturno

Energía disponible en la salida del inversor

Energía inyectada en la red

Anexo 7. Equipos BIPV para el Cubo de Innovación CHECH



Teja solar NCL -BP-P-C022



Vidrio solar NCL-BP-P-C04

Anexo 8. Costos de fabricación a 2020 diferentes tecnologías BIPV

PV Technology		Best Research—Cell Efficiency (%)	Average Visible Transmittance (AVT)	Cost (€/W)	Operating Lifetime (Years)	Potential ST- and T-BIPV Applications	
Crystalline Si	Single-crystal (c-Si)	26.1	Opaque	0.40–0.55	>20	Cell cladding	
	Multi-crystalline (m-Si)	23.3	Opaque		>20	Cell cladding	
	Si heterostructures (HIT)	27.6	Opaque		>20	Cell cladding	
	Thin-film crystal	21.2	-		>20	Cell cladding	
Single-junction GaAs	Single-crystal	27.8	Opaque	>30	>20	-	
	Concentrator	30.5	Opaque		>20	-	
	Thin-film crystal	29.1	Opaque		>20	-	
Multijunction	Two-junction (concentrator)	35.5	Opaque	>>30	>20	-	
	Two-junction (non-concentrator)	32.9	Opaque		>20	-	
	Three-junction (concentrator)	44.4	Opaque		>20	-	
	Three-junction (non-concentrator)	37.9	Opaque		>20	-	
	Four-junction or more (non-concentrator)	39.2	Opaque		>20	-	
Thin-film	CIGS	23.4	<30%	~0.55	~20	Homogeneous/cell cladding	
	CdTe	22.1	~30%	~0.50	>10	Homogeneous/cell cladding	
	Amorphous Si:H stabilized (a-Si)	14.0	10–25%	~0.35	>20	Homogeneous	
Emerging PV ¹	Dye-sensitized cells (DSSC)	12.3	10–50%	Expected <0.25	-	Homogeneous	
	Perovskite cells	25.2	~30%		-	Homogeneous	
	Perovskite/Si- and perovskite/CIGS-tandem	29.1/24.2	30–77%		-	Homogeneous/cell cladding	
	Organic cells (various types) and organic tandem cells	17.4/14.2	20–65%		-	Homogeneous	
	Inorganic cells	12.6	20–55%		-	Homogeneous	
	Quantum dot (QD) cells	16.6	20–30%		-	-	-

Fuente: [37]

Anexo 9. Costos proyecto residencial 4.4kWp

El siguiente proyecto es un proyecto residencial on-grid ya instalado en el condómino San Isidro del Lago, casa 76, Anapoima Cundinamarca de 4.4kWp, con dos micro inversores trifásicos - APsystems QT2 y cada micro con 4 paneles de 550W marca JA. Proyecto con certificado RETIE y vendiendo excedentes a la red de Enel-Codensa. Proyecto diseñado, instalado y legalizado por el autor de este trabajo de grado en septiembre de 2023, durante el curso de la Maestría en Energías Renovables.

Paneles instalados sobre pérgola de la terraza



Imagen 1 del Anexo 9. Predio y modelado del proyecto solar San Isidro Casa 76

Fuente: El autor



Imagen 2 del Anexo 9. Fotos de la instalación del sistema

Fuente: El autor

Costos del proyecto San Isidro:



*Imagen del Anexo 9. Costos del proyecto San Isidro
Fuente: El autor*

Descripción	Categoría	Monto	Real
Paneles 550 W - JA	Equipos Principales	\$ 6.820.000,00	\$ 6.820.000,00
Microinversores QT2 Trifásicos	Equipos Principales	\$ 3.366.194,00	3.366.194,00
RETIE	RETIE	\$ 1.606.500,00	1.606.500,00
Mano de obra	Mano de Obra	\$ 1.000.000,00	1.500.000,00
Ingeniería	Ingeniería	\$ 5.000.000,00	5.000.000,00
Perfilería	Estructura	\$ 1.050.000,00	1.050.000,00
Transportes	Transportes	\$ 500.000,00	-
Obra civil	Mano de Obra	\$ -	-
Cableado AC, cintas, amarras, caja, interruptor 3x20A siemens	Cableado	\$ 622.289,00	622.289,00
Caja Kowet intemperie	Material	\$ 166.243,00	166.243,00
IVA compra equipos principales inversores y paneles	Equipos Principales	\$ 350.000,00	352.000,00
Monitoreo y cable solar y conectores 10 m x 10 pares	Equipos Principales	\$ 1.412.286,00	1.412.286,00
Interruptor 3x30	Material	\$ 70.000,00	70.000,00
Extra perfilera	Estructura	\$ 450.000,00	450.000,00
YC-bus x2	Equipos Principales	\$ 287.372,00	287.372,00
End-camp x2	Equipos Principales	\$ 68.451,00	68.451,00
Coraza intemperie	Material	\$ 404.100,00	404.100,00
Cable 10 AWG verde	Cableado	\$ 117.000,00	117.000,00
Extras Adicionales	Adicionales	\$ 150.000,00	150.000,00
Transporte equipos	Transportes	\$ 100.000,00	100.000,00
Medidor Bidireccional	Equipos Principales	\$ 1.200.000,00	1.200.000,00
Adicionales visitas	Mano de Obra	\$ 500.000,00	500.000,00
Alimentación	Otros	\$ 250.000,00	250.000,00
	Total gastos	\$ 25.490.435,00	25.492.435,00

*Tabla I del anexo 9. Costos discriminados del proyecto San Isidro
Fuente: El autor*

El costo total del proyecto fue de 25.490.435 \$ COP, si se realizará con los vidrios solares de la CHEC el cambio sería:

- Cambio en costo de los materiales principales, 48 vidrios solares de 95W caben en la misma área de la pérgola (668.000\$ COP cada uno)

- Cambio de inversor a un SUN2000-4KTL-M1 (6,205,968.76 \$ COP)

Diseño con pérgola en vidrio solar de 95W como el usado en el proyecto de la CHEC.



Imagen 4 del Anexo 9. Modelado de BIPV en San Isidro

Fuente: El autor

Costos del proyecto San Isidro con vidrios Solares:

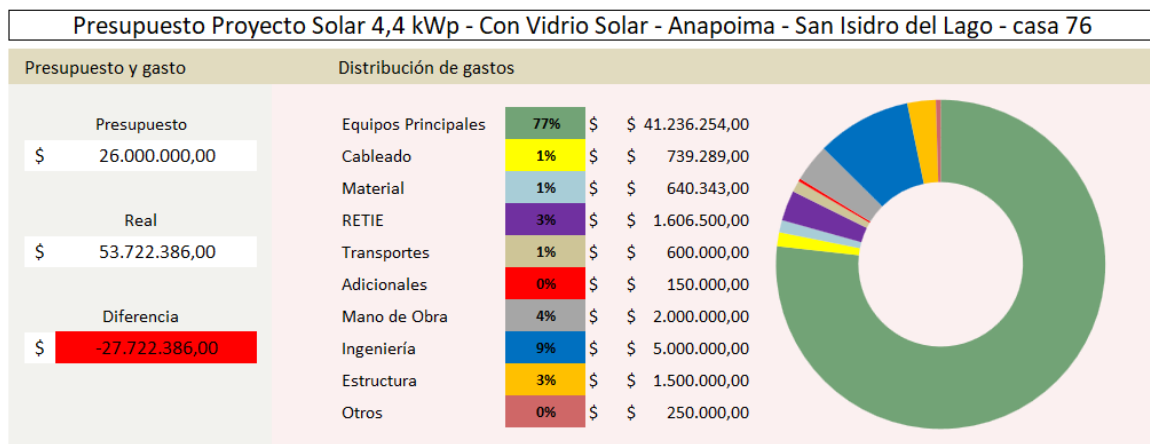


Imagen 5 del Anexo 9. Costos del proyecto San Isidro con vidrio solar

Fuente: El autor

Podemos analizar claramente que el proyecto con vidrio solar en pérgola prácticamente se dobla en costo y por lo tanto no es viable, ya que la compra de estos elementos es muy costosa con el valor actual. A nivel residencial, con estos valores no será rentable hasta llegar a valores más económicos y con potencias de generación más altas. Se quiso mostrar este ejemplo y realizar el ejercicio para dar una referencia de los costos de un proyecto real ya instalado y mostrar cómo se afectan los costos si se implementara un sistema BIPV sencillo a escala pequeña, concluyendo que no son viables económicamente como si lo son los proyectos industriales grandes presentados en la sección 6.4 los cuales por el tamaño de generación ahorran mucha energía y también tendrán mucho más excedentes considerables para vender.

Descripción	Categoría	Monto	Real
48 Vidrios Solares Si NCL-BIPV-P3-95	Equipos Principales	\$ 32.068.000,00	\$ 32.068.000,00
Inversores SUN2000-4KTL-M1	Equipos Principales	\$ 6.205.968,00	\$ 6.205.968,00
RETIE	RETIE	\$ 1.606.500,00	1.606.500,00
Mano de obra	Mano de Obra	\$ 1.500.000,00	1.500.000,00
Ingeniería	Ingeniería	\$ 5.000.000,00	5.000.000,00
Perfilería	Estructura	\$ 1.050.000,00	1.050.000,00
Transportes	Transportes	\$ 500.000,00	500.000,00
Obra civil	Mano de Obra	\$ -	-
Cableado AC, cintas, amarras, caja, interruptor 3x20A siemens	Cableado	\$ 622.289,00	622.289,00
Caja Kowet intemperie	Material	\$ 166.243,00	166.243,00
IVA compra equipos principales inversores y paneles	Equipos Principales	\$ 350.000,00	352.000,00
Monitoreo y cable solar y conectores 10 m x 10 pares	Equipos Principales	\$ 1.412.286,00	1.412.286,00
Interruptor 3x30	Material	\$ 70.000,00	70.000,00
Extra perfilera	Estructura	\$ 450.000,00	450.000,00
YC-bus x2	Equipos Principales	\$ -	-
End-camp x2	Equipos Principales	\$ -	-
Coraza intemperie	Material	\$ 404.100,00	404.100,00
Cable 10 AWG verde	Cableado	\$ 117.000,00	117.000,00
Extras Adicionales	Adicionales	\$ 150.000,00	150.000,00
Transporte equipos	Transportes	\$ 100.000,00	100.000,00
Medidor Bidireccional	Equipos Principales	\$ 1.200.000,00	1.200.000,00
Adicionales visitas	Mano de Obra	\$ 500.000,00	500.000,00
Alimentación	Otros	\$ 250.000,00	250.000,00
Total gastos		\$ 53.722.386,00	53.724.386,00

Tabla II del anexo 9. Costos discriminados del proyecto San Isidro con Vidrio Solar

Fuente: El autor

Se simula el sistema de San Isidro con los 48 vidrios de 95W, 4.560kWp para comparar los resultados de simulación con los reales del sistema 4,4kWp instalados.

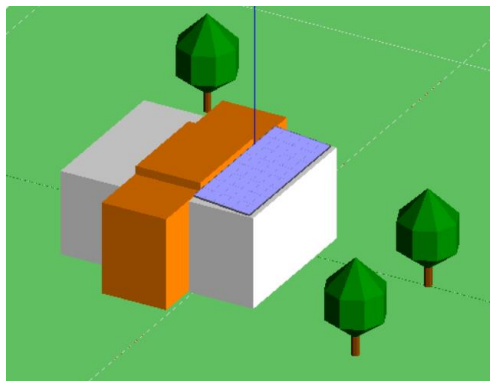


Imagen 5 del anexo 9. Montaje 3D simulación PVsyst vidrios solar - San Isidro

Producción de Energía anual (kWh/año)	Producción promedio de (Energía kWh/mes)	Producción promedio de (Energía kWh /día)	PR (%)	Pérdidas por incidencia plano receptor (%)	Pérdidas por sombras (%)	Pérdidas Factor IAM (%)
6821	568.41	18.94	81.66	0.3	-0,08	-2.98

Tabla III del anexo 9. Resultados energéticos en PVsyst vidrio solar - San Isidro

Fuente: El autor

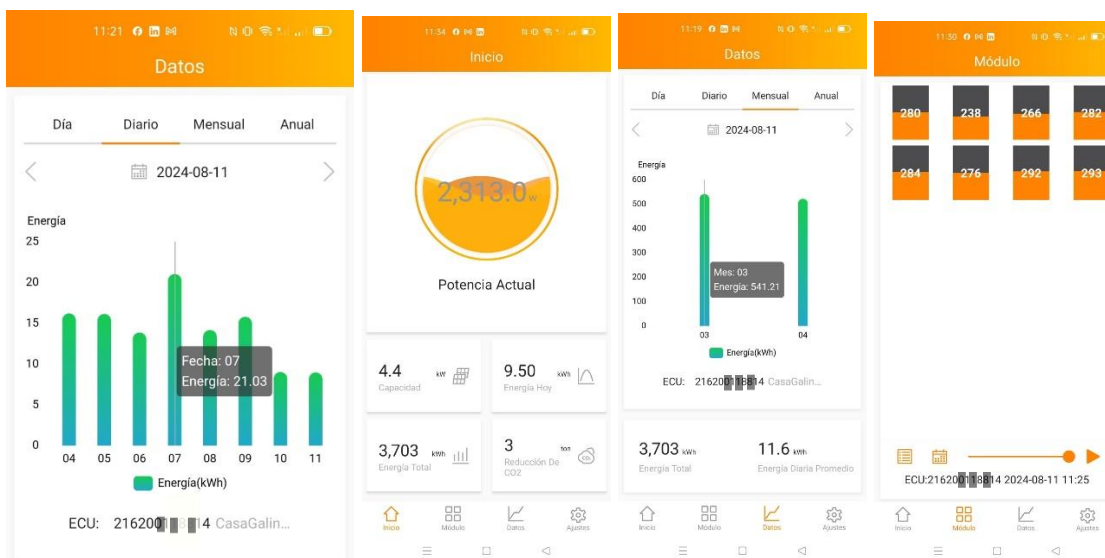


Imagen 5 del anexo 9. Resultados reales App de APsystems - San Isidro

Fuente: El autor.

Se puede observar que los resultados energéticos de la simulación con vidrios dan 568.41 kWh/mes y son muy similares a los reales 541.21 kWh/mes del sistema de 4,4kWp instalado con los 8 paneles de 550W.