



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Evaluación Financiera de la Utilización de los Elementos Generadores de Energía Renovable en las Edificaciones en Colombia

Financial Evaluation of the Use of Renewable Energy Generating Elements in Buildings in Colombia

**Joan Sebastián Ruiz Zapata**

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de:  
Maestría en Sistemas Energéticos

Directora:

Diana Lorena Cadavid Higueta, Ph.D

Codirector:

Carlos Jaime Franco Cardona, Ph.D

Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín  
Facultad de Minas  
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión  
Medellín, Colombia  
2019

*A mis padres por su apoyo incondicional,*

*A mi esposa por su comprensión y cariño y*

*A mi hijo con quien compartiré la alegría de vivir en función del estudio.*

## Agradecimientos

A Dios, por permitirme vivir de una manera tranquila dedicada a la familia, al estudio y al trabajo.

A mis padres, que tempranamente me brindaron las condiciones para poder llevar a cabo mis estudios sin mayores contratiempos.

A mi compañera Andrea Arenas que con cariño y paciencia soportaron las ausencias que requieren éste tipo de estudios cuidando sola de nuestro hijo cuando me encontraba en otra ciudad.

A la Universidad Nacional que me ha acogido cariñosamente y brindarme todas las oportunidades de crecimiento académico, laboral y espiritual.

Al profesor Carlos Jaime Franco, que su vida, sus logros personales y académicos, sirven a muchos estudiantes de ejemplo. Particularmente agradezco algunas palabras de su clase de “Sistemas Complejos” (cuando era estudiante de pregrado), inspirándome a seguir disciplinadamente el camino de la rectitud y de la búsqueda del conocimiento a través del estudio juicioso y sistemático.

A Lorena Cadavid, mi directora de tesis, por ser una mujer integral. Por ser tan dedicada y disciplinada con su trabajo. Por su enorme y valioso conocimiento entregado de manera desinteresada. Lorena Cadavid siempre ha estado en disposición de ayudar, de aclarar dudas, de hacer las cosas bien. Es una mujer amable que con paciencia y pedagogía han guiado este documento hasta lograr la culminación exitosa del mismo. Su manera de redactar me inspira a seguir buscando en la elaboración de mis párrafos las palabras correctas. A Dios le agradezco por permitirme trabajar con ella.

A mis compañeros de estudio Mauricio Bedoya y Natalie Ramírez porque ha sido incondicionales. Personas amables y honestas que con cariño me han apoyado en la elaboración de mi tesis. Espero poder contar con ellos siempre y que la vida me permita devolverles doblemente lo que han hecho por mí.

## Resumen

Según la Agencia Internacional de Energía los edificios consumen la mayor cantidad de energía eléctrica en el mundo representando más de un tercio del consumo total final de esta energía, lo que los convierte en una fuente importante de emisiones de dióxido de carbono. Para contrarrestar el impacto negativo generado al medio ambiente, es menester que las edificaciones se construyan o se modifiquen teniendo en cuenta no sólo la racionalización y la conservación de los recursos naturales sino también los últimos avances en la tecnología. Por ejemplo, tejas o vidrios fotovoltaicos integrados por completo a la edificación. Éste documento presenta un modelo financiero que evalúa la viabilidad de utilizar este tipo de elementos en las construcciones colombianas teniendo en cuenta las particularidades del mercado local. Para cumplir este objetivo fue necesario identificar las necesidades del sector de la construcción y el impacto que tienen las edificaciones sustentables en el cuidado del medio ambiente. Posteriormente, caracterizar los elementos y establecer las estructuras de costos con base en los precios del mercado nacional. Por último, se desarrolló un modelo de evaluación financiera que mide el desempeño económico global de dichos elementos en 22 ciudades de Colombia. Como resultado de ésta evaluación, la teja fotovoltaica es el elemento constructivo que presenta mejores niveles de tasa interna de retorno en la ciudad de Arauca cuando los costos de inversión inicial son los actuales.

## Palabras Clave

Materiales de construcción, Fuente de energía renovable, análisis costes-beneficio, BIPV .

## Abstract

According to the International Energy Agency, buildings consume the largest amount of electrical energy in the world, representing more than one-third of the total final consumption of this energy, which makes them an important source of carbon dioxide emissions. To counteract the negative impact generated on the environment, it is necessary that buildings be built or modified taking into account not only the rationalization and conservation of natural resources but also the latest advances in technology. For example, tiles or photovoltaic glass completely integrated into the building. This document presents a financial model that evaluates the feasibility of using this type of elements in Colombian constructions, taking into account the particularities of the local market. To meet this objective it was necessary to identify the needs of the construction sector and the impact that sustainable buildings have on environmental care. Subsequently, characterize the elements and establish cost structures based on national market prices. Finally, a financial evaluation model was developed that measures the overall economic performance of these elements in 22 cities in Colombia. As a result of this evaluation, the photovoltaic tile is the constructive element that presents the best levels of internal rate of return in the city of Arauca when the initial investment costs are current.

## Keywords

Building materials, renewable energy source, cost-benefit analysis, BIPV .

## Tabla de contenido

Agradecimientos .....	3
Resumen .....	4
Palabras Clave .....	4
Abstract .....	4
Keywords.....	4
Tabla de contenido.....	5
Lista de Tablas .....	7
Lista de Figuras.....	9
Lista de abreviaturas .....	9
1 Introducción .....	10
1.1 Orden del documento .....	11
2 Antecedentes .....	12
2.1 Contexto internacional.....	12
2.1.1 Emisiones del sector de la construcción a nivel mundial .....	12
2.2 Contexto Colombiano .....	14
2.2.1 El sector de la construcción en Colombia .....	15
3 Marco Teórico .....	17
3.1 Eficiencia .....	17
3.2 Autogeneración.....	17
3.3 Envoltente del edificio .....	17
3.4 Temperatura de la fotocelda.....	18
3.5 Clasificación de los Sistemas BIPV .....	18
3.6 Elementos constructivos con tecnologías generadoras de energía renovable utilizados en techos y fachadas.....	19
3.6.1 Bloques fotovoltaicos .....	20
3.6.2 Vidrio Fotovoltaico .....	20
3.6.3 Tejas fotovoltaicas.....	20
3.6.4 Baldosas con mecanismos de presión o fabricados con material piezoeléctrico .....	20
3.7 Modelo financiero para la evaluación de proyectos BIPV.....	21
4 Revisión de literatura .....	21
5 Objetivos .....	24
5.1 Objetivo General .....	24
5.2 Objetivos Específicos.....	24
5.3 Alcance del documento.....	24

6	Metodología.....	25
6.1	Modelado.....	25
	Evaluación financiera .....	25
	Elementos evaluados .....	25
	Herramienta o Software.....	26
	Variables de entrada .....	26
	Variables auxiliares.....	26
	Inversión inicial .....	26
	Tasas de mantenimiento.....	27
	Degradación de la tecnología (Wp/m2) .....	27
	Flujos de caja.....	27
	Pago de la electricidad .....	27
	Flujo de caja diferencial .....	28
6.2	Parametrización .....	28
	Nivel de irradiación (Kwh/m2) .....	28
	Generación de la energía (Kwh/m2) .....	28
	Estructura de costos.....	28
	Tarifas de energía por ciudades .....	30
7	Resultados.....	32
7.1	Resultados del caso Base .....	32
7.2	Análisis de sensibilidad.....	33
	Vidrio fotovoltaico.....	33
	Teja fotovoltaica.....	34
	Baldosa piezoeléctrica.....	35
	Tabla Resumen de ciudades factibles .....	35
7.3	Análisis de escenarios .....	36
	7.3.1 Escenario donde los costos de inversión inicial bajan al 50% .....	36
	7.3.2 Escenario donde los costos de inversión inicial bajan al 25% .....	38
8	Conclusiones .....	45
8.1	Cumplimiento de los objetivos.....	46
	8.1.1 Objetivo General .....	46
	8.1.2 Objetivo específico 1 .....	46

8.1.3	Objetivo específico 2 .....	47
8.1.4	Objetivo específico 3 .....	47
8.2	Aportes y contribuciones .....	47
8.3	Trabajos Futuros .....	48
9	Referencias.....	48
10	Anexos.....	52
10.1	Anexo 1 .....	52
10.1.1	cálculo de la inflación y la tasa real de descuento .....	52
	Calculo de la inflación .....	52
	Fórmulas utilizadas para el cálculo .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
	Cálculo de la tasa real de descuento.....	52
10.1.2	Nuevos resultados.....	53

## Lista de Tablas

Tabla 6-1.	Nivel de irradiación de 22 ciudades Colombianas.....	28
Tabla 6-2.	Estructura de costos del Vidrio Fotovoltaico según proveedor .....	29
Tabla 6-3.	Estructura de costos de la Teja Fotovoltaica según proveedor.....	29
Tabla 6-4.	Estructura de costos de la baldosa según proveedor.....	30
Tabla 6-5.	Estructura de costos de materiales tradicionales según proveedores.....	30
Tabla 6-6.	Tarifas de energía por ciudades según el boletín tarifario 2018 de la Superservicios .....	31
Tabla 6-7.	Tarifas de energía por ciudades según el boletín tarifario 2018 de la Superservicios .....	31
Tabla 6-8.	Supuestos del modelo por tecnología .....	31
Tabla 7-1.	Escenario base de las tres tecnologías .....	33
Tabla 7-2.	Análisis de sensibilidad Costos actuales - Vidrio Fotovoltaico .....	34
Tabla 7-3.	Análisis de sensibilidad Teja Fotovoltaico .....	35
Tabla 7-4.	Número de proyectos factibles en función del aumento en la tarifa.....	35
Tabla 7-5.	Tabla resumen de ciudades factibles .....	36
Tabla 7-6.	TIR de vidrio fotovoltaico con costos de inversión inicial al 50% .....	37
Tabla 7-7.	TIR de teja fotovoltaica con costos de inversión inicial al 50% .....	37
Tabla 7-8.	TIR de vidrio fotovoltaico con costos de inversión inicial al 25% .....	38
Tabla 7-9.	TIR de teja fotovoltaica con costos de inversión inicial al 25% .....	39
Tabla 7-10.	TIR de la baldosa piezoeléctrica con costos de inversión inicial al bajar un 75%.....	39
Tabla 7-11.	Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Medellín según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	40
Tabla 7-12.	Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Arauca según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	40

Tabla 7-13. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Barranquilla según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	40
Tabla 7-14. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cartagena según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	41
Tabla 7-15. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Tunja según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	41
Tabla 7-16. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Manizales según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	41
Tabla 7-17. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Florencia según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	41
Tabla 7-18. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Yopal según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	42
Tabla 7-19. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Valledupar según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	42
Tabla 7-20. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Montería según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	42
Tabla 7-21. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Bogotá según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	42
Tabla 7-22. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Neiva según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	43
Tabla 7-23. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Riohacha según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	43
Tabla 7-24. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Santa Marta según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	43
Tabla 7-25. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Villavicencio según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	43
Tabla 7-26. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Pasto según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	44
Tabla 7-27. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cúcuta según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	44
Tabla 7-28. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Armenia según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	44
Tabla 7-29. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Pereira según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	44
Tabla 7-30. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Sincelejo según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo.....	45
Tabla 7-31. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Ibagué según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	45
Tabla 7-32. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cali según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo .....	45
Tabla 10-1 Supuestos del modelo con tasas del banco de la república y la Superfinanciera .....	52
Tabla 10-2 Análisis de sensibilidad del vidrio fotovoltaico con 1% de tasa real de descuento.....	53

Tabla 10-3 Análisis de sensibilidad de la teja fotovoltaica con 1% de tasa real de descuento .....54

## Lista de Figuras

Figura 1. Participación global de edificios y construcción en relación con la energía final y las emisiones en el 2017.....12

Figura 2. Clasificación de los Sistemas BIPV .....18

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
GEI	Gases de efecto invernadero
EGEI	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
AIE	Agencia Internacional de Energía
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
SIN	Sistema Interconectado Nacional
ZNI	Zonas no Interconectadas
PV	Photovoltaic
BIPV	Building Integrated Photovoltaic System
BIPV-T	Building Integrated Photovoltaic System - Termical
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
IPSE	Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas
TIR	Tasa Interna de Retorno
ECDBC	La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono

## 1 Introducción

Del cambio climático se han generado en los últimos diez años más de 250.000 documentos, conformados por cartas, ponencias, capítulos de libros y artículos científicos (estos últimos representan el 74.6% del total de los documentos según información de la base de datos Scopus), sin embargo, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) siguen en aumento y de no tomarse medidas, la temperatura promedio global aumentará alrededor de 4°C para el año 2100 (Pires, 2017). En su informe *Objetivos de Desarrollo Sostenible (2017)*, las Naciones Unidas afirman que entre los efectos más devastadores de este cambio en la temperatura se encuentran: las sequías, olas de calor, enfermedades e inundaciones que año tras año ha venido cobrando la vida de cientos de personas y ocasionando daños materiales incalculables. Además, expone que las familias que viven en situación de pobreza tienen mayor probabilidad de ser afectados. En diciembre de 2018, en el vigésimo cuarto período de sesiones de la Conferencia de las Partes (COP24) celebrado en Katowice - Polonia, la AIE como autoridad energética a nivel mundial promovió una serie de acciones en beneficio del cambio climático analizando el progreso de los países hacia los objetivos del Acuerdo de París. Las emisiones globales de carbono relacionadas con la energía deben alcanzar un máximo alrededor de 2020 y luego entrar en una fuerte caída. No obstante, el nuevo escenario de políticas de la AIE muestra que las emisiones de CO2 aumentarán hasta 2040. (International Energy Agency, 2017)

Uno de los sectores con mayor impacto de emisiones es el sector de la construcción de edificios, éste es responsable del 36% del consumo global final de energía y cerca del 40% de emisiones directas e indirectas de CO2 (International Energy Agency, 2017). La construcción comercial y residencial genera el 30% de los residuos sólidos y el 20% de la contaminación de las aguas, según datos de la AEI (2017) se necesitan más de dos toneladas de materias primas por cada m2 de vivienda a construir por lo que podríamos concluir que la mitad del CO2 expulsado a la atmósfera está relacionado con la construcción de edificios a lo largo de todas sus fases: construcción, uso y posterior demolición. El informe *Global Alliance for Buildings and Construction (REN21, 2018)*, asegura que las emisiones de los edificios y del sector de la construcción parecen haberse estabilizado desde 2015 aunque siguen representando la mayoría de las emisiones totales de CO2 relacionadas con la energía. Expuesto lo anterior, parece que las emisiones de GEI de las edificaciones van en caminadas a rebasar el umbral de la seguridad energética, por tanto, el sector de la construcción tiene que desempeñar un papel importante en mitigar los efectos del cambio climático.

Reducir el consumo de electricidad es el reto que el sector se ha venido planteando en los últimos años. La construcción de edificios sostenibles representa una solución importante para estas fuentes generadoras de CO2 dado que tienen la capacidad de autoabastecer una parte importante de su demanda de energía. Para ello, utiliza elementos generadores de energía renovable integrados a la edificación como es el caso de los sistemas fotovoltaicos. Estas nuevas tecnologías son conocidas como *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)* que significa que el sistema fotovoltaico reemplaza por completo el material tradicional de construcción (Quesada, Rousse, Dutil, Badache, & Hallé, 2012). Por otra parte, existen baldosas con mecanismos de presión o fabricadas con materiales

piezoeléctricos que también contribuyen con la generación de energía. En la actualidad, estas tecnologías están siendo probadas en sitios de alto flujo peatonal como: centros comerciales, instituciones educativas, entre otros.

Para definir el alcance de este documento es importante hacer la siguiente claridad a los lectores: construir o transformar un edificio que contemple las estrategias para la disminución de emisiones, sugiere el análisis de dos perspectivas: La primera es implementar equipos que ayudan a hacer más eficiente su consumo, donde se incluyen: ventanas de alto rendimiento, niveles óptimos de aislamiento, superficies reflectoras, selladores, calentamiento térmico adicional, bombas de calor, electrodomésticos y equipos eficientes en energía, iluminación de estado sólido (SSL), entre otros; y la segunda es integrar elementos a la edificación capaces de generar energía renovable ya sea porque utiliza tecnología fotovoltaica o cualquier otra tecnología generadora. Este documento estará enfocado en los elementos constructivos generadores de energía renovable, específicamente en tres: vidrio fotovoltaico, teja fotovoltaica y baldosas elaboradas con materiales piezoeléctricos. Además, analiza la viabilidad financiera de utilizarlos en las construcciones colombianas, teniendo en cuenta el nivel de desarrollo tecnológico y su disponibilidad en los mercados locales. Cabe mencionar que estos elementos fueron seleccionados dado que al momento de la investigación, éstos son los elementos predominantes en la construcción de las fachadas con estas características.

## 1.1 Orden del documento

Inicialmente se examinan los antecedentes en relación con las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector de la construcción, tanto a nivel mundial como local. Posteriormente, en el capítulo 3, se presenta el marco teórico que servirá de referencia para comprender el origen de conceptos como: Eficiencia energética, edificaciones BIPV, material Piezoeléctrico, entre otros; En el capítulo 4, se desarrolla una revisión de literatura para establecer los últimos aportes de los autores y avances de las tecnologías que se relacionan con los objetivos del documento. En el capítulo 5, se presentan los objetivos y alcance del documento, que en éste caso se ha centrado en el mercado Colombiano. En el capítulo 6, se expone la metodología tenida en cuenta para el desarrollo de esta investigación. En el capítulo 7, se desarrollan los objetivos, analizando la identificación de los elementos, pasando por las estructuras de costos y las variables que se utilizarán en el modelo. En el capítulo 8, se describe el modelo construido para la evaluación financiera, las variables y las herramientas que fueron útiles para evaluar los costos y las favorabilidades que presenta el modelo. En el capítulo 9, se exponen los resultados y conclusiones que ha arrojado la investigación, seguido de algunos trabajos futuros que son necesarios llevar a cabo para el complemento y profundización de las temáticas relacionadas con ésta tesis. Por último, se presentan las referencias consultadas.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Contexto internacional

#### 2.1.1 Emisiones del sector de la construcción a nivel mundial

Según cifras de la Agencia internacional de Energía (2017), el sector de la construcción utiliza anualmente alrededor de 3.000 millones de toneladas de materias primas en la fabricación de componentes como el acero, el cemento y el vidrio, empleando en estos procesos un tercio del consumo mundial de la energía, lo que lo hace partícipe de casi el 45% del flujo total de la economía mundial. Es importante resaltar que el 99,5% del uso directo de ésta energía son combustibles fósiles (International Energy Agency, 2017). Según The Global Alliance for Buildings and Construction (REN21, 2018) el sector cementero es responsable alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> siendo la producción de éste elemento el mayor generador de GEI. Seguido de esto, el hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, la industria del hormigón emplea 1.6 billones de toneladas de cemento por año, emitiendo por tonelada de cemento 1 tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en el proceso de fabricación. En la Figura 2.1 se exponen los datos de la AIE donde se evidencia que el sector de la construcción y las operaciones de edificios representaron el 36% del uso de energía final global y el 39% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la energía en 2017.

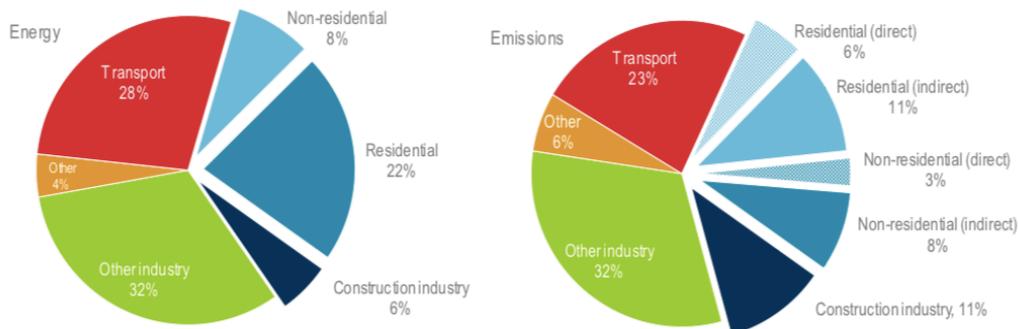


Figura 1. Participación global de edificios y construcción en relación con la energía final y las emisiones en el 2017.

Fuente: Derivado de IEA (2018a), World Energy Statistics and Balances 2018, [www.iea.org/statistics](http://www.iea.org/statistics) y el modelo de edificios de IEA Energy Technology Perspectives.

En 2013, las emisiones del sector alcanzaron un máximo de 9.5 GtCO<sub>2</sub>-eq y en 2016 lograron disminuir a 9.0 GtCO<sub>2</sub>-eq, no obstante, este dato indica que sus emisiones casi se han triplicado desde 1970 (IPEEC Building Energy Efficiency, 2017). En la construcción de edificios, la demanda de energía ha estado creciendo al mismo ritmo de las emisiones de CO<sub>2</sub> que aumentan casi un 1% por año desde el 2010 (EIA, 2017). Del año 2010 a 2016, el consumo final de energía de los edificios pasó de 119EJ a 124 EJ (Exajulios) debido a varios factores: aumento del área construida (que según el Global Status Report del 2018 es casi un 3% por año), a un mejor acceso a la energía en los países en desarrollo y al aumento en el uso de dispositivos que consumen energía (IEA, 2017). Teniendo en

cuenta lo anterior, se prevé que la demanda energética en los edificios de todo el mundo aumentará casi un 50% entre 2018 y 2050 (Chalmers, 2014).

El escenario mundial eficiente resalta el potencial para que la demanda de energía de los edificios a nivel mundial disminuya entre 2018 y el 2040. A pesar de que el área total del piso de construcción aumenta, los edificios en 2040 podrían ser en promedio casi un 40% más eficientes energéticamente que en la actualidad y se estima que los nuevos edificios de energía cero pueden estar construidos en el 2020 para las economías avanzadas y en el 2030 para las economías emergentes (IEA, 2017).

El Global ABC (2018) resalta que la inversión en eficiencia energética en edificios se ha ralentizado, a pesar del incremento en 4.7 % en 2017, es la tasa de aumento más baja en los últimos años en comparación con las tasas de crecimiento anual del 6-11% de 2014 a 2016 (REN21, 2018). Entre las medidas clave que influyen en la eficiencia se incluyen: aires acondicionados, mejoras en el aislamiento y las ventanas del edificio para reducir la demanda de refrigeración. Por otra parte, pueden integrarse elementos como vidrios y módulos fotovoltaicos que aprovechen las grandes superficies de las fachadas para generar parte de la demanda de electricidad del edificio. Sumando estas variables, la eficiencia energética podría mejorar en un 43% entre el 2018 y 2040 en comparación con la mejora del 38% desde el año 2000 (REN21, 2018). Adicional a esto, los diseños de edificios también tendrán que cambiar al igual que las tecnologías que se usan para construirlos. Al respecto, la directora ejecutiva interina de la ONU Medio Ambiente, Joyce Msuya, Agregó: *"Solo necesitamos observar las normas actuales y la calidad de muchos edificios para darnos cuenta de que podemos hacerlo mucho mejor. Necesitamos ser más exigentes en la construcción de edificios ecológicos y eficientes"* (Katowice, 7 de diciembre de 2018).

La Alianza Global para los Edificios y la Construcción (REN21, 2018) liderada por ONU Medio Ambiente, tiene como objetivo movilizar a todas las partes interesadas del sector para impulsar las acciones climáticas en favor de la construcción y los edificios eficientes, resilientes y sin emisiones. En el informe del informe (REN21, 2018) ilustran cómo los países, ciudades y organizaciones ya están trabajando en el aprovechamiento del potencial energético de los edificios y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible. No obstante, requiere de esfuerzos globales que van desde políticas, tecnología y herramientas de financiamiento hasta una mayor cooperación internacional, mayor educación y conciencia y mejoramiento de los programas de capacitación en la cadena de valor de los edificios. Cabe resaltar, que el sector de los edificios y la construcción resulta ser un actor clave en la lucha contra el cambio climático dado que sigue contribuyendo a la contaminación ambiental y al calentamiento global, que, según lo expuesto por las Naciones Unidas en la COP21 – Acuerdos de París del 2015, es el problema más urgente que enfrenta la humanidad.

Implementar tecnologías a favor de la construcción sostenible y los edificios inteligentes no es una tarea sencilla, en el 2018 Lu, Chang, Shabunko, Tan, & Yee, (2019) llevaron a cabo un estudio sobre las motivaciones que impulsan versus las barreras que obstaculizan la adopción de tecnologías innovadoras "BIPV" en Singapur, involucrando autoridades del gobierno, fabricantes, arquitectos y constructores. El estudio arroja que entre los factores más influyentes están los ahorros y beneficios económicos en primer lugar y la certificación Green Mark en segundo, esta última sirve como una

forma de reconocimiento a la gestión en beneficio del medio ambiente, fortaleciendo su imagen pública y promoviendo la aceptación de éstas tecnologías en la industria. Por otra parte, periodos de recuperación muy largos, altos costos de inversión inicial y la baja eficiencia de la conversión de energía son los factores para que los constructores no incluyan estas tecnologías en los edificios siendo el costo el factor más preponderante. Estos costos incluyen: costo de los inversores, el almacenamiento eléctrico o baterías, las conexiones medidas de la red, la protección contra fallas, el cableado y costo de diseño e instalación.

Por su parte, el investigador Curtius (2018) investiga en Suiza las barreras y facilitadores de la adopción de tecnologías como los sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios a partir de 43 entrevistas cualitativas dirigidas a partes interesadas a lo largo de toda la cadena de valor de dichos sistemas. En su estudio concluye que las barreras centrales para los productos específicos como: módulos, cables, baterías, etc. son los altos costos iniciales y la complejidad que representa su instalación. También concluye que una barrera específica para las partes involucradas en el sector es la renuencia de muchos arquitectos a adoptar estas tecnologías por el bajo conocimiento que se tiene de ella. Adicionalmente, asegura que existen barreras institucionales que se refieren a los riesgos políticos o a la falta de voluntad política para adoptar estrategias en dirección a promover estas tecnologías.

Por último, Yang & Zou (2016) llevaron cabo una investigación para identificar los costos, beneficios y riesgos de una integración arquitectónica con tecnologías que promueven un edificio sostenible desde el punto de vista de las partes interesadas a través de una revisión exhaustiva de la literatura. En ella, observan que si bien los sistemas fotovoltaicos integrados a la edificación tienen altos costos de capital de inversión inicial, existen importantes beneficios a largo plazo para los clientes, usuarios finales y la sociedad. Identificaron que además de la disminución de los costos se requiere apoyo e incentivos de políticas gubernamentales para promover una aplicación más amplia de estas tecnologías en la construcción. Seguido de esto, identificaron la falta de datos detallados sobre los costos de las tecnologías (incluidos los costos de los componentes individuales) y la falta de métodos para el análisis de los beneficios.

Todos estos estudios y gestiones apuntan a desarrollar edificios cada vez más eficientes hasta acercarse al concepto de Edificio Cero Energía. La AIE (2017) asegura que estos edificios cero serán un concepto de edificio capaz de generar su demanda anual de energía basado en fuentes renovables, en él se busca el equilibrio entre el consumo y generación anual de energía (Sorgato, Schneider, & Rüter, 2017). *“Los sistemas BIPV que contribuyan al desarrollo del Edificio Cero serán el futuro de la construcción”*. (IPEEC Building Energy Efficiency, 2017)

## 2.2 Contexto Colombiano

La conferencia sobre el cambio climático de París del 2015, ha dejado a Colombia con la responsabilidad de reducir en un 20% las emisiones GEI para el 2030. Ésta, es la contribución del país para evitar un incremento de 2 grados en la temperatura media global -que es el objetivo

supremo de la COP 21-. Según el tercer comunicado Nacional del Cambio climático entregado por el IDEAM Y EL PNUD en el 2016 llamado “*Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero*”(IDEAM, 2016), las emisiones del país corresponden aproximadamente al 0,4% del total de emisiones mundiales, además, se sitúa en el puesto 5 entre 32 países de Latinoamérica y el Caribe, donde Brasil, México y Argentina son los principales emisores de este grupo. Este mismo comunicado revela que en términos per cápita las emisiones son de 4 ton Co<sub>2</sub> eq por habitante ubicándose a nivel mundial en el puesto 105. Si se comparan estas cifras con las de países como Canadá y Estados Unidos donde las emisiones per cápita son de 24,6 y 18,5 ton Co<sub>2</sub> eq por habitante respectivamente y donde China, Estados Unidos, India, Federación Rusa y Japón representan el 50% de las emisiones mundiales de GEI, Colombia no es un gran emisor gases, no obstante, el país hace enormes esfuerzos en establecer acciones concretas en la mitigación de éste fenómeno.

### **2.2.1 El sector de la construcción en Colombia**

Según Acosta (2017), en el país el sector de la construcción consumen el 60 % de los recursos naturales no renovables extraídos de la tierra y el 40 % de la energía. Adicionalmente, genera el 30% de CO<sub>2</sub> y de todos los materiales empleados en las obras, se desperdicia el 20 %. En materia de aprovechamiento de los residuos el porcentaje no sobrepasa el 20% comparado con países como Italia, Países bajos Eslovenia, Estonia, Irlanda, Reino Unido y Hungría en donde se recicla en más del 95% de los materiales minerales de los residuos de construcción y demolición. Para enfrentar y mejorar esta situación, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 472 del 28 de febrero de 2017 que reglamenta la gestión integral de los residuos de construcción y demolición o escombros en el país; con lo cual se espera afianzar las políticas nacionales de desarrollo sostenible, disminuyendo la demanda de materias primas y fomentando la creación de empresas gestoras de los residuos RCD a nivel nacional, regional y local.

Por otra parte, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2015) expone que el sector comercial consume el 20% de la energía del Sistema Interconectado Nacional y es el responsable del 3% del total de las emisiones de GEI del país. Si se evalúa el porcentaje de emisiones del sector no es muy significativo pero debido al aumento de las edificaciones producto de la creciente urbanización, se hace urgente el establecimiento de políticas que respondan a los impactos ambientales de éstas nuevas construcciones. Durante el desarrollo de Expocamacol 2018, Juliana Villegas Restrepo, vicepresidente de Exportaciones de ProColombia, entidad dedicada a las exportaciones, turismo, inversión y marca país, informó que, en los próximos dos años, Colombia va a ser uno de los líderes en la región en materia de construcción ya que proyecta crecimientos promedio superiores a 5% entre 2019 y 2022.

El Gobierno Nacional, bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y los Ministerios Sectoriales, ha iniciado una estrategia de planeación de desarrollo a corto, mediano y largo plazo que busca responder a estos nuevos retos. La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) Mendieta (2010), tiene como objetivo desligar el crecimiento de las emisiones de GEI del crecimiento económico nacional. Asegura el Gobierno que al implementar los planes y las políticas adecuadas se evitará el incremento acelerado de GEI en los sectores económicos a la vez que promueven el crecimiento de los demás sectores.

Cumpliendo con la estrategia, el consorcio del Consejo Colombiano de Construcción, la asociación Sostenible, el Equipo Acelerador de Eficiencia en la Construcción y el Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste, evaluaron el cómo adaptar e implementar las pautas nacionales de construcción ecológica en un código de construcción utilizable. En razón a ello, Bogotá se convirtió en el 2018 en la primera ciudad Colombiana en implementar la Resolución Nacional 549/15 que da cuenta de la implementación de un nuevo código de energía para los edificios que busca acelerar su eficiencia (Acelerador & Energ, 2016). Posterior a esto, se determinó que la política nacional de construcción ecológica de Colombia no podía implementarse sin recopilar información adicional sobre la línea de base de la eficiencia de la construcción en las ciudades, para lo cual, reclutó a investigadores universitarios colombianos, ejecutivos de servicios públicos y líderes de la construcción que trabajan para cumplir con el código de ahorro de energía y agua.

Según el informe de actualización desempeño mercado inmobiliario por la certificación LEED (2018) producto de la implementación de éstas políticas y estrategias, el país ya suma 122 proyectos de construcción sostenible. Por su parte la firma certificadora *Certification Leed* o Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (USGBC (U.S. Green Building Council), n.d.) -por sus siglas en inglés-, asegura que ya son 1.9 millones de metros cuadrados certificados, distribuidos en dos ciudades: Bogotá y Medellín. Esta certificación *Leed* es una de las más reconocidas en el mundo con presencia en 165 países y otorga certificados del tipo Platino, Oro, Plata, y Certificado Leed que para el país ya son 13, 61, 32 y 16 respectivamente. Para otorgar los certificados, la firma se basa en la calificación de 5 criterios: sitios sustentables, ahorro de agua, ahorro de energía y atmósfera, materiales y recursos y calidad ambiental en los interiores. A demás de éste tipo de certificación, en el país existen otras firmas que avalan la construcción sostenible y que han contribuido al desarrollo eficiente del sector como: Referencial Casa Colombia, *Edge* y *Living Building Challenge* que es la más exigente de todas.

Para continuar con éste tipo de iniciativas y hacer más contundentes las acciones encaminadas a disminuir las emisiones de GEI en el país, es fundamental incluir en las políticas el desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable. La ley 1715 de 2014 en el Artículo 5(17) (Colombia, 2014) define las FNCER como: energía solar, eólica, geotérmica, la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos y los mares. En relación con la energía solar, ésta puede ser aprovechada implementando módulos y vidrios fotovoltaicos en las fachadas de los edificios capaces de generar parte de la demanda de su energía.

Éste aprovechamiento, sin duda se suma de una manera importante a las estrategias que están direccionadas hacia la construcción de edificaciones sustentables en el país. No obstante, entre las principales barreras que ha impedido el desarrollo de éstas tecnologías en el Territorio Nacional se encuentra la fuerte participación de la hidroenergía en la matriz energética y su relativa abundancia, pero los severos periodos de sequía de los últimos años han obligado a trazar una hoja de ruta para el aprovechamiento de los recursos energéticos de origen renovable que se tienen disponibles.

### 3 Marco Teórico

A continuación se relacionan los elementos técnicos y argumentos científicos que dan soporte a la investigación presentada en éste documento.

#### 3.1 Eficiencia

La Eficiencia energética es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética. Busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles(International Energy Agency, 2017). A través de la eficiencia energética, se busca obtener el mayor provecho de la energía, bien sea a partir del uso de una forma primaria de energía o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo.

En el marco de una transformación energética, los usuarios de los apartamentos se convertirán en generadores de su propia energía, en consecuencia la ley 1715 del 2014(“Congreso de Colombia,” 2014), define el concepto de la autogeneración a pequeña escala o microgeneración, ésta es aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades y que por sus características de pequeña escala, su potencia máxima no supera el límite establecido por la UPME (2015) de 10 MW. Seguido de esto, El Ministerio de Minas y Energía (2017) define la figura del autogenerador como el usuario conectado al Sistema de Interconexión Nacional (SIN) que realiza la actividad de autogeneración (El usuario puede ser o no propietario de los activos de autogeneración).

#### 3.2 Autogeneración

La autogeneración invita a pensar en las formas de convertir las superficies y fachadas de los edificios en estructuras fotovoltaicas capaces de aprovechar la irradiación solar(Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2017). En consecuencia, aparece el concepto de *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), en el cual, los elementos constructivos que generan energía eléctrica, reemplazan por completo los materiales tradicionales de construcción. Es importante diferenciar éste sistema de los sistemas *Building Attached Photovoltaics* (BAPV) donde los elementos generadores se instalan encima de los materiales con los que está construido el edificio, por lo que no hay una integración total(Sorgato et al., 2017). Los sistemas BAPV se consideran complementos de los edificios y no están directamente relacionados con los aspectos funcionales de las estructuras del edificio(C. Peng, Y. Huang, Z. Wu, 2011).

#### 3.3 Envoltente del edificio

Según la IEA (2017) es la envoltente del edificio lo que determina la cantidad de energía necesaria para calentarlo o enfriarlo. Si el edificio requiere de una envoltente en un clima frío, ésta demandará entre un 20% y 30% de energía para calentar el edificio, y en climas cálidos, el ahorro de energía será reducida pues para la refrigeración se estima entre 10% y 40%. Sin embargo, los ejemplos de

las mejores tecnologías de construcción disponibles combinadas con fuentes de energía renovables en edificios avanzados (como edificios de energía cero), solo representan un pequeño nicho de mercado en la actualidad. En una crisis económica mundial, los políticos deben tener presente que la promoción de la eficiencia energética en el sector de la construcción puede aumentar los empleos, apoyar el desarrollo económico y reducir el consumo de energía(IEA, 2013).

### 3.4 Temperatura de la fotocelda

Uno de los retos que tienen los desarrolladores de tecnologías fotovoltaicas es que entre más aumente la temperatura de la fotocelda menos eficiente es la generación de energía(Samir & Ali, 2017). Es así como aparecen los sistemas (BIPV/T) que recuperan el calor generado acumulado en la fotocelda a través de unos conductos o ventanillas. Baljit, Chan, & Sopian (2016) presentan una investigación que promueve el mejoramiento del desempeño de las fotoceldas pasando el aire a través de una pared ventilada. Esta ventilación es natural y es impulsado mediante convección forzada (que es el transporte de calor a través del movimiento de un fluido) para que fluya entre el panel fotovoltaico y la pared del edificio. En este tipo de sistema el fluido de trabajo no solo se usa para enfriar el panel fotovoltaico, al recolectarse, también se utiliza como suministro de agua caliente(Baljit et al., 2016)

### 3.5 Clasificación de los Sistemas BIPV

La tecnología fotovoltaica integrada al edificio podría clasificarse en dos: la construcción fotovoltaica integrada (BIPV) y la construcción fotovoltaica-térmica integrada (BIPV/T) (Baljit et al., 2016), sin embargo, varios autores coinciden en que los sistemas BIPV presentan grandes oportunidades y variadas aplicaciones. En la figura 3-1 puede observarse la clasificación de los sistemas fotovoltaicos integrados al edificio propuestos por (Biyik et al., 2017)

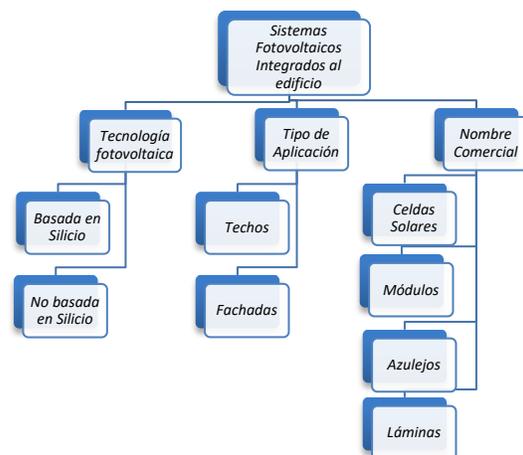


Figura 2. Clasificación de los Sistemas BIPV

Fuente: Elaboración propia "Traducción del autor"

En la actualidad existe una gama amplia de productos BIPV que pueden categorizarse de muchas maneras, por ejemplo, en los estudios de Bjørn Petter Jelle & Breivik (2012) se propone la siguiente categorización:

- Productos de papel BIPV
- Azulejos BIPV
- Productos Modulares BIPV
- Productos de acristalamiento de celdas solares

En los sistemas BIPV y BIPV/T existen dos áreas en las que se focalizan la mayoría de las investigaciones: las nuevas tecnologías de película delgada y las mejoras en la eficiencia del sistema por ventilación con el objeto de reducir la temperatura de la celda(Biyik et al., 2017).

Las tecnologías de película delgada que conservan la eficiencia cuando se somete a altas temperaturas(Bjørn Petter Jelle & Breivik, 2012) son productos adecuados cuando la instalación está sujeta a restricciones de peso dado que son livianos y flexibles. Otros elementos utilizados en los sistemas BIPV son los Azulejos BIPV que tienen el aspecto de los azulejos o tejas tradicionales, también pueden integrarse en todo el techo o por segmentos de techo. Dada su característica curva no podría esperarse un rendimiento igual a una celda plana sin embargo son acabados estéticos(Bjørn Petter Jelle & Breivik, 2012)

Otros productos que son más conocidos en el mercado son los modulares, éstos están diseñados para responder más eficazmente a las condiciones del clima, dada su característica modular, resulta más fácil la instalación y puede ajustarse a techos convencionales, sin embargo, puede existir confusión con respecto a si son productos BIPV o BAPV dado que algunos de estos módulos son fabricados con aislamiento térmico(Bjørn Petter Jelle & Breivik, 2012). Por último, están los productos de acristalamiento con celdas solares que permiten el paso de la luz dependiendo del nivel de opacidad deseado, al tiempo, que produce la electricidad. Dada su fabricación en cristal permite múltiples combinaciones en cuanto a color y tamaño para brindar estética en los diseños arquitectónicos. Entre sus aplicaciones están las ventanas, techos, fachadas, azulejos, entre otros(Bjørn Petter Jelle & Breivik, 2012). Todas estas tecnologías le apuntan a desarrollar edificios cada vez más eficientes, hasta acercarse al concepto de Edificio Cero Energía. Sorgato (2017) asegura que estos edificios cero serán un concepto de edificio capaz de generar su demanda anual de energía basado en fuentes renovables, en él se busca el equilibrio entre el consumo y generación anual de energía. *“Los sistemas BIPV que contribuyan al desarrollo del Edificio Cero serán el futuro de la construcción”*.(IPEEC Building Energy Efficiency, 2017)

### **3.6 Elementos constructivos con tecnologías generadoras de energía renovable utilizados en techos y fachadas.**

Adicional a los elementos citados anteriormente, se exponen algunos elementos constructivos a los que la invención humana ha adaptado tecnología para generar energía renovable. Una de las

características principales de estos elementos es que reemplazan el material de construcción tradicional con el valor agregado de la generación de energía renovable.

### **3.6.1 Bloques fotovoltaicos**

Los bloques fotovoltaicos son elementos constructivos capaces de generar energía eléctrica. Éstos están fabricados con material reciclado y celdas fotovoltaicas. Los bloques fotovoltaicos tienen la misma funcionalidad que los bloques tradicionales de cemento siendo utilizados como morteros o elementos de aislamiento y protección en las construcciones. Como referencia, sirva la Universidad EAFIT que lidera una de las investigaciones en relación a éste elemento (Velásquez, Marulanda, & Betancur, 2016)

### **3.6.2 Vidrio Fotovoltaico**

El vidrio fotovoltaico es un elemento de construcción para las edificaciones compuesto por dos láminas de vidrio traslúcido, dentro de las cuales se encuentran cámaras de aislamiento, una capa de material semiconductor, una deposición de silicio amorfo y una deposición de aluminio. Éste elemento ofrece una amplia gama de colores con los que se pueden personalizar según la demanda del proyecto. Entre las bondades se encuentra la generación de energía eléctrica permitiendo el paso de la luz solar (Beltran, 2009)

### **3.6.3 Tejas fotovoltaicas**

Las tejas fotovoltaicas son tejas que tienen incorporado celdas solares en su estructura. Algunas están hechas de cerámica y otras de plástico reciclado. La instalación pasa por debajo del tejado hasta el convertidor. Estos elementos pueden ser completamente integrables a las edificaciones reemplazando por completo los techos elaborados con materiales de construcción tradicionales. El sistema encargado de convertir la energía del sol capturada por las tejas en electricidad está completamente oculto detrás de la cubierta. (Musk, 2019)

### **3.6.4 Baldosas con mecanismos de presión o fabricados con material piezoeléctrico.**

En la actualidad existen mecanismos que al aplicar un esfuerzo mecánico generan energía, es el caso de las baldosas de la compañía PAVEGEN donde el ingeniero Industrial Laurence Kemball – Kook patentó la idea de que el impacto de las pisadas generaría energía limpia. Cada pisada puede generar ocho vatios al comprimir el mecanismo en cinco milímetros. También es el caso de los ingenieros en Israel, donde el centro tecnológico Innowattech R&D company crea un nuevo tipo de material para las carreteras compuestos por cristales piezoeléctricos. Ésta tecnología aprovecha la energía cinética del paso de los vehículos generando 400KW por kilómetro aproximadamente. Esta energía bien pueden ser utilizada para iluminar las zonas comunes, ser almacenada o entregarla a la red directamente. (Kemball-Cook, 2009)

La piezoelectricidad está definida como la capacidad que tienen ciertos materiales para producir una carga eléctrica cuando es sometida a un esfuerzo mecánico. Ésta cualidad también se presenta en sentido contrario, cuando al material se aplica una carga eléctrica, éste se deforma en proporción a la carga.(Falconi, 2019) .

### 3.7 Modelo financiero para la evaluación de proyectos BIPV

Una encuesta desarrollada por los investigadores Graham & Harvey (2001) donde participaron trescientos noventa y dos directores financieros (CFOs) de los estados unidos, reveló que entre los métodos de evaluación de inversiones más comunes y elegidos como técnicas para establecer presupuestos de capital o rentabilidades de los proyectos, estaban: El Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Amortización Descontado. El VPN puede usarse para reflejar cuál es la diferencia neta entre los beneficios y los costos de un sistema, calculando el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos para luego hallar su diferencia (Eiffert & Thompson, 2000). El VPN es el valor de todos los flujos de caja futuros descontados a una tasa de descuento (TD), esta es una medida de factibilidad económica de un proyecto (Saeed Edalati 2016). Por otra parte, la TIR calcula cuál será el rendimiento que dará una determinada inversión en un periodo de tiempo. Este método selecciona una TD y descuenta el flujo de efectivo hasta que el valor neto de la inversión sea cero. (Eiffert & Thompson, 2000).

Si se toman los métodos VPN, TIR Y DPBT como los modelos de evaluación financiera, el resultado puede considerarse viable si: el VPN es positivo en caso de analizarse una única inversión o cuando es el menos negativo entre otras inversiones que son también negativas. La TIR cuando es superior a la tasa de descuento (TD) fijada por el inversionista y el método DPBT cuando el período de recuperación descontado es más corto que el ciclo de vida del Sistema BIPV. (Graham & Harvey, 2001).

## 4 Revisión de literatura

En este capítulo se presentan los estudios recopilados de revistas de investigación científica y libros que preceden el objeto de estudio de este documento. Tanto estudios teóricos como de campo fueron analizados, extrayendo de ellos los análisis financieros de los sistemas generadores de energía renovable integrados a las edificaciones al igual que las tesis que estudian las tecnologías disponibles en los mercados que permiten desarrollar una matriz energética más eficiente y limpia.

En Canadá, Asaee, Nikoofard, Ugursal, & Beausoleil-Morrison (2017) desarrollan un estudio para medir el impacto técnico y económico de los sistemas PV y BIPV/T utilizando el modelo híbrido canadiense de energía de uso final y emisión. Los sistemas utilizados en este estudio producen electricidad y energía térmica para abastecer las demandas eléctricas y el calentamiento de agua sanitaria. El sistema BIPV/T añade una bomba de calor que se conecta al almacenamiento térmico, al calentador auxiliar y al equipo de calefacción de agua sanitaria sustituyendo por completo el sistema de calefacción de las casas. Entre los hallazgos se encuentra que en el sistema PV adaptado ahorra un 3% en energía y un 5% en emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que el sistema BIPV/T produce un 18% de ahorro de energía y un 17% en reducción de emisiones. Este mismo año, en Malasia (2017), los investigadores Ghazali, Salleh, Haw, Mat y Sopian llevan a cabo un estudio para evaluar la viabilidad técnica y financiera de una aplicación fotovoltaica integrada a la fachada de un edificio alto en posición vertical en una zona urbana. En él, utilizaron un modelo de evaluación financiera llamado "SAM" o Modelo de Asesor del Sistema desarrollado por el

Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) <https://sam.nrel.gov>. Al aplicar el modelo encuentran que el periodo de amortización del sistema es de 12 años.

Por otra parte, en China, Huang & Yu (2017) establecen los tiempos de recuperación de los sistemas fotovoltaicos compuestos por Silicio cristalino, Silicio multicristalino y Silicio Amorfo. Entre los resultados se encuentran que el tiempo de recuperación de la energía de los tres sistemas es de 3,0 a 7,4 años y que es mucho menor que el ciclo de vida del sistema fotovoltaico; por lo tanto, teóricamente, los tres sistemas fotovoltaicos son sistemas de energía renovable sostenibles y respetuosos con el medio ambiente desde la perspectiva del consumo de energía. Adicionalmente, en Turquía, Bilir & Yildirim (2017) analizan los periodos de recuperación de un sistema fotovoltaico instalado en el techo de un colegio. Los resultados indicaron un tiempo de recuperación simple de 7.9 años para el Caso 1 y 7.6 años para el Caso 2. El tiempo de recuperación de energía se determinó como 5 años para ambos sistemas.

También en la India, Tripathy, Joshi, & Panda (2017) presentan un análisis del costo del ciclo de vida y el tiempo de recuperación de la inversión de los sistemas térmicos de construcción integrada fotovoltaica (BIPV) tomando como referencia las condiciones climáticas de este país. Los hallazgos del estudio fueron que la energía producida oscilaba entre 1,61 y 3,61 US \$/kWh y el ciclo de vida entre 7.30 y 16,9 años (los autores esperaban que fuese de 30 años). Por último, concluyen que el sistema térmico BIPV es viable tanto desde el punto de vista financiero como medioambiental y puede utilizarse como una fuente importante de energía renovable.

Sorgato et al. (2017), implementan una evaluación técnica y económica de un BIPV. En el sistema se instalan módulos sin marco de película delgada de Teluro de Cadmio (CdTe) que reemplazan a los materiales tradicionales de la fachada como el vidrio arquitectónico, también se instalan módulos fotovoltaicos en los tejados. Este estudio se lleva a cabo en edificios de cuatro plantas de oficinas y centros comerciales de seis ciudades del Brasil, todas de clima cálido. Los resultados principales según el análisis técnico son: es posible satisfacer completamente la demanda de energía del edificio de oficinas con integración fotovoltaica en todas las ciudades brasileñas evaluadas. Según el estudio el clima local tiene un impacto significativo en el consumo de energía debido principalmente a las cargas de aire acondicionado. Por último, el análisis económico reflejó que con los costos cada vez más bajos de la energía fotovoltaica, reemplazar los materiales de construcción de fachadas convencionales con módulos fotovoltaicos no solo es un enfoque innovador sino también económico.

Wang et al. (2016) analizan para Shanghái dos sistemas: un BAPV de 3 kWp y un BIPV de 10kW, el primero instalado en el tejado y conectados a la red de China y el segundo hace parte de la fachada del edificio. Para las evaluaciones financieras han utilizado las técnicas Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), el tiempo de amortización de la energía (EPBT) y tiempo de recuperación de la inversión de gases de efecto invernadero (GPBT). Los sistemas EPBT y GPBT han sido utilizados para evaluar los impactos ambientales. Los resultados fueron: el primer sistema osciló entre los 4,2 y 3,1 años y el segundo entre 1,3 y 0,4 años. Entre los principales hallazgos se encuentra que el rendimiento mensual de los dos sistemas fue de 80.8% y 80.3% respectivamente.

La eficiencia mensual de los dos sistemas fueron de 10.8% y 11.2% respectivamente. El valor anual del beneficio económico ambiental para el BAPV es de 20.07 USD/kWp y para el sistema BIPV de 17 USD/kWp. Finalmente, la evaluación de los sistemas permite concluir que ambos sistemas tienen un beneficio ambiental significativo.

Oh, Koo, Hong, Jeong, & Lee (2017) analizaron el impacto económico que tienen las tarifas residenciales progresivas eléctricas en la instalación de una persiana fotovoltaica en Corea del Sur. También utilizaron un enfoque del costo del ciclo de vida para analizar los efectos de las tarifas progresivas sobre las persianas fotovoltaicas integradas (PIPV). Considerando las tarifas residenciales progresivas mostró una tendencia a que cuanto mayor era la cantidad de consumo de electricidad en un hogar, mejor era la viabilidad económica del Proyecto. Es importante resaltar que en algunas zonas arancelarias puede verse afectada significativamente la viabilidad económica del BIPV. Por último, se determinó que la viabilidad económica del BIPV bajo el plan de utilización conectado a la red era superior.

Evola & Margani (2016) analizaron la rentabilidad de colocar fachadas fotovoltaicas en edificios residenciales con cierto grado de obsolescencia construidos entre 1950 y 1990 en Italia. Los factores tenidos en cuenta fueron: la orientación de los módulos fotovoltaicos, diferentes tecnologías de estos y las condiciones climáticas. Los resultados muestran que para un edificio de ocho plantas la inversión inicial puede amortizarse en unos nueve (9) años si se consideran los incentivos fiscales de la época y una tasa de autoconsumo del 50% para la electricidad producida por los módulos fotovoltaicos. Según los autores, la presencia de incentivos fiscales es esencial para que la inversión sea atractiva.

Cucchiella, D'Adamo, & Lenny Koh, (2015) desarrollaron un análisis ambiental y económico de los sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios (BIPV) en varias regiones Italianas. En un primer momento evalúan provincialmente y luego a escala regional. Los indicadores de evaluación para el modelo fueron: valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), período de recuperación de la inversión (DPbP), relación costo-beneficio agregado (BCr) y reducción de las emisiones de dióxido de carbono (ERcd). Uno de los objetivos del estudio fue definir la cantidad de sistemas (PV) que se necesitan para abastecer la demanda de energía renovable de los usuarios y la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas. Entre los principales hallazgos se encuentra que los resultados económicos están fuertemente influenciados por el valor de irradiación promedio anual. Para un escenario de instalación de 134 MW el desempeño es de 8,5 ton de CO<sub>2</sub> eq por kW instalado y un flujo de caja neto positivo de 2000 € por kW instalado.

Gordillo & Aristiza (2008) analizan el desempeño operacional del primer sistema fotovoltaico integrado (BIPV) conectado a la red instalada en Colombia. Éste se llevó a cabo en Bogotá y después de dos años de monitoreo observaron que la energía generada por la planta de BIPV conectada a la red cumple con las especificaciones exigidas para dichos sistemas por los estándares nacionales e internacionales.

Aristizábal & Páez, (2018) presentaron los resultados de desempeño operacional de un sistema fotovoltaico integrado en un edificio conectado a la red de 6 kW (BIPV) aplicado en un laboratorio,

instalado en Bogotá – Colombia después de un año de monitoreo. Los datos fueron evaluados desde Septiembre 2015 hasta Agosto 2016 y los principales hallazgos indican que el promedio de energía de corriente alterna (CA) generada por el sistema fotovoltaico PV fue de 471,083 kWh/mes con un promedio de irradiación de 4.048 kWh/m<sup>2</sup>-día; seguido de esto, el promedio de la eficiencia de la matriz fotovoltaica fue de 13,68% y el rendimiento final máximo del rendimiento del sistema (YF) fue de 88,6 kWh/kWp-año. Al final concluyen que la planta de BIPV conectada a la red cumple con las especificaciones exigidas para dichos sistemas según los estándares nacionales e internacionales.

## 5 Objetivos

### 5.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad financiera de la utilización de elementos generadores de energía renovable en las edificaciones en Colombia.

### 5.2 Objetivos Específicos

Caracterizar los elementos generadores de energía renovable que pueden ser incorporados en edificaciones.

Establecer la estructura de costos asociada a los elementos identificados para el contexto colombiano.

Desarrollar un modelo de evaluación financiera que evalúe el desempeño económico de los elementos identificados.

### 5.3 Alcance del documento

Este documento se limita a evaluar los flujos de la inversión a través de la TIR. Ésta, se seleccionó como herramienta de evaluación sobre otros indicadores porque refleja *prima facie* si la inversión genera los flujos de caja que hacen que el proyecto sea viable y además porque al decidir sobre ella el tipo de descuento, el análisis de sensibilidad será más apropiado que el que arroja el mismo VPN. Por otra parte, puede considerarse como lenguaje universal, es decir, en otro país pueden también evaluar si esta inversión será rentable o no, caso contrario con el VPN pues estos estarán calculados en pesos y para ser evaluados en otro país deberá considerar el cambio de la divisa.

El modelo presentado en este documento aplica para las edificaciones que en sus techos o fachadas utilicen elementos constructivos totalmente integrados capaces de generar energía renovable. El análisis se enmarca en las condiciones del sector de la construcción en Colombia y en los precios establecidos por los distribuidores oficiales en Colombia que aparecen relacionados en las páginas web de los fabricantes originales. Los elementos evaluados serán el vidrio traslúcido fotovoltaico, la teja fotovoltaica y la baldosa piezoeléctrica. Para desarrollar el modelo fue preciso establecer las tarifas de energía de 22 ciudades principales de Colombia. Por último, todo el ejercicio de modelado se hará a través de la herramienta de Office, Excel.

## 6 Metodología

### 6.1 Modelado

#### Evaluación financiera

La evaluación financiera del modelo consistió en hacer un análisis comparativo entre la Tasa TIR del flujo de caja diferencial (compuesto por el material generador de energía integrado al edificio y el material tradicional de construcción) y una tasa fijada en el 2%, pues éste es el porcentaje aproximado de restar una tasa de rendimiento en Colombia DTF 90 días con el costo de vida o inflación . Toda TIR arrojada por el modelo que se encuentre por encima de ésta tasa de descuento se consideró rentable o favorable.

#### Elementos evaluados

Para este trabajo se han escogido tres elementos constructivos capaces de generar energía eléctrica e integrarse por completo a la edificación: El vidrio fotovoltaico, la teja fotovoltaica y la baldosa piezoeléctrica.

El vidrio fotovoltaico es un elemento constructivo compuesto por dos láminas de vidrio traslúcido y una celda fotovoltaica en medio. Entre los fabricantes más reconocidos se encuentra la empresa española ONYX Solar y de China las empresas Fujian Xinfuxin CO LTD Y QINGDAO (Aoxing, Migo, Rocky, entre otras). Entre las características más importantes está la integración por completo a la edificación como elemento arquitectónico permitiendo el paso de la luz solar al tiempo que genera energía y aísla termo-acústicamente el lugar.

Las tejas fotovoltaicas son azulejos o tejas de techo que tienen incorporada una celda solar en su armazón(Mondal & Mezher, 2017). Estos elementos pueden ser completamente integrables a las edificaciones reemplazando por completo los techos elaborados con materiales de construcción tradicionales. Éste invento es una alternativa relativamente más económica (en caso de que la construcción del techo esté apenas iniciando) que los módulos o paneles solares, pues, estos últimos están adheridos a los techos o estructuras ya edificadas y su diferencia fundamental con las tejas fotovoltaicas radica en que no reemplazan los techos ya construidos.

Hoy en día, son varias las empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de tejas fotovoltaicas en el mundo, entre ellas está TESLA MOTORS. La empresa Norteamericana fundada en Julio de 2003 por el Ingeniero Elon Musk, lanzó éste producto al mercado en el 2017 y lo llamó “Solar Roof”. Como TESLA existen compañías dedicadas a la fabricación y comercialización de azulejos o tejas fotovoltaica como SUNNY de china y HM SOLAR de la India.

La baldosa piezoeléctrica es una superficie o losa capaz de transformar la energía que se ejerce sobre ellas al momento de ser comprimidas en electricidad. Entre las empresas que se dedican a su fabricación está PAVEGEN en el Reino Unido e INNOWATTECH ubicada en Israel. Las baldosas fabricadas por las compañías tienen un tamaño promedio de 45 × 60 centímetros y están pensadas

para ser utilizadas en zonas donde haya aglomeración de personas, como estaciones de tren, aeropuertos, colegios y centros comerciales. La energía generada por millones de pisadas puede ser utilizada en múltiples aplicaciones, como iluminación de señales, anuncios digitales o zonas Wiifi.

### Herramienta o Software

Para elaborar el modelo financiero se escogió la herramienta de Office “Microsoft Excel”, pues éste software nos permite calcular la TIR fácilmente al introducir en la fórmula los datos correspondientes al flujo de caja.

### Variables de entrada

Después de la elección del software se establecieron las variables de entrada para las tres tecnologías evaluadas que son: Caso Vidrio fotovoltaico, Caso Teja fotovoltaica y Caso baldosa piezoeléctrica. Entre las variables de entrada se encuentran: Potencia Pico (Wp) del elemento constructivo, Potencia de salida según las especificaciones del fabricante, porcentaje de eficiencia garantizada por el fabricante, Potencia real entregada, tasa anual de mantenimiento, costo por metro cuadrado del elemento constructivo, entre otras. Más adelante en la sección de parametrización se detallarán éstos componentes.

### Variables auxiliares

Seguido de esto, se incluyeron “variables auxiliares” como: los días de operación, una tasa de aumento anual en la tarifa de energía y la inflación. El periodo de evaluación para las tres tecnologías ha sido de 40 años -según los fabricantes se estima que la vida útil de los elementos oscila entre los 20 y 30 años. Por tanto, el modelo realiza los cálculos anualmente durante la vida útil de cada tecnología. La unidad de medida en que fueron hechos todos los cálculos es el “metro cuadrado” (m<sup>2</sup>), dado que facilita y estandariza la manera de presentar los resultados de la tesis, también, es la unidad en que se presentan la mayoría de los datos de los fabricantes.

### Inversión inicial

Son varios los elementos tenidos en cuenta para el cálculo de la inversión inicial en cada una de las tecnologías. Como primer rubro se tienen los precios ofrecidos por los distribuidores oficiales en Colombia y ubicados en la ciudad de Bogotá. Para el caso del vidrio fotovoltaico ha sido el distribuidor LUXOLARY, SUNNY para el caso de las tejas fotovoltaicas y PAVEGEN para las baldosas piezoeléctricas. Estos precios se han convertido a \$/m<sup>2</sup>, no obstante, el costo de los inversores, la instalación, las estructuras, accesorios, cables y entrada en operación que son productos y servicios también ofrecidos por los distribuidores, se han estructurado como porcentajes del costo por metro cuadrado del elemento constructivo. Por ejemplo: si el costo del vidrio fotovoltaico fuese de \$100/m<sup>2</sup> y el costo de las estructuras de \$50/m<sup>2</sup>, el costo de la estructura será el 50% del \$/m<sup>2</sup> del vidrio fotovoltaico o sea 50\$/m<sup>2</sup> y de la misma manera para los demás elementos. Para el costo de los elementos tradicionales de construcción sólo se ha tenido en cuenta el costo por metro cuadrado brindado por HOMECENTER más los costos de instalación. Sin embargo, en el caso de querer mayor seguridad en los datos de inversión inicial para los materiales tradicionales, es posible hacer un

promedio entre las cotizaciones, no obstante, el precio estaría muy cercano al establecido por HOMECENTER dado que es un líder del mercado en este segmento.

### Tasas de mantenimiento

El mantenimiento de los equipos es un procedimiento necesario para conservar el nivel de generación de energía que ofrece el equipo y para extender la vida útil del mismo. Por ésta razón se ha incluido el costo del mantenimiento para la evaluación financiera de los elementos aquí considerados. Este costo anual de mantenimiento de los equipos está representado en un porcentaje del \$/m<sup>2</sup> del elemento tecnológico. Para el vidrio tradicional y fotovoltaico será del 0,7%, para la baldosa tradicional y piezoeléctrica del 0,70% y para teja tradicional y fotovoltaica será del 3%.

### Degradación de la tecnología (Wp/m<sup>2</sup>)

Según Petter & Breivik, (2012) con el paso de los años la celda fotovoltaica va perdiendo capacidad de generación de energía. Por tanto, en éste trabajo se ha determinado una tasa de degradación anual después del décimo año de operación, pues los fabricantes de éstas tecnologías garantizan un porcentaje de potencia de salida constante durante los primeros diez años. Para el caso de la baldosa piezoeléctrica se ha considerado una tasa de degradación distinta dado que está en función del desgaste del mecanismo (el fabricante PAVEGEN considera 0,80%), el modelo permite hacer un análisis de sensibilidad en relación con esta variable.

Cálculo de los primeros 10 años: potencia pico(Wp) \* porcentaje de la potencia de salida del fabricante.(%)

Después de 10 años: potencia de salida del fabricante(Wp/m<sup>2</sup>) – (Wp/m<sup>2</sup>\* Tasa de degradación). Éste procedimiento es aplicado cada año.

### Flujos de caja

Los flujos de caja han sido construidos con un horizonte de observación de 40 años. En ellos, se han analizado los comportamientos de los flujos anuales tanto del material tradicional de construcción como los del elemento generador de energía. Los rubros que se han contemplado allí son: Costos por metro cuadrado de la inversión inicial, los costos por metro cuadrado de mantenimiento y el pago de la electricidad. Esto se ha establecido tanto para los materiales tradicionales como para los elementos generadores de energía. Posteriormente, se ha desarrollado un flujo de caja diferencial en el cual se ha aplicado la tasa de descuento para calcular la TIR y el VPN.

### Pago de la electricidad

En la parte del vidrio tradicional se ha incluido una columna con valores negativos del pago de energía que se ha dejado de percibir. Este pago de la energía es calculado como la multiplicación entre la generación de energía (kW/m<sup>2</sup>) y el precio de las tarifas por ciudades. Los datos de la generación de energía han sido construidos según los niveles de irradiancia de 22 ciudades principales de Colombia y de las tarifas de energía en cada ciudad.

$$\$/m^2 = Kwh/m^2 * \$/Kwh$$

### Flujo de caja diferencial

Después de construidos los flujos de caja para cada uno de los elementos, se procede a calcular el flujo de caja diferencial, que como su nombre lo indica calcula la diferencia entre los flujos del material tradicional de construcción y los flujos del elemento generador de energía, dejando un solo flujo de caja y al que se aplica el cálculo de la TIR teniendo en cuenta la tasa de descuento.

## 6.2 Parametrización

### Nivel de irradiación (Kwh/m2)

El modelo se ha diseñado teniendo en cuenta el promedio anual de irradiación de 22 ciudades principales de Colombia relacionadas de mayor a menor en la Tabla 6-1. Estos datos han sido tomados del IDEAM(UPME, 2005), no obstante, estos niveles de brillo también pueden encontrarse utilizando el observatorio de dinámica solar de la NASA y que comúnmente es utilizado en éste tipo de análisis.

Tabla 6-1. Nivel de irradiación de 22 ciudades Colombianas

Número	Ciudad	Nivel de irradiación (Kw)	Número	Ciudad	Nivel de irradiación (Kw)
1	Barranquilla	5,9512	12	Cúcuta	4,4438
2	Riohacha	5,6058	13	Sincelejo	4,368
3	Cartagena	5,5525	14	Medellín	4,3351
4	Santa Marta	5,4054	15	Cali	4,3326
5	Valledupar	5,2804	16	Montería	4,2471
6	Yopal	4,8351	17	Pereira	4,2109
7	Villavicencio	4,7507	18	Bogotá	4,0377
8	Ibagué	4,6632	19	Armenia	3,9338
9	Tunja	4,6574	20	Manizales	3,7672
10	Neiva	4,6515	21	Pasto	3,7428
11	Arauca	4,6198	22	Florencia	3,6175

Fuente: Elaboración propia tomando datos del IDEAM

### Generación de la energía (Kwh/m2)

Esta se ha calculado para cada ciudad teniendo en cuenta las siguientes multiplicaciones.

$$\frac{Kwh}{m^2} = (m^2 * \frac{Wp}{m^2} * \frac{Kwh}{m^2} * días) / 1000w$$

### Estructura de costos

Para estructurar los costos de los elementos según el mercado colombiano, fue necesario como primer medida elaborar una lista de proveedores a nivel nacional junto a las cotizaciones que podían

emitir vía telefónica o correo electrónico, sin embargo, el 90% de éstos proveedores eran empresas informales, empresas que importaban la tecnología a nombre de otras empresas, lo que dificultó la estabilización o estandarización del precio. Por tanto, como plan de contingencia, se recurrió únicamente a los proveedores oficiales que son relacionados por los fabricantes originales en sus páginas web. A continuación en la Tabla 6-2, Tabla 6-3 y Tabla 6-4, se relacionan los proveedores oficiales establecidos en Colombia junto a los precios base de cotización y el porcentaje de participación del costo total.

Tabla 6-2. Estructura de costos del Vidrio Fotovoltaico según proveedor

Proveedor	Elemento del costo	Costo COP (\$/m <sup>2</sup> )	% del costo
Luxolary (Bogotá)	<b>Vidrio Fotovoltaico (m<sup>2</sup>)</b>	\$300.775	29,20%
	Inversores + elementos de protección	\$312.806	30,40%
	Instalación	\$126.326	12,30%
	Estructuras, Accesorios y Cables	\$285.736	27,80%
	Operación	\$3.008	0,30%
	<b>Total</b>	<b>\$1.028.651</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-3. Estructura de costos de la Teja Fotovoltaica según proveedor

Proveedor	Elemento del costo	Costo COP (\$/m <sup>2</sup> )	% del costo
SUNNY (Bogotá)	<b>Teja fotovoltaica (m<sup>2</sup>)</b>	\$69.000	29,20%
	Inversores + elementos de protección	\$71.760	30,40%
	Instalación	\$28.980	12,30%
	Estructuras, Accesorios y Cables	\$65.550	27,80%
	Operación	\$690	0,30%
	<b>Total</b>	<b>\$235.980</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-4. Estructura de costos de la baldosa según proveedor

Proveedor	Elemento del costo (m2)	Costo COP (\$/m2)	% del costo
Pavegen (Bogotá)	<b>Baldosa (m2)</b>	\$444.179	29,20%
	Inversores + elementos de protección	\$461.946	30,40%
	Instalación	\$186.555	12,30%
	Estructuras, Accesorios y Cables	\$421.970	27,80%
	Operación	\$4.442	0,30%
	<b>Total</b>	<b>\$1.519.092</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

Al examinar éste tipo de proyectos, una de las características que más resalta es que los elementos generadores de energía aquí tenidos en cuenta reemplazan el material tradicional al integrarse por completo al edificio, desde ésta perspectiva fue necesario incluir en los flujos de caja el costo del material de construcción tradicional. En la Tabla 6-5 se relacionan las estructuras de costos extraídas de un proveedor reconocido en Colombia que distribuye material de construcción a nivel nacional.

Tabla 6-5. Estructura de costos de materiales tradicionales según proveedores

Proveedor	Elemento del costo (m2)	Costo COP (\$/m2)	% del costo
HOMECENTER (Colombia)	<b>Vidrio Tradicional (m2)</b>	\$35.000	77%
	Instalación	\$10.500	23%
	<b>Total</b>	<b>\$45.500</b>	<b>100%</b>
	<b>Teja tradicional (m2)</b>	\$8.000	77%
	Instalación	\$2.400	23%
	<b>Total</b>	<b>\$10.400</b>	<b>100%</b>
	<b>Baldosa Tradicional (m2)</b>	\$25.000	77%
	Instalación	\$7.500	23%
	<b>Total</b>	<b>\$32.500</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

### Tarifas de energía por ciudades

La energía eléctrica generada por los elementos otorga beneficios monetarios según el precio de la tarifa que las electrificadoras ya tienen implementadas en las ciudades. En el análisis se utilizaron las tarifas de 22 ciudades Colombianas principales. A continuación se relacionan en la Tabla 6-6 y Tabla 6-7 las tarifas por ciudades según el boletín tarifario Julio - Septiembre 2018 de la Superintendencia de Servicios públicos Domiciliarios de Colombia.

Tabla 6-6. Tarifas de energía por ciudades según el boletín tarifario 2018 de la Superservicios

TARIFAS POR CIUDADES Y ELECTRICIDADORAS (\$/kWh)	Medellín	Arauca	Barranquilla	Cartagena	Tunja	Manizales	Florencia	Yopal	Valledupar	Montería	Bogotá
	EPM	ENELAR	ELECTRICARIBE	ELECTRICARIBE	EBSA	CHEC	ELECTROCAQUETA	ENERCA	ELECTRICARIBE	ELECTRICARIBE	CODENSA
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Valor generación mes (\$/kWh)	170,51	217,99	164,69	164,69	182,27	177,47	172,75	202,36	164,69	164,69	194,57
Valor transmisión (\$/kWh)	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01
Valor distribución (\$/kWh)	179,23	166,84	122,11	122,11	166,84	179,23	202,13	202,13	122,11	122,11	166,84
Valor Comercialización (\$/kWh)	43,04	122,33	62,67	62,67	89,91	77,18	103,65	59,37	62,67	62,67	45,31
Valor pérdidas (\$/kWh)	32,40	40,54	33,95	33,95	34,58	33,85	32,99	37,93	33,95	33,95	35,3
Valor restricciones (\$/kWh)	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15
Valor Total (\$/kWh)	494,34	616,86	452,58	452,58	542,76	536,89	580,68	570,95	452,58	452,58	511,18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-7. Tarifas de energía por ciudades según el boletín tarifario 2018 de la Superservicios

TARIFAS POR CIUDADES Y ELECTRICIDADORAS (\$/kWh)	Neiva	Riohacha	Santa Marta	Villavicencio	Pasto	Cúcuta	Armenia	Pereira	Sincelejo	Ibagué	Cali
	ELECTROHUILA	ELECTRICARIBE	ELECTRICARIBE	EMSA - META	CEDENAR	CENS	EDEQ	EEP	ELECTRICARIBE	ENERTOLIMA	EMCALI
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Valor generación mes (\$/kWh)	202,99	164,69	164,69	175,84	188,42	178,02	169,32	193,43	164,69	187,44	192,59
Valor transmisión (\$/kWh)	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01	30,01
Valor distribución (\$/kWh)	166,84	122,11	122,11	202,13	170,86	179,23	179,23	179,23	122,11	194,53	170,86
Valor Comercialización (\$/kWh)	89,71	62,67	62,67	65,73	113,97	56,07	63,57	64,16	62,67	69,06	42,18
Valor pérdidas (\$/kWh)	38,02	33,95	33,95	33,73	35,59	33,98	29,68	36,45	33,95	35,43	36,35
Valor restricciones (\$/kWh)	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15	39,15
Valor Total (\$/kWh)	566,72	452,58	452,58	546,59	578	516,46	510,96	542,43	452,58	555,62	511,14

Fuente: Elaboración propia

Seguido de esto, se ha elaborado una tabla con la degradación de la tecnología por año tomando como referencia las tasas sugeridas por los fabricantes. Las especificaciones técnicas emitidas por los fabricantes en relación con la potencia de salida de los elementos son: 32, 16 y 8 W/m<sup>2</sup> para los casos del vidrio, la teja y la baldosa respectivamente. Algunas variables como la degradación de la tecnología en el vidrio fotovoltaico tiene incorporado una pérdida de eficiencia de 0,5% por año, después de 10 años en operación, según los fabricantes éste es el rendimiento típico de los sistemas fotovoltaicos que se fabrican. A continuación se relacionan en la Tabla 6-8 los supuestos del modelo por tecnología que han sido tomados de las recomendaciones de los fabricantes.

Tabla 6-8. Supuestos del modelo por tecnología

Supuestos del modelo	Tecnología		
	Vidrio Fotovoltaico	Teja Fotovoltaica	Baldosa
Pérdida de Eficiencia por año después de 10 años (%)	0,50%	0,50%	0,80%
Tasa anual de mantenimiento (Costo/m <sup>2</sup> )	0,70%	3%	0,70%
Tasa de descuento fijada para comparar TIR halladas con el modelo	2%	2%	2%
Inflación (incorporada en el incremento anual del costo del mantenimiento)	4%	4%	4%
Tasa de aumento anual de la energía	2%	2%	2%

Fuente: Elaboración propia

Por último, es importante resaltar que fueron utilizados los 365 días del año como los días de operación para el cálculo de la generación de energía.

## 7 Resultados

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de la viabilidad financiera de los elementos generadores de energía elegidos para la investigación según el modelo construido. Estos resultados serán presentados por grupos según el nivel de viabilidad que presenten los proyectos en función de los parámetros presentados anteriormente. En primer lugar, se presentan los resultados en un escenario que servirá de referencia para las demás evaluaciones llamado “escenario Base”. En él, tanto las tarifas de energía como los costos de inversión inicial son los actuales. Posteriormente se hará un análisis de sensibilidad en relación con la tarifa de energía en un rango entre -20% y 20% haciendo saltos de 5%. Por último, se presentarán dos escenarios en los que los costos de inversión inicial caen al 25% y al 50%.

### 7.1 Resultados del caso Base

La Tabla 7-1 muestra el caso base en el que Arauca es la única ciudad que tiene TIR por encima de la tasa de descuento si se utiliza el elemento constructivo “Teja fotovoltaica”. Por tanto, un proyecto que utilice esta tecnología en esa ciudad puede considerarse rentable. Por otra parte, en las ciudades resaltadas con color verde presentando TIR positivas, puede llevarse a cabo un análisis de sensibilidad en relación con la tasa de descuento, con la tarifa de energía o con los costos de inversión inicial para investigar de qué manera los proyectos pueden resultar factibles. En relación con la tecnología “baldosa piezoeléctrica” puede concluirse que no es un elemento factible bajo las condiciones del caso base. Se hace necesario analizar un escenario que contemple la disminución de costos de inversión inicial de esta tecnología.

Tabla 7-1. Escenario base de las tres tecnologías

COMPORTAMIENTO DE LA TIR "Escenario Base"											
Nº	Ciudad	Promedio Anual de Radiación Solar	Tecnología			Nº	Ciudad	Promedio Anual de Radiación Solar	Tecnología		
			Vidrio Fotovoltaico	Teja Fotovoltaica	Baldosa Piezoeléctrica				Vidrio Fotovoltaico	Teja Fotovoltaica	Baldosa Piezoeléctrica
1	Medellín	4,3351	-1,07%			12	Neiva	4,6515	0,63%	0,51%	
2	Arauca	4,6198	1,24%	2,18%		13	Riohacha	5,6058	0,33%	-0,55%	
3	Barranquilla	5,9512	0,80%	1,02%		14	Santa Marta	5,4054	0,03%		
4	Cartagena	5,5525	0,25%	-0,86%		15	Villavicencio	4,7507	0,51%	0,12%	
5	Tunja	4,6574	0,30%	-0,66%		16	Pasto	3,7428	-0,99%		
6	Manizales	3,7672	-1,59%			17	Cúcuta	4,4438	-0,49%		
7	Florencia	3,6175	-1,25%			18	Armenia	3,9338	-1,64%		
8	Yopal	4,8351	0,99%	1,55%		19	Pereira	4,2109	-0,53%		
9	Valledupar	5,2804	-0,16%	-8,57%		20	Sincelejo	4,368	-1,80%		
10	Montería	4,2471	-2,06%			21	Ibagué	4,6632	0,49%	0,06%	
11	Bogotá	4,0377	-1,40%			22	Cali	4,3326	-0,79%		

Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Análisis de sensibilidad

### Vidrio fotovoltaico

Según los resultados de la Tabla 7-2, Manizales, Montería, Armenia y Sincelejo presentan TIR negativas en todos los rangos de variación de la tarifa. En conclusión, ningún proyecto que considerara la tecnología “vidrio fotovoltaico” como elemento constructivo en estas ciudades, resultaría rentable bajo las condiciones de los parámetros establecidos. Por otro lado, existen ciudades donde resultaría rentable la utilización de la tecnología si la tarifa tuviese un aumento. Por ejemplo: si la tarifa de energía aumenta en un 15%, Arauca y Yopal muestran TIR por encima de la tasa de descuento, lo que se traduce en proyectos factibles. De igual forma, si la tarifa aumentara un 20%, los proyectos en Arauca, Barranquilla, Yopal y Neiva serán rentables. Cabe mencionar que a pesar de que algunas ciudades presentan niveles de irradiación por encima de Arauca, no ven reflejada ésta ventaja en el incremento del número de proyectos factibles. Esto es debido a que los precios de las tarifas de energía en Arauca están por encima de las demás ciudades e implementar tecnologías fotovoltaicas resulta más favorable.

Tabla 7-2. Análisis de sensibilidad Costos actuales - Vidrio Fotovoltaico

Comportamiento de la TIR con análisis de sensibilidad en la tarifa - Vidrio Fotovoltaico											
	Ciudad	Promedio Anual de Radiación Solar	INCREMENTO EN LA TARIFA				Tarifa actual	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%		-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	0,43%	0,09%	-0,27%	-0,65%	-1,07%	-1,53%	-2,03%	-2,59%	-3,25%
2	Arauca	4,6198	2,65%	2,32%	1,98%	1,62%	1,24%	0,84%	0,41%	-0,05%	-0,54%
3	Barranquilla	5,9512	2,21%	1,89%	1,54%	1,18%	0,80%	0,39%	-0,04%	-0,51%	-1,02%
4	Cartagena	5,5525	1,68%	1,35%	1,00%	0,64%	0,25%	-0,16%	-0,61%	-1,10%	-1,64%
5	Tunja	4,6574	1,72%	1,40%	1,05%	0,68%	0,30%	-0,12%	-0,56%	-1,05%	-1,59%
6	Manizales	3,7672	-0,03%	-0,38%	-0,75%	-1,15%	-1,59%	-2,07%	-2,60%	-3,22%	-3,94%
7	Florencia	3,6175	0,28%	-0,07%	-0,43%	-0,82%	-1,25%	-1,71%	-2,22%	-2,80%	-3,48%
8	Yopal	4,8351	2,40%	2,08%	1,73%	1,37%	0,99%	0,59%	0,16%	-0,31%	-0,81%
9	Valledupar	5,2804	1,29%	0,96%	0,61%	0,24%	-0,16%	-0,58%	-1,04%	-1,55%	-2,11%
10	Montería	4,2471	-0,45%	-0,81%	-1,19%	-1,61%	-2,06%	-2,57%	-3,15%	-3,82%	-4,64%
11	Bogotá	4,0377	0,13%	-0,21%	-0,58%	-0,97%	-1,40%	-1,87%	-2,40%	-2,99%	-3,69%
12	Neiva	4,6515	2,05%	1,72%	1,38%	1,01%	0,63%	0,22%	-0,22%	-0,69%	-1,21%
13	Riohacha	5,6058	1,75%	1,42%	1,08%	0,71%	0,33%	-0,09%	-0,53%	-1,02%	-1,55%
14	Santa Marta	5,4054	1,47%	1,14%	0,79%	0,43%	0,03%	-0,39%	-0,84%	-1,34%	-1,89%
15	Villavicencio	4,7507	1,93%	1,60%	1,26%	0,90%	0,51%	0,10%	-0,34%	-0,82%	-1,35%
16	Pasto	3,7428	0,51%	0,17%	-0,19%	-0,58%	-0,99%	-1,44%	-1,94%	-2,50%	-3,14%
17	Cúcuta	4,4438	0,97%	0,64%	0,29%	-0,09%	-0,49%	-0,92%	-1,40%	-1,92%	-2,51%
18	Armenia	3,9338	-0,08%	-0,43%	-0,80%	-1,21%	-1,64%	-2,13%	-2,67%	-3,29%	-4,02%
19	Pereira	4,2109	0,94%	0,60%	0,25%	-0,13%	-0,53%	-0,96%	-1,44%	-1,97%	-2,56%
20	Sincelejo	4,368	-0,22%	-0,57%	-0,95%	-1,35%	-1,80%	-2,29%	-2,84%	-3,48%	-4,24%
21	Ibagué	4,6632	1,92%	1,59%	1,24%	0,88%	0,49%	0,08%	-0,36%	-0,84%	-1,37%
22	Cali	4,3326	0,69%	0,36%	0,00%	-0,38%	-0,79%	-1,23%	-1,72%	-2,26%	-2,89%

Fuente: Elaboración propia

### Teja fotovoltaica

En el caso de esta tecnología, se observa que es más sensible al cambio en la tarifa, pues, pasa de tener un sólo proyecto factible en Arauca a tener 29 proyectos factibles, de hecho, hasta con tres puntos porcentuales por encima de la tasa de descuento como es el caso de Arauca cuando la tarifa aumenta en un 20%. En barranquilla y Yopal fue necesario incrementar en un 5% la tarifa de energía para presentar proyectos factibles. En ciudades como Neiva, Villavicencio e Ibagué los proyectos son factibles con este elemento sólo si se incrementa la tarifa de energía en un 10%. Proyectos en Cartagena, Tunja y Riohacha son rentables si se incrementa en un 15% la tarifa. Por último, sólo con un incremento en la tarifa del 20% Valledupar y Santa Marta, tendrían proyectos rentables para esta tecnología. En ciudades como Medellín, Manizales, Florencia, Bogotá, Pasto, Cúcuta, Pereira, Armenia, Sincelejo y Cali, no se podrían incluir en los proyectos éste elemento constructivo, pues presentan TIR por debajo de la tasa descuento en todas las variaciones de la tarifa tenidas en cuenta.

Tabla 7-3. Análisis de sensibilidad Teja Fotovoltaico

Comportamiento de la TIR con análisis de sensibilidad en la tarifa - Teja Fotovoltaica											
	Ciudad	Promedio Anual de Radiación Solar	INCREMENTO EN LA TARIFA				Tarifa actual	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%		-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	-0,15%	-1,59%							
2	Arauca	4,6198	5,22%	4,56%	3,85%	3,07%	2,18%	1,13%	-0,22%	-10,36%	
3	Barranquilla	5,9512	4,34%	3,65%	2,89%	2,03%	1,02%	-0,29%	-10,45%		
4	Cartagena	5,5525	3,20%	2,44%	1,58%	0,53%	-0,86%	-8,41%			
5	Tunja	4,6574	3,30%	2,55%	1,70%	0,68%	-0,66%	-9,24%			
6	Manizales	3,7672	-10,60%								
7	Florencia	3,6175	-0,75%	-10,01%							
8	Yopal	4,8351	4,73%	4,06%	3,32%	2,50%	1,55%	0,38%	-1,26%		
9	Valledupar	5,2804	2,30%	1,46%	0,44%	-0,91%	-8,57%				
10	Montería	4,2471									
11	Bogotá	4,0377	-13,14%	-7,44%							
12	Neiva	4,6515	4,00%	3,29%	2,51%	1,60%	0,51%	-0,98%	-7,35%		
13	Riohacha	5,6058	3,37%	2,62%	1,77%	0,76%	-0,55%	-9,72%			
14	Santa Marta	5,4054	2,73%	1,93%	1,00%	-0,18%					
15	Villavicencio	4,7507	3,75%	3,03%	2,23%	1,29%	0,12%	-1,55%			
16	Pasto	3,7428	0,11%	-1,21%	-7,90%						
17	Cúcuta	4,4438	1,50%	0,54%	-0,70%	-9,70%					
18	Armenia	3,9338	-9,82%								
19	Pereira	4,2109	1,40%	0,42%	-0,86%	-9,07%					
20	Sincelejo	4,368	-7,33%								
21	Ibagué	4,6632	3,72%	2,99%	2,18%	1,24%	0,06%	-1,64%			
22	Cali	4,3326	0,70%	-0,43%	-11,06%						

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-4, relaciona la cantidad de proyectos factibles cuando la tarifa de energía aumenta en saltos de 5% hasta llegar a 20%.

Tabla 7-4. Número de proyectos factibles en función del aumento en la tarifa

Aumento en la tarifa	Proyectos Factibles
0%	1
5%	3
10%	6
15%	11
20%	15

Fuente: Elaboración propia

### Baldosa piezoeléctrica

Para el caso de la baldosa piezoeléctrica, el modelo no encontró TIR que pudieran compararse según los parámetros establecidos. Esto se debe a la relación costo beneficio, pues la tecnología aún es costosa para la energía que está en capacidad de generar. En la próxima sección se presentan escenarios en donde los costos de inversión inicial bajan al 50% y al 25%

### Tabla Resumen de ciudades factibles

A continuación la Tabla 7-5 contiene el resumen de las ciudades que presentan proyectos factibles en función de la tarifa y el elemento constructo.

Por ejemplo, en la ciudad de Arauca resulta factible utilizar el elemento constructivo Teja fotovoltaica cuando los costos de la tarifa son los actuales, asimismo, al incrementar los costos de la tarifa en un 5% empiezan a presentar factibilidades las ciudades de Barranquilla y Yopal.

Tabla 7-5. Tabla resumen de ciudades factibles

Elemento constructivo	INCREMENTO EN LA TARIFA				Tarifa actual
	20%	15%	10%	5%	
Vidrio Fotovoltaico	Arauca	Arauca			
	Barranquilla	Yopal			
	Yopal				
	Neiva				
Teja Fotovoltaica	Arauca	Arauca	Arauca	Arauca	Arauca
	Barranquilla	Barranquilla	Barranquilla	Barranquilla	
	Yopal	Yopal	Yopal	Yopal	
	Neiva	Neiva	Neiva		
	Villavicencio	Villavicencio	Villavicencio		
	Ibagué	Ibagué	Ibagué		
	Cartajena	Cartajena			
	Tunja	Tunja			
	Riohacha	Riohacha			
	Valledupar				
Santa Marta					
Baldosa Piezoeléctrica					

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 Análisis de escenarios

En esta sección se presentan los comportamientos de la TIR de cada una tecnologías evaluadas cuando los costos de inversión inicial bajan un 25% y un 50%.

#### 7.3.1 Escenario donde los costos de inversión inicial bajan un 50%

##### Vidrio fotovoltaico

Según los resultados de la Tabla 7-6, al disminuir los costos de inversión inicial un 50%, los proyectos son factibles en todas las ciudades y con todas las variaciones de la tarifa de energía tenidas en cuenta, incluso cuando las tarifas de energía disminuyen en un 20%. Es evidente que el costo de inversión inicial de la tecnología tiene un impacto significativo en la factibilidad de los proyectos.

Tabla 7-6. TIR de vidrio fotovoltaico con costos de inversión inicial al 50%

COMPORTAMIENTO DE LA TIR CON LOS COSTOS AL 50%											
	Ciudad	Promedio Anual Radiación Solar	INCREMENTO EN LA TARIFA				Tarifa actual	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%		-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	6,36%	5,99%	5,61%	5,22%	4,82%	4,40%	3,97%	3,51%	3,04%
2	Arauca	4,6198	9,06%	8,63%	8,19%	7,74%	7,29%	6,82%	6,34%	5,84%	5,33%
3	Barranquilla	5,9512	8,49%	8,08%	7,65%	7,22%	6,77%	6,32%	5,85%	5,36%	4,86%
4	Cartagena	5,5525	7,82%	7,42%	7,01%	6,59%	6,16%	5,72%	5,26%	4,79%	4,30%
5	Tunja	4,6574	7,87%	7,47%	7,06%	6,64%	6,21%	5,77%	5,31%	4,84%	4,34%
6	Manizales	3,7672	5,86%	5,50%	5,12%	4,74%	4,35%	3,94%	3,51%	3,06%	2,59%
7	Florencia	3,6175	6,19%	5,82%	5,44%	5,05%	4,65%	4,24%	3,81%	3,36%	2,88%
8	Yopal	4,8351	8,74%	8,32%	7,88%	7,44%	7,00%	6,53%	6,06%	5,57%	5,06%
9	Valledupar	5,2804	7,35%	6,95%	6,56%	6,15%	5,73%	5,29%	4,85%	4,38%	3,90%
10	Montería	4,2471	5,43%	5,07%	4,71%	4,33%	3,94%	3,53%	3,11%	2,67%	2,20%
11	Bogotá	4,0377	6,03%	5,67%	5,29%	4,91%	4,51%	4,10%	3,67%	3,22%	2,75%
12	Neiva	4,6515	8,28%	7,87%	7,45%	7,02%	6,58%	6,13%	5,66%	5,18%	4,68%
13	Riohacha	5,6058	7,91%	7,51%	7,09%	6,67%	6,24%	5,80%	5,34%	4,87%	4,37%
14	Santa Marta	5,4054	7,56%	7,17%	6,76%	6,35%	5,93%	5,49%	5,04%	4,57%	4,08%
15	Villavicencio	4,7507	8,13%	7,72%	7,31%	6,88%	6,45%	6,00%	5,54%	5,06%	4,56%
16	Pasto	3,7428	6,44%	6,07%	5,69%	5,30%	4,89%	4,47%	4,04%	3,59%	3,11%
17	Cúcuta	4,4438	6,97%	6,59%	6,20%	5,80%	5,38%	4,96%	4,52%	4,06%	3,58%
18	Armenia	3,9338	5,80%	5,44%	5,07%	4,69%	4,30%	3,89%	3,46%	3,01%	2,54%
19	Pereira	4,2109	6,93%	6,55%	6,16%	5,76%	5,34%	4,92%	4,48%	4,02%	3,54%
20	Sincelejo	4,368	5,66%	5,30%	4,94%	4,56%	4,16%	3,75%	3,33%	2,88%	2,41%
21	Ibagué	4,6632	8,11%	7,70%	7,29%	6,86%	6,43%	5,98%	5,52%	5,04%	4,54%
22	Cali	4,3326	6,65%	6,28%	5,89%	5,49%	5,09%	4,66%	4,23%	3,77%	3,30%

Fuente: Elaboración propia

### Teja fotovoltaica

Como lo muestra la Tabla 7-7, al reducir en un 50% los costos de inversión inicial del elemento constructivo “Teja fotovoltaica” se evidencia un aumento significativo en la factibilidad de los proyectos, calculando TIR positivas para todas las ciudades y todas las variaciones en la tarifa.

Tabla 7-7. TIR de teja fotovoltaica con costos de inversión inicial al 50%

COMPORTAMIENTO DE LA TIR CON LOS COSTOS AL 50%											
	Ciudad	Promedio Anual Radiación Solar	INCREMENTO EN LA TARIFA				Tarifa actual	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%		-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	12,13%	11,44%	10,74%	10,02%	9,28%	8,51%	7,71%	6,87%	5,97%
2	Arauca	4,6198	17,28%	16,44%	15,59%	14,73%	13,87%	12,98%	12,09%	11,17%	10,22%
3	Barranquilla	5,9512	16,17%	15,37%	14,55%	13,73%	12,90%	12,05%	11,18%	10,29%	9,36%
4	Cartagena	5,5525	14,87%	14,11%	13,34%	12,55%	11,75%	10,94%	10,10%	9,23%	8,33%
5	Tunja	4,6574	14,98%	14,22%	13,44%	12,65%	11,85%	11,03%	10,19%	9,32%	8,41%
6	Manizales	3,7672	11,20%	10,53%	9,85%	9,14%	8,41%	7,66%	6,86%	6,01%	5,10%
7	Florencia	3,6175	11,80%	11,12%	10,43%	9,71%	8,98%	8,22%	7,42%	6,57%	5,67%
8	Yopal	4,8351	16,65%	15,83%	15,00%	14,16%	13,32%	12,45%	11,57%	10,67%	9,73%
9	Valledupar	5,2804	13,98%	13,24%	12,49%	11,73%	10,95%	10,16%	9,33%	8,48%	7,58%
10	Montería	4,2471	10,40%	9,75%	9,08%	8,38%	7,66%	6,91%	6,11%	5,25%	4,30%
11	Bogotá	4,0377	11,52%	10,85%	10,16%	9,45%	8,72%	7,96%	7,16%	6,31%	5,41%
12	Neiva	4,6515	15,76%	14,97%	14,17%	13,36%	12,54%	11,70%	10,84%	9,96%	9,04%
13	Riohacha	5,6058	15,05%	14,28%	13,50%	12,71%	11,91%	11,09%	10,24%	9,37%	8,47%
14	Santa Marta	5,4054	14,39%	13,64%	12,88%	12,11%	11,32%	10,52%	9,69%	8,83%	7,93%
15	Villavicencio	4,7507	15,48%	14,70%	13,91%	13,10%	12,29%	11,46%	10,60%	9,73%	8,81%
16	Pasto	3,7428	12,29%	11,59%	10,89%	10,16%	9,42%	8,65%	7,85%	7,01%	6,11%
17	Cúcuta	4,4438	13,28%	12,56%	11,83%	11,09%	10,32%	9,54%	8,73%	7,88%	6,99%
18	Armenia	3,9338	11,10%	10,43%	9,75%	9,05%	8,32%	7,56%	6,77%	5,92%	5,00%
19	Pereira	4,2109	13,19%	12,48%	11,75%	11,01%	10,25%	9,47%	8,66%	7,81%	6,92%
20	Sincelejo	4,368	10,84%	10,18%	9,50%	8,80%	8,08%	7,32%	6,52%	5,67%	4,75%
21	Ibagué	4,6632	15,44%	14,66%	13,87%	13,07%	12,25%	11,42%	10,57%	9,69%	8,78%
22	Cali	4,3326	12,67%	11,97%	11,26%	10,53%	9,78%	9,00%	8,20%	7,35%	6,46%

Fuente: Elaboración propia haciendo uso de datos del IDEAM, 2018

### Baldosa piezoeléctrica

En este escenario el modelo no encontró TIR que pudieran compararse según los parámetros establecidos. Como se había mencionado anteriormente se debe a la relación costo beneficio, pues la tecnología resulta costosa incluso cuando los costos bajan al 50% para la energía que está en capacidad de generar.

### 7.3.2 Escenario donde los costos de inversión inicial bajan al 25%

#### Vidrio fotovoltaico

En este escenario la Tabla 7-8 muestra una clara tendencia a aumentar la factibilidad de los proyectos conforme bajan los costos de inversión inicial.

Tabla 7-8. TIR de vidrio fotovoltaico con costos de inversión inicial al 25%

COMPORTAMIENTO DE LA TIR											
	Ciudad	Promedio Anual Radiación	INCREMENTO EN LA TARIFA					DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	2,79%	2,46%	2,12%	1,76%	1,38%	0,98%	0,56%	0,10%	-0,39%
2	Arauca	4,6198	5,06%	4,71%	4,35%	3,98%	3,59%	3,19%	2,77%	2,33%	1,86%
3	Barranquilla	5,9512	4,60%	4,26%	3,90%	3,53%	3,15%	2,75%	2,33%	1,89%	1,42%
4	Cartagena	5,5525	4,04%	3,70%	3,35%	2,99%	2,61%	2,22%	1,80%	1,36%	0,88%
5	Tunja	4,6574	4,09%	3,75%	3,40%	3,04%	2,66%	2,26%	1,84%	1,40%	0,93%
6	Manizales	3,7672	2,34%	2,02%	1,67%	1,31%	0,93%	0,53%	0,10%	-0,37%	-0,88%
7	Florencia	3,6175	2,64%	2,31%	1,96%	1,61%	1,23%	0,83%	0,40%	-0,06%	-0,56%
8	Yopal	4,8351	4,80%	4,45%	4,10%	3,73%	3,34%	2,94%	2,53%	2,08%	1,62%
9	Valledupar	5,2804	3,64%	3,31%	2,96%	2,60%	2,22%	1,83%	1,41%	0,97%	0,49%
10	Montería	4,2471	1,95%	1,62%	1,28%	0,92%	0,53%	0,12%	-0,32%	-0,80%	-1,32%
11	Bogotá	4,0377	2,50%	2,17%	1,83%	1,47%	1,09%	0,69%	0,26%	-0,20%	-0,71%
12	Neiva	4,6515	4,43%	4,08%	3,73%	3,36%	2,98%	2,59%	2,17%	1,73%	1,26%
13	Riohacha	5,6058	4,12%	3,78%	3,43%	3,07%	2,69%	2,29%	1,87%	1,43%	0,96%
14	Santa Marta	5,4054	3,83%	3,49%	3,14%	2,78%	2,41%	2,01%	1,59%	1,15%	0,67%
15	Villavicencio	4,7507	4,30%	3,96%	3,61%	3,25%	2,87%	2,47%	2,05%	1,61%	1,14%
16	Pasto	3,7428	2,87%	2,54%	2,19%	1,83%	1,46%	1,06%	0,63%	0,18%	-0,32%
17	Cúcuta	4,4438	3,33%	2,99%	2,65%	2,29%	1,91%	1,52%	1,10%	0,65%	0,17%
18	Armenia	3,9338	2,30%	1,97%	1,62%	1,26%	0,88%	0,48%	0,05%	-0,42%	-0,93%
19	Pereira	4,2109	3,29%	2,96%	2,61%	2,25%	1,88%	1,48%	1,06%	0,61%	0,13%
20	Sincelejo	4,368	2,17%	1,84%	1,50%	1,13%	0,75%	0,35%	-0,09%	-0,56%	-1,08%
21	Ibagué	4,6632	4,29%	3,95%	3,59%	3,23%	2,85%	2,45%	2,04%	1,59%	1,12%
22	Cali	4,3326	3,05%	2,72%	2,37%	2,01%	1,64%	1,24%	0,82%	0,36%	-0,12%

Fuente: Elaboración propia

Teja fotovoltaica

Tabla 7-9. TIR de teja fotovoltaica con costos de inversión inicial al 25%

COMPORTAMIENTO DE LA TIR											
	Ciudad	Promedio Anual Radiación	INCREMENTO EN LA TARIFA					DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,3351	5,50%	4,85%	4,15%	3,38%	2,52%	1,52%	0,27%	-1,55%	
2	Arauca	4,6198	9,74%	9,09%	8,43%	7,74%	7,02%	6,26%	5,46%	4,58%	3,60%
3	Barranquilla	5,9512	8,89%	8,25%	7,60%	6,91%	6,19%	5,42%	4,59%	3,67%	2,62%
4	Cartagena	5,5525	7,86%	7,23%	6,57%	5,88%	5,14%	4,35%	3,47%	2,46%	1,25%
5	Tunja	4,6574	7,94%	7,32%	6,66%	5,97%	5,23%	4,44%	3,56%	2,57%	1,38%
6	Manizales	3,7672	4,61%	3,93%	3,19%	2,35%	1,38%	0,17%	-1,58%		
7	Florencia	3,6175	5,19%	4,53%	3,82%	3,04%	2,15%	1,09%	-0,28%	-10,12%	
8	Yopal	4,8351	9,25%	8,62%	7,96%	7,27%	6,55%	5,79%	4,97%	4,07%	3,06%
9	Valledupar	5,2804	7,12%	6,49%	5,83%	5,12%	4,36%	3,53%	2,59%	1,47%	0,04%
10	Montería	4,2471	3,79%	3,07%	2,27%	1,34%	0,18%	-1,45%			
11	Bogotá	4,0377	4,92%	4,26%	3,53%	2,73%	1,80%	0,68%	-0,82%	-7,61%	
12	Neiva	4,6515	8,56%	7,93%	7,28%	6,59%	5,87%	5,09%	4,25%	3,31%	2,22%
13	Riohacha	5,6058	8,00%	7,37%	6,71%	6,02%	5,29%	4,50%	3,63%	2,64%	1,46%
14	Santa Marta	5,4054	7,46%	6,83%	6,17%	5,48%	4,73%	3,92%	3,01%	1,95%	0,64%
15	Villavicencio	4,7507	8,34%	7,71%	7,06%	6,37%	5,64%	4,86%	4,01%	3,05%	1,93%
16	Pasto	3,7428	5,64%	4,99%	4,30%	3,54%	2,69%	1,71%	0,51%	-1,18%	
17	Cúcuta	4,4438	6,52%	5,89%	5,21%	4,50%	3,71%	2,83%	1,82%	0,56%	-1,24%
18	Armenia	3,9338	4,51%	3,83%	3,08%	2,24%	1,25%	0,01%			
19	Pereira	4,2109	6,45%	5,81%	5,14%	4,42%	3,63%	2,75%	1,72%	0,44%	-13,02%
20	Sincelejo	4,368	4,25%	3,55%	2,79%	1,91%	0,88%	-0,47%	-9,67%		
21	Ibagué	4,6632	8,31%	7,68%	7,02%	6,34%	5,61%	4,83%	3,97%	3,01%	1,89%
22	Cali	4,3326	5,99%	5,35%	4,66%	3,92%	3,11%	2,18%	1,06%	-0,40%	-9,11%

Fuente: Elaboración propia

Baldosa piezoeléctrica

En relación con la tecnología “Baldosa Piezoeléctrica”, es importante resaltar que ninguna TIR pudo ser hallada con los costos actuales, tampoco con los costos al 50%, pues su capacidad de generar energía eléctrica es muy limitada y es fácilmente superada por los costos de mantenimiento en los flujos de caja. Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 7-10 sólo con los costos de inversión inicial cuando bajan un 75% el modelo calcula algunas TIR, pero todas son negativas. Por tanto, ningún proyecto debería considerar ésta tecnología como elemento constructivo entre tanto no mejore su capacidad de generación y disminuya su costo.

Tabla 7-10. TIR de la baldosa piezoeléctrica con costos de inversión inicial al bajar un 75%

COMPORTAMIENTO DE LA TIR											
	Ciudad	Promedio Anual Radiación	INCREMENTO EN LA TARIFA					DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,6198	-3,14%	-3,66%	-4,25%	-4,97%	-5,89%	-7,25%			
2	Arauca	5,9512	-0,35%	-0,71%	-1,11%	-1,53%	-2,00%	-2,52%	-3,12%	-3,81%	-4,67%
3	Barranquilla	5,5525	0,14%	-0,22%	-0,60%	-1,01%	-1,45%	-1,94%	-2,48%	-3,11%	-3,85%
4	Cartagena	4,6574	-0,45%	-0,82%	-1,21%	-1,64%	-2,12%	-2,65%	-3,25%	-3,97%	-4,86%
5	Tunja	3,7672	-2,05%	-2,48%	-2,97%	-3,51%	-4,15%	-4,93%	-5,95%	-7,56%	
6	Manizales	3,6175	-4,58%	-5,29%	-6,21%	-7,59%					
7	Florencia	4,8351	-5,26%	-6,12%	-7,37%	-10,83%					
8	Yopal	5,2804	-1,69%	-2,10%	-2,56%	-3,07%	-3,65%	-4,35%	-5,21%	-6,41%	-8,69%
9	Valledupar	4,2471	-0,88%	-1,27%	-1,68%	-2,13%	-2,64%	-3,21%	-3,88%	-4,70%	-5,78%
10	Montería	4,0377	-3,03%	-3,53%	-4,11%	-4,80%	-5,67%	-6,92%	-9,68%		
11	Bogotá	4,0216	-3,63%	-4,19%	-4,86%	-5,71%	-6,82%	-9,32%			
12	Neiva	5,6058	-2,06%	-2,50%	-2,98%	-3,53%	-4,17%	-4,95%	-5,98%	-7,61%	
13	Riohacha	5,4054	-0,37%	-0,73%	-1,13%	-1,55%	-2,02%	-2,54%	-3,14%	-3,84%	-4,71%
14	Santa Marta	4,7507	-0,68%	-1,05%	-1,46%	-1,90%	-2,39%	-2,94%	-3,58%	-4,34%	-5,33%
15	Villavicencio	3,7428	-1,86%	-2,28%	-2,75%	-3,27%	-3,88%	-4,61%	-5,54%	-6,89%	-10,65%
16	Pasto	4,4438	-4,68%	-5,41%	-6,37%	-7,86%					
17	Cúcuta	3,9338	-2,53%	-2,99%	-3,52%	-4,12%	-4,85%	-5,80%	-7,20%		
18	Armenia	4,2109	-3,97%	-4,57%	-5,31%	-6,29%	-7,82%				
19	Pereira	4,8183	-3,12%	-3,63%	-4,23%	-4,94%	-5,85%	-7,19%			
20	Sincelejo	4,6632	-2,71%	-3,19%	-3,73%	-4,37%	-5,15%	-6,18%	-7,85%		
21	Ibagué	4,3326	-2,04%	-2,47%	-2,95%	-3,50%	-4,13%	-4,91%	-5,92%	-7,51%	
22	Cali	4,3326	-2,80%	-3,29%	-3,84%	-4,49%	-5,29%	-6,37%	-8,23%		

Fuente: Elaboración propia

### Tabla resumen

En las tablas presentadas a continuación se resumen los impactos en la factibilidad de los proyectos con los costos actuales y al disminuir los costos de inversión inicial al 25% y al 50% en todas las ciudades en función de la tecnología evaluada.

Tabla 7-11. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Medellín según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Medellín		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,43%	0,09%	-0,27%	-0,65%	-1,07%	-1,53%	-2,03%	-2,59%	-3,25%
	AI 50%	6,36%	5,99%	5,61%	5,22%	4,82%	4,40%	3,97%	3,51%	3,04%
	AI 25%	2,79%	2,46%	2,12%	1,76%	1,38%	0,98%	0,56%	0,10%	-0,39%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-0,15%	-1,59%							
	AI 50%	12,13%	11,44%	10,74%	10,02%	9,28%	8,51%	7,71%	6,87%	5,97%
	AI 25%	5,50%	4,85%	4,15%	3,38%	2,52%	1,52%	0,27%	-1,55%	
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-12. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Arauca según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

ARAUCA		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	2,65%	2,32%	1,98%	1,62%	1,24%	0,84%	0,41%	-0,05%	-0,54%
	AI 50%	9,06%	8,63%	8,19%	7,74%	7,29%	6,82%	6,34%	5,84%	5,33%
	AI 25%	5,06%	4,71%	4,35%	3,98%	3,59%	3,19%	2,77%	2,33%	1,86%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	5,22%	4,56%	3,85%	3,07%	2,18%	1,13%	-0,22%	-10,36%	
	AI 50%	17,28%	16,44%	15,59%	14,73%	13,87%	12,98%	12,09%	11,17%	10,22%
	AI 25%	9,74%	9,09%	8,43%	7,74%	7,02%	6,26%	5,46%	4,58%	3,60%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-13. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Barranquilla según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Barranquilla		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	2,21%	1,89%	1,54%	1,18%	0,80%	0,39%	-0,04%	-0,51%	-1,02%
	AI 50%	8,49%	8,08%	7,65%	7,22%	6,77%	6,32%	5,85%	5,36%	4,86%
	AI 25%	4,60%	4,26%	3,90%	3,53%	3,15%	2,75%	2,33%	1,89%	1,42%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	4,34%	3,65%	2,89%	2,03%	1,02%	-0,29%	-10,45%		
	AI 50%	16,17%	15,37%	14,55%	13,73%	12,90%	12,05%	11,18%	10,29%	9,36%
	AI 25%	8,89%	8,25%	7,60%	6,91%	6,19%	5,42%	4,59%	3,67%	2,62%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-14. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cartagena según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Cartagena		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,68%	1,35%	1,00%	0,64%	0,25%	-0,16%	-0,61%	-1,10%	-1,64%
	AI 50%	7,82%	7,42%	7,01%	6,59%	6,16%	5,72%	5,26%	4,79%	4,30%
	AI 25%	4,04%	3,70%	3,35%	2,99%	2,61%	2,22%	1,80%	1,36%	0,88%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	3,20%	2,44%	1,58%	0,53%	-0,86%	-8,41%			
	AI 50%	14,87%	14,11%	13,34%	12,55%	11,75%	10,94%	10,10%	9,23%	8,33%
	AI 25%	7,86%	7,23%	6,57%	5,88%	5,14%	4,35%	3,47%	2,46%	1,25%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-15. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Tunja según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Tunja		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,72%	1,40%	1,05%	0,68%	0,30%	-0,12%	-0,56%	-1,05%	-1,59%
	AI 50%	7,87%	7,47%	7,06%	6,64%	6,21%	5,77%	5,31%	4,84%	4,34%
	AI 25%	4,09%	3,75%	3,40%	3,04%	2,66%	2,26%	1,84%	1,40%	0,93%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	3,30%	2,55%	1,70%	0,68%	-0,66%	-9,24%			
	AI 50%	14,98%	14,22%	13,44%	12,65%	11,85%	11,03%	10,19%	9,32%	8,41%
	AI 25%	7,94%	7,32%	6,66%	5,97%	5,23%	4,44%	3,56%	2,57%	1,38%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-16. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Manizales según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Manizales		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	-0,03%	-0,38%	-0,75%	-1,15%	-1,59%	-2,07%	-2,60%	-3,22%	-3,94%
	AI 50%	5,86%	5,50%	5,12%	4,74%	4,35%	3,94%	3,51%	3,06%	2,59%
	AI 25%	2,34%	2,02%	1,67%	1,31%	0,93%	0,53%	0,10%	-0,37%	-0,88%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-10,60%								
	AI 50%	11,20%	10,53%	9,85%	9,14%	8,41%	7,66%	6,86%	6,01%	5,10%
	AI 25%	4,61%	3,93%	3,19%	2,35%	1,38%	0,17%	-1,58%		
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-17. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Florencia según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Florencia		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,28%	-0,07%	-0,43%	-0,82%	-1,25%	-1,71%	-2,22%	-2,80%	-3,48%
	AI 50%	6,19%	5,82%	5,44%	5,05%	4,65%	4,24%	3,81%	3,36%	2,88%
	AI 25%	2,64%	2,31%	1,96%	1,61%	1,23%	0,83%	0,40%	-0,06%	-0,56%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-0,75%	-10,01%							
	AI 50%	11,80%	11,12%	10,43%	9,71%	8,98%	8,22%	7,42%	6,57%	5,67%
	AI 25%	5,19%	4,53%	3,82%	3,04%	2,15%	1,09%	-0,28%	-10,12%	
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-18. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Yopal según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Yopal		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	2,40%	2,08%	1,73%	1,37%	0,99%	0,59%	0,16%	-0,31%	-0,81%
	AI 50%	8,74%	8,32%	7,88%	7,44%	7,00%	6,53%	6,06%	5,57%	5,06%
	AI 25%	4,80%	4,45%	4,10%	3,73%	3,34%	2,94%	2,53%	2,08%	1,62%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	4,73%	4,06%	3,32%	2,50%	1,55%	0,38%	-1,26%		
	AI 50%	16,65%	15,83%	15,00%	14,16%	13,32%	12,45%	11,57%	10,67%	9,73%
	AI 25%	9,25%	8,62%	7,96%	7,27%	6,55%	5,79%	4,97%	4,07%	3,06%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-19. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Valledupar según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Valledupar		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,29%	0,96%	0,61%	0,24%	-0,16%	-0,58%	-1,04%	-1,55%	-2,11%
	AI 50%	7,35%	6,95%	6,56%	6,15%	5,73%	5,29%	4,85%	4,38%	3,90%
	AI 25%	3,64%	3,31%	2,96%	2,60%	2,22%	1,83%	1,41%	0,97%	0,49%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	2,30%	1,46%	0,44%	-0,91%	-8,57%				
	AI 50%	13,98%	13,24%	12,49%	11,73%	10,95%	10,16%	9,33%	8,48%	7,58%
	AI 25%	7,12%	6,49%	5,83%	5,12%	4,36%	3,53%	2,59%	1,47%	0,04%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-20. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Montería según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Montería		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	-0,45%	-0,81%	-1,19%	-1,61%	-2,06%	-2,57%	-3,15%	-3,82%	-4,64%
	AI 50%	5,43%	5,07%	4,71%	4,33%	3,94%	3,53%	3,11%	2,67%	2,20%
	AI 25%	1,95%	1,62%	1,28%	0,92%	0,53%	0,12%	-0,32%	-0,80%	-1,32%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales									
	AI 50%	10,40%	9,75%	9,08%	8,38%	7,66%	6,91%	6,11%	5,25%	4,30%
	AI 25%	3,79%	3,07%	2,27%	1,34%	0,18%	-1,45%			
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-21. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Bogotá según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Bogotá		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,13%	-0,21%	-0,58%	-0,97%	-1,40%	-1,87%	-2,40%	-2,99%	-3,69%
	AI 50%	6,03%	5,67%	5,29%	4,91%	4,51%	4,10%	3,67%	3,22%	2,75%
	AI 25%	2,50%	2,17%	1,83%	1,47%	1,09%	0,69%	0,26%	-0,20%	-0,71%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-13,14%	-7,44%							
	AI 50%	11,52%	10,85%	10,16%	9,45%	8,72%	7,96%	7,16%	6,31%	5,41%
	AI 25%	4,92%	4,26%	3,53%	2,73%	1,80%	0,68%	-0,82%	-7,61%	
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-22. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Neiva según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Neiva		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%		0%	-5%	-10%	-15%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	2,05%	1,72%	1,38%	1,01%	0,63%	0,22%	-0,22%	-0,69%	-1,21%
	AI 50%	8,28%	7,87%	7,45%	7,02%	6,58%	6,13%	5,66%	5,18%	4,68%
	AI 25%	4,43%	4,08%	3,73%	3,36%	2,98%	2,59%	2,17%	1,73%	1,26%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	4,00%	3,29%	2,51%	1,60%	0,51%	-0,98%	-7,35%		
	AI 50%	15,76%	14,97%	14,17%	13,36%	12,54%	11,70%	10,84%	9,96%	9,04%
	AI 25%	8,56%	7,93%	7,28%	6,59%	5,87%	5,09%	4,25%	3,31%	2,22%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-23. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Riohacha según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Riohacha		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%		0%	-5%	-10%	-15%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,75%	1,42%	1,08%	0,71%	0,33%	-0,09%	-0,53%	-1,02%	-1,55%
	AI 50%	7,91%	7,51%	7,09%	6,67%	6,24%	5,80%	5,34%	4,87%	4,37%
	AI 25%	4,12%	3,78%	3,43%	3,07%	2,69%	2,29%	1,87%	1,43%	0,96%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	3,37%	2,62%	1,77%	0,76%	-0,55%	-9,72%			
	AI 50%	15,05%	14,28%	13,50%	12,71%	11,91%	11,09%	10,24%	9,37%	8,47%
	AI 25%	8,00%	7,37%	6,71%	6,02%	5,29%	4,50%	3,63%	2,64%	1,46%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-24. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Santa Marta según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Santa Marta		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%		0%	-5%	-10%	-15%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,47%	1,14%	0,79%	0,43%	0,03%	-0,39%	-0,84%	-1,34%	-1,89%
	AI 50%	7,56%	7,17%	6,76%	6,35%	5,93%	5,49%	5,04%	4,57%	4,08%
	AI 25%	3,83%	3,49%	3,14%	2,78%	2,41%	2,01%	1,59%	1,15%	0,67%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	2,73%	1,93%	1,00%	-0,18%					
	AI 50%	14,39%	13,64%	12,88%	12,11%	11,32%	10,52%	9,69%	8,83%	7,93%
	AI 25%	7,46%	6,83%	6,17%	5,48%	4,73%	3,92%	3,01%	1,95%	0,64%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-25. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Villavicencio según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Villavicencio		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%		0%	-5%	-10%	-15%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,93%	1,60%	1,26%	0,90%	0,51%	0,10%	-0,34%	-0,82%	-1,35%
	AI 50%	8,13%	7,72%	7,31%	6,88%	6,45%	6,00%	5,54%	5,06%	4,56%
	AI 25%	4,30%	3,96%	3,61%	3,25%	2,87%	2,47%	2,05%	1,61%	1,14%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	3,75%	3,03%	2,23%	1,29%	0,12%	-1,55%			
	AI 50%	15,48%	14,70%	13,91%	13,10%	12,29%	11,46%	10,60%	9,73%	8,81%
	AI 25%	8,34%	7,71%	7,06%	6,37%	5,64%	4,86%	4,01%	3,05%	1,93%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-26. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Pasto según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Pasto		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,51%	0,17%	-0,19%	-0,58%	-0,99%	-1,44%	-1,94%	-2,50%	-3,14%
	AI 50%	6,44%	6,07%	5,69%	5,30%	4,89%	4,47%	4,04%	3,59%	3,11%
	AI 25%	2,87%	2,54%	2,19%	1,83%	1,46%	1,06%	0,63%	0,18%	-0,32%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	0,11%	-1,21%	-7,90%						
	AI 50%	12,29%	11,59%	10,89%	10,16%	9,42%	8,65%	7,85%	7,01%	6,11%
	AI 25%	5,64%	4,99%	4,30%	3,54%	2,69%	1,71%	0,51%	-1,18%	
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-27. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cúcuta según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Cúcuta		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,97%	0,64%	0,29%	-0,09%	-0,49%	-0,92%	-1,40%	-1,92%	-2,51%
	AI 50%	6,97%	6,59%	6,20%	5,80%	5,38%	4,96%	4,52%	4,06%	3,58%
	AI 25%	3,33%	2,99%	2,65%	2,29%	1,91%	1,52%	1,10%	0,65%	0,17%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	1,50%	0,54%	-0,70%	-9,70%					
	AI 50%	13,28%	12,56%	11,83%	11,09%	10,32%	9,54%	8,73%	7,88%	6,99%
	AI 25%	6,52%	5,89%	5,21%	4,50%	3,71%	2,83%	1,82%	0,56%	-1,24%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-28. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Armenia según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Armenia		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	-0,08%	-0,43%	-0,80%	-1,21%	-1,64%	-2,13%	-2,67%	-3,29%	-4,02%
	AI 50%	5,80%	5,44%	5,07%	4,69%	4,30%	3,89%	3,46%	3,01%	2,54%
	AI 25%	2,30%	1,97%	1,62%	1,26%	0,88%	0,48%	0,05%	-0,42%	-0,93%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-9,82%								
	AI 50%	11,10%	10,43%	9,75%	9,05%	8,32%	7,56%	6,77%	5,92%	5,00%
	AI 25%	4,51%	3,83%	3,08%	2,24%	1,25%	0,01%			
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-29. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Pereira según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Pereira		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,94%	0,60%	0,25%	-0,13%	-0,53%	-0,96%	-1,44%	-1,97%	-2,56%
	AI 50%	6,93%	6,55%	6,16%	5,76%	5,34%	4,92%	4,48%	4,02%	3,54%
	AI 25%	3,29%	2,96%	2,61%	2,25%	1,88%	1,48%	1,06%	0,61%	0,13%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	1,40%	0,42%	-0,86%	-9,07%					
	AI 50%	13,19%	12,48%	11,75%	11,01%	10,25%	9,47%	8,66%	7,81%	6,92%
	AI 25%	6,45%	5,81%	5,14%	4,42%	3,63%	2,75%	1,72%	0,44%	-13,02%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-30. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Sincelejo según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Sincelejo		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	-0,22%	-0,57%	-0,95%	-1,35%	-1,80%	-2,29%	-2,84%	-3,48%	-4,24%
	AI 50%	5,66%	5,30%	4,94%	4,56%	4,16%	3,75%	3,33%	2,88%	2,41%
	AI 25%	2,17%	1,84%	1,50%	1,13%	0,75%	0,35%	-0,09%	-0,56%	-1,08%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	-7,33%								
	AI 50%	10,84%	10,18%	9,50%	8,80%	8,08%	7,32%	6,52%	5,67%	4,75%
	AI 25%	4,25%	3,55%	2,79%	1,91%	0,88%	-0,47%	-9,67%		
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-31. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Ibagué según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Ibagué		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	1,92%	1,59%	1,24%	0,88%	0,49%	0,08%	-0,36%	-0,84%	-1,37%
	AI 50%	8,11%	7,70%	7,29%	6,86%	6,43%	5,98%	5,52%	5,04%	4,54%
	AI 25%	4,29%	3,95%	3,59%	3,23%	2,85%	2,45%	2,04%	1,59%	1,12%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	3,72%	2,99%	2,18%	1,24%	0,06%	-1,64%			
	AI 50%	15,44%	14,66%	13,87%	13,07%	12,25%	11,42%	10,57%	9,69%	8,78%
	AI 25%	8,31%	7,68%	7,02%	6,34%	5,61%	4,83%	3,97%	3,01%	1,89%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-32. Tabla resumen de la factibilidad de los proyectos en Cali según los costos de inversión inicial y el elemento constructivo

Cali		INCREMENTO EN LA TARIFA				TARIFA ACTUAL	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
		20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
Vidrio Fotovoltaico	Costos actuales	0,69%	0,36%	0,00%	-0,38%	-0,79%	-1,23%	-1,72%	-2,26%	-2,89%
	AI 50%	6,65%	6,28%	5,89%	5,49%	5,09%	4,66%	4,23%	3,77%	3,30%
	AI 25%	3,05%	2,72%	2,37%	2,01%	1,64%	1,24%	0,82%	0,36%	-0,12%
Teja Fotovoltaica	Costos actuales	0,70%	-0,43%	-11,06%						
	AI 50%	12,67%	11,97%	11,26%	10,53%	9,78%	9,00%	8,20%	7,35%	6,46%
	AI 25%	5,99%	5,35%	4,66%	3,92%	3,11%	2,18%	1,06%	-0,40%	-9,11%
Baldosa Piezoeléctrica	Costos actuales									
	AI 50%									
	AI 25%									

Fuente: Elaboración propia

## 8 Conclusiones

El modelo construido ha permitido evaluar la viabilidad financiera del vidrio fotovoltaico, la teja fotovoltaica y la baldosa piezoeléctrica en 22 ciudades principales de Colombia, teniendo en cuenta los costos de inversión inicial en el mercado local, los niveles de irradiación de las ciudades y los precios en las tarifas de energía. A través del modelo podemos concluir que la ciudad de Arauca

presenta las mejores condiciones para implementar elementos generadores de energía integrados a las edificaciones.

El modelo ha calculado que Arauca es la única región del país donde la Teja fotovoltaica funcionaría como elemento constructivo bajo las condiciones actuales en relación con la tarifa de energía y los costos de inversión inicial.

Por otra parte, el modelo financiero da cuenta del impacto que generan los costos de inversión inicial en la factibilidad de los proyectos, pues al disminuir los costos al 50% se hacen factibles todos los proyectos que incluyen en sus construcciones elementos como el vidrio fotovoltaico y la teja fotovoltaica en todas las ciudades evaluadas.

En relación con el elemento “Baldosa piezoeléctrica”, el modelo calcula que aún si los costos de inversión inicial disminuyen al 50% o al 25%, no resultaría factible su utilización en las edificaciones colombianas, pues el comportamiento de la TIR en todas las ciudades refleja que son negativas o incalculables. Ésto debido a la relación costo – beneficio que presenta el elemento, en los flujos de caja resultan siempre mayores los costos de mantenimiento que los beneficios de la generación de energía eléctrica.

Para que el Vidrio fotovoltaico sea factible como elemento constructivo bajo las condiciones actuales de los costos de inversión inicial, la tarifa de energía tendría que aumentar en un 15% y sólo podría construirse en Arauca y Yopal. Seguido de esto, en caso que la tarifa aumente en un 20% se incluirían ciudades como Barranquilla y Neiva.

A pesar de los grandes avances en este campo, se requieren más investigaciones y desarrollos para lograr la esperanza de energía 100% renovable con un costo razonable.

## 8.1 Cumplimiento de los objetivos

En esta sección se justifica el cumplimiento de los objetivos propuestos, iniciando por el Objetivo General y posteriormente se presentan las de los objetivos específicos

### 8.1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad financiera de la utilización de elementos generadores de energía renovable en las edificaciones en Colombia.

Gracias al modelo construido se puede evaluar financieramente los elementos constructivos relacionados en la investigación. Se pudo averiguar a través del modelo que las tejas fotovoltaicas son el elemento constructivo con mayor factibilidad y que los costos de inversión inicial tienen un impacto significativo en la factibilidad de usar el vidrio fotovoltaico y la teja fotovoltaica.

### 8.1.2 Objetivo específico 1

*Identificar y caracterizar los elementos generadores de energía renovable que pueden ser incorporados en edificaciones.*

En la sección 6,1 del documento se identifican y caracterizan los elementos que desde el principio se tenían proyectados, dado que al momento de desarrollar la investigación sólo estos elementos fueron encontrados con estas características.

### **8.1.3 Objetivo específico 2**

*Establecer la estructura de costos asociada a los elementos identificados para el contexto colombiano.*

En la sección 6,2 de la metodología se encuentran las estructuras de costos de los elementos constructivos que fueron proyectados desde el inicio de la tesis.

### **8.1.4 Objetivo específico 3**

*Desarrollar un modelo de evaluación financiera que evalúe el desempeño económico de los elementos identificados.*

En la sección 6,1 se presentan las variables de entrada del modelo, las características de irradiancia de 22 ciudades principales de Colombia y se construye la tabla de tarifas. Lo anterior permite construir un modelo que evalúa la viabilidad financiera de los elementos generadores de energía renovable a través del cálculo de la TIR. También fueron necesarios los supuestos y variables auxiliares presentados en la misma sección.

## **8.2 Aportes y contribuciones**

De esta investigación pueden obtenerse los siguientes aportes y contribuciones:

Los investigadores que usen este texto como referencia encontrarán la región del país con mayor factibilidad al momento de construir edificaciones con vidrio fotovoltaico y teja fotovoltaica. Además encontrarán un modelo que evalúa la sensibilidad de la inversión en función de la tarifa de energía y los costos de inversión inicial. Asimismo, permite identificar las oportunidades de inversión en diferentes ciudades de Colombia en función de las tecnologías propuestas.

En este documento se presenta un mapa de factibilidad de la tecnología vidrio fotovoltaico y teja fotovoltaica, en donde 11 de 22 ciudades evaluadas son factibles según el incremento en la tarifa de energía. Estas ciudades son: Arauca, Barranquilla, Yopal, Neiva, Villavicencio, Ibagué, Cartagena, Tunja, Riohacha, Valledupar y Santa Marta.

Sorprende el hecho de que en las condiciones actuales de mercado en lo relativo a los costos de inversión inicial y tarifas de energía, Arauca sea la única ciudad en la que si se invirtiera en tejas en fotovoltaicas la inversión sería ampliamente factible. Ésta alternativa se ampliaría a otras ciudades como Barranquilla y Yopal si la tarifa de energía se incrementara en un 5% y, si este incremento fuese de un 10% las alternativas de inversión serían: Neiva, Villavicencio e Ibagué.

Por último, este documento presenta la baldosa piezoeléctrica como un elemento constructivo no factible aún si los costos de inversión inicial disminuyen en un 50%.

### 8.3 Trabajos Futuros

Pueden considerarse nuevas variables en el modelo financiero que incorpore otras tecnologías, por ejemplo, los módulos fotovoltaicos aunque no sean integrables por completo a la construcción.

Tener en cuenta el crecimiento del parque automotor eléctrico como nueva demanda de energía en los edificios.

Integrar al modelo las formas en que pueden venderse los excedentes de energía a la Red.

Evaluar el rendimiento y la producción energética de las tecnologías BIPV – T operando en conjunto a las evaluadas en este trabajo de investigación.

Considerar en este mismo modelo un análisis de sensibilidad en las tasas de descuento y la inflación para contar con un panorama más amplio para el análisis de los proyectos.

## 9 Referencias

- Acclerador, P., & Energ, E. (2016). Bogotá anuncia implementación de norma para el cumplimiento de ahorro de agua y energía en edificaciones, (040).
- Acosta Mejía, M. P. (2017). Análisis del ciclo de vida de la producción de agregado grueso natural y combinación natural/reciclado en Barranquilla: caso de estudios, 57. Retrieved from <http://manglar.uninorte.edu.co/jspui/handle/10584/8075>
- ANDI. (2019). Colombia: Balance 2018 y Perspectivas 2019 Tabla de contenido, 66.
- Aristizábal, A. J., & Páez, C. A. (2018). Experimental investigation of the performance of 6 kW BIPV system applied in laboratory building. *Energy & Buildings*, 152(2017), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.030>
- Asaee, S. R., Nikoofard, S., Ugursal, V. I., & Beausoleil-Morrison, I. (2017). Techno-economic assessment of photovoltaic (PV) and building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system retrofits in the Canadian housing stock. *Energy and Buildings*, 152, 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.071>
- Baljiti, S. S. S., Chan, H.-Y., & Sopian, K. (2016). Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems. *Journal of Cleaner Production*, 137, 677–689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.150>
- Beltran, Á. (2009). Vidrio Fotovoltaico.

- Bilir, L., & Yildirim, N. (2017). ScienceDirect Photovoltaic system assessment for a school building. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17856–17868. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.122>
- Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A., Shahrestani, M., Yao, R., Shao, L., ... Atlı, Y. B. (2017). A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(3), 833–858. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009>
- Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. (2011). *Energy and Buildings*, 43(12), 3592–3598. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.032>
- Colombia, C. (2014). Ley 1715 De 2014. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Congreso de Colombia. (2014). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cucchiella, F., D’Adamo, I., & Lenny Koh, S. C. (2015). Environmental and economic analysis of building integrated photovoltaic systems in Italian regions. *Journal of Cleaner Production*, 98, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.043>
- Curtius, H. C. (2018). The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. *Renewable Energy*, 126, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.001>
- Eiffert, P., & Thompson, A. (2000). U . S . Guidelines for the Economic Analysis of Building-Integrated Photovoltaic Power Systems, (February).
- Evola, G., & Margani, G. (2016). Renovation of apartment blocks with BIPV: Energy and economic evaluation in temperate climate. *Energy and Buildings*, 130, 794–810. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.085>
- Falconi, C. (2019). Piezoelectric nanotransducers. *Nano Energy*, 59(March), 730–744. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.027>
- Ghazali, A., Salleh, E. @. I., Haw, L. C., Mat, S., & Sopian, K. (2017). Performance and financial evaluation of various photovoltaic vertical facades on high-rise building in Malaysia. *Energy and Buildings*, 134, 306–318. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.003>
- Gordillo, G., & Aristiza, A. J. (2008). Performance monitoring results of the first grid-connected BIPV system in Colombia, 33, 2475–2484. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.018>
- Graham, J., & Harvey, C. (2001). The theory and practice of corporate finance: evidence from the field. *Journal of Financial Economics*, 60, 187–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-405X\(01\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0304-405X(01)00044-7)
- Huang, D., & Yu, T. (2017). ScienceDirect ScienceDirect Study on Energy Payback Time of Building Integrated Photovoltaic System. *Procedia Engineering*, 205, 1087–1092. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.174>
- IDEAM. (2016). *Y Departamental De Gases Efecto Invernadero - De Gases Efecto*.
- International Energy Agency. (2013). *Transition to Sustainable Buildings*.

<https://doi.org/10.1787/9789264202955-en>

- International Energy Agency. (2017). Market Report Series energy efficiency 2017.
- IPEEC Building Energy Efficiency. (2017). Existing Building Energy Efficiency Renovation.
- Jelle, Bjørn Petter, & Breivik, C. (2012). State-of-the-art building integrated photovoltaics. *Energy Procedia*, 20(1876), 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.009>
- Jelle, Bjørn Petter, & Breivik, C. (2012). The path to the building integrated photovoltaics of tomorrow. *Energy Procedia*, 20(1876), 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.010>
- Kemball-Cook, L. (2009). Baldosa Fotovoltaica.
- Leed, P., Council, G. B., & Colombiano, C. (2018). Actualización desempeño mercado inmobiliario por la certificación LEED®. Cccs.
- Lu, Y., Chang, R., Shabunko, V., Tan, A., & Yee, L. (2019). The implementation of building-integrated photovoltaics in Singapore: drivers versus barriers. *Energy*, 168, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.099>
- Mendieta, M. P. (2010). Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono ECDBC. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 7. Retrieved from [http://mitigationpartnership.net/sites/default/files/u1300/060312\\_ecdbc\\_cambio\\_climatico.pdf](http://mitigationpartnership.net/sites/default/files/u1300/060312_ecdbc_cambio_climatico.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. CREG (2017). Colombia.
- Mondal, M. H. A., & Mezher, T. (2017). Application of energy optimization models to design sustainable energy system: A review. *The Engineering Journal of Application & Scopes*, 2(1), 1–8. Retrieved from <http://ebrary.ifpri.org/cdm/singleitem/collection/p15738coll5/id/5748/rec/1%5Cnhttp://www.ij-tejas.com/paper/vol2Issue1/1.pdf>
- Musk, E. (2019). Tejas Fotovoltaicas.
- Oh, J., Koo, C., Hong, T., Jeong, K., & Lee, M. (2017). An economic impact analysis of residential progressive electricity tariffs in implementing the building-integrated photovoltaic blind using an advanced finite element model. *Applied Energy*, 202, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.158>
- Petter, B., & Breivik, C. (2012). State-of-the-art building integrated photovoltaics, 20(1876), 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.009>
- Pires, J. C. M. (2017). COP21: The algae opportunity? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(September 2016), 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.197>
- Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., & Hallé, S. (2012). A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2820–2832. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.078>
- REN21. (2018). Renewables 2018 Global Status Report. Retrieved from <http://www.ren21.net/gsr>

2018/

- Samir, H., & Ali, N. A. (2017). Applying Building-integrated Photovoltaics (BIPV) in Existing Buildings, Opportunities and Constrains in Egypt. *Procedia Environmental Sciences*, 37, 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.048>
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>
- Sorgato, M. J., Schneider, K., & Rüter, R. (2017). Technical and economic evaluation of building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.091>
- Tripathy, M., Joshi, H., & Panda, S. K. (2017). Energy payback time and life-cycle cost analysis of building integrated photovoltaic thermal system in fl uenced by adverse e ffect of shadow, 208(October), 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.025>
- UPME. (2005). Mapas de Brillo Solar. *Atlas de Radiación Solar de Colombia*, 41–57.
- UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.
- USGBC (U.S. Green Building Council). (n.d.). *Guía de C onceptos B ásicos de Edificios verdes y LEED ( Core Concepts and LEED Guide ) SEGUNDA EDICIÓN ( SECOND EDITION )*.
- Velásquez, A., Marulanda, J., & Betancur, M. (2016). Ladrillo Solar.
- Wang, W., Liu, Y., Wu, X., Xu, Y., Yu, W., Zhao, C., & Zhong, Y. (2016). Environmental assessments and economic performance of BAPV and BIPV systems in Shanghai. *Energy and Buildings*, 130, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.066>
- Yang, R. J., & Zou, P. X. W. (2016). Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. *International Journal of Construction Management*, 16(1), 39–53. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1117709>

## 10 Anexos

### 10.1 Anexo 1

#### 10.1.1 cálculo de la inflación y la tasa real de descuento

La siguiente tabla propone cambios en los datos presentados en los supuestos del modelo de la sección 6, específicamente los datos presentados en la **tabla 6-8. Supuestos del modelo por tecnología.**

Tabla 33 Supuestos del modelo con tasas del banco de la república y la Superfinanciera

Supuestos del modelo	Tecnología		
	Vidrio Fotovoltaico	Teja Fotovoltaica	Baldosa
Pérdida de Eficiencia por año después de 10 años (%)	0,50%	0,50%	0,80%
Tasa anual de mantenimiento (Costo/m2)	0,70%	3%	0,70%
Tasa de descuento	1%	1%	1%
Inflación	3,41%	3,41%	3,41%
Tasa de aumento anual de la energía	2%	2%	2%

Fuente: Elaboración propia

#### Tasa de inflación y tasa real de descuento (CDT)

Las tasas utilizadas en el modelo fueron tomadas del Banco de la Republica, de la Superfinanciera y de los fabricantes. De éstos últimos específicamente lo relacionado con la degradación de la tecnología.

El modelo calcula la tasa interna de retorno (TIR) al utilizar el vidrio fotovoltaico, la teja fotovoltaica y las baldosas elaboradas con materiales piezoeléctricos en edificaciones colombianas.

El horizonte de tiempo estuvo en función de la vida útil de los elementos constructivos (según fabricantes 40 años) .

Tasa de Inflación: 3,41% (tomado de las proyecciones del Banco de la República 2019)

La tasa CDT a 90 días fue tomada de la superfinanciera resultado del promedio de tasas emitidas por 23 bancos (excluyendo tres bancos que se consideró afectaria de manera significativa el promedio) Tasa: 4,45%

## Cálculo de la tasa real de descuento

$$\left( \frac{(1 + CDT)}{(1 + \text{inflación})} - 1 \right) * 100 = \text{Tasa real de descuento (\%)}$$

Fuente: Banco de la república

$$\left( \frac{(1 + 4,45\%)}{(1 + 3,41\%)} - 1 \right) * 100 = 1\%$$

### 10.1.2 Nuevos resultados

Tabla 34 Análisis de sensibilidad del vidrio fotovoltaico con 1% de tasa real de descuento

COMPORTAMIENTO DE LA TIR											
	Ciudad	Promedio Anual	INCREMENTO EN LA TARIFA					DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%	0%	-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,6198	0,79%	0,48%	0,15%	-0,20%	-0,57%	-0,96%	-1,39%	-1,86%	-2,37%
2	Arauca	5,9512	2,87%	2,56%	2,23%	1,89%	1,54%	1,16%	0,77%	0,35%	-0,10%
3	Barranquilla	5,5525	2,46%	2,14%	1,82%	1,48%	1,13%	0,75%	0,35%	-0,07%	-0,53%
4	Cartagena	4,6574	1,95%	1,64%	1,31%	0,98%	0,62%	0,24%	-0,16%	-0,59%	-1,06%
5	Tunja	3,7672	1,99%	1,68%	1,36%	1,02%	0,66%	0,28%	-0,12%	-0,55%	-1,02%
6	Manizales	3,6175	0,36%	0,05%	-0,28%	-0,64%	-1,01%	-1,42%	-1,86%	-2,35%	-2,89%
7	Florencia	4,8351	0,64%	0,33%	0,00%	-0,35%	-0,72%	-1,12%	-1,55%	-2,02%	-2,55%
8	Yopal	5,2804	2,64%	2,32%	2,00%	1,66%	1,30%	0,93%	0,54%	0,11%	-0,34%
9	Valledupar	4,2471	1,58%	1,27%	0,95%	0,61%	0,25%	-0,13%	-0,54%	-0,98%	-1,46%
10	Montería	4,0377	-0,01%	-0,33%	-0,67%	-1,03%	-1,42%	-1,84%	-2,29%	-2,80%	-3,38%
11	Bogotá	4,0216	0,51%	0,20%	-0,13%	-0,48%	-0,86%	-1,26%	-1,69%	-2,17%	-2,71%
12	Neiva	5,6058	2,30%	1,99%	1,66%	1,32%	0,97%	0,59%	0,20%	-0,23%	-0,69%
13	Riohacha	5,4054	2,02%	1,71%	1,38%	1,05%	0,69%	0,31%	-0,09%	-0,52%	-0,99%
14	Santa Marta	4,7507	1,75%	1,44%	1,12%	0,78%	0,42%	0,04%	-0,36%	-0,80%	-1,27%
15	Villavicencio	3,7428	2,19%	1,88%	1,55%	1,21%	0,86%	0,48%	0,08%	-0,34%	-0,81%
16	Pasto	4,4438	0,86%	0,55%	0,22%	-0,13%	-0,50%	-0,89%	-1,31%	-1,78%	-2,29%
17	Cúcuta	3,9338	1,29%	0,98%	0,65%	0,31%	-0,05%	-0,44%	-0,85%	-1,30%	-1,79%
18	Armenia	4,2109	0,32%	0,00%	-0,33%	-0,68%	-1,06%	-1,47%	-1,91%	-2,40%	-2,95%
19	Pereira	4,8183	1,25%	0,94%	0,62%	0,28%	-0,09%	-0,47%	-0,89%	-1,34%	-1,83%
20	Sincelejo	4,6632	0,19%	-0,12%	-0,46%	-0,81%	-1,19%	-1,61%	-2,05%	-2,55%	-3,11%
21	Ibagué	4,3326	2,17%	1,86%	1,54%	1,20%	0,84%	0,47%	0,07%	-0,36%	-0,82%
22	Cali	4,3326	1,03%	0,72%	0,39%	0,05%	-0,32%	-0,71%	-1,13%	-1,59%	-2,09%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35 Análisis de sensibilidad de la teja fotovoltaica con 1% de tasa real de descuento

COMPORTAMIENTO DE LA TIR											
	Ciudad	Promedio Anual	INCREMENTO EN LA TARIFA				0%	DISMINUCIÓN EN LA TARIFA			
			20%	15%	10%	5%		-5%	-10%	-15%	-20%
1	Medellín	4,6198	1,73%	1,00%	0,16%	-0,86%	-2,23%	-4,67%			
2	Arauca	5,9512	5,85%	5,27%	4,67%	4,02%	3,32%	2,55%	1,69%	0,69%	-0,56%
3	Barranquilla	5,5525	5,09%	4,50%	3,88%	3,21%	2,47%	1,65%	0,70%	-0,46%	-2,05%
4	Cartagena	4,6574	4,13%	3,52%	2,87%	2,15%	1,34%	0,41%	-0,74%	-2,34%	-9,70%
5	Tunja	3,7672	4,21%	3,61%	2,95%	2,24%	1,45%	0,52%	-0,60%	-2,14%	-11,05%
6	Manizales	3,6175	0,72%	-0,12%	-1,15%	-2,54%					
7	Florencia	4,8351	1,40%	0,64%	-0,26%	-1,37%	-2,96%				
8	Yopal	5,2804	5,42%	4,84%	4,22%	3,56%	2,85%	2,05%	1,15%	0,07%	-1,34%
9	Valledupar	4,2471	3,41%	2,78%	2,09%	1,32%	0,43%	-0,65%	-2,11%	-4,85%	
10	Montería	4,0377	-0,30%	-1,32%	-2,71%	-10,63%					
11	Bogotá	4,0216	1,09%	0,30%	-0,65%	-1,88%	-3,79%				
12	Neiva	5,6058	4,79%	4,20%	3,57%	2,89%	2,13%	1,28%	0,29%	-0,97%	-2,81%
13	Riohacha	5,4054	4,26%	3,66%	3,01%	2,30%	1,51%	0,59%	-0,52%	-2,03%	-4,92%
14	Santa Marta	4,7507	3,75%	3,13%	2,46%	1,71%	0,87%	-0,14%	-1,42%	-3,41%	
15	Villavicencio	3,7428	4,58%	3,99%	3,35%	2,66%	1,89%	1,02%	-0,02%	-1,36%	-3,46%
16	Pasto	4,4438	1,89%	1,17%	0,35%	-0,64%	-1,93%	-4,03%			
17	Cúcuta	3,9338	2,81%	2,15%	1,42%	0,59%	-0,41%	-1,70%	-3,75%		
18	Armenia	4,2109	0,61%	-0,25%	-1,31%	-2,78%	-9,66%				
19	Pereira	4,8183	2,74%	2,08%	1,34%	0,50%	-0,51%	-1,84%	-4,01%		
20	Sincelejo	4,6632	0,28%	-0,62%	-1,77%	-3,50%					
21	Ibagué	4,3326	4,55%	3,96%	3,32%	2,63%	1,86%	0,98%	-0,06%	-1,41%	-3,57%
22	Cali	4,3326	2,26%	1,57%	0,79%	-0,12%	-1,27%	-2,90%			

Fuente: Elaboración propia

## Análisis

En el caso del vidrio y la teja fotovoltaica al hacer cambios en las tasas anteriormente mencionadas, nuevas ciudades empiezan a presentar factibilidades en el escenario base (con los costos actuales de inversión inicial). Las únicas ciudades que no presentan factibilidad en los proyectos por tecnología son:

**Vidrio fotovoltaico:** Medellín, Manizales, Florencia, Montería, Bogotá, Pasto, Armenia y Sincelejo.

**Teja fotovoltaica:** Manizales, Montería, Armenia y Sincelejo.

En conclusión, el modelo funciona para evaluar la viabilidad de estos elementos constructivos según el costo de éstos en el mercado local, las tarifas de energía y los niveles de irradiación de cada ciudad.