

Modelo de prefactibilidad técnico y económico para el uso de energía fotovoltaica para entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá



Edison Velasco Castañeda

Universidad de La Sabana, Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Ingeniería

Chía, Colombia

2021

PAGINA DE ACEPTACION

Resumen

La implementación de energías renovables en Colombia está en auge, principalmente, en zonas de alta radiación, como la costa Atlántica y sur del país como en el Valle de Cauca. Dicha implementación ha sido enfocada tanto para la industria como para venta de energía al Sistema Integrado Nacional, todo a mayor escala, es decir con valores superiores a 1 MWp. Sin embargo, su implementación a menor escala se ha llevado a cabo en proyectos para viviendas en zonas no interconectadas al sistema. El uso residencial y por entidades Gubernamentales, específicamente en la región Andina, se ha implementado principalmente en soluciones de iluminación y muy poco a menor escala, esto es, soluciones menores de 100 kWp. Este trabajo y el modelo de prefactibilidad en Excel, permite a las entidades Gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá visualizar resultados técnicos, económicos y el cálculo en la disminución de emisiones de CO₂ desde la visión de la prefactibilidad. En consecuencia, permitirá realizar el primer paso en la identificación de las necesidades técnicas, del mejor estimado de costos en una etapa temprana de evaluación del proyecto, y permitirá tener un marco de referencia de: la potencia actual de la edificación, estimado del número de paneles solares, área requerida, potencia estimada de la solución en unidades de kWp y el costo de la inversión (estimación clase V, es decir, desviación hasta un $\pm 50\%$). La inversión está sujeta a un análisis económico con el fin de determinar, a través de las variables financieras, la viabilidad económica de la inversión, tomando como base el marco regulatorio en aspectos de la autogeneración a una escala menor o pequeña, como lo señala la Ley 1715 que permite obtener a los incentivos tanto tributarios y como fiscales. Así mismo, una de las variables es el retorno de la inversión, como referencia de la eficiencia económica por costo de energía referente al consumo de la Red Nacional. Por último, las entidades gubernamentales podrán conocer el beneficio ambiental en cuanto a la disminución de

emisiones de CO₂ por la implementación de la solución fotovoltaica que mejor se ajuste a sus necesidades y como aporte al objetivo número 7, “Energía asequible y no contaminante”, de la Agenda Colombia 2030.

Palabras clave:

Autogeneración energía fotovoltaica; prefactibilidad; Implementación municipios de Chía y Cajicá; Beneficio tributario y fiscal; Emisiones CO₂; Viabilidad técnica y económica.

Resumen gráfico

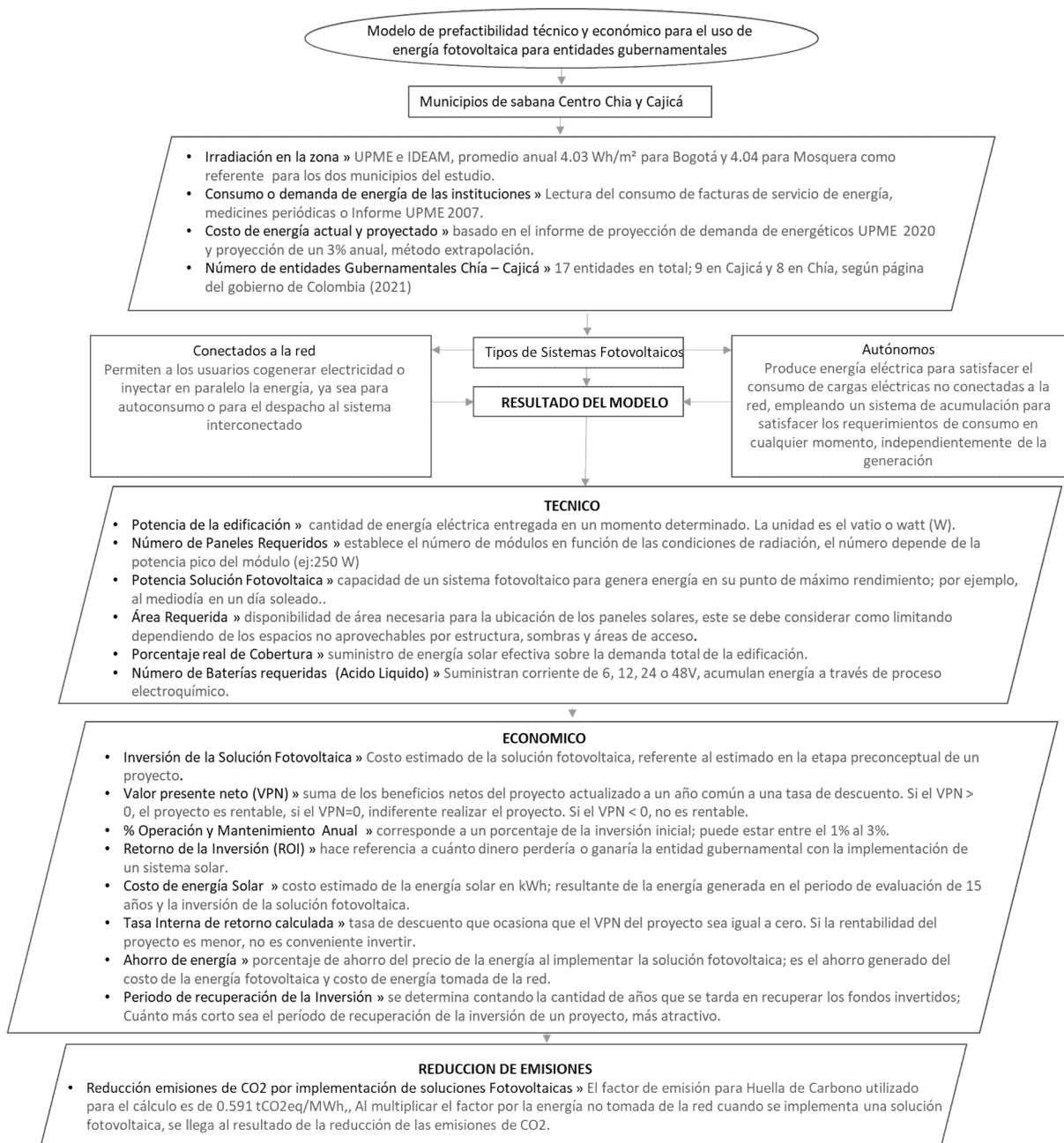


Tabla de Contenido

Introducción 8

Justificación 9

Objetivos 10

 Objetivo general 10

 Objetivos específicos 10

Descripción del problema 10

Marco Teórico 12

 Energía Solar 15

 Energía solar fotovoltaica 17

Módulo fotovoltaico 20

Generador fotovoltaico 21

Inversor DC/AC 22

Acumulador electroquímico 22

 Cálculo de producción de energía 22

Estado del arte 24

Metodología 26

Resultados 40

 Evaluación técnica para la implementación del sistema fotovoltaico 40

 Valor agregado en la implementación del sistema fotovoltaico 47

 Viabilidad financiera en la implementación del sistema fotovoltaico 49

Conclusiones 53

Referencias..... 56

Apéndices..... 65

 Apéndice A..... 65

 Apéndice B..... 67

 Apéndice C..... 69

Anexos 71

 Anexo 1 71

 Anexo 2 72

 Anexo 3 73

Introducción

Las energías limpias o renovables en Colombia han tomado un valor importante en la sostenibilidad de las empresas, viviendas residenciales y áreas que no cuentan con conexión al Sistema Interconectado Nacional (UPME, 2015) Por su parte, el Gobierno Nacional, con el fin de incentivar el uso de energías, ha promulgado la Ley 1715 de 2014 y el decreto 2143 de 2015, que, en líneas generales, fomentan la implementación de las Fuentes No Convencionales de Energía, enfocado a aquellas de carácter renovable, en el esquema energético nacional.

Actualmente, Colombia tiene una matriz energética compuesta por un 69.9% de hidroeléctricas, un 29.3% térmicas y 0.8% entre Solar, Eólica y Biomasa (Ser Colombia, s.f.); por lo tanto el gobierno Colombia buscando un enfoque hacia el uso de energías alternativas del país fijó una Agenda 2030 con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), cuyo objetivo número 7, denominado “Energía asequible y no contaminante”, está enfocado en brindar acceso a la energía eléctrica al 100% de los colombianos (Departamento Nacional de Planeación [DNP], s.f.a).

El estudio de prefactibilidad estará enfocado en los dos municipios pertenecientes a Sabana Centro; Chía y Cajicá, como primer alcance en la búsqueda para incentivar a entidades gubernamentales implementar soluciones de suministro de energía limpias y lograr así avances hacia el cumplimiento de las metas establecidas en la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible (DNP, s.f.b), además en ellos se identifica el mayor desarrollo en vivienda residencial oficinas, gastronomía y comercio. El presente trabajo pretende estructurar un modelo de prefactibilidad para la implementación de energías renovables en las entidades públicas de los dos municipios en mención, del departamento de Cundinamarca, pertenecientes al grupo de municipios de Sabana Centro.

Justificación

El desarrollo de energías renovables está en auge, no solamente por ser limpias e inagotables, sino también porque se están convirtiendo en alternativas competitivas, cuyos costos evolucionan a la baja de forma sostenida. En Colombia a pesar de la coyuntura por el COV-19 el sector de las energías renovables sigue en crecimiento; entre enero y abril de 2021, se han registrado emprendimientos certificados que durante todo el 2020; esto se ha logrado mediante la resolución de la UPME 203 de septiembre de 2020, la cual facilitó las gestiones para que los proyectos de energías renovables se pudieran acoger a los beneficios tributarios contemplados en la Ley 1715 de forma más ágil (Valora Analitik, 2021)

El presente trabajo expone un análisis de prefactibilidad técnico y económico de la viabilidad para implementar la energía fotovoltaica en áreas que tienen baja radiación, como lo son los municipios de Chía y Cajicá, alcance del presente trabajo, teniendo en cuenta que son dos municipios que tienen una gran influencia en la Sabana de Bogotá, pertenecen a Sabana Centro y son considerados una muestra representativa para el desarrollo del trabajo e implementación del modelo de prefactibilidad en Excel.. El análisis no solo está enfocado en el beneficio económico comparado con el costo de suministro de energía eléctrica tomada a través de la red, sino también enfocado al beneficio ambiental, aportando así sea en un porcentaje mínimo, al cambio climático. Por último, el análisis presenta de forma clara y concisa cuál es el beneficio tributario que ofrece el Gobierno Nacional a quienes implementen energías renovables. En este sentido, esta investigación responde al cuestionamiento por: ¿Cuál es la prefactibilidad técnica y económica al implementar un sistema solar en las edificaciones gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá, pertenecientes a Sabana Centro; y así mismo cuál sería su impacto en reducción de emisiones de CO2?

Objetivos

Objetivo general

Realizar un estudio técnico y financiero, bajo el criterio de la prefactibilidad, para la implementación de energía fotovoltaica para entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá, pertenecientes a Sabana Centro; apuntando al uso alternativo para reducir costos operativos, manejo de situaciones ante fallas en el suministro de energía del Sistema Interconectado Nacional e impulsar el aporte de disminución de reducciones de emisiones de CO₂.

Objetivos específicos

- (1) Evaluar la viabilidad técnica de implementación del sistema de generación fotovoltaica, soportado en la información de demanda de energía y niveles de radiación, en las edificaciones de las entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá.
- (2) Determinar la importancia desde el punto de vista de confiabilidad y reducción de emisiones de CO₂ para las entidades gubernamentales por la implementación de energía fotovoltaica.
- (3) Evaluar la viabilidad financiera, incorporando los beneficios de la Ley 1715 de 2014, la cual incentiva el desarrollo e implementación de las Fuentes No Convencionales de Energía, máxime aquellas de Carácter renovable, en el sistema energético nacional; y el Decreto 2143 de 2015 del Ministerio Minas y Energía.

Descripción del problema

Específicamente, los modelos de uso de energía renovable fotovoltaica [FV] están relacionados con el nivel de la irradiación en unidades de potencia de energía por área

(kWh/m²/día). De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] (2005), los niveles de irradiación altos en Colombia, están ubicados en la Guajira, Costa Atlántica y en menores valores en la región Andina, Orinoquia y Pacífico, por ende, los municipios de Chía y Cajicá, sujetos de estudio en el presente trabajo, ubicados en el departamento de Cundinamarca, región Andina, están en un segundo orden de prioridad para implementar la generación de energía fotovoltaica. Con respecto a entidades Gubernamentales, se ha registrado el proyecto de suministro de energía fotovoltaica en 2018 con la empresa de Licores de Cundinamarca, ubicado en el municipio de cota, primera empresa industrial y comercial del estado en apostarle a las energías renovables (Enel, 2018) y en enero de 2021, en dos sedes del Ministerios de Minas y Energía en Bogotá; sin embargo no se tiene un registro de proyectos de energía solar en edificios de entidades gubernamentales de los municipios que comprenden Sabana Centro, y específicamente en Chía y Cajicá.

Por esta razón, el modelo de prefactibilidad para la implementación de energía fotovoltaica en Chía y Cajicá permitirá a las entidades gubernamentales determinar la viabilidad técnica y económica para implementarlo en sus edificaciones y así avanzar en la evaluación del proyecto hasta su puesta en operación. Esta herramienta posibilita a las entidades generar un reporte técnico y económico que permite apalancar y desarrollar un proyecto de energía fotovoltaica y así incluir energías renovables en su operación, aportar para lograr el objetivo de la Agenda Colombia 2030 con la disminución de emisiones de CO₂, ahorro en el costo de energía y ser amigable con el medioambiente.

Marco Teórico

El consumo de energía a nivel mundial ha venido en crecimiento en esta década, con un aumento promedio anual del 2% (Enerdata, 2020). Sin embargo, en 2019 se observó una desaceleración; además, en 2020, producto de la pandemia ha disminuido un 5.9%, a la par del “crecimiento económico” (-4.5%). En el caso de Colombia, con base en la información del operador del Sistema Interconectado Nacional (XM), el consumo de energía disminuyó comparado con el año inmediatamente anterior en 2.6%, lo que representa un consumo de 70.178 gigavatios por hora (GWh) en 2020. En la Figura 1, se muestra la variación del consumo de energía por regiones en donde se evidencia una disminución en la región Centro y la región Caribe.

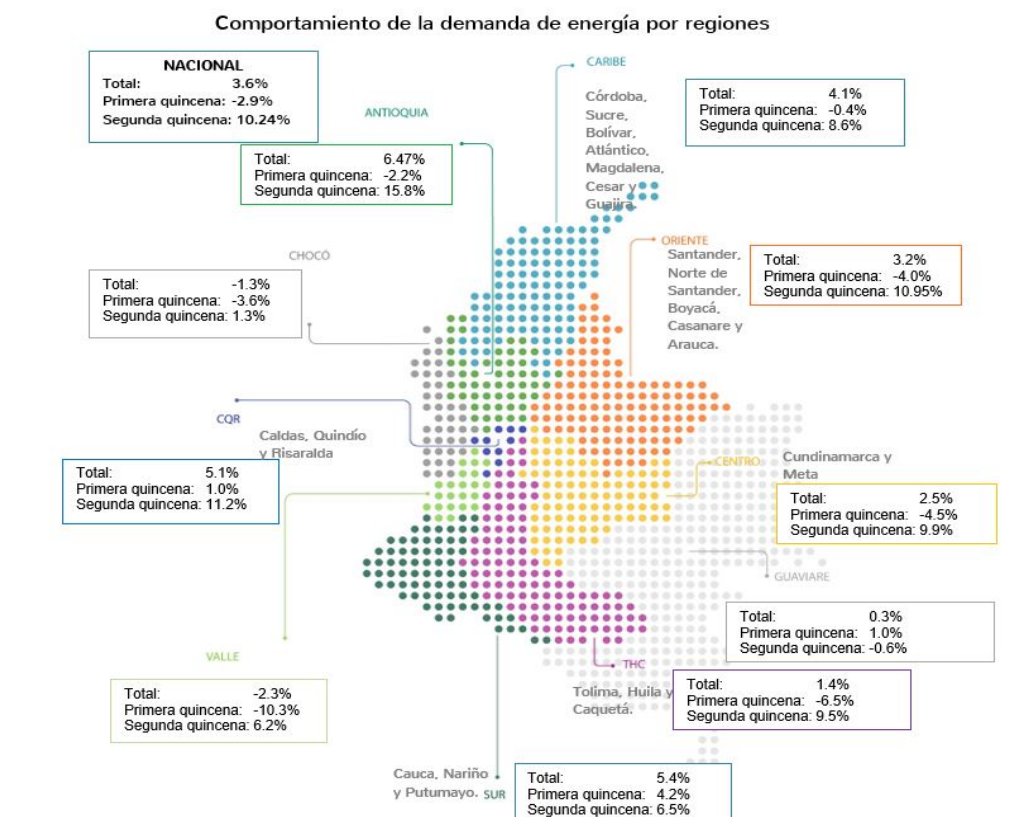


Figura 1. Comportamiento de la demanda de energía por regiones. Fuente: XM (2021)

Las regiones más alejadas del centro del país tuvieron un incremento anual superior al 3%, destacándose la región sur y el departamento del Guaviare. Por otro lado, el consumo residencial, comercial y de pequeña industria aumentó en un 0.4% y en la mediana y gran industria el aumento fue del 5.9% (Sánchez, 2021).

Con respecto al uso de energías alternativas en Colombia, los proyectos fotovoltaicos representan el 69.13% del total de proyectos en desarrollo de fuentes renovables (Sánchez, 2020), seguido por un 23.72% de proyectos hidroeléctricos. En la Figura 2, se muestran los porcentajes para proyectos eólicos, térmicos y de biomasa sobre un total de 385 proyectos, los cuales están en fases de desarrollo. El mayor número de estos proyectos de energías alternativas se concentran en los departamentos del Valle y Santander (Sánchez, 2021).

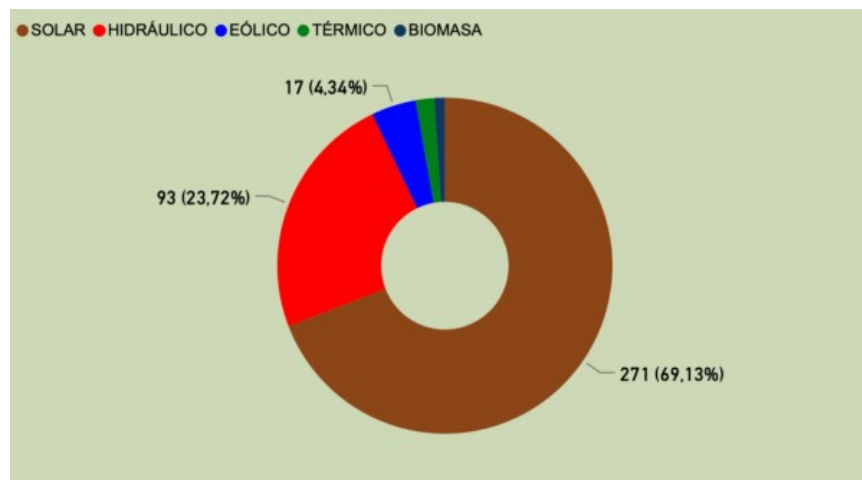


Figura 2. Proyectos en desarrollo de fuentes renovables en Colombia a 31 de Julio 2020.

Fuente: Sánchez (2020).

El gobierno de Colombia estima contar con proyectos de energía solar y eólica por 2.800 megavatios [MW] tanto instalados como en construcción en 2022. La capacidad de generación con energías limpias en 2018 era de 22.4 MW. A partir de los análisis de ciclo de vida de

diversas tecnologías, la UPME (2015), citando al Laboratorio Nacional de Energías Renovables [NREL] (2013), afirma que “los factores de emisiones asociados con los sistemas solar fotovoltaico [FV] se encuentran en el orden de 50 kg CO₂ eq/MWh, frente a valores por encima de 450 kg CO₂ eq/MWh para plantas operadas con combustibles fósiles” (p. 42).

Los proyectos de implementación de iniciativas relacionadas al uso de estas energías han sido posibles bajo el esquema normativo de la Ley 1715 de 2014, la cual regula la opción de entregar excedentes; inclusive permite un esquema de créditos para sistemas de autogeneración de pequeña escala que utilicen Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER).

Específicamente para los municipios de Chía y Cajicá, el déficit de cobertura referente a viviendas que no cuentan con el servicio de energía eléctrica es del 0% (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020). Sin embargo, no se evidencia que se hayan presentado propuestas para la implementación y/o operación de proyectos de generación de energía FV en los municipios o cerca de ellos; únicamente en Cundinamarca se encuentran en desarrollo los proyectos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Información correspondiente a los proyectos de generación de energía FV en Cundinamarca

Municipio	Nombre del proyecto	Capacidad MW	Estado
Soacha	Parque Fotovoltaico Canoas	200	Prefactibilidad y análisis técnico.
Guaduas	Solar Puerta de Oro	300	Estudios de viabilidad

Nota: Tabla tomada de UPME (2020a) y adaptada a formato APA.

En cuanto a la cobertura energética de los municipios de Chía y de Cajicá, hay que resaltar el alcance de la conectividad. En la Tabla 2, se muestran los datos oficiales de consumo, teniendo en cuenta que los municipios cuentan con un suministro de energía eléctrica que alcanza el 100% de cobertura.

Tabla 2.

Consumo de energía oficial en Chía y Cajicá al mes de enero de 2021

Municipio	Consumo Enero / 21 (kW)			Promedio día kWh
	Total, Residencial	Comercial	Total	
Chía	8,170,042	487,948	8,657,990	11,637
Cajicá	4,557,773		4,557,773	6,126

Nota: Tabla construida a partir de los datos del Servicio Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios [SUI] (2021)

Estos dos municipios tienen un gran potencial para implementar energías renovables. Primero, por ser ambientalmente sostenibles. Segundo, por no ser aún empleadas en viviendas o edificaciones gubernamentales de forma masiva, abriendo a estas entidades la posibilidad para ser pioneros en la implementación de energías sostenibles en el municipio. Ante este potencial, es necesario entender cómo se produce energía a través del sol y cuál es el funcionamiento de este tipo de sistemas.

Energía Solar

La energía solar es una energía renovable obtenida a partir de la radiación electromagnética del sol. Para obtenerla, la energía se debe captar por medio de células

fotoeléctricas o colectores que la transforman en energía solar térmica a través de la temperatura y energía solar fotovoltaica, una energía obtenida de la luz y que es la más utilizada por su fácil producción. En la Tabla 3, se resumen los usos de la energía solar a partir de lo expuesto por Factor Energía (2020).

Tabla 3.

Usos de energía solar

Energía solar térmica	<ul style="list-style-type: none"> - Se produce calor a través de la energía del sol, y se usa como fuente de energía. - El calor capturado pasa por unos tubos que generan energía para agua caliente o calefacción. - Es posible su implementación a gran escala, se conoce como “Planta termo solar o central térmica solar”, llega a ocupar grandes extensiones de terreno con colectores de alta temperatura, alcanzando a operar a más de 500°C. Existen tecnologías que almacenan el calor para su posterior transformación en electricidad por demanda.
Energía solar fotovoltaica	<ul style="list-style-type: none"> - Se produce energía a partir de la radiación solar con la ayuda de paneles solares fotovoltaicos, los cuales transforman la luz y calor del sol en electricidad. - Considera el uso de la energía captada durante el día para mantener una temperatura apropiada en la edificación durante la noche, o equilibra el calor excesivo durante épocas de verano; esto se consigue con “arquitectura bioclimática” utilizando materiales y orientaciones específicas.

Nota: Información tomada de Factor Energía (2020).

Teniendo en consideración el comportamiento de la radiación, es necesario remitirse a la disponibilidad de este tipo de energía, pues, como se ve en la Figura 3, no toda ella es aprovechada.

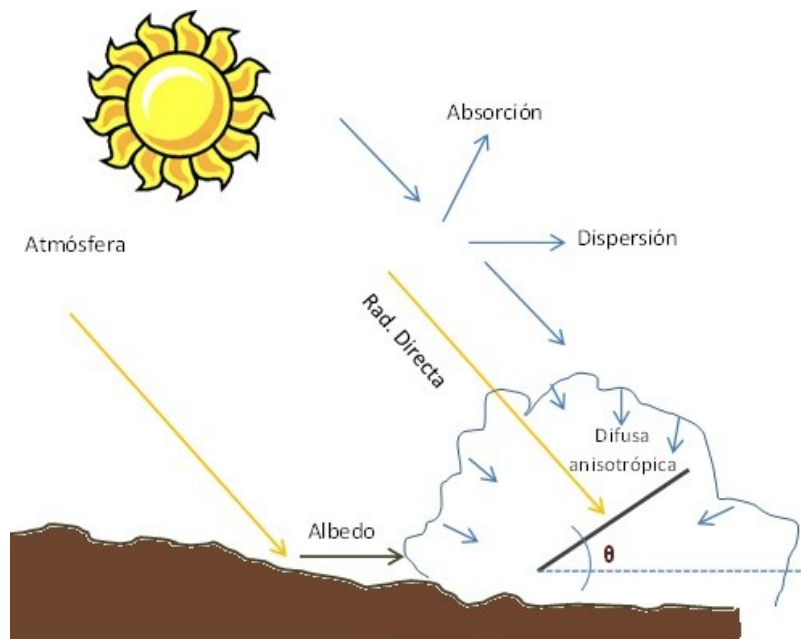


Figura 3. Comportamiento radiación sobre paneles solares. Fuente: Quk (2011).

La disponibilidad efectiva de energía está influenciada por factores como la localización geográfica (latitud, longitud, elevación), época del año, duración del día, como también, por las nubes y otras condiciones meteorológicas, condiciones dependientes de la localización y el momento del día (Trace Software, s.f.)

Energía solar fotovoltaica

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar (Perpiñán, 2020). “El principal componente de este

sistema es el módulo fotovoltaico, a su vez compuesto por células capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua” (Perpiñán, 2020, p. 1). Los equipos adicionales involucrados en un sistema fotovoltaico dependen de la aplicación o requerimiento de la vivienda o edificio. Los sistemas fotovoltaicos se clasifican en conectados a red y autónomos.

Los sistemas conectados a la red producen energía eléctrica para ser consumida, la energía que no se usa puede ser inyectada íntegramente en la red convencional, su esquema se muestra en la Figura 4.

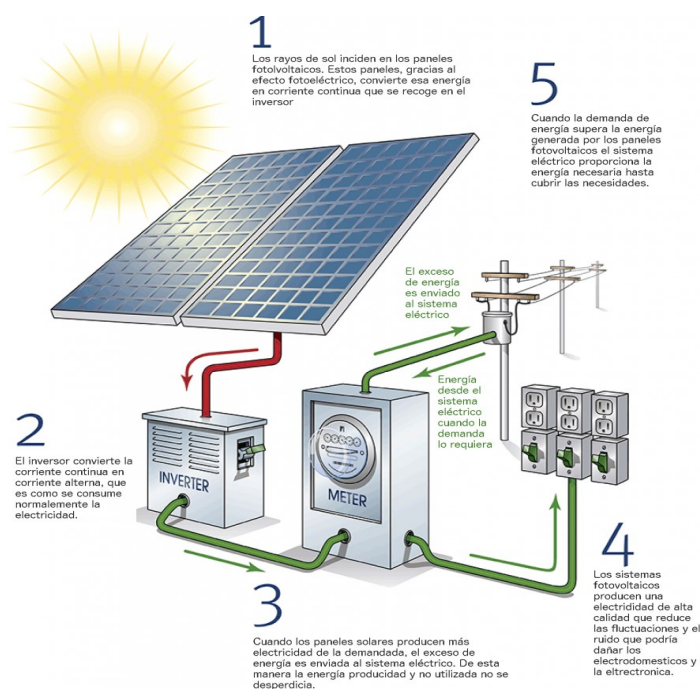


Figura 4. Esquema de generación fotovoltaica conectada a la red. Fuente: HelioEsfera (2020)

Debido a que no operan bajo una demanda específica de consumo de forma directa ni la garantiza, no necesitan adicionar equipos que permitan la acumulación de energía. Para permitir la correcta conexión con la red eléctrica estos sistemas incluyen un equipo inversor, el cual proporciona la potencia producida por el generador fotovoltaico a las condiciones de la red

convencional, entrega corriente eléctrica igualando los parámetros de voltaje, frecuencia, fase y factor de potencia. Estos sistemas pueden a su vez ser divididos en sistemas instalados sobre suelo y sistemas en edificios o viviendas. Los sistemas sobre suelo concebidos para producir energía y obtener el rendimiento económico asociado suelen superar los 100 kW de potencia (Elecama, 2019). Los sistemas en edificios incluyen funciones adicionales a la producción de energía, como sustitución de componentes arquitectónicos, efecto estético, sombreado de acristalamientos, normalmente de potencias inferiores a los 100 kW.

El otro sistema fotovoltaico es el sistema autónomo, el cual abarca una variedad muy amplia de adaptaciones, ya que la necesidad es cumplir con una demanda energética determinada. Por esta razón, los sistemas autónomos incorporan un equipo de acumulación de energía (Elecama, 2019). Estos sistemas se clasifican en tres grupos de acuerdo con la aplicación requerida: profesionales, electrificación rural y pequeño consumo. En la Figura 5, se muestra el diagrama del sistema fotovoltaico autónomo.

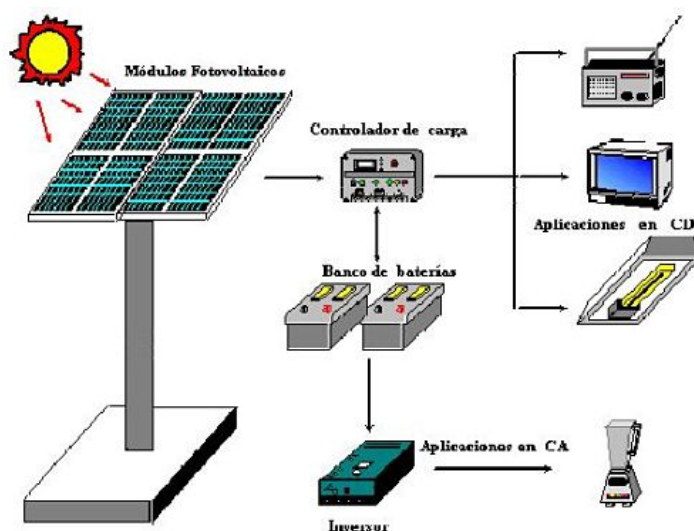


Figura 5. Sistema Fotovoltaico Autónomo. Fuente: Agredano (2008)

El plano eléctrico conocido como “Diagrama unifilar” muestra el esquema general gráficamente todos los componentes del sistema Fotovoltaico como equipos, dispositivos y elementos que lo conforman; el diagrama Unifilar del sistema autónomo se muestra en la Figura 6.

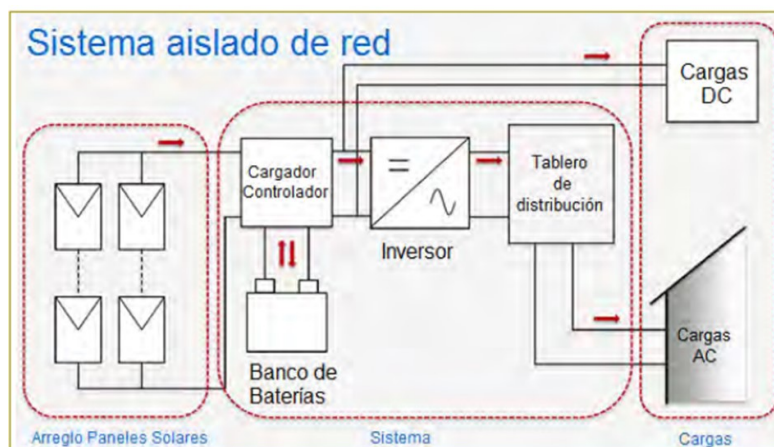


Figura 6. Diagrama del sistema autónomo. Fuente: Smets & Narayan (2014, citado por Ruiz, González, Benítez, & Barrera, 2019)

Tal y como se observa en la Figura 5, los sistemas autónomos constan de diferentes dispositivos con funciones particulares. A continuación, se presentan dichos dispositivos y sus funciones.

Módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico es una agrupación de células encapsuladas en dos capas de etileno-vinilo-acetato (EVA), entre una lámina frontal de vidrio y una capa posterior de un polímero termoplástico, usualmente se utiliza Tedlar u otra lámina de cristal cuando se requieren obtener módulos con algún grado de transparencia. En la Figura 7, se muestra cómo está

compuesto el panel y los materiales con los que se construye (SunFields Europe, s.f.). Los paneles convencionales se enmarcan en una estructura de aluminio anodizado con el fin de aumentar la resistencia mecánica del conjunto y facilitar el anclaje del módulo a las estructuras que lo soporta.

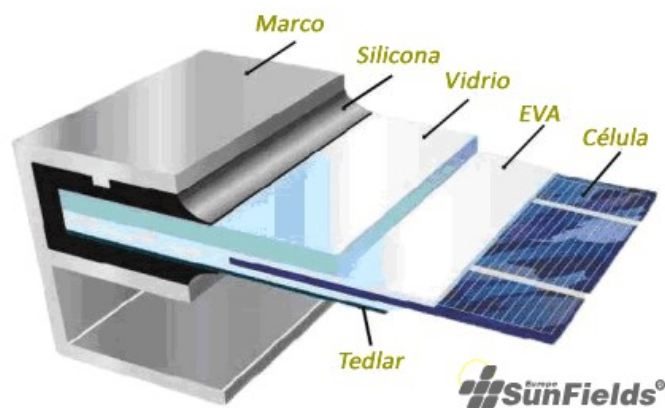


Figura 7. Compuestos de un panel solar. Fuente: SunFields Europe (s.f.)

Con respecto a los componentes ilustrados, el EVA es un tipo de polímero que, al aplicar calor forma una película que sella y aísla en torno a las células solares. Su principal función es, justamente, encapsular la célula. Por otro lado, el Tedlar es una que cobertura protege al poliéster de la degradación causada por la luz solar que recibe el panel. Finalmente, la capa de vidrio está diseñada de tal manera que contenga un bajo nivel de hierro. Con esto, se asegura la transmisividad de la capa. Así mismo, suele usarse vidrio templado en aras de aumentar la resistencia a impactos del compuesto.

Generador fotovoltaico

Es el conjunto de módulos fotovoltaicos para adaptarse a las condiciones de funcionamiento de una aplicación determinada.

Inversor DC/AC

Este dispositivo es un equipo que acondiciona la señal de potencia emitida por el generador fotovoltaico que está en tensión continua; el no acondicionar la señal, entorpece el acoplamiento del sistema a la red eléctrica (Díaz & Carmona, 2018). El procedimiento que realiza el inversor consiste en convertir la tensión de continua a alterna, asegurando cumplir con los límites de tensión eficaz, frecuencia, distorsión de tensión y corriente, eficiencia, rendimiento y seguridad eléctrica.

Acumulador electroquímico

Conocido también como batería secundaria o recargable, que almacena energía eléctrica transformándola en energía electroquímica (Díaz & Carmona, 2018). Su presencia, sin importar el nivel de generación, satisface los requerimientos de consumo del sistema, permitiéndole la autonomía. Incluso contribuye al correcto funcionamiento del sistema al aportar picos de intensidad superiores a los que proporciona el generador FV y estabilizar el voltaje del sistema, por lo tanto, evita que se generen fluctuaciones, ya que usualmente generan daños en los equipos. La variada gama de acumuladores se basa, casi en su totalidad, en la tecnología de ácido-plomo.

Cálculo de producción de energía

La potencia entregada está influenciada por los siguientes factores (Todo Productividad, 2010):

- a. Irradiancia efectiva que incide en el plano del generador.
- b. Temperatura ambiente, si no se tiene este dato se puede asumir un valor constante de temperatura de 25°C en el caso de simulaciones.
- c. Impacto de sombras sobre el generador.

- d. Comportamiento eléctrico del generador.
- e. Curva de eficiencia del inversor y resto de componentes del sistema, como el cableado y transformador

Según el Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (Comisión Europea, 2019), el rendimiento de los módulos FV depende de su temperatura y de la radiación solar disponible. Estos módulos pueden ser células de silicios cristalino; de lámina delgada de CIS [CuInSe] o CIGS [CuInGaSe]; y/o de lámina delgada de Teluro de Cadmio [CdTe].

Por otro lado, la potencia pico instalada (kWp) es la potencia que el fabricante de los módulos fotovoltaicos publica en su ficha técnica que estos pueden producir bajo condiciones estándares de medida. Las condiciones estandarizadas de medida son 1000W de radiación solar por metro cuadrado sobre el plano de captación y una temperatura del módulo de 25°C.

Como se mencionó anteriormente, uno de los factores que predominan en la generación de energía es la radiación solar. Colombia tiene una radiación promedio de 4.5 kWh/m²-día, por encima de Alemania (3.0 kWh/m²-día), país de mayor uso a nivel mundial con 36 GW instalada en 2013 (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018). Los valores de radiación promedio por región en Colombia se indican en la Tabla 4.

Tabla 4.

Promedio de radiación por regiones de Colombia

Región Andina	Promedio de Irradiación
Guajira	6.0 kWh/m ² -día
Costa Atlántica	5.0 kWh/m ² -día
Orinoquia	4.5 kWh/m ² -día
Amazonía	4.2 kWh/m ² -día

Región Andina	4.5 kWh/m ² -día
Costa Pacífica	3.5 kWh/m ² -día

Nota: Tabla tomada de UPME, IDEAM (2005, citada por Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2018), y adaptada a formato APA

Estado del arte

La bibliografía disponible indica que la evaluación técnica y económica de proyectos de energía fotovoltaica ha sido abordada desde diferentes perspectivas y en diferentes contextos. Dentro de esta bibliografía, hay un cuerpo de estudios enfocados en la factibilidad de la implementación de este tipo de sistemas. Por ejemplo, Guevara y Pérez (2015) realizaron un análisis de viabilidad del suministro de energía eléctrica a la granja La Fortaleza ubicada en Melgar, Tolima, mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico. El estudio desarrolló la línea base con respecto a la radiación solar, nubosidad y las precipitaciones. Dentro de estas variables, la más significativa es la radiación solar, cuyo valor oscila en el año entre 4.2 y 4.8 Wh/m², para el estudio tomaron el valor de 4.181 Wh/ m². Para el análisis financiero, se tomó como base el valor del costo de energía sobre la facturación mensual del servicio. El costo promedio calculado en el periodo de 2011 a 2014 es de \$382.68 kWh (Guevara & Pérez, 2015).

La demanda de energía la determinaron dividiendo la granja en tres secciones: casa, hotel y cuarto de piscina. La energía total consumida por día determinada fue de 52 kWh. Después de realizar los cálculos, el número de paneles solares para la demanda fue de 48 paneles de 315Wp, ocupando un área de 117.2 m². El costo de la inversión con tecnología policristalina calculada fue de \$117.957.253. El costo del kWh por la implementación del ahorro calculado fue de \$249, representando un ahorro en el año 1 de \$7.792.399. Sin embargo, la conclusión del estudio muestra que durante la vida útil del sistema fotovoltaico no se llega a recuperar la inversión

inicial a pesar de generar ahorros en el costo de energía por lo cual la instalación no es financieramente viable.

Por otro lado, Beltrán, Poveda, y Carvajal (2018) desarrollaron la prefactibilidad económica para la implementación de un sistema de energización solar fotovoltaico para un laboratorio ubicado en la sede de Villavicencio de la Universidad Cooperativa de Colombia. Para tal fin, realizaron una evaluación diagnóstica inicial a través de la lectura del contador por un periodo de 2.5 meses para determinar el consumo de energía eléctrica basado en las demandas de energía de equipos, luminarias y aires acondicionados. Posteriormente, con la determinación de la demanda, procedieron a realizar el diseño del sistema fotovoltaico, asumiendo el funcionamiento del laboratorio por 24 horas los siete días de la semana. Los cálculos de diseño se realizaron con base en tres alternativas planteadas: (a) suministro para aires, Luminarias, PC y Equipos; (b) suministro para aires, luminarias y PC; y (c) suministro para luminarias.

La viabilidad de las alternativas se analizó desde el punto de vista de área disponible, concluyendo que la alternativa b es factible, presentando un costo de \$184.765.065. A partir de esta alternativa, desarrollaron el análisis financiero tomando una demanda de energía constante hasta el año 2030 de 29.5 kWh y un costo de energía incremental de \$472.17 kWh. La recuperación de la inversión calculada se daría a los 11 años y 5 meses, generando un ahorro mensual de \$1.431.817.

Por último, el estudio de factibilidad de Peñaloza (2020) fue desarrollado para la creación de un Sistema de Autogeneración de Energía Solar Fotovoltaica para la sede CCVA de Cúcuta. El estudio consideró el inventario de equipos y objetos de consumo de energía de la sede, dando como potencia nominal 128 kWh, y, a través de la factura del servicio eléctrico, se tabularon los consumos reales desde febrero a agosto, arrojando un promedio mensual de 5894 kW. Las

alternativas las determinaron con los límites de áreas que tiene la sede; la alternativa A contó con un área de 336 m²; seguida de la alternativa B con un área de 64 m²; y la alternativa C con un área de 117 m². Para determinar el número de paneles, tomaron la dimensión de uno de ellos, lo cual constituye un panel de 99.2 cm x 195.6 cm y capacidad de 340 W. El evaluador toma la decisión de continuar con el análisis financiero haciendo uso de la alternativa A, arrojando el uso de 160 paneles. Además, para el cálculo de la producción de energía consideraron la radiación en la ciudad de Cúcuta del mes de marzo (la más baja del año): 4.660,8 Wh/m². Dentro del análisis financiero, se calculó por medio del costo de la factura y el consumo la tarifa de la energía de \$485.67 kWh (precio referente al primer semestre del año 2019). El costo de la inversión para la aplicación fue de \$179.543.325, sin contemplar el uso de baterías. La inversión se tiende a recuperar entre 2 a 3.5 años. La factibilidad, entonces, fue positiva para esta aplicación, la Tasa Interna de Retorno [TIR] es de 3.18% y un Valor Presente Neto [VPN] de \$330.197.307, es decir, la Universidad estaría ahorrando tres pesos por cada peso invertido.

Metodología

Tabla 5.

Resumen de la metodología de la investigación

Objetivos	Actividades	Entregables
Evaluar la viabilidad técnica de	Modelar la radicación de los municipios de Chía y Cajicá utilizando información de la UPME e IDEAM. Corrida de producción de energía a través de la página web del Sistema de	Gráfico en el documento con la radiación oficial en la Sabana de Bogotá. Excel con la producción de energía para 1kWp en los municipios de Chia y Cajicá; incluye la

<p>implementación del sistema de generación fotovoltaica, soportado en la información de demanda de energía y niveles de radiación, en las edificaciones de las entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá.</p>	<p>Información Geográfico Fotovoltaico de la Comisión Europea.</p> <p>Consulta en páginas del Gobierno Colombiano para identificar las entidades gubernamentales.</p> <p>Consultar sobre los consumos de energía para estimar la demanda de energía se hará a través de contactar por contactos en las entidades o basado en un análisis de consumo de entidades similares bajo estudios de instituciones públicas referenciadas según corresponde.</p>	<p>producción anual de energía.</p> <p>Listado con el número y datos específicos de las entidades Gubernamentales de Chía y Cajicá; en Excel y anexo del documento.</p> <p>En Excel y documento la estimación de consumos por tipo de entidad y flexibilidad en el modelo de Excel para digitar el consumo leído de la factura del servicio o estudio de demanda de energía que se pueda tener o adelantar por la entidad.</p>
<p>Determinar la importancia desde el punto de vista de confiabilidad y reducción de emisiones de CO2 para las entidades gubernamentales por la implementación de energía fotovoltaica.</p>	<p>Describir las condiciones de confiabilidad e investigar cómo la ley protege al consumidor ante fallas recurrentes en el sistema.</p> <p>Calcular la reducción de emisiones de CO2 de acuerdo con la metodología propuesta por el Ministerio</p>	<p>Análisis de confiabilidad y resumen en el documento de cómo se protege al usuario por la baja confiabilidad del sistema.</p> <p>Cálculo en Excel con base en el factor de emisión para Huella de</p>

	de Minas y Energía, la UPME, IDEAM y XM.	Carbono Corporativa de 0.591 tCO ₂ eq/MWh.
Evaluar la viabilidad financiera, incorporando los beneficios de la Ley 1715 de 2014, que incentiva la implementación de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de Carácter renovable o limpias, en el sistema energético nacional; y el Decreto 2143 de 2015 del Ministerio Minas y Energía.	Proyectar el costo de energía tomada en la red a través de los análisis de la UPME y XM. Estimar el costo de la inversión, se hará con base en métricas tanto para la solución integral como para las Baterías. Calcular el beneficio tributario de acuerdo con la Ley 1715 de 2014. Realizar el análisis financiero con base en los métodos estándar de evaluación de proyectos: VPN, TIR, periodo de recobro de la Inversión, costo de la energía solar y porcentaje de ahorro de energía.	En Excel el cálculo de la proyección de costo de energía con base en los precios históricos. En Excel se calcula el costo de la solución con base en la demanda de energía y métricas utilizadas y comentadas en el documento. Análisis financiero en Excel con todas las variables de flujo de caja que permiten calcular la viabilidad de la implementación Fotovoltaica, este incluye el beneficio tributario.

Nota: Tabla de autoría propia.

La presente investigación se llevó a cabo con mirar a cumplir los objetivos planteados en la sección correspondiente de este documento; en ese sentido, la Tabla 5 presenta de manera resumida las actividades puntuables para dar cumplimiento a cada uno y los entregables

realizados en los que se refleja el procedimiento de la investigación. Ahora bien, con el fin de definir el modelo técnico y económico para el uso de energía fotovoltaica para las entidades gubernamentales del municipio de Chía y Cajicá, se planteó el siguiente procedimiento.

En primer lugar, se determinaron las variables que permitan establecer la viabilidad técnica. Para esto, se modeló la radicación de los municipios de Chía y Cajicá utilizando varias fuentes de información, entre ellas las paginas oficiales de la UPME e IDEAM. Esta última con los centros de toma de irradiación en Bogotá en el Aeropuerto El Dorado (Código Ideam 21205791) y el municipio de Mosquera (Código 21205420 - Tibaitata). Además, se utilizó la página web del Sistema de Información Geográfico Fotovoltaico de la Comisión Europea (2019). Para el mismo propósito, se estableció el número de entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá. La información fue recopilada a partir de los datos del Gobierno Colombiano (Datos Abiertos Colombia, 2021), el cálculo se realizó multiplicando la carga por tipo de sector por 30 días de consumo, así:

$$\text{Ecuación 1 [E1]: Consumo de energía estimado [kWh/mes]} = \text{Consumo sector [kWh/día]} \times 30 \text{ días}$$

Con respecto a la estimación de la demanda de energía de las entidades públicas, se realizó la pregunta sobre los consumos vía consulta directa en cada entidad o basado en un análisis de consumo de entidades similares como se presenta en el estudio de la Universidad Nacional de Colombia (2007). Por último, se calculó, con la fórmula establecida de área requerida por producción de energía FV, el área requerida para las demandas previamente determinadas.

Para terminar el análisis técnico del uso de energía fotovoltaica, se tomaron los parámetros que muestra la Figura 8, realizada por la empresa SunnyTools (s.f.).

Potencia sistema solar	Ejemp. Segments de uso	Cantidad de paneles (250W)	Superficie requerida (neta)
1kWp	Hogar, pequeño comercio	4	7 m2 11 m2
5kWp	Hogar, pequeño comercio, riego	20	35 m2 55 m2
30kWp	Edificios, comercio, riego	120	210 m2 330 m2
100kWp	Comercio , industria.	400	700 m2 1100 m2

Figura 8. Áreas requeridas conceptuales para los rangos de potencia requerida. Fuente:

SunnyTools (s.f.)

El modelo técnico fue pensado como conectado a la red y al Sistema Interconectado Nacional [SIN] con autonomía a través de baterías. Con el fin de calcular la cantidad de energía producida por un sistema convencional de paneles solares, es decir, el cálculo de producción de energía, se tomaron en cuenta las siguientes variables: (a) modulo fotovoltaico; (b) potencia FV pico instalada [kWp] – Potencia pico; (c) perdidas del sistema; (d) ángulo de inclinación o pendiente; y (e) ángulo de azimut [°]. La Tabla 6 presenta la descripción detallada de las variables mencionadas.

Tabla 6.

Variables para el cálculo de producción de energía

Variables calculo producción de energía	Concepto
Modulo Fotovoltaico	Células de Silicio Cristalino

Potencia FV pico instalada [kWp] – Potencia pico	<p>“Potencia que el fabricante de los módulos fotovoltaicos declara que pueden producir bajo condiciones estándares de medida (1000W de radiación solar por metro cuadrado y una temperatura del módulo de 25°C). La potencia pico = área * eficiencia / 100”</p>
Perdidas del sistema	<p>“Pérdidas que hacen que la potencia realmente entregada a la red eléctrica sea inferior a la potencia producida por los módulos fotovoltaicos. Existen varias causas como pérdidas en el cableado, en los inversores, suciedad sobre los módulos. Se asumen unas pérdidas del 14%.”</p> <p>“Para sistemas fijos (sin sistema de seguimiento solar), el modo en que se colocan los módulos afecta a la temperatura de los mismos, lo que a su vez influye en su rendimiento.”</p>
Ángulo de inclinación o pendiente	<p>“Ángulo que presentan los módulos fotovoltaicos respecto al plano horizontal en sistemas con montaje fijo, se consideran los ángulos de inclinación y orientación vienen determinados cuando se colocan sobre un tejado existente.”</p>
Ángulo de azimut [°]:	<p>El IDEAM (s.f.a) recomienda un azimut entre 0 a 16°.</p>
Rendimiento de un sistema FV autónomo	<p>“Sin conexión a la red eléctrica y que por tanto dispone de un sistema de almacenamiento con baterías para proporcionar la energía demandada en momentos en los que no existe radiación solar disponible. El cálculo utiliza información sobre el consumo eléctrico a lo largo del día para simular el flujo de energía hacia los usuarios y hacia el sistema de baterías en su recarga y descarga.”</p>

Nota: Tabla construida a partir de la información de Comisión Europea (2019, Sección 4).

El simulador de la Comisión Europea suministra la producción de energía mensual, por lo tanto, se procedió a calcular la producción de energía con base en la siguiente fórmula:

$$E2: \text{Producción de energía} = \text{Potencia (kW)} \times (\text{producción energía anual en kWh calculada por el simulador}) \times \text{Pérdida de eficiencia (0.5\% anual)}$$

La potencia se calculó de la siguiente manera:

$$E3: \text{Potencia (kW)} = \text{Consumo mes (kWh/mes)} / 30 \text{ días} / 24 \text{ horas} / 0.8 \text{ (Factor de demanda)}$$

La pérdida de eficiencia de los paneles fotovoltaicos con base en un estudio realizado en Europa ha determinado que un panel solar pierde 0.5% de su eficiencia en un año (Ruiz, 2020), pero puede variar de acuerdo con las condiciones climáticas y radiación UV. En su trabajo, Ruiz concluye que cuando un panel solar pierde más del 20% de su eficiencia se conoce técnicamente que tiene un fallo técnico.

Las baterías para los sistemas autónomos, al igual que los paneles, varían en capacidad y prestación de éstas. Como base del modelo, se consideró que las baterías no tuvieran una descarga mayor del 70% y se supuso un factor de corrección de Temperatura de 1. La tensión de la batería puede ser de 12V o 24V (variable dentro del modelo). Con respecto a los días de autonomía, se consideró en el modelo una variable que puede estar sujeta a la experiencia del usuario de cortes del servicio en un año.

Posteriormente, se describe las condiciones de la Ley para la implementación de sistemas de generación desde el punto de vista de beneficios tributarios; esto con el fin de que las posibles entidades gubernamentales interesadas conozcan los porcentajes al cual podría estar sujeta la

entidad si implementa un sistema FV. Finalmente, se realizó el cálculo de reducción de emisiones de CO siguiendo la medición que ofrece la herramienta en la reducción estimada con base el factor de emisiones presentados en informes de la UPME (2020c; 2020d). El factor de emisión para Huella de Carbono Corporativa fue de 0.591 tCO₂eq/MWh, para el cual se utiliza la Estimación de GEI por consumo de energía eléctrica, Inventarios de emisiones de GEI y cálculo de la huella de carbono empresarial o corporativa. A través de ella, se cuantifican las emisiones de GEI de una organización y se identifican las acciones específicas

En un tercer momento, se procedió a establecer las condiciones financieras con base en el flujo de caja que se muestra en la Tabla 7. Estas variables expuestas son las que el modelo toma en consideración.

Tabla 7.

Variables para el análisis financiero de la solución fotovoltaica

Variables
Anual
Precio kWh Año (\$)
Costo de energía sin solución Fovovoltaica
Costo de energía con solución Fovovoltaica
Ahorro Anual (\$)
Ingreso por Venta de excedente
Operación y Mantenimiento (Sistema Fovovoltaica)
Utilidad Bruta
Depreciaciones (5 años – línea recta)
Utilidad antes de impuestos (1)
Beneficio Tributario Ley 1715
Utilidad antes de impuestos (2)

Impuesto de utilidad

Utilidad Neta

Depreciaciones (5 años – línea recta)

Inversión activos fijos

Flujo de Caja Neto

Nota: Autoría propia.

Con estas variables, se calcula la Utilidad Bruta, cuya fórmula aplicada en el modelo es la siguiente:

$$E4: \text{Utilidad Bruta} = \text{Ahorro Anual (\$)} + \text{Ingreso por venta de excedentes} - \text{Operación/Mantenimiento (\$)}$$

El porcentaje del costo inicial de la inversión el cual puede considerarse entre el 1% al 3%. La *depreciación* se establece acelerada. De acuerdo con la Ley 1714, se fija un periodo de 5 años y forma lineal, tomando el valor de cada depreciación del 20% del activo. Al aplicar la resta entre la *Utilidad bruta* y la *depreciación*, se determina la *Utilidad antes de impuestos (1)*. Posteriormente, se aplica el ingreso en el primer año por beneficio tributario del 31% sobre el 50% del costo total de la inversión, distribuida a 5 años.

Finalmente, se resta el valor del beneficio tributario resultando en la *Utilidad antes de Impuestos (2)*, a la cual se aplica el Impuesto de renta (Impuesto de Utilidad) que, para el año gravable 2021, es del 31%. La *Utilidad neta* del modelo se calcula con la siguiente fórmula:

$$E5: \text{Utilidad Neta} = \text{Utilidad antes de impuestos (2)} - \text{Impuesto de Utilidad (31\%)}$$

Por último, el *Flujo de caja neto* se calcula sumando la *Utilidad neta* con la *Depreciación*. Los valores e indicadores financieros que calcula y muestran los resultados el modelo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Variables como entregables del modelo financiero

Variable	Formula	Concepto
Costo de energía Solar (Col\$/kWh)	E6: $= \frac{\text{Costo de la solución Fotovoltaica}}{\sum \text{Estimado Generación de energía Solar}}$	
VPN Es la suma de los beneficios netos futuros del proyecto actualizado a un año común a una tasa de descuento	E7: $VPN = -I_0 + \sum \frac{B_n - C_n}{(1+d)^n}$ I = Inversión B = Beneficios directos C = Costos directos d = Tasa mínima de retorno n = Número de años del horizonte de evaluación	Si el VPN > 0, el proyecto es rentable. Si el VPN=0, indiferente realizar el proyecto. Si el VPN < 0, no es rentable.
Tasa Mínima de retorno	Para el modelo se sugiere el 10%, puede digitar el valor que estime el equipo financiero de la entidad	Valor actual del dinero de una fecha futura. Permite descontar el dinero futuro a una inversión.
Retorno de la Inversión		Cuánto dinero perdió o ganó la entidad con las

(ROI)	E8:	inversiones hechas.
	$ROI = \frac{\text{Ganancia} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$	
<p>Tasa Interna de retorno calculada</p> <p>Tasa de descuento en donde el VPN del proyecto sea cero.</p>	<p>Se toma el valor del VAN positivo dividido entre la suma de los dos valores de los VAN, tanto del positivo como del negativo en valor absoluto, y el resultado es la cantidad que se tiene que sumar para obtener la TIR.</p>	<p>Transforma la rentabilidad de un proyecto o tasa de rentabilidad; si la rentabilidad del proyecto es menor, no conviene invertir.</p>
<p>Periodo de recuperación de la Inversión</p> <p>No tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo; la cantidad de años que se tarda en recuperar los fondos invertidos.</p>	<p>E9:</p> $PRI = \frac{\text{Inversión}}{\text{Flujo de efectivo}}$	<p>Cuánto más corto sea el período de recuperación de la inversión de un proyecto, más atractivo.</p>
<p>Beneficio Tributario efectivo</p>	<p>E10:</p>	<p>Beneficios tributarios que otorga la Ley 1715 de 2014, sobre deducción de 50% de la inversión</p>
<p style="text-align: center;"><i>Ingreso Beneficio = (Inversión)(deducción)(Impuesto de renta)</i></p>		

Nota: Autoría propia.

El costo de la solución fotovoltaica se basa en el costo actual y proyectado de los costos de energía tomado de la base de datos de la página oficial de energía XM. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020). La metodología de la proyección de precios se realizó con base en un informe de la proyección de demanda de energéticos ante el Covid 19 (UPME, 2020b). A partir de ello se tabuló y graficó para así obtener una tendencia y determinar el mejor estimado del comportamiento del costo de energía a 15 años. Para el costo de las baterías, se tomó como referencia lo propuesto por SunFields Europe (2011) actualizada con la inflación desde el 2018, hasta el 2020. Esta información se recoge en la Figura 9.

	Descripción	Unidad	Litio	VRLA-Acido Plomo	Acido plomo
C_{ub}	Costo por unidad de almacenamiento	\$/Wh	1485	350	290

Figura 9. Costos de baterías por tipo de tecnología y unidad de almacenamiento. Tomada de SunFields Europe (2011).

Además, el modelo integró los costos generales de la solución fotovoltaica con base en la simulación que ofrece la página SunColombia, los cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Métrica para estimación de costos de solución fotovoltaica.

Métrica 1-4 kWp	\$	2.6	USD/Wp
Métrica 5-29 kWp	\$	2.4	USD/Wp

Métrica 30-99 kWp	\$	2.0	USD/Wp
Métrica >100 kWp	\$	1.7	USD/Wp

Nota: Tomada de SunnyTools (s.f.)

El presente trabajo y modelo se enmarca en la etapa de *Evaluación conceptual* del proyecto, por ende, los costos presentados son valores de referencia que pueden representar una desviación entre el $\pm 20\%$ a $\pm 50\%$.

Por último, se concluyó el cálculo del beneficio tributarios de acuerdo con la Ley 1715 de 2014. A partir de esta información, se realizó el análisis financiero con base en los métodos estándar de evaluación de proyectos: VPN, TIR, periodo de recobro de la Inversión, costo de la energía solar y porcentaje de ahorro de energía.

El modelo de Excel entregará información acerca de: la potencia actual; potencia solución fotovoltaica; porcentaje real de cobertura (el porcentaje de lo realmente producido por energía solar con respecto a la demanda); paneles requeridos; área requerida; y, si el sistema es autónomo, el número de baterías. El modelo contempla ingreso por venta de excedente, y este se da cuando se produce energía y no se consume (HG, 2020). La Resolución CREG 030 de 2018 determina un instrumento fácil y sencillo para que los usuarios residenciales de todos los estratos, comerciantes y pequeñas industrias, produzcan energía principalmente para atender sus propias necesidades y, si hay lugar, puedan vender los excedentes al SIN. A través de esta resolución, se determinan las condiciones de integración, los estándares técnicos de disponibilidad del sistema y la información necesaria sobre la disponibilidad de la red. Adicionalmente, se regula la venta de excedentes, sus aspectos técnicos, informativos y las reglas

de comercialización, al igual que las obligaciones para los Autogeneradores a pequeña escala [AGPE] y las del operador de red.

Según el tipo de usuario que sea y si desea o no conectarse a la red eléctrica, se deben seguir una serie de pasos, tales como verificación de disponibilidad de la red, diligenciamiento de formularios y estudios de conexión. Todo esto permite que los usuarios participen activamente en el suministro de energía del país. El Artículo 17 de la resolución menciona cómo se realiza el reconocimiento, el cual se hace en el mismo periodo de facturación por el costo de comercialización que corresponde al componente que fija la resolución CREG 119 de 2007. Por ahora, el modelo contempla el mismo valor del que se paga por el precio de la energía. Esto se hace en concordancia con lo indicado por América Fotovoltaica, quién afirma que

En el caso de los autogeneradores, se considera un costo muy cercano al precio que se paga por el consumo eléctrico. En el caso de un generador distribuido, será un valor ligado al precio de la electricidad en el mercado de bolsa más una prima (América Fotovoltaica, s.f., Sección de ¿Qué pasa si no logro vender mi excedente?).

Con respecto al costo de operación y mantenimiento, este depende de la ubicación de los paneles e instalaciones de sus componentes y dependerá de la recomendación del fabricante o proveedor del sistema. Puntualmente, el modelo contempla la metodología de 1%, pero este valor puede digitalizarse si hay una recomendación de un porcentaje diferente.

La herramienta para el desarrollo del modelo se basó en metodologías ágiles (Scrum y Canvas) y el modelo es presentado en Excel.

Resultados

Evaluación técnica para la implementación del sistema fotovoltaico

En el marco de desarrollo de la viabilidad técnica del uso de sistemas fotovoltaicos en la Sabana de Bogotá, dirigido hacia las edificaciones de entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá, se evaluaron diferentes variables para soportar la producción de energía a través de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica o sistemas autónomos, este último se considera teniendo en cuenta la confiabilidad del sistema en los municipios del presente trabajo, de 20.8 horas promedio por día.

Al definir estos dos tipos de conexión del sistema FV, se realizó la investigación de las entidades existentes a la fecha en los municipios seleccionados. Las entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá son reportadas en el Apéndice A. Puntualmente, el municipio de Cajicá cuenta con nueve entidades gubernamentales; el municipio de Chía registra ocho entidades. Entre ellas, se encuentran dos hospitales, uno en cada municipio (Datos Abiertos Colombia, 2021).

Con el listado de las 17 entidades gubernamentales de Chía y Cajicá, se realizó la investigación del consumo de energía. El recibo de cobro fue obtenido, únicamente, en el Edificio del Palacio Municipal de Cajicá (ver Anexo 1) donde operan la Alcaldía, el Concejo y la Personería del municipio. Para las otras entidades, se realizó la investigación para estimar los consumos de energía por mes. La estimación se realizó con base en el informe presentado a la UPME por la Universidad Nacional de Colombia (2007), el cual determinó el consumo en MWh durante 24 meses de diferentes entidades. En la Tabla 10, se muestra el resumen de las mediciones realizadas para Bogotá y que sirvieron como base para el cálculo de estimación de las entidades del municipio de Chía y Cajicá.

Tabla 10.

Consumo medio horario

Atención	Consumo medio horario (kWh/día)	Sector
7am-5pm	178.8	Salud
24 horas	109	Salud
24 horas	2347.3	Hospital
24 horas	2730.9	Hospital
24 horas	260	Bomberos
24 horas	225.13	Salud Medellín
24 horas	12995.2	Salud Medellín
7am-5pm	133.13	Colegio
7am - 3pm	335	Colegio
24 horas	249.36	Policía

Nota: Tabla tomada de Universidad Nacional de Colombia (2007)

En el Apéndice B, se muestra el resultado de la estimación de consumo de energía por mes descrita anteriormente de las entidades de los dos municipios, el consumo de las entidades exceptuando la Alcaldía de Cajicá es estimado.

La estimación se hace con el fin de tener el mejor aproximado para posteriormente determinar la solución fotovoltaica. Sin embargo, una vez la entidad gubernamental alimente el modelo con los datos reales o con datos levantados a través de mediciones detalladas como resultado de un estudio posterior a este trabajo, la solución fotovoltaica se recalculará en la hoja de cálculo sin tener que modificar las otras variables del modelo. Es decir, el modelo tiene la opción de cambiar el consumo de generación sin realizar modificaciones adicionales de fondo.

En cuanto al comportamiento del consumo estimado para un periodo de 15 años, con un incremento anual sugerido del 1.5%, el promedio estuvo por debajo de lo estimado por la UPME (2020b). El incremento de consumo de energía es una variable que puede modificarse en el modelo, ya que puede haber una disminución de consumo por teletrabajo de algunos funcionarios o por aumento de servicios que pueda ofrecer un edificio gubernamental, entre otras múltiples razones.

Con respecto a la solución fotovoltaica, se tomó en cuenta la irradiación de la Sabana de Bogotá, haciendo uso de los datos registrados por la UPME e IDEAM. La Tabla 11 presenta los datos correspondientes a las estaciones de medición en la Sabana.

Tabla 11.

Estación de medición irradiación media horaria en Bogotá y Mosquera

	Bogotá	Mosquera
Código IDEAM	21205791	21205420
Nombre	Aeropuerto Eldorado	Tibaitata
Ubicación	Bogotá, Cundinamarca	Mosquera, Cundinamarca
Inicio Operación	-	may-92
Final Operación	-	sep-02
Latitud	4.71	4.68
Longitud	-74.15	-74.2
Elevación	2541	2543

Nota: Tabla tomada de IDEAM (s.f.b)

En la Figura 10, se resumen el promedio mensual de radiación global en las dos estaciones.

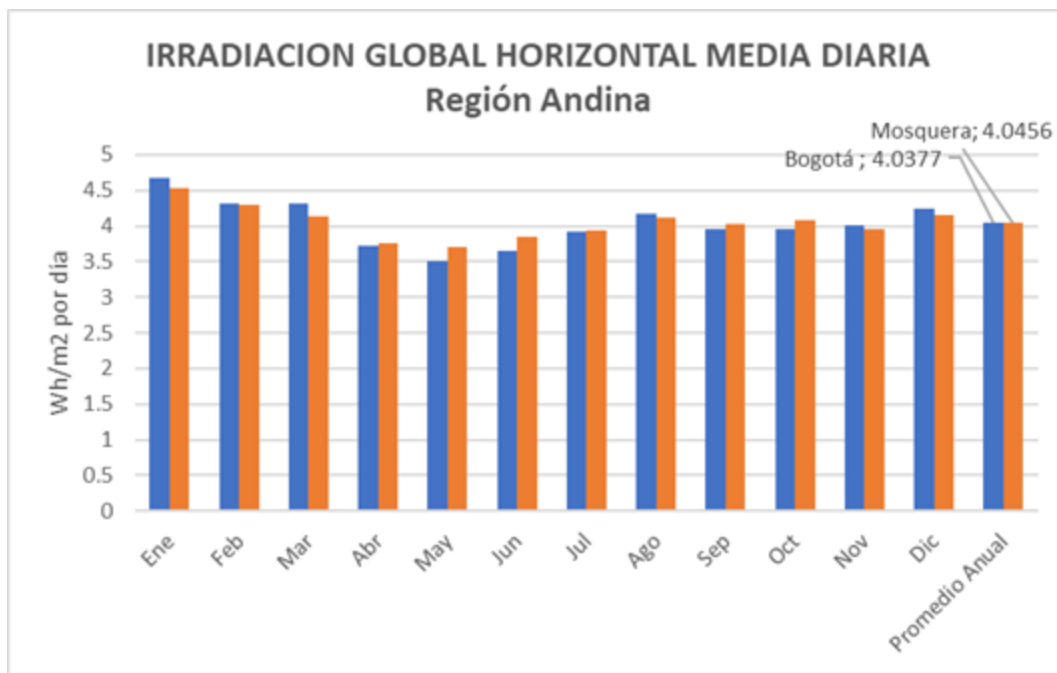


Figura 10. Irradiación Global Horizontal Media horaria. Fuente: Autoría propia

En la Tabla 12, se muestran los resultados calculados a través de la página del Sistema de Información Geográfico Fotovoltaico de la Comisión Europea (2019). Allí, se simularon las condiciones con las variables anteriormente descritas con una potencia fotovoltaica pico instalado de 1 kWp.

Tabla 12.

Resultados Cálculo producción anual en kWh – Chía y Cajicá

Resultados de la simulación	Cajicá	Chía
Ángulo de inclinación [°]	16	16
Ángulo de azimut [°]	0	0

Producción anual FV [kWh]	1285.97	1221.76
Irradiación anual [kWh/m2]	1709.6	1623.76
Variación interanual [kWh]	22.99	26.43
Cambios en la producción debido a		
Ángulo de incidencia [%]	-3.57	-3.67
Temperatura y baja irradiancia [%]	-9.3	-9.18
Pérdidas totales [%]	-24.78	-24.76

Nota: Base de cálculo 1 kWhp. Tabla de autoría propia utilizando la plataforma de la Comisión Europea.

La potencia calculada para cada entidad se resume en la Tabla 13, y es resultado de la demanda de energía estimada y que sirve de base para calcular la potencia pico requerida para el cálculo del sistema fotovoltaico.

Tabla 13.

Potencia y consumo por cada entidad Gubernamental de Chía y Cajicá

Consumo Mes (Kwh)	Potencia (Kw)	Nombre
76,173	105.796	Hospital Profesor Jorge Cavelier
5,364	9.3	Instituto Municipal De Cultura Y Turismo De Cajicá
3,994	6.9	Asociación De Municipios De Sabana Centro - Asocentro
3,994	6.9	Empresa De Servicios Públicos De Cajicá S.A.
4,021	7.0	Alcaldía De Cajicá
5,364	9.3	Instituto Municipal De Deporte Y Recreación De Cajicá
3,270	5.7	Instituto Municipal De Vivienda De Interés Social De Cajicá

3,270	5.7	Concejo De Cajicá
3,270	5.7	Personería De Cajicá
3,270	6	Instituto De Desarrollo Urbano, Vivienda Y Gestión Territorial De Chía
70,419	98	Hospital San Antonio De Chía
5,364	9	Instituto Municipal De Recreación Y Deporte De Chía
3,994	7	Empresa De Servicios Públicos Solidarios De Chía - Emserchia
4,021	7	Alcaldía De Chía
3,270	6	Personería De Chía
3,270	6	Secretaría De Educación Del Municipio De Chía
3,270	6	Concejo De Chía

Nota: Autoría propia.

Aunque en el mercado se encuentran varias marcas y potencia por cada panel, en el presente trabajo se tomó como referencia paneles de 250 W y un área por panel de 2 metros cuadrados. En el Anexo 2, se muestra la valoración por marca de paneles solares, cuya potencia nominal oscila entre 270 Wp y 330Wp; sin embargo, en el modelo de Excel, documento externo a este documento, se pueden cambiar los valores de acuerdo con la ficha técnica de los proveedores o fabricantes de los paneles.

El cálculo del área y número de paneles requerido para cada necesidad de consumo de energía se encuentra formulado en el modelo de Excel, el cual entrega el área requerida. Esta área debe ser verificada con el área del edificio gubernamental donde se requiere instalar la solución.

La implementación de energía generada a través del sol es viable técnicamente para ser implementada en entidades o edificios gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá, por las siguientes razones:

- a. Por cada 1kWp se pueden generar para Cajicá en el año 1.286 kWh y 1.222 kWh para Chía. Esto en función de la radicación del área y variaciones de esta en el año. Lo anterior significa que, mínimo, se puede sustituir energía de la red por solar en esta cantidad.
- b. La demanda de energía de las entidades gubernamentales está en un rango entre los 3.000 kWh/mes a 80.000 kWh/mes, es decir, se podría instalar la solución si las áreas lo permiten.
- c. La tecnología en paneles solares sigue avanzando, permitiendo el uso de menor área para generar más energía. En este trabajo no se considera el uso de nuevas tecnologías, pero, si se tiene la ficha técnica de los paneles, información que podría incluirse en el modelo la capacidad de cada panel en Wattios y el área de cada uno de estos.
- d. La vida útil de todos los componentes de la solución está catalogada superior a los 25 años, excepto las baterías que están entre 4 a 6 años.
- e. Los mantenimientos de los sistemas son periódicos dependiendo del tipo de trabajo requerido. Por ejemplo, para los paneles se enfocan en limpieza del polvo y mediciones de voltaje. Para los inversores es importante la limpieza de los disipadores de calor, sistema de filtrado y rejillas de protectoras de entrada de aire. Con respecto a los soportes, la búsqueda de grietas o deformaciones, ajuste de tornillos y tuercas, son cruciales. Por último, para las baterías, se recomienda la limpieza de la parte superior y de los bornes, así como los terminales de la conexión.

Valor agregado en la implementación del sistema fotovoltaico

La implementación del sistema en edificaciones gubernamentales de Chía y Cajicá tendría beneficios cualitativos que se pueden enmarcar en la confiabilidad del suministro de energía eléctrica, sin que afecte gestiones administrativas o labores propias de la atención de la salud. Las causas en el aumento de fallas en el servicio e inconformidades están dadas debido a caída de árboles sobre las redes aéreas, inundaciones de las cámaras de las redes subterráneas e ingreso de roedores a las subestaciones. Sobre esto, Enel-Condensa, operador en Sabana Centro, está realizando inversiones para bajar las interrupciones entre un 30% y un 26% en su frecuencia (Enel, 2020). Los niveles de confiabilidad se compensan con soluciones de autogeneración fotovoltaica autónoma.

La normatividad que protege al usuario ante fallas del sistema está dada a través de la resolución CREG 015 de 2018, donde se indica el procedimiento para remunerar las actividades de Distribución del SIN, particularmente en lo que se refiere a la calidad de la distribución del servicio eléctrico ofrecida por un operador de red (Enel, s.f.a). Dicha resolución establece que ésta será medida a través de indicadores que evalúan la duración y frecuencia de las interrupciones percibidas por los usuarios conectados a sus redes. Además, menciona los valores de referencia para el cálculo de los indicadores de calidad, el nivel de tensión, y desempeño del operador de red respecto a la meta establecida por el regulador, a partir de los cuales se determina la implementación de un esquema de incentivos y compensaciones a los usuarios. Son excluidos aquellos eventos requeridos por seguridad ciudadana, los debidos a catástrofes naturales, los debidos a actos de terrorismo, los menores o iguales a tres minutos, los debidos a

trabajos de reposición o modernización en subestaciones, entre otros. En el Anexo 3, se explican los indicadores de calidad de servicio.

En resumen, el usuario, en el contexto del presente trabajo, está protegido y compensado económicamente ante el no suministro de energía. Sin embargo, el usuario de los servicios de las entidades Gubernamentales es afectado por cortes de energía, viéndose expuesto a reprocesos y una posible baja de eficiencia de los funcionarios públicos. Por tal motivo, una solución fotovoltaica con uso de baterías podría ofrecer continuidad de los servicios, minimizando confusión a los usuarios de las entidades, y aumentando la eficiencia de los funcionarios. Lo cual se traduce en un mayor nivel de satisfacción del servicio que se ofrece.

Con referencia a la reducción de emisiones de CO₂, se multiplicó el factor de 0.591 tCO₂eq/MWh, por la energía no tomada de la red cuando se implementa una solución fotovoltaica, se llegó al resultado de la reducción de las emisiones de CO₂. Esta contribución se alinea con los objetivos de desarrollo planteados en la Agenda 2030 que, en este caso aplica para el objetivo número 13, que hace referencia a la reducción de emisiones totales de gases efectos invernadero en un 20%, cuyo responsable es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia propuso, en su meta para 2030, llegar a 267Mt CO₂ eq, lo que significa que desde el 2015, cuando se firmó el acuerdo al 2030, se debe reducir alrededor de 91.6Mt CO eq, representando un 5% adicional al compromiso inicial (MinAmbiente, 2020). Aunque el aporte de reducción es mínimo, propenderá para incentivar la implementación en un numero mayor de entidades gubernamentales que seguirán sumando para cumplir con esta meta.

De acuerdo con el modelo en Excel, la implementación de 1kWp en Chia y/o Cajicá evitaría emitir alrededor del 3 Ton de Co₂ al año. Este valor de reducción contribuye a los beneficios ambientales de la energía fotovoltaica, ya que es renovable e inagotable en la medida

de disponibilidad del sol lo que la lleva a un sistema energético sostenible. Un segundo beneficio de la implementación de este tipo de soluciones es que no emite gases de efecto invernadero. Finalmente, hay que enfatizar en que no es contaminante, ya que no emite sustancias tóxicas ni contaminantes del aire, es decir, que, de acuerdo con Acciona (s.f.), se estaría contribuyendo a la reducción de enfermedades respiratorias como el asma; ni genera residuos ni contaminación del agua.

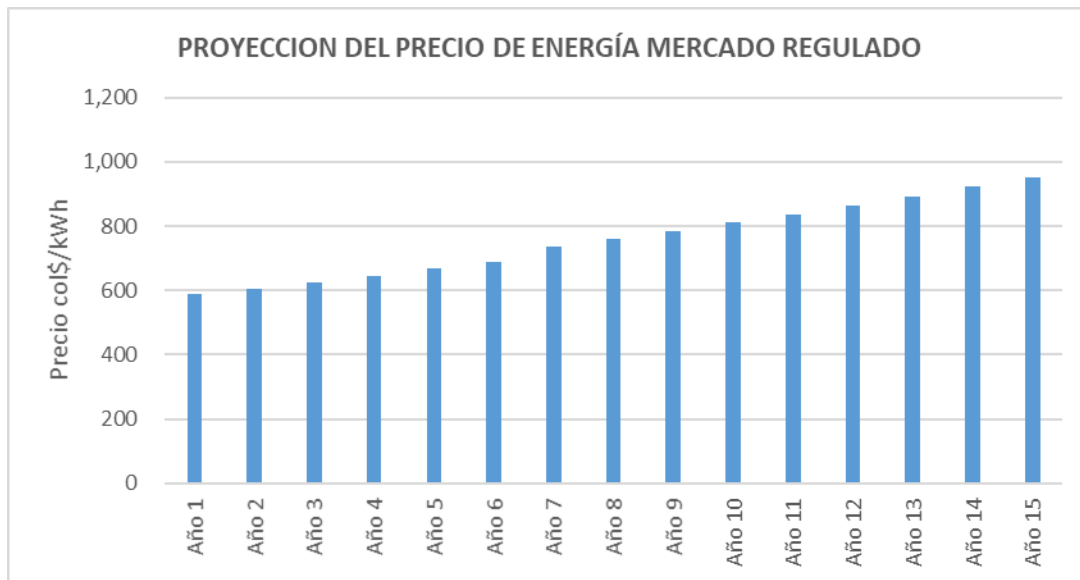
Viabilidad financiera en la implementación del sistema fotovoltaico

La implementación de los sistemas fotovoltaicos en estos dos municipios no solo tiene la viabilidad técnica y un beneficio ambiental, sino que para ser sostenible debe ser económicamente viable. Para tal fin, el Gobierno Colombiano ha implementado la Ley 1715 de 2014, la cual busca incentivar su aplicación, a través de beneficios económicos en deducción de renta, exclusión del IVA, depreciación línea recta y retirada de aranceles para productos vinculados a fuentes de energías renovables. El presente trabajo desarrolló un flujo de caja a 15 años con las variables que se mencionaron en la Tabla 7 de la metodología.

Los precios se proyectaron extrapolando hasta el año 15, arrojando un 3% de incremento. En la Tabla 14, se muestra el comportamiento del costo para el mercado regulado, sector al que pertenecen las entidades gubernamentales.

Tabla 14.

Proyección del precio de energía en el mercado regulado



Nota: Autoría propia.

El costo de energía sin y con solución fotovoltaica, hace referencia al costo de la energía que se pagará año a año al implementar o no la solución fotovoltaica. Este costo es el resultado de multiplicar el consumo anual de energía por la proyección del precio. Anualmente, la UPME realiza periódicamente proyecciones de los precios, los cuales pueden ser digitalizados en el modelo con la finalidad de actualizar el análisis económico. La diferencia de estos dos costos resulta el Ahorro Anual, es decir, el ahorro que se genera por dejar de consumir de la red eléctrica gracias al uso de soluciones fotovoltaicas.

Con base en los entregables dentro del reporte del modelo, se podrá determinar la viabilidad de la implementación de la solución. Si llegase a no ser viable, se podrían realizar sensibilidades cambiando datos del alcance, como porcentaje de cobertura de demanda; tipo sistema fotovoltaica de autónoma a conexión a la red; o por ejemplo la tasa mínima de retorno.

Por último, desde el punto de vista económico el modelo entrega un presupuesto de los principales componentes del sistema. Este presupuesto corresponde a la clase 5, a partir de la

clasificación de la American Association for the Advancement of Cost Engineering International [AAACE] (Ledesma, 2019), la cual se muestra en la Figura 11.

CLASE DEL ESTIMADO	ETAPA DEL PROYECTO EN TERMINOS DE % DE AVANCE	ETAPA DEL PROYECTO	RANGO ESPERADO DE PRECISION
Clase 5	0% a 2%	Evaluación Conceptual -Valores de Referencia	I: -20% a -50% S: +30% a +100%
Clase 4	1% a 15%	Estudio o factibilidad	I: -15% a -30% S: +20% a +50%
Clase 3	10% a 40%	Diseño detallado	I: -10% a -20% S: +10% a +30%
Clase 2	30% a 75%	Control de oferta	I: -5% a -15% S: +5% a +20%
Clase 1	65% a 100%	Estimado para chequeo de oferta	I: -3% a -10% S: +3% a +15%

Figura 11. Precisión de costos de un proyecto. Fuente: Ledesma (2019)

El reporte del modelo muestra la Figura 12 con el porcentaje de cada uno de los principales costos.

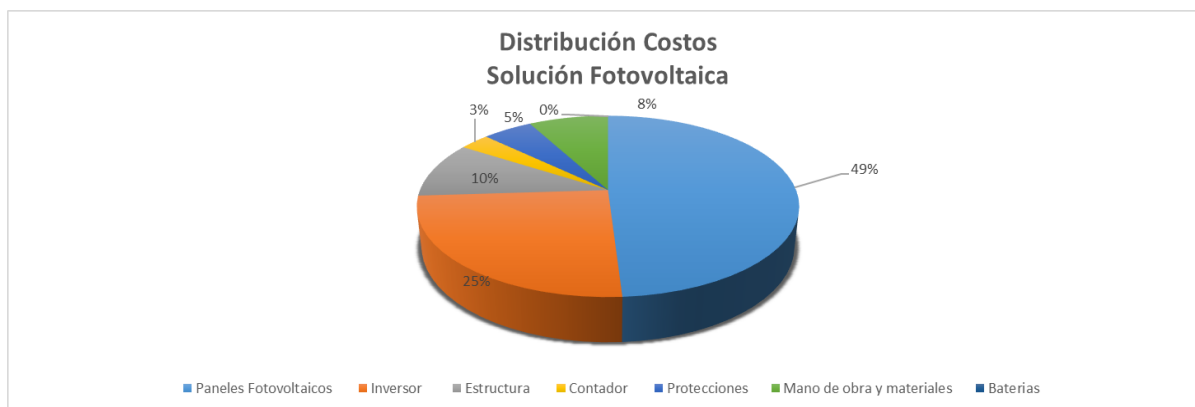


Figura 12. Distribución costos solución fotovoltaica

Así mismo, el modelo muestra una tabla que indica cuánto podría costar los componentes principales del sistema fotovoltaico. La Tabla 15 muestra este entregable del reporte.

Tabla 15.

Estimación de costos fotovoltaicos

Elemento	Costo (COP)
Paneles Fotovoltaicos	\$92,690,360
Inversor	\$47,291,000
Estructura	\$18,916,400
Contador	\$5,674,920
Protecciones	\$9,458,200
Mano de obra y materiales	\$15,133,120
Baterías	-

Nota: Autoría propia

El costo de la solución fotovoltaica esta calculado con base en las métricas descritas en la metodología

Se realizó la comparación del modelo con los documentos que se referencian en el estado del arte (Peñaloza, 2020; Beltrán, Poveda, & Carvajal, 2018; Guevara & Pérez, 2015). A partir de ello, para tener la mayoría de las variables y realizar un ajuste detallado, se escogió como modelo de contraste el proyecto realizado por Guevara y Pérez (2015). La comparación de los resultados se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.

Comparación entre proyecto de Guevara y Pérez, y el presente modelo

Proyecto	Unidad	Data	Resultados del Modelo	Desviación
Consumo día	kWh	86		

Área	m2	117	109	7%
Paneles	#	48	64	-33%
TIR	#	7%	8%	-10%
Periodo de recuperación de la Inversión		9	8.9	1%
Costo energía solar		414	322	22%
Reducción CO2		177.5	219	-23%
Costo	\$	143,589,364	\$ 168,000,000	-17%

Nota: Autoría propia

Por otro lado, desde el punto de vista técnico, se realizó el comparativo de tres proyectos de la empresa Vatia en Colombia (s.f.). Los comparativos entre dichos proyectos y los resultados del modelo se presentan en el Apéndice C.

El modelamiento de diferentes condiciones de demanda de energía determina que las energías renovables son más económicas que las energías convencionales, en este caso la red. Los costos de las tecnologías renovables o limpias están bajando sus costos, de tal forma que se convierten altamente competitivas con las convencionales. Las economías de escala y su continua innovación están logrando que las energías limpias sean la solución más sostenible, no sólo ambiental sino también económicamente. La presente investigación, al igual que el modelo, incentiva a profundizar en estudios que permitan su implementación en edificaciones gubernamentales de Chía y Cajicá.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos y de la revisión teórica realizada, es pertinente reconocer que el modelo es una herramienta para enmarcar desde la prefactibilidad un proyecto de implementación solar en entidades gubernamentales, edificios o casas residenciales y algunas

industrias como clase 5. Así mismo, permite entregar información técnica básica y conceptual, además de financiera con una desviación tolerable en una primera etapa de conceptualización del proyecto. El modelo y presente trabajo, desarrollan una metodología sin un nivel de detalle técnico profundo, sin embargo se debe tener en cuenta la normatividad técnica como el RETIE, resolución 90708 de 2013; RETILAP, reglamento técnico de Iluminación y alumbrado público; RETIQ, Reglamento Técnico de Etiquetado, Resolución 40234 de marzo de 2017; NTC ISO-50001, establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, inclusive el uso y consumo de la energía.

Proyecto de esta índole conllevarían a que en los municipios de Chia y Cajicá se pudiesen generar en el año 1.286 kWh y 1.222 kWh respectivamente por cada 1kWp, esto en función de la radicación del área y variaciones de esta en el año. Esto indica que mínimo se puede sustituir energía de la red por energía solar en estas magnitudes, significando un aporte importante al contexto; se suma a la viabilidad técnica el uso de baterías para almacenar desde horas hasta días energía que puede ser utilizada tanto para cortes de energía como para sustituir un 100% la toma de energía del sistema Interconectado Nacional; así mismo depende de la actividad propia del edificio y la confiabilidad del suministro de energía; para Chia y Cajicá se recomienda máximo un día por la alta confiabilidad del sistema de distribución de energía. Los aportes, en este sentido, vienen en términos del medio ambiente. Los beneficios ambientales en la implementación de la energía fotovoltaica son numerosos, ya que (1) es renovable, (2) sostenible, (3) no emite gases de efecto invernadero, por lo que no contribuye al calentamiento global, y (4) no es contaminante de la atmosfera ni del agua. De igual forma, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por consumo de energía fotovoltaica contribuye a mitigar el impacto directo al cambio climático, aportando así a soluciones

ambientales esenciales en la actualidad. Además, la ventaja de su implementación es que la energía se produce en el mismo lugar, contando con espacio disponible suficiente evitando traslados o remodelación de las instalaciones.

En estas mismas líneas, la implementación de un sistema de generación eléctrica a través de Paneles Fotovoltaicos es una solución sostenible, poco intrusiva, con buena aceptación social, de alta durabilidad entre 20 a 25 años de vida útil e impulsada por leyes para apremiar su implementación (Gana Energía, 2019). Esto la convierte en una de las soluciones más interesantes a nivel de energías renovables no convencionales en entidades gubernamentales. Encontrar estos beneficios en el proyecto planteado y la generación del modelo presentado, puede influir en la promoción de este tipo de proyectos en la zona. Su éxito y viabilidad permite sentar precedente para que otras entidades de otros municipios de Sabana Centro puedan viabilizar un proyecto y fortalecer la apuesta por este tipo de iniciativas. Los resultados del modelo determinan la viabilidad de la implementación de la solución; si llegase a no ser viable se podrán realizar sensibilidades hasta lograr enmarcarlo en la viabilidad económica tomando en consideración que el costo de una instalación fotovoltaica puede verse influenciado por elementos de diseño como la inclinación del tejado, la orientación o el sombreado, vida útil del sistema, por ende, el costo por kWh no tiene una ecuación universal.

El presente trabajo y modelo en Excel generarán nuevos conocimientos para aquellos usuarios que requieren entender de forma básica las principales variables para implementar un sistema fotovoltaico como solución para disminuir costos de energía, reducir emisiones de CO₂ y ser innovadores en entidades gubernamentales, extrapolando a la industria, viviendas residenciales o zonas no interconectadas. Así mismo, el presente trabajo enfocado a la prefactibilidad de la implementación fotovoltaico abre las puertas para proceder a la etapa de

estudio de factibilidad específico para un edificio o edificios gubernamentales en donde determine el usuario; en estudios posteriores se podrían involucrar factores cualitativos que puedan afectar o interferir con el proyecto final, entre los que se puede sugerir son: obstáculos, riesgos del proyecto, cómo garantizar los recursos económicos y retos para su aprobación.

Referencias

Acciona. (s.f.). *Energía Solar Fotovoltaica*. Recuperado de

<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>

Agredano, J. (2008). Los sistemas fotovoltaicos. *Suelo Solar*. Recuperado de

<https://suelosolar.com/noticias/fotovoltaica/mexico/10-8-2008/los-sistemas-fotovoltaicos>

América Fotovoltaica. (s.f.). *Venta de excedentes*. Recuperado de

<http://www.americafotovoltaica.com/venta-de-excedentes/>

Beltrán, A., Poveda, M., & Carvajal, D. (2018). *Estudio de prefactibilidad para la*

implementación del sistema de energización solar fotovoltaico para el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Villavicencio (Tesis de grado, Universidad Cooperativa De Colombia, Villavicencio, Colombia). Recuperado de

<https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/6272>

Comisión Europea. (2019). *Photovoltaic Geographical Information System*. Recuperado de

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP

Datos Abiertos Colombia. (2021). *Universo de Entidades*. Recuperado de

<https://www.datos.gov.co/Funci-n-p-blica/Universo-de-entidades/h7zv-k39x>

Departamento Nacional de Planeación. (s.f.a). *Energía asequible y no contaminante*. Recuperado de <https://www.ods.gov.co/es/objetivos/energia-asequible-y-no-contaminante>

Departamento Nacional de Planeación. (s.f.b). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.ods.gov.co/es>

Díaz, T., & Carmona, G. (2018). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. McGraw Hill. Recuperado de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Elecam. (2019). *¿Qué es un sistema fotovoltaico? Tipos de sistemas*. Recuperado de <https://elecam.net/que-es-un-sistema-fotovoltaico-tipos-de-sistemas-2/>

Enel. (s.f.a). *¿Sabías que entran en vigencia las compensaciones por fallas del servicio según la resolución de la CREG?* Recuperado de <https://www.enel.com.co/es/personas/servicio-al-cliente/compensaciones-por-servicio/compensaciones-creg.html>

Enel. (s.f.b). *¿En qué consiste las gráficas de duración y frecuencia de interrupciones de luz?* Recuperado de <https://www.enel.com.co/es/personas/servicio-al-cliente/compensaciones-por-servicio/en-que-consiste-las-graficas-de-duracion-y-frecuencia-de-interrupciones-de-luz.html>

Enel. (2018). *Codensa instalará más de 400 paneles solares en la empresa de licores más grande de Suramérica*. Recuperado de <https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d201808-codensa-instalar-ms-de-400-paneles-solares-en-la-empresa-de-licores-ms-grande-de-suramrica.html>

- Enel. (2020). *#Aquí estamos para contarte qué pasa con el servicio*. Recuperado de <https://www.enel.com.co/es/personas/2020-un-gran-reto-para-la-energia.html>
- Enerdata. (2020). *Consumo energético total*. Recuperado de <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Factor Energía. (2020). *Energía Solar: todo lo que tienes que saber*. Recuperado de <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo/energia-solar/>
- Gana Energía. (4 de septiembre, 2019). *Los beneficios de la energía solar*. Recuperado de <https://ganaenergia.com/blog/los-beneficios-de-la-energia-solar/>
- Guevara, C., & Pérez, M. (2015). *Análisis de viabilidad del suministro de energía eléctrica a la granja la fortaleza ubicada en Melgar – Tolima mediante la implementación de un sistema solar fotovoltaico* (Tesis de grado, Universidad Libre, Bogotá, Colombia). Recuperado de <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7962>
- HelioEsfera. (2020). *Diagrama de un sistema fotovoltaico*. Recuperado de <https://www.helioesfera.com/diagrama-sistema-fotovoltaico/>
- HG. (2020). *En Colombia, ya puedes ser autogenerador y vender los excedentes a la red eléctrica*. Recuperado de <https://www.hgingenieria.com.co/sabias-que-puedes-ser-autogenerador-y-vender-los-excedentes-a-la-red-electrica/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales [IDEAM] (s.f.a). *Aspectos Teóricos del Atlas*. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (s.f.b). *Promedios mensuales de brillo solar para todas las estaciones del país (horas de sol al día)*.

Recuperado de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/6.Anexo_Promedios-mensuales-de-brillo-solar.pdf

Ledesma, L. (2019). Capex y/o Presupuesto de los Proyectos. PIV Ingeniería. Recuperado de <https://www.pivingeneria.com/blog/capex-y-presupuesto-de-los-proyectos>

MinAmbiente. (2020). *NDC de Colombia – Actualización 2020, 5 de octubre*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Peñaloza, E. (2020). *Estudio de Factibilidad para la creación de un Sistema de autogeneración de Energía Solar fotovoltaica para la Sede CCVA De Cúcuta*. (Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Cucutá, Colombia). Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/34039>

Perpiñán, O. (2020). *Energía Solar Fotovoltaica*. Recuperado de <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>

Quk. (15 de julio, 2011). *El comportamiento de la radiación solar en la Tierra*. El Blog de Quk. Recuperado de <https://www.blogdequk.com/2011/07/el-comportamiento-de-la-radiacion-solar.html>

Resolución 00303 de 2018 [Autoridad Nacional de Licencias Ambientales]. Por la cual se expide una Certificación de Beneficio Ambiental por Nuevas Inversiones en Proyectos de Fuentes No Convencionales de Energías Renovables - FNCER y Gestión Eficiente de la Energía, para la exclusión del Impuesto Sobre las Ventas – IVA de AMERICANA DE

TECNOLOGÍA Y COMUNICACIONES S.A.S., y ENERGÍA VITAL Co. S.A.S., y se toman otras determinaciones. 2 de marzo de 2018.

Ruiz, E. (2020). ¿Cuál es la vida útil de los paneles solares fotovoltaicos? *Solar Plus*.

Recuperado de <https://solarplus.es/vida-util-de-paneles-solares>

Ruiz, J., González, D., Benítez, M., & Barrera, D. (2019). Implementación del Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería (113), 21-29. Recuperado de

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci/article/view/80>

Sánchez, P. (2020). Colombia: los 271 proyectos fotovoltaicos vigentes en el país suman 8.855

MW. *PV Magazine*. Recuperado de [https://www.pv-magazine-](https://www.pv-magazine-latam.com/2020/08/07/colombia-los-271-proyectos-fotovoltaicos-vigentes-en-el-pais-suman-8-855-mw/)

[latam.com/2020/08/07/colombia-los-271-proyectos-fotovoltaicos-vigentes-en-el-pais-suman-8-855-mw/](https://www.pv-magazine-latam.com/2020/08/07/colombia-los-271-proyectos-fotovoltaicos-vigentes-en-el-pais-suman-8-855-mw/)

Sánchez, A. (2021). Demanda de energía cayó 2,6% en 2020 frente a 2019, solo en diciembre se redujo 1,5%. *La República*. Recuperado de

<https://www.larepublica.co/economia/demanda-de-energia-cayo-26-en-2020-frente-a-2019-solo-en-diciembre-se-redujo-15-3110067>

Ser Colombia. (s.f.). *Mercados Colombia*. Recuperado de <https://ser-colombia.org/mercados-colombia/>

Servicio Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios [SUI]. (2021).

Energía/Comercial/Consolidado Energía por Empresa y Departamento. Recuperado de

http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_095

SunFields Europe. (s.f.). *¿Cómo se construye un módulo fotovoltaico? – Laminación, curado y enmarcado*. Recuperado de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-laminacion-curado-y-enmarcado/>

SunFields Europe. (2011). *Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma*. Recuperado de https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/08/Sunfields_Manual-Calculo_Fotovoltaica_Autonomas.pdf

SunnyTools (s.f.). Beneficios de los sistemas fotovoltaicos para el sector Residencial, comercial y productivo [Diapositiva de PowerPoint]. Cortolima. https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/foros/Beneficios_de_los_sistemas_fotovolcaicos_para_el_sector_Residencial_comercial_y_productivo.pdf

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2020). *Boletín Tarifario de energía. Enero–marzo 2020*. Recuperado de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Boletines/2020/Jul/boletin_tarifario_energia_i_trim-2020_10072020.pdf

Todo Productividad. (21 de febrero, 2010). *Factores que afectan al rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas*. Recuperado de <http://todoproductividad.blogspot.com/2010/02/factores-que-afectan-al-rendimiento-de.html>

Trace Software. (s.f.). *¿Cuáles son los factores que afectan la eficiencia de los paneles solares?* Recuperado de <https://www.trace-software.com/es/cuales-son-los-factores-que-afectan-la-eficiencia-de-los-paneles-solares/>

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Recuperado de http://www.upme.gov.co/Atlas_Radiacion.htm

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá, Colombia. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2020a). *Informe de Registro de Proyectos de Generación*. Recuperado de http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2020/Registro_octubre_2020.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2020b). *Proyección demanda de energéticos ante el COVID-19 2020-2026*. Recuperado de <http://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Proyecciones-de-demanda.aspx#:~:text=Los%20resultados%20de%20la%20proyecci%C3%B3n%20de%20demanda%20presentan%20diferencias%20con,sino%20hasta%20despu%C3%A9s%20de%202026>.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2020c). *Cálculo del factor de emisiones de la Red de Energía Eléctrica en Colombia*. Recuperado de https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_FE_del_SIN_2019_Dic_2020.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2020d). *Cálculo del factor de emisiones de la Red de Energía Eléctrica en Colombia. Documento soporte*. Recuperado de

http://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Documento_soporte_de_calculo_FE.pdf

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región Central*. Recuperado de <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf>

Universidad Nacional de Colombia. (2007). *Caracterización del consumo de energía final en los sectores terciario, grandes establecimientos comerciales, centros comerciales y determinación de consumos para sus respectivos equipos de uso de energía final*. Recuperado de <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/940/1/Informe%20Final%20v%201.pdf>

Valora Analitik. (8 de junio, 2021). *Colombia registra récord en beneficios tributarios para energías renovables*. Recuperado de <https://www.valoraanalitik.com/2021/06/08/colombia-registra-record-beneficios-tributarios-energias-renovables/>

Vatia (s.f.). *Energía Solar*. Recuperado de <https://vatia.com.co/Portafolio/Soluciones-de-eficiencia-energ%C3%A9tica-cero-inversi%C3%B3n/Energ%C3%ADa-Solar>

XM (2020, 6 de febrero). *En Colombia Factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164,38 gramos de CO2 por kilovatio hora* [Comunicado]. Recuperado de <https://www.xm.com.co/Paginas/detalle-noticias.aspx?identificador=2383>

XM (2021, 23 de abril). *Demanda de energía en Colombia, un año después del inicio de la pandemia* [Comunicado]. Recuperado de

<https://www.xm.com.co/Documents/Comunicados/2021/Comunicado%20Decrecimiento%20demanda%20de%20energ%C3%ADa%20Marzo%202021.pdf>

Apéndices

Apéndice A.

Entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá

La Tabla 1 del presente Apéndice fue construida con la información de las entidades gubernamentales de los municipios focalizados por la investigación.

Tabla 1.

Entidades gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá

Código Institución	Nombre	NIT	Naturaleza Jurídica
Cajicá			
3516	Hospital Profesor Jorge Cavelier	832002436-6	Empresas Sociales del Estado
4662	Instituto Municipal De Cultura Y Turismo De Cajicá	900132302	Establecimiento Público
1330	Asociación De Municipios De Sabana Centro - Asocentro	800177622	Establecimiento Público
4001	Empresa De Servicios Públicos De Cajicá S.A.	832002386	Empresas de Servicios Públicos Domiciliarios Oficiales
175	Alcaldía De Cajicá	899999465	Alcaldía
4757	Instituto Municipal De Deporte Y Recreación De Cajicá	800185515	Establecimiento Público
4734	Instituto Municipal De Vivienda De Interés Social De Cajicá	900132308	Establecimiento Público
1743	Concejo De Cajicá	899999465	Concejo Municipal
5126	Personería De Cajicá	899999465	Personería Municipal
Chía			

1366	Instituto De Desarrollo Urbano, Vivienda Y Gestión Territorial De Chía	900806301	Establecimiento Público
3566	Hospital San Antonio De Chía	899999156	Empresas Sociales del Estado
4717	Instituto Municipal De Recreación Y Deporte De Chía	800201907	Establecimiento Público
4045	Empresa De Servicios Públicos Solidarios De Chía - Emserchia	899999714	Empresas de Servicios Públicos Domiciliarios - Oficiales
346	Alcaldía De Chía	899999172	Alcaldía
4892	Personería De Chía	899999172	Personería Municipal
8363	Secretaría De Educación Del Municipio De Chía	NULL	Secretaría de Despacho
1671	Concejo De Chía	899999172	Concejo Municipal

Nota: Tabla adaptada de Datos Abiertos Colombia (2021).

Apéndice B**Consumo de energía de las entidades gubernamentales estudiadas**

Tabla 1.

Estimación consumo de energía entidades Gubernamentales de los municipios de Chía y Cajicá

Código de Institución	Nombre	Consumo calculado mes (kWh)
Cajicá		
3516	Hospital Profesor Jorge Cavelier	76,173
4662	Instituto Municipal De Cultura Y Turismo De Cajicá	5,364
1330	Asociación De Municipios De Sabana Centro – Asocentro	3,994
4001	Empresa De Servicios Públicos De Cajicá S.A.	3,994
175	Alcaldía De Cajicá	4,021
4757	Instituto Municipal De Deporte Y Recreación De Cajicá	5,364
4734	Instituto Municipal De Vivienda De Interés Social De Cajicá	3,270
1743	Concejo De Cajicá	3,270
5126	Personería De Cajicá	3,270
Chía		
1366	Instituto De Desarrollo Urbano, Vivienda Y Gestión Territorial De Chía	3,270
3566	Hospital San Antonio De Chía	70,419
4717	Instituto Municipal De Recreación Y Deporte De Chía	5,364

4045	Empresa De Servicios Públicos Solidarios De Chía - Emserchia	3,994
346	Alcaldía De Chía	4,021
4892	Personería De Chía	3,270
8363	Secretaría De Educación Del Municipio De Chía	3,270
1671	Concejo De Chía	3,270

Nota: Autoría propia

Apéndice C

Comparativa entre proyectos ya implementados en Colombia y el modelo propuesto

En las Figuras 1, 2, y 3, se presenten comparativas del modelo con proyectos implementados por Vatia. Las desviaciones están dentro del rango de incertidumbre entre el $\pm 20\%$ a $\pm 50\%$; la serie 1 corresponde a los datos de Vatia, la serie 2 a los resultados del modelo y la serie 3 a la desviación.

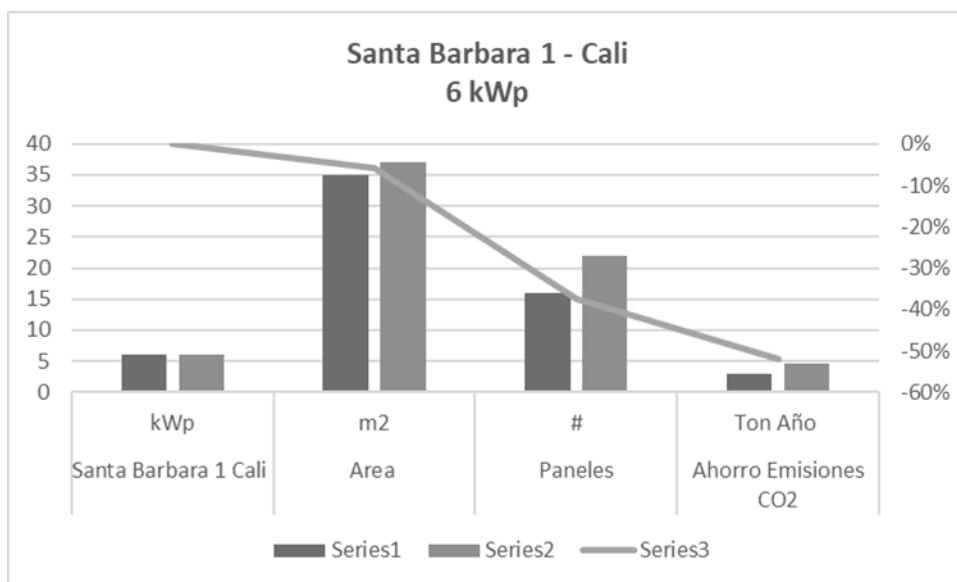


Figura 1. Comparativa con proyecto Santa Barbara 1, Cali

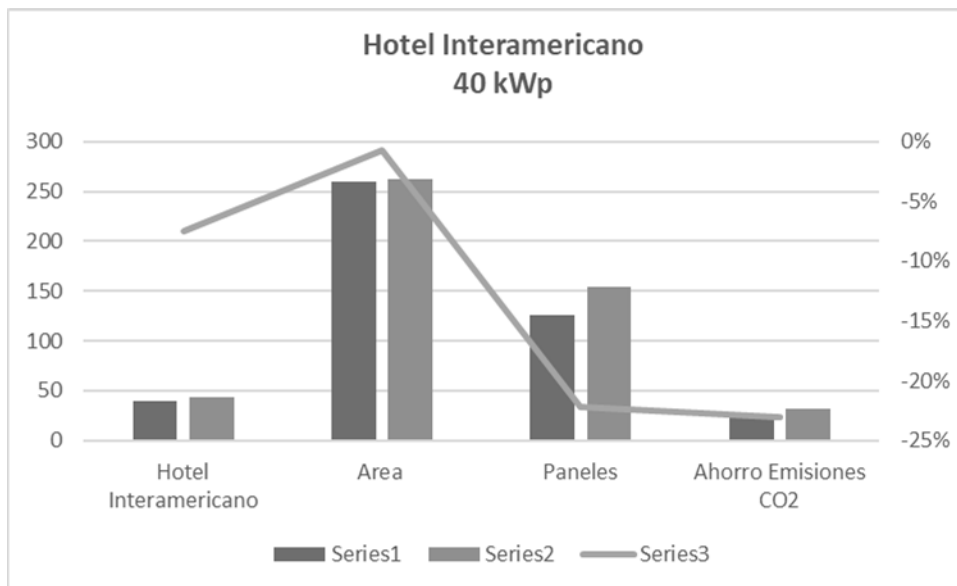


Figura 2. Comparativa con proyecto Hotel Interamericano

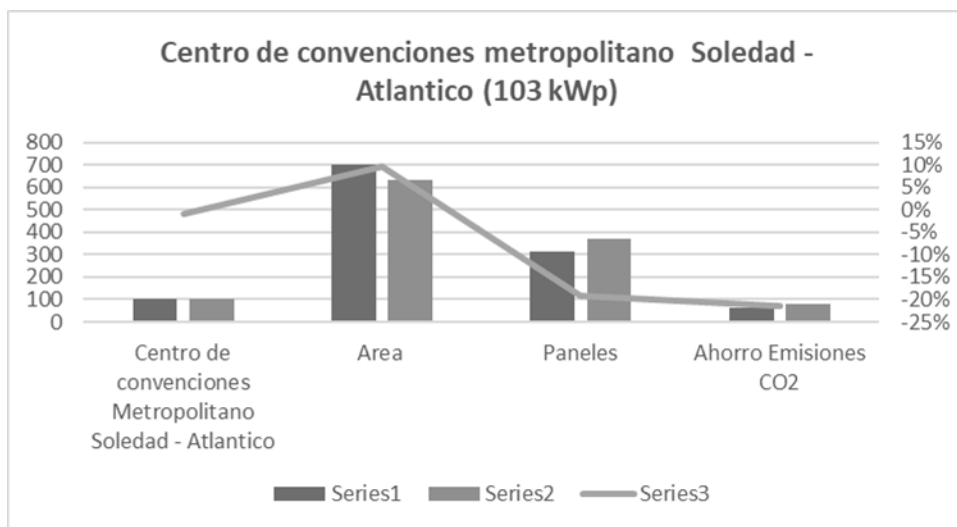


Figura 3. Comparativa con proyecto Centro de convenciones metropolitano Soledad, Atlántico

Anexos

Anexo 1

enel codensa

Cr. 13A No. 93-66 - www.enel.com.co

¿Quieres tu factura virtual? Escanea el código

earth pact PAPEL ECOLÓGICO

Número de Cliente: **0764442-1**
Cita este número para pagos y consultas

CLIENTE
PALACIO MUNICIPAL
CAL 2 N 4 07
CAJICA 5000 8 01 815
CAJICA - CAJICA

REPARTO ESPECIAL
13738

RESUMEN EJECUTIVO
Factura de Servicios Públicos No. 626477431-3
Periodo facturado 27 ENE/2021 A 25 FEB/2021
Fecha expedición 17/marzo/2021
Próxima fecha de lectura 29 MAR/2021
Total a Pagar \$0
Cuenta padre No.

DATOS TÉCNICOS
Ruta: 5000 8 02 836 1203 SCCJU08904 Transformador: 42433TR1
Tipo de Servicio: 0 Oficial Activo: Uso 7
Estrato: 70349120 0 Carga (kW): 3
Medidor No.: 1 Red: Aerea
Nivel de Tensión: 1 Nivel de Referencia: Nivel II
Circuito: C.J22 Nivel de Tensión Ref: Nivel II
Propiedad: Empresa
Anomalia: Normal
Lectura: Real

COMPORTAMIENTO DE CONSUMO
Bar chart showing monthly consumption in kWh from September to March. Consumption is relatively stable, around 300-400 kWh per month.

CONTACTANOS
LÍNEA DE ATENCIÓN EMPRESARIAL: 6 016 000
EMERGENCIAS: 6 016 000 Opción 1
DENUNCIAS: 5 894 894
DEFENSOR DEL CLIENTE: <https://www.enel.com.co/es/personas/defensor-cliente.html>
@CodensaEnergia App Móvil Enel-Codensa
www.enel.com.co
servicioalcliente.empresarial@enel.com

¡Este mes tuvimos acceso a la LECTURA DE TU MEDIDOR y tu CONSUMO de energía se encuentra dentro de lo habitual!

ENERGÍA
Tipo de Lectura: Real Situación encontrada: Normal

CONCEPTOS FACTURADOS
Promedio activa de los últimos 6 meses: 4022 Promedio reactiva de los últimos 6 meses: 0

Concepto	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Factor	Energía Consumida	Energía Facturada	Precio Unitario	VALOR
CONSUMO ACTIVA SENCILLA	39441	35420	4021	1	4021	4021	541.4943	\$2,177,349
CONSUMO DE ENERGÍA								\$0
541.4943 (Valor kWh)x4021 (Consumo en kWh)								\$2,177,349
SUBTOTAL VALOR CONSUMO								\$155,442
ALIMBRADO PÚBLICO ART 19 1 PAR. 2 CCU								\$-2,332,791
CARGO CREDITO CLIENTE HIJO								\$-2,177,349
SUBTOTAL VALOR OTROS								
1 TOTAL ENERGÍA:								\$0

Pago oportuno 09 MAR/2021
Suspensión por no pago 11 MAR/2021
Número de cuenta 0764442-1

USO SEGURO DE LA ENERGÍA
Al comprar equipos considera el criterio de eficiencia energética, esencialmente en sistemas de iluminación.

Figura 1. Recibo de energía del Palacio Municipal

Anexo 2

Marca	En general	Cualidad	Eficiencia	Fiabilidad	Relación calidad-precio
1 REC	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
2 QCells	4.9	5.0	5.0	4.5	5.0
3 Jinko	4.8	4.0	5.0	5.0	5.0
4 LG Solar	4.8	5.0	5.0	5.0	4.0
5 Panasonic	4.8	5.0	5.0	5.0	4.0
6 Ja Solar	4.6	4.0	5.0	4.5	5.0
7 Sharp	4.6	4.0	4.5	5.0	5.0
8 SolarWatt	4.6	5.0	4.0	5.0	4.5
9 SunPower	4.6	5.0	5.0	4.5	4.0
10 ZNShine	4.6	4.0	4.5	5.0	5.0
11 Bruk-bet	4.5	4.5	4.5	5.0	4.0
12 Seraphim	4.5	4.5	5.0	3.5	5.0
13 Trina Solar	4.5	4.0	4.5	4.5	5.0
14 Axitec	4.4	4.5	4.5	4.0	4.5
15 FuturaSun	4.4	4.5	5.0	3.5	4.5
16 LONGi	4.4	4.5	4.5	3.5	5.0
17 Selfa	4.4	4.5	4.0	4.5	4.5

Figura 1. Valoración marcas de paneles solares. Fuente: Ruiz (2020)

Anexo 3

Los indicadores de calidad de servicio se muestran en la Figura 1.

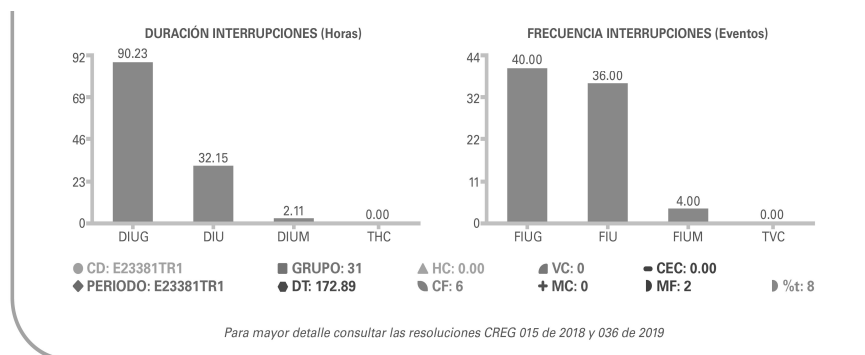


Figura 1. Calidad del servicio – Enel Condensa. Fuente: Enel (s.f.b)

Enel (s.f.b.) indica el significado de las siglas y convenciones presentes en la Figura 1. Al respecto, afirma que

La duración por interrupciones se refiere a las horas totales que no se contó con el servicio:

DIUG: Duración máxima anual en horas de eventos que deben recibir los usuarios.

DIU: es el total acumulado en horas de los eventos percibidos por el usuario, en un periodo de doce meses que termina en el mes de evaluación.

DIUM: es la duración en horas de todos los eventos percibidos por el usuario, durante el mes de evaluación.

THC: es el total de horas compensadas al usuario durante los últimos 12 meses, por nivel de tensión y por grupo de calidad, hasta el mes anterior.

Y la compensación por frecuencia de interrupciones o eventos:

FIUG: número máximo anual de eventos (servicio) que deben recibir los usuarios del operador de red.

FIU: número total acumulado de eventos percibidos por el usuario, en un periodo de doce meses que termina el mes de evaluación.

FIUM: Número total de eventos percibidos por el durante el mes de la evaluación.

TVC: Total de eventos compensados al usuario, conectado al nivel de tensión n , que pertenece al grupo de calidad q , hasta el mes anterior. (Enel, s.f.b, párrafo 1 y 2)