

UNIVERSIDAD DE LA SABANA



Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de Ingeniería

**Evaluación para proyectos de implementación de sistemas solares fotovoltaicos en la
infraestructura gubernamental de Sabana Centro**

Chía, 2021

Presentación de trabajos de grado

Informe final

**EVALUACIÓN PARA PROYECTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS
SOLARES FOTOVOLTAICOS EN LA INFRAESTRUCTURA GUBERNAMENTAL DE
SABANA CENTRO**

Ana María Castro González

Tutor

Manuel Alfredo Figueredo Medina

Andrés Felipe Cardona Ortegón

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia Ingeniería

Chía, 2021

RESUMEN

En la búsqueda de alcanzar los compromisos adquiridos en la COP21¹, con la promoción del desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía renovable, surge en Colombia la necesidad de incentivar la generación de energía eléctrica a partir de estas fuentes, aprovechando el potencial energético del país.

Para tal propósito, esta investigación ofrece a las entidades públicas de Sabana Centro (Cundinamarca) una evaluación para proyectos de implementación de sistemas solares fotovoltaicos, para la cual se han identificado y seleccionado factores legales, técnicos y financieros que deben ser tenidos en cuenta en su implementación, a fin de realizar la evaluación financiera, a través de una herramienta, que permite conocer el dimensionamiento estimado del sistema, el valor estimado de la inversión y el tiempo de retorno de la inversión.

ABSTRACT

In Colombia arises the need to encourage the generation of electric energy from non-conventional renewable energy sources to achieve the commitments acquired at COP21 taking advantage of the country's energy potential.

For this purpose, this research offers public entities of Sabana Centro (Cundinamarca) an evaluation for the implementation of solar photovoltaic system projects. Legal, technical, and financial factors that must be considered in their implementation have been identified and selected to perform the financial evaluation, through a tool that allows knowing the estimated sizing of the system, the estimated value of the investment and the time of return of the investment.

Palabras clave: Colombia, Sabana Centro, solar fotovoltaica, entidades públicas.

¹ Conferencia sobre Cambio Climático en París

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	PROBLEMA.....	11
	Antecedentes	11
	Pregunta problema	18
3.	JUSTIFICACIÓN	19
4.	OBJETIVOS	22
	Objetivo General	22
	Objetivos Específicos.....	22
5.	MARCO TEÓRICO.....	23
	Estado del arte.....	28
6.	METODOLOGÍA	34
7.	RESULTADOS.....	40
8.	CONCLUSIONES	50
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
10.	ANEXO A.....	57
11.	ANEXO B	59
12.	ANEXO C.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación porcentual por sectores en el consumo final de energía 1975-2018 _____	12
Figura 2. Participación porcentual de fuentes de energía en la composición de la oferta 1975-2018 _____	12
Figura 3. Zonas de mayor intensidad de radiación global en Colombia _____	24
Figura 4. Irradiación global horizontal en Cundinamarca _____	24
Figura 5. Irradiación global horizontal en Sabana Centro _____	25
Figura 6. Esquema de un sistema solar fotovoltaico autónomo. _____	26
Figura 7. Interfaz herramienta para la evaluación de proyectos de sistemas solares fotovoltaicos para el sector público. _____	39
Figura 8. Dimensionamiento del número de paneles para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	42
Figura 9. Dimensionamiento de los elementos principales del sistema On-grid y sus costos para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	42
Figura 10. Comportamiento inversión de activos (depreciación en 7 años) para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	43
Figura 11. Incidencia del ahorro en el consumo de energía para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	43
Figura 12. Análisis de viabilidad financiera, TIR, Periodo de recuperación y VP de los flujos sin inversión para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	44
Figura 13. Dimensionamiento del número de paneles para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	45
Figura 14. Dimensionamiento de los elementos principales del sistema On-grid y sus costos para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	46
Figura 15. Comportamiento inversión de activos (depreciación en 5 años, escenario propuesto por los autores) para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	47

Figura 16. Incidencia del ahorro en el consumo de energía para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	47
Figura 17. Análisis de viabilidad financiera, TIR, Periodo de recuperación y VP de los flujos sin inversión para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	48
Figura 18. Formulario de resumen de la herramienta de evaluación técnica y financiera de sistemas solares fotovoltaicos. _____	49
Figura 19. Gráfico de dispersión para la estimación del costo de los paneles solares. _____	59
Figura 20. Gráfico de dispersión para la estimación del costo de las estructuras para paneles solares. _____	59
Figura 21. Gráfico de dispersión para la estimación del costo del inversor. _____	60
Figura 22. Gráfico de dispersión para la estimación del costo de las baterías. _____	60
Figura 23. Gráfico de dispersión para la estimación del costo del controlador/regulador. _____	61
Figura 24. Ventana de Resultados (marco legal) para un autogenerador a pequeña escala, conectado al SIN y que entregará excedentes. _____	62
Figura 25. Ventana de Resultados (marco técnico) para un autogenerador a pequeña escala, conectado al SIN y que entregará excedentes. _____	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad colombiana que incentiva el uso eficiente de la energía y la utilización de FNCER _____	20
Tabla 2. Normatividad colombiana relacionada con la autogeneración a pequeña y gran escala. _____	27
Tabla 3. Factores que influyen en el dimensionamiento e implementación de sistemas solares fotovoltaicos _____	35
Tabla 4. Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico. _____	37
Tabla 5. Funciones de estimación del costo de los elementos principales de un sistema solar fotovoltaico. _____	37
Tabla 6. Factores legales, técnicos y financieros que enmarcan la utilización de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia para la autogeneración. _____	40
Tabla 7. Condiciones iniciales del proyecto: sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020. _____	41
Tabla 8. Condiciones iniciales del proyecto: Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. _____	45
Tabla 9. Marco normativo de la autogeneración en Colombia, incluye artículos de interés para entidades públicas. _____	57

1. INTRODUCCIÓN

Colombia en su búsqueda por cumplir con los compromisos adquiridos en la COP21, ha llevado a la búsqueda de iniciativas que permitan incentivar la utilización de fuentes no convencionales de energía renovable, mitigar los impactos ambientales y a su vez lograr una transformación en la matriz energética colombiana, a fin de suplir con mayor eficiencia la demanda energética que crece anualmente con el crecimiento de las industrias, población etc.

Aunque sin duda el Gobierno nacional ha propuesto distintos lineamientos que impulsan estas iniciativas, como el Plan energético 2020-2050, Plan de acción en materia de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de la energía sustentable y leyes como la 1715 de 2014 (UPME, 2019), aún se tiene un marco de oportunidad amplio en el aprovechamiento de los recursos renovables con los cuales cuenta el país. Dentro de los cuales está el recurso solar, un recurso renovable que permite su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica para casas, edificios, industrias, centros comerciales entre otros, a fin de suplir el total de su consumo o una parte de él, generando así ahorros y reducción de emisiones de gases efecto invernadero en comparación con las fuentes convencionales de energía (Ministerio de minas y energía, 2015). Es por esto, que la investigación del aprovechamiento del recurso solar en Colombia ha tomado fuerza en los últimos años; desde la ley 1715 de 2014 se ha logrado una promoción en el desarrollo y utilización de FNCER² por parte de entidades de distintos sectores, quienes han incursionado en la implementación de sistemas solares fotovoltaicos para suplir sus demandas energéticas con dicha propuesta; esto se refleja en el último boletín estadístico emitido por el Ministerio de Minas y Energía donde se evidencia que entre 2015 y 2018 se registran 470 proyectos de FNCER en el país (Ministerio de Minas y Unidad de Planeación Minero

² Fuentes No Convencionales de Energía Renovable

Energética, 2018). No obstante, es evidente en la revisión bibliográfica realizada que las entidades privadas han tenido mayor participación en estas investigaciones y que las entidades públicas aún avanzan poco a poco en ese camino.

Por lo anterior se encontró la necesidad que existe en el sector público para contar con estrategias que les permitan acercarse al cumplimiento de lo establecido en la ley 1715 de 2014 y ley 1955 de 2019 (El Congreso de Colombia, 2020) sobre las acciones ejemplares en términos de ahorro energético en las administraciones públicas, ya sea por medidas de eficiencia energética o implementación de FNCER para suplir su demanda.

En respuesta a esa necesidad, se propone en este trabajo de investigación la identificación y selección de los factores legales, técnicos y financieros principales, que se deben tener presentes en la implementación de un sistema solar fotovoltaico, específicamente en entidades públicas; así mismo, se realiza la evaluación financiera de la implementación, a través de una herramienta, que dimensiona de forma estimada el sistema a implementar, los costos y beneficios económicos que generaría para la entidad, a fin de aportar información relevante en la decisión de implementar sistemas solares fotovoltaicos en este tipo de entidades. El trabajo incluye un caso de aplicación de la herramienta, donde se estima con la información inicial de la entidad el costo de la inversión, los ahorros que se obtendrán, así como el tiempo de retorno de la inversión para una entidad pública de Sabana Centro.

El trabajo se desarrolla a partir de la descripción de la situación energética en el país, en términos de consumo, oferta, compromisos internacionales entre otros, los cuales dan una visión del problema actual frente a la implementación de fuentes no convencionales de energía en Colombia, partiendo desde las barreras, pasando por las estrategias implementadas y evidenciando las oportunidades en esta área de desarrollo.

Posteriormente se mencionan las oportunidades que existen en el sector público para la utilización, se recopila información sobre las acciones ejemplares de las administraciones públicas y su rol dentro de los compromisos internacionales adquiridos.

Así mismo se realiza una descripción del recurso solar en Colombia, como de los sistemas solares fotovoltaicos para su aprovechamiento; y a su vez se realiza una revisión de proyectos que se han desarrollado en el país a fin de seleccionar los factores legales, técnicos y financieros de interés para este proyecto de investigación.

Finalmente, con los factores identificados y seleccionados se desarrolla una herramienta que permite el dimensionamiento del sistema a utilizar (estimado) así como evaluar financieramente la implementación sugerida, entregando a la entidad interesada información que les permita tomar decisiones.

Es de importancia resaltar que el trabajo de investigación permite a las entidades públicas, identificar los factores más influyentes o sensibles que afectan la implementación de estos sistemas en su infraestructura, teniendo presente las condiciones iniciales de cada entidad y las características energéticas de la zona de aplicación: Sabana Centro.

Así mismo, se ofrece una herramienta que aporte a las estrategias que buscan incentivar el uso de FNCER³ en Colombia, convirtiendo a las entidades públicas en agentes claves en el fortalecimiento de las políticas gubernamentales en términos ambientales. Y a su vez, que logren fortalecer su imagen frente a los compromisos internacionales del país (COP21).

³ Fuentes no convencionales de energía.

2. PROBLEMA

Antecedentes

El crecimiento económico del país está asociado al crecimiento de la demanda eléctrica, así lo muestra el Plan Energético Nacional 2020 a 2050 (UPME, 2019); donde el análisis del histórico de la oferta y demanda, evidencia grandes variaciones entre los años 1975 y 2018, debido a que *“el consumo final de energía se incrementó un 78%, pasando de 735 PJ a 1.308 PJ, que equivale a una tasa de crecimiento promedio anual de 1,81%.”* (UPME, 2019). Esta variación comenzó por cambios en la participación de los sectores en el consumo final (ver figura 1), la participación de fuentes de energía en la composición de la oferta (ver figura 2) y el consumo final de energía (que para el 2018 fue de 1.308 PJ) distribuyéndose la mayor participación de los sectores así: 40% Transporte, 22% Industrial, 20% Residencial, 6% Comercial & Público y 12% otros.

También, estaban involucradas en la variación las canastas de los diferentes sectores donde la preminencia de los distintos energéticos según el sector fueron para el 2018: Transporte - Diesel y gasolina, Industria - carbón mineral y gas natural, Residencial - electricidad y leña y en el Comercial & Público predominó la electricidad. Sin duda estos cambios han sido impulsados por el crecimiento de las industrias manufactureras y del sector transporte (UPME, 2019).

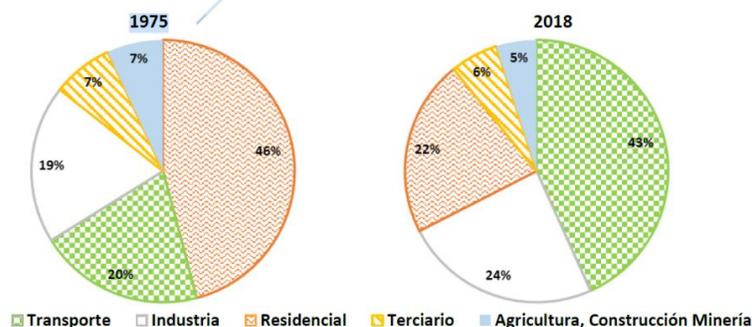
Así mismo según el PEN⁴ la participación de los sectores afectan el consumo final de energía debido a las actualizaciones, expansiones y crecimientos que han sufrido en los últimos 20 años, algunos ejemplos de esto son, el crecimiento de la demanda de transporte, expansión de la cobertura eléctrica y zonas residenciales, programas de masificación a favor del uso de una

⁴ Plan Energético Nacional.

fuentes de energía en particular e integración de nuevas tecnologías a las actividades diarias del país (UPME, 2019).

Figura 1

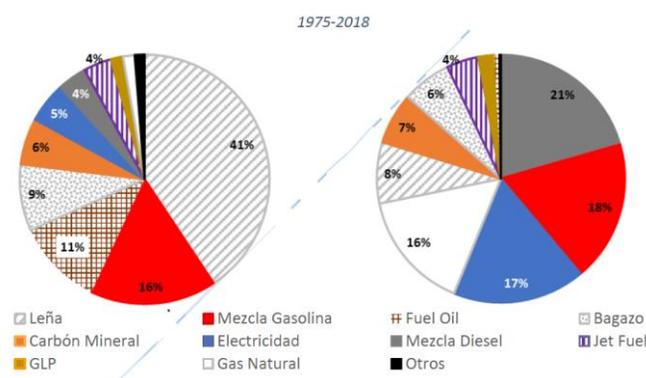
Participación porcentual por sectores en el consumo final de energía 1975-2018



Nota: La figura muestra la variación en la participación porcentual por sectores en el consumo final (demanda) en 1975 y 2018, evidenciando cambios notorios en el consumo de los sectores de transporte y residencial. Fuente: (UPME, 2019).

Figura 2

Participación porcentual de fuentes de energía en la composición de la oferta 1975-2018



Nota: La figura muestra la variación en la participación porcentual de fuentes de energía (oferta) en 1975 y 2018, evidenciando el aumento en la oferta de electricidad, mezcla diesel, leña y fuel oil Fuente: (UPME, 2019).

Sin embargo, a medida que el país se industrializa, el crecimiento de estos sectores y la demanda eléctrica de los mismos, ya no es proporcional (Chacón Enciso & Leiva mutis, 2016), y se hace cada vez más necesario suplir la demanda total a partir de fuentes no convencionales de energía renovable consideradas por la UPME: biomasa, pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, geotérmica, mares, y solar.

Este desafío involucra al sector eléctrico como agente fundamental para el crecimiento de otros sectores económicos de Colombia; por este motivo la EEN (Estrategia Energética Nacional) toma fuerza en la agenda 2030, pues se establecen objetivos claros y rutas de trabajo que permiten al país cumplir con su compromiso internacional en la COP21 (Acuerdo de París) donde Colombia busca reducir para el 2030 el 20% de las emisiones de CO₂ (ACOLGEN, 2017).

Dentro del compromiso adquirido, los objetivos de desarrollo sostenible establecen metas que incentivan al país a renovar las formas de suplir dicha demanda, aportando a la disminución de emisiones de GEI⁵; sin olvidar los beneficios financieros que estos cambios pueden traer y la fácil implementación en términos de tiempo (ACOLGEN, 2017). La Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica, describe en su informe Visión 2030, que el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido la reducción de los costos de inversión, de proyectos que apuntan a la implementación de energías renovables no convencionales, como lo son el uso de energía eólica y solar fotovoltaica, los cuales han disminuido en un 30% y 65% respectivamente (ACOLGEN, 2017). Este ahorro permitirá al sector energético la *“diversificación de la matriz energética, la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero del sector, el incremento de la competitividad en la formación de precios y potencializará el número de hogares,*

⁵ Gases de efecto invernadero.

comercios e industrias capaces de producir su propia energía; así como entregar los excedentes a la red” (ACOLGEN, 2017). Estas estrategias buscan la transformación energética de la matriz ,que conduzca al país hacia un desarrollo sostenible (UPME, 2019).

Es importante resaltar que en Colombia, la producción de energía eléctrica está asociada a 4 actividades fundamentales: generación donde se convierten otras fuentes de energía en energía eléctrica, transmisión y distribución donde la energía generada es transportada y distribuida al usuario final a diferentes niveles de tensión y comercialización que es el proceso en el que agentes se encargan de la compra y venta de la energía eléctrica (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2008). En Colombia el 70% de la energía eléctrica es producida por centrales hidroeléctricas, las cuales no logran suplir la demanda total del país, pues en algunas temporadas del año su producción se ve afectada por los tiempos de sequía. Por otro lado, las termoeléctricas a base de gas o combustibles fósiles son las encargadas de suplir el restante de la demanda, pese a su alto costo y poco favorables índices de contaminación por la combustión y generación de ruido (Higuera Aguilar & Carmona Valencia, 2017).

Como lo indica el IDEAM⁶ (2016) las emisiones anuales del grupo “Energía” que contiene a los sectores económicos: transporte, comercial, residencial, industrias manufactureras, minas y energías, según el IPCC⁷; presentó hasta 2012 aumentos anuales de 3%, dentro de los cuales el sector transporte e industrias de la energía, son los mayores aportantes de emisiones con un promedio anual de 38% y 23% respectivamente. También menciona que en el sector económico de Minas y Energía *“el 36% promedio de las emisiones son el uso de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas, seguido por la quema de combustibles en la producción y*

⁶ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

⁷ Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

refinación de petróleo y gas” (IDEAM, 2016). Este sector participa en los GEI con 13.7 Mton⁸ de dióxido de carbono equivalente⁹ y metano.

Por otro lado, el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), mostró que las emisiones de GEI aumentaron en el 2017 el 11.9% respecto al 2016, los principales crecimientos en las emisiones GEI fueron: las industrias manufactureras con el 22.1%, la Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca el 16.1% de crecimiento y la Administración pública y defensa el 12,4% respecto al año 2016. Así mismo las emisiones de gases precursores de ozono troposférico (principal ingrediente del smog urbano) aumentaron el 19.9% en 2017 respecto al año anterior (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2019).

Para el 2015 el IDEAM presentó los 5 sectores productivos que generaban mayores emisiones de CO_2 : el forestal y otros usos del suelo (aportaba cerca de 40 millones de toneladas) 39% de las emisiones totales de ese año, el agropecuario cerca de 20 millones de toneladas (19%), transporte con 10 millones de toneladas (10%), industrias de la energía aproximadamente 10 millones de toneladas (9%) y residuos con el 6%, aportando 5 millones de toneladas para el año de análisis (García Arbeláez, C., G. Vallejo, 2016).

En consecuencia, Colombia contribuye con el 0.57% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (La República, 2018) y entre 2016-2017 había perdido 219.973 hectáreas de bosque (deforestación), problemática asociada las emisiones del país (IDEAM et al., 2018).

Considerando las perspectivas asociadas a la generación de energía, y sus implicaciones ambientales, existen diferentes estrategias impulsadas por el gobierno para la estimulación del uso de fuentes no convencionales de energía renovable, dentro de las cuales está la Formulación

⁸ Millones de toneladas.

⁹ Unidad de medición que compara el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases de efecto invernadero con respecto al dióxido de carbono. Resolución 1962 de 2017.

de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía, Plan energético 2020-2050, Plan de acción en materia de Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de la energía sustentable, entre otros (Ministerio de minas y energía, 2015). De estas, han surgido instrumentos legales regulatorios como los beneficios tributarios establecidos en la Ley 1715 del 2014, que comprende la deducción especial del impuesto sobre la renta, depreciación acelerada, exclusión del IVA en la adquisición de bienes y servicios, y exclusión del gravamen arancelario, las dos últimas de interés para este trabajo de investigación (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2014).

En respuesta de las estrategias impulsadas, en Colombia, acorde al Boletín Estadístico del Ministerio de Minas y Energía, se registraron 470 proyectos de generación eléctrica (incluidas las FNCER) entre los años 2016 a 2018 primer periodo; estos correspondían a una capacidad de 14.062 MW. En cuanto a las tecnologías implementadas, 39% fueron hidráulicos, 27% solares, 18% térmicos y 16% eólicos. De igual manera, de los 470 proyectos, 83 correspondían al departamento de Antioquia y 45 a Cundinamarca, siendo los dos departamentos que registraron mayor consumo en el periodo de análisis.

Respecto a la participación de la generación de energía eléctrica del SIN¹⁰ en el primer trimestre del 2018, se distribuía principalmente en los departamentos de Antioquia con el 35%, Cundinamarca con el 14%, Atlántico con el 8% y Boyacá con el 9% (Ministerio de Minas y Unidad de Planeación Minero Energética, 2018) evidenciando así, el potencial con el que cuenta Cundinamarca (departamento de interés para este trabajo de investigación) en términos de generación de energía eléctrica, así lo confirma el Informe de Registro de Proyectos de Generación de Energía Eléctrica a mayo de 2021, en el cual se registra que Cundinamarca cuenta

¹⁰ Sistema Interconectado Nacional.

con una capacidad en proyectos solares vigentes de 482.7 MW (en 14 proyectos en total), ocupando el 9° puesto de los 27 departamentos en capacidad (UPME, 2020).

En el trabajo realizado por Hincapié, sobre la caracterización de energías alternativas en Colombia en empresas públicas y privadas (en el periodo comprendido entre 2012 y 2018), se evidencia que ambos sectores han trabajado en la implementación de estos sistemas renovables no convencionales. Acorde a los 61 proyectos caracterizados, el sector privado ha puesto en marcha cerca de 51% de ellos y 49% han estado a cargo del sector público (Hincapié Vigoya, 2018). Sin embargo, en la revisión de la macro localización y micro localización de estos proyectos, se encuentra que, de los 30 proyectos desarrollados por el sector público, 12 de ellos se realizaron en Cundinamarca, pero ninguno de ellos en la zona de Sabana Centro. Cabe resaltar que los proyectos mencionados en el trabajo de Hincapié corresponden a proyectos implementados y en funcionamiento.

Así mismo, la masificación de las energías renovables no convencionales sigue enfrentando barreras importantes como lo son (Ministerio de minas y energía, 2015):

- Subsidios a fuentes convencionales.
- Altos costos en comparación con las fuentes convencionales.
- Financiamiento limitado para fuentes no convencionales.
- Falta de capital humano con conocimiento en las nuevas tecnologías.
- Factores regulatorios e institucionales.

Evidenciando su baja participación en la matriz eléctrica del país en los años 2018 y 2019, donde tuvieron el 1% y 1.5% de participación respectivamente. (Energía, n.d.).

Por otro lado, la participación de las FNCER en la matriz eléctrica del país, ha estado principalmente asociada a las ZNI¹¹, al ser zonas en condiciones de pobreza y vulnerabilidad, donde el acceso a servicios públicos como la electricidad es limitada por la falta de sostenibilidad técnica, económica, social y ambiental, asociadas a su dispersión en el territorio nacional, limitaciones tecnológicas, geográficas y el estar altamente expuestas al conflicto (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Es así como se evidencia que los cambios presentados en los diferentes sectores económicos, la dificultad para suplir la demanda energética, la importancia de la relación entre el sector eléctrico y el crecimiento económico y la responsabilidad del país (partiendo desde las entidades públicas) con el cumplimiento de los compromisos internacionales (COP21) a través de la adopción de acciones ejemplares, dan lugar a nuevos ámbitos de implementación de FNCER, que permitan diversificar la matriz energética a fin de enfrentar los retos aquí propuestos.

Pregunta problema

¿Cuáles son los factores de tipo legal, técnico y financiero que las entidades públicas deben tener en cuenta, para la evaluación técnica y financiera de la implementación de un sistema solar fotovoltaico?

¹¹ Zonas No Interconectadas.

3. JUSTIFICACIÓN

Para mediados del 2018, la participación en la generación de energía eléctrica en el país, se distribuyó: 86.01% proveniente del recurso hídrico, 9.29% del gas, 3.6% del carbón, 0.02% del ACPM y 0.01% generada a partir de radiación solar, aportando esta última 6.9 GW de los 33.541,7 GW generados ese año (Ministerio de Minas y Unidad de Planeación Minero Energética, 2018).

Considerando que Colombia tiene un alto potencial energético, ya que cuenta con una “radiación promedio uniforme de 4,5 kWh/m² durante el año, la cual supera el valor promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d” (Celsia, 2018); se evidencia la oportunidad que existe en el aprovechamiento del recurso solar disponible en el país, a fin de incrementar la participación de la energía solar en la matriz energética, como estrategia para avanzar en el cumplimiento de los compromisos obtenidos en la COP21.

Es importante mencionar, que en respuesta a las primeras estrategias implementadas para incentivar la utilización de las FNCER (como la solar), la integración a la matriz energética de esta, ha tomado fuerza en los últimos años, pues de los 470 proyectos de generación registrados, entre 2016 y 2018, en el Boletín Estadístico del Ministerio de Minas y Energía, 325 estuvieron asociados a tecnología solar, 17 eólicos, 10 térmicos y 11 biomasa (Ministerio de Minas y Unidad de Planeación Minero Energética, 2018).

Así mismo, ha surgido en Colombia, la promoción de la gestión eficiente de la energía, a partir de la eficiencia energética y respuesta a la demanda; se busca que a través de un marco normativo e instrumentos de promoción se fomente la inversión, investigación y desarrollo de las tecnologías utilizadas en la implementación de las FNCER como parte clave de este objetivo (El Congreso de Colombia, 2014), esta estrategia busca aplicarse en los sectores económicos del país, como el sector público; y por lo tanto ofrece dentro del marco normativo la ley 1955 de

2019, que expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad“, la cual en su artículo 30 menciona el compromiso que deben adquirir las administraciones públicas en términos de ahorro energético; este consiste en lograr un ahorro mínimo del 15% respecto al consumo del año anterior, a partir de “*medidas de eficiencia energética y de cambios y/o adecuaciones en su infraestructura*” (El Congreso de Colombia, 2014), con el fin de establecer metas anuales de ahorro a partir del segundo año, las cuales deben ser cumplidas al término del 2022.

Así mismo, la ley 1715 y el Decreto 2469, ambos del 2014 mencionan el interés del Gobierno Nacional en el desarrollo y promoción de las FNCER, a través de los artículos aquí mencionados:

Tabla 1

Normatividad colombiana que incentiva el uso eficiente de la energía y la utilización de FNCER

LEY/DECRETO	ARTÍCULO
Ley 1715 de 2014	19. Fomentar el aprovechamiento del recurso solar en edificaciones oficiales.
	30. Establecer objetivos de eficiencia energética para todos los edificios de las administraciones públicas, como metas escalonadas con horizontes de hasta 10 años tras su entrada en vigencia. Destinar los recursos (presupuesto) necesarios.
	32. Las administraciones públicas, en sus ámbitos territoriales, adoptarán planes de gestión eficiente de la energía, así como de la utilización de FNCE para los edificios y equipos consumidores de energía de titularidad pública.
	41. Adoptar acciones ejemplares, en particular, la consecución del ahorro de energía y la introducción de FNCE en los distintos sectores, como el desarrollo de tecnologías energéticas y para la eficiencia energética de los edificios.
	42. Las administraciones públicas, cada una en el ámbito de sus competencias fomentarán las actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación de interés en el campo de las FNCE y la gestión eficiente de la energía.
Decreto 2469 de 2014	Implementar los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración a gran escala, con el fin de propender por el uso racional y eficiente de la energía, buscando el mayor aprovechamiento de esta.

Nota: La tabla muestra las secciones de la ley 1715 y decreto 2469 de 2014, que especifican acciones para las administraciones públicas. Elaboración: propia, datos tomados de la ley 1715 y decreto 2469.

En respuesta a esto, el sector público enfrenta un importante reto, pues para el 2018 la canasta energética del sector comercial y público estaba conformada principalmente por electricidad en un 67.28%, gas natural 24,71% y GLP (gas licuado del petróleo) correspondiente al 8.01%, indicando así un alto consumo de electricidad; de modo que se constata una puerta a la autogeneración a partir de energías renovables no convencionales en el sector, que apunte a suplir dicha demanda y su vez cumpla con lo propuesto en el marco normativo ya expuesto (UPME, 2019).

En consecuencia, es posible identificar que Colombia cuenta con el potencial solar energético necesario para aprovechar este tipo de tecnologías, que las estrategias implementadas por el gobierno han abierto la puerta a su inversión, investigación, desarrollo e implementación y por ende los proyectos solares si han logrado un incremento en la participación de la matriz energética del país en los últimos años; no obstante debido a las barreras ya mencionadas en los antecedentes, se evidencia que aún hay lugar al aprovechamiento del recurso solar en zonas como Cundinamarca (específicamente en Sabana Centro), y que de igual forma, el sector público, aún cuenta con potencial de inversión, investigación, desarrollo e implementación de este tipo de energía, a fin de tomar acciones ejemplares que permitan mitigar el impacto de las barreras técnicas, administrativas y de mercado asociadas al desarrollo de las FNCER, como lo menciona la ley 1715 de 2014 en su artículo 41.

4. OBJETIVOS

Objetivo General

Establecer los factores legales, técnicos y financieros que afectan la evaluación técnica y financiera de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en infraestructuras gubernamentales de Sabana Centro; para determinar la viabilidad de la implementación a través de una herramienta que considere las condiciones iniciales de la entidad.

Objetivos Específicos

- Identificar y seleccionar los factores legales, técnicos y económicos que enmarcan la utilización de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia para la autogeneración.
- Desarrollar una herramienta que recopile los factores identificados y seleccionados, para determinar la viabilidad de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en entidades públicas de Sabana Centro.

5. MARCO TEÓRICO

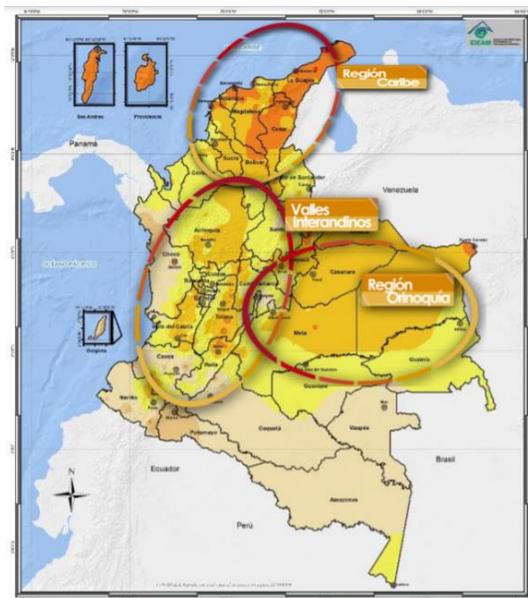
El interés por la explotación de las energías renovables ha surgido en consecuencia a dos grandes razones: el conflicto político entre naciones, por la dependencia del petróleo, carbón y gas y el impacto ambiental por las emisiones de GEI asociadas al Cambio Climático, problemática que enfrenta la sociedad actual (IDEAM et al., 2018). Dentro de las energías renovables se encuentran la energía solar, eólica, biomasa, hidráulica, energía de los océanos y la geotermia, que pueden ser aprovechadas acorde a los recursos de cada región y al desarrollo de tecnologías, que permiten la transformación de estas a fin de suplir las necesidades energéticas (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010).

La energía solar, es aquella que usa el potencial energético solar implementando tecnologías fotovoltaica, térmica y pasiva a través de celdas solares, colectores y muros/ventanas etc., para la obtención de energía eléctrica y calor (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010). La UPME define la energía solar como *“la energía producida por reacciones nucleares al interior del Sol, que son transmitidas en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio (radiación solar)”* (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010). También menciona que para conocer la cantidad de radiación solar disponible que puede ser convertida en energía útil en una zona específica, depende de factores como la posición del sol, condiciones atmosféricas (microclima), la altura sobre el nivel mar y la duración del día.

A fin de avanzar en la utilización de esta energía, el IDEAM ha desarrollado la herramienta: Atlas climatológico, radiación y viento, que para 2018 presentó su última versión; en esta herramienta se encuentran mapas de radiación y brillo solar, así como radiación ultravioleta y ozono. Acorde a los mapas obtenidos, las zonas de mayor radiación global en Colombia son la región Caribe, Orinoquia y los valles interandinos como se muestra en la figura 3 (IDEAM, 2018)

Figura 3

Zonas de mayor intensidad de radiación global en Colombia

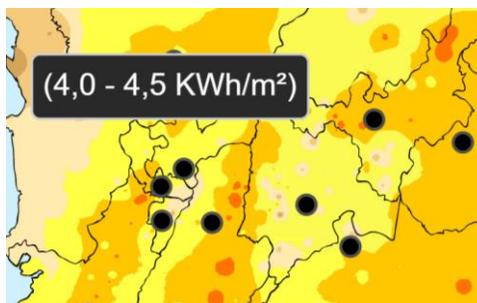


Nota: La figura muestra las tres regiones de Colombia con mayor intensidad de radiación global, medida a través de aproximadamente 140 estaciones del país. Fuente: (IDEAM, 2018).

Acorde a lo anterior, Colombia cuenta un promedio de radiación global de 4.5 – 5.0 $KWh/m^2/día$, superior al promedio mundial (3,9 $KWh/m^2/día$), propicio para el aprovechamiento de este recurso en las zonas especificadas. Para Cundinamarca el promedio de radiación global es de 4.0 – 4.5 $KWh/m^2/día$ en la gran mayoría de su territorio, como se muestra en la figura 4 y para la zona de Sabana Centro de 4.32 – 4.9 $KWh/m^2/día$ (figura 5).

Figura 4

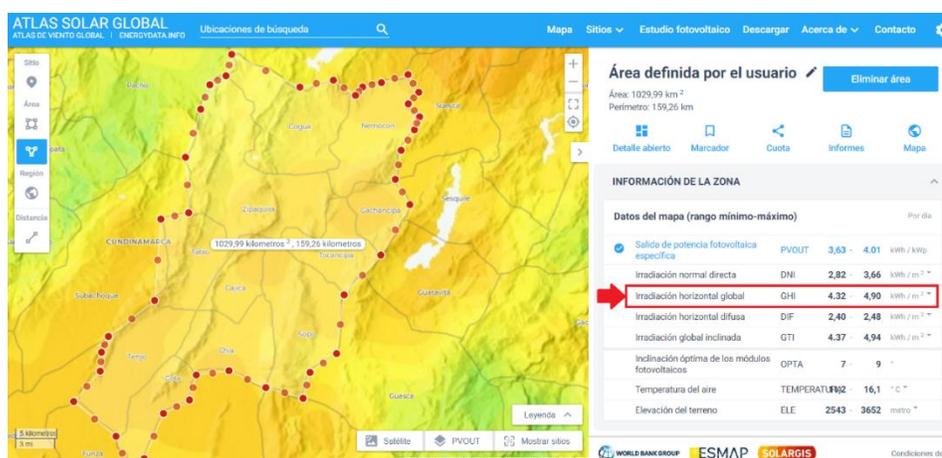
Irradiación global horizontal en Cundinamarca



Nota: Fuente: (IDEAM, 2018).

Figura 5

Irradiación global horizontal en Sabana Centro



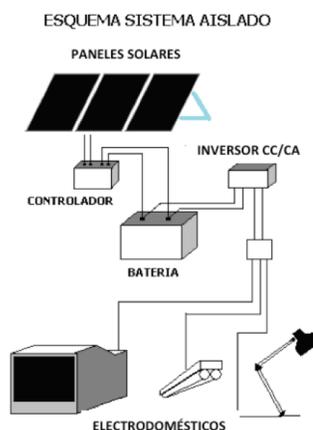
Nota: Irradiación horizontal global en la zona de Sabana Centro (Cajicá, Chía, Cogua, Cota, Gachancipá, Nemocón, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá, Zipaquirá) en la que se muestra una irradiancia horizontal global entre 4,32 y 4,90 kWh/m² para la zona. Fuente: (The World Bank, n.d.).

Una de las formas que hay para aprovechar el recurso solar disponible, es la energía solar fotovoltaica, mediante la cual la energía solar es convertida en electricidad utilizando celdas fotovoltaicas; la corriente generada puede ser utilizada en el instante (sistemas simples conectados a la red eléctrica conocidos como On-grid) o también ser almacenada en baterías para utilizarla posteriormente (sistemas autónomos conocidos como Off-grid).

Los componentes principales de los sistemas solares fotovoltaicos son: paneles solares, inversores y estructura de montaje; para los sistemas autónomos se incluyen baterías, y reguladores de carga (Gentil Orozco, 2020):

Figura 6

Esquema de un sistema solar fotovoltaico autónomo.



Nota: Elementos de un sistema solar fotovoltaico off-grid, en caso de no se autónomo, el esquema se mantiene retirando baterías y regulador. Fuente: (Departamento Nacional de Planeación, 2016)

- Los paneles solares son aquellos que captan la irradiancia y generan una corriente eléctrica. Son en su mayoría de silicio y se clasifican en dos tipos: monocristalinos que producen más energía y son más eficientes, y policristalinos los cuales son menos eficientes pero más económicos (Celsia, s.f.). Para conocer la cantidad de paneles que se requiere en un sistema es necesario encontrar la potencia que se desea suplir y la potencia pico de cada panel.
- Los inversores, son aquellos encargados de transformar la corriente directa generada por los paneles en corriente alterna, para ser conectados en el sistema es necesario conocer su potencia máxima y mínima de funcionamiento.

- La estructura de montaje o soporte está encargada de brindar rigidez según el tipo de suelo o techo al que será sujeta la estructura. Y también ayuda a posicionar el panel en la inclinación adecuada.
- Baterías o acumuladores, están encargados de almacenar la energía eléctrica generada por los paneles solares para luego ser consumida.
- Regulador de carga es el equipo que regula las cargas de las baterías, para el correcto funcionamiento de estas, evitando sobrecargas o descargas que puedan afectar la operación y vida útil de las baterías.

Dependiendo de la instalación, los sistemas solares fotovoltaicos pueden ser On-grid, los cuales funcionan conectados a la red eléctrica y no utilizan acumuladores ni reguladores de carga, su eficiencia es mayor y requieren una inversión menor; por otro lado están los sistemas Off-grid, que son aquellos que utilizan acumuladores (baterías) y reguladores de carga, debido a esto, son más costosos aunque comunes en las ZNI por su autonomía (Celsia, s.f.).

Actualmente en Colombia, los sistemas solares fotovoltaicos pueden integrarse al Sistema Interconectado Nacional, y acorde a la ley 1715 de 2014 entregar los excedentes que generan, una estrategia que busca incentivar la implementación de estos.

Para regular la integración se ha establecido un marco legal, que regula actividades como la autogeneración, conexión al SIN, entrega de excedentes, beneficios tributarios entre otros, el cual se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2

Normatividad colombiana relacionada con la autogeneración a pequeña y gran escala.

Legislación	Objetivo
Ley 143 de 1994	Establece la normativa para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en Colombia.

Ley 697 de 2001	Promueve el uso racional y eficiente de la energía, así como la utilización de energías alternativas.
Ley 1715 de 2014	Regular la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Interconectado Nacional
Decreto 2469 de 2014	Establecer lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración.
Decreto 1623 de 2015	Modificar y adicionar el Decreto 1073 de 2015, en cuanto a los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas.
Decreto 1073 de 2015	Expedir el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía.
Resolución 281 de 2015	Definir el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.
Decretos 2143 de 2015	Reglamentar los requisitos para la obtención de los incentivos establecidos en la Ley 1715.
Resolución 2000 de 2017	Establecer la forma y requisitos para presentar las solicitudes de acreditación para obtener la exclusión del IVA.
Decreto 348 de 2017	Adicionar el Decreto 1073 de 2015, la sección 4A, respecto a los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala.
Ley 1955 de 2019	Expedir el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.
Resolución 40715 de 2019	Reglamentar el alcance de la obligación establecida el artículo 296 de la Ley 1955 de 2019.
Decreto 829 de 2020	Reglamente los plazos de los trámites a cargo de la UPME. Entre otros artículos de la ley 1715 de 2014.
Resolución 203 de 2020	Establecer los requisitos y el procedimiento para acceder a los beneficios tributarios en inversiones.
Regulación 030 de 2018 (CREG)	Regular la autogeneración a pequeña escala y la generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.
Resolución CREG 098 de 2019	Establece los mecanismos de incorporación de Sistemas de almacenamiento (baterías) al Sistema Interconectado Nacional.
Resolución 060 de 2019	Realiza ajustes al Reglamento de Operación para la conexión y operación de plantas fotovoltaicas conectadas al Sistema Interconectado Nacional.
Resolución CREG 002 de 2021	Regular aspectos operativos y comerciales para incorporar a los autogeneradores a pequeña escala al Sistema Interconectado Nacional.
RETIE	Reglamenta desde la perspectiva técnica-legal las instalaciones eléctricas.
NTC 1736	Definir nomenclatura asociada a la energía solar fotovoltaica.
NTC 2050	Establecer los lineamientos técnicos para salvaguardar de los riesgos del uso de la electricidad.

Nota: La tabla muestra el marco legal si se desea ser un autogenerador, considerando aspectos legales, técnicos y beneficios tributarios para entidades públicas. Elaboración: propia, datos tomados de la normatividad colombiana.

Estado del arte

De acuerdo con el diario La República (2019), “Colombia ha contado con un Sistema eléctrico robusto y confiable, de clase mundial”, uno de los motivos por el que se presenta una fuerte resistencia a la transición de: energías convencionales a energías renovables no

convencionales. Sin embargo, existen otras barreras económicas, regulatorias e institucionales, como lo es la política energética, normatividad en los requerimientos técnicos, incertidumbre sobre los potenciales de desarrollo, esquemas de financiación, etc. (Ministerio de minas y energía, 2015).

De acuerdo con lo anterior, la búsqueda de soluciones, estrategias y planes que incentiven el uso de las energías renovables no convencionales en distintos sectores del país, se han convertido en la motivación de instituciones privadas y públicas para desarrollar trabajos de investigación; los cuales han entregado en sus resultados, propuestas de gran interés para aquellos que desean incursionar en este desafío, estableciéndose como plataforma para las nuevas ideas.

Higuera y Carmona (2017), presentan el análisis de factibilidad para la implementación de un proyecto de energía solar fotovoltaica enfocada en organizaciones que cuenten con área disponible de 10 mil metros cuadrados, capaz de autogenerar 1.000 MWh por año, para consumir conforme se genera, evitando así la utilización de sistema de almacenamiento de energía (baterías). La metodología utilizada para la evaluación del proyecto es la ONUDI¹², la cual analiza “*mercado, comercialización, materias primas, suministros, ubicación, medio ambiente, ingeniería, tecnología, gastos, recursos humanos, planificación y presupuesto de ejecución, para llegar finalmente a un análisis financiero*”(Higuera Aguilar & Carmona Valencia, 2017). Dentro de la investigación, analizaron casos de éxito de otros países como Alemania, Japón, España y Estados Unidos, quienes establecieron políticas claras en fases que les han permitido alcanzar las metas esperadas y toman factores que son representativos para Colombia como la venta de excedentes, priorizar la compra de energía eléctrica generada con sistemas solares fotovoltaicos,

¹² Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo industrial.

fuentes de financiación, asesoría por parte de las empresas públicas de energía, entre otros a fin de masificar el uso de este tipo de energía. Finalmente, visibilizan oportunidad de mitigar las barreras al eliminar el cargo por respaldo a AGPE¹³, eliminar la renta presuntiva, priorizar la venta de energía proveniente de FNCER, beneficio tributario del 50% de la inversión primer y segundo año, reducción costos de instalación por eficiencia; y proponen una evaluación financiera incorporando las oportunidades que plantean en la cual la venta de excedentes tiene un rol importante, así mismo concluyen que este tipo de proyectos deben analizarse desde otras perspectivas como social y ambiental para encontrar más beneficios.

Estrada y Muñoz, desarrollaron una propuesta, que consiste en la implementación de un sistema solar fotovoltaico en las viviendas de la vereda La Esperanza del municipio de Convención Norte de Santander, con la cual buscan garantizar la demanda de electricidad de las viviendas, que lo implementen, de manera constante; debido a las dificultades que presentan en la zona, por la baja cobertura de los servicios públicos e intermitencia en el suministro de energía a las viviendas, uno de los componentes asociados a la calidad de vida acorde al séptimo de los objetivos de desarrollo sostenible. Este trabajo de investigación utiliza la metodología PMI y en sus resultados encuentran que el tiempo de retorno de estos proyectos es favorable y que sus beneficios sociales y ambientales al suplir demanda en ZNI toma relevancia en la implementación de este tipo de proyectos (Estrada Martínez & Muñoz Fuentes, 2017).

En su trabajo de investigación, Espitia presenta una guía metodológica, estándar, que permite ser aplicable a distintos proyectos de implementación de paneles solares interconectado a la red eléctrica pública. En ella se especifican los pasos necesarios para comprender el funcionamiento de estos sistemas, así como el dimensionamiento de estos, a partir de los

¹³ Autogenerador a pequeña escala.

requerimientos encontrados y los costos de la implementación. Dentro los resultados se encuentra que evaluar la factibilidad y rentabilidad del proyecto por VPN genera inconvenientes pues la tasa depende de muchos factores haciéndola fluctuante, por otro lado los tiempos de retorno de la inversión pueden ser a corto o mediano plazo dependiendo de factores económicos asociados a la actividad económica de la empresa y así mismo se concluyen los beneficios de tener un sistema de autoconsumo que evite la implementación de sistemas de almacenamiento pues repercute notablemente en el valor de la inversión inicial (Espitia Rey, 2017).

En evaluación de factibilidad de implementar un sistema solar fotovoltaico de autogeneración en una finca en la vereda La Cuesta, Subachoque; que se dedica a la producción de fresas, a fin de que sea autosostenible, se aborda desde las perspectivas técnica, administrativa, legal y financiera; algunos criterios a considerar en el diseño técnico son el área disponible, las adecuaciones de la zona a utilizar, en cuanto a la perspectiva legal es importante considerar los beneficios otorgados por gobierno para el análisis de la viabilidad financiera, ya que favorecen los indicadores de análisis VPN y TIR (Benitez Soler & Tello, 2018).

Barrera y Castilla, realizan un trabajo de investigación en el cual analizan la viabilidad de implementar un sistema solar fotovoltaico en algunas viviendas del municipio de Quebradanegra, Cundinamarca, buscando desarrollar una propuesta inicial que permita estudiar el comportamiento del sistema implementado en la zona; a fin de evaluar su replicación en todas las viviendas del municipio. El proyecto surge del interés de satisfacer las necesidades energéticas de las ZNI, o como soporte para las intermitencias en el suministro de energía eléctrica tradicional; debido a que el consumo de las viviendas es mayor en las noches proponen la implementación de baterías. Dentro de los resultados obtenidos, el sistema propuesto no satisface el 100% del consumo de los habitantes de la zona de estudio y proponen un sistema

hibrido que pueda proporcionar el recurso eléctrico necesario, así mismo el tiempo de retorno de la inversión realizada es a mediano plazo aunque los beneficios sociales marcan pauta importante para el análisis de implementación, finalmente se establece que este tipo de implementación son de mayor interés para entidades privadas y por ende aún se requiere la masificación en el sector público (Barrera Salazar & Castilla Garzón, 2018).

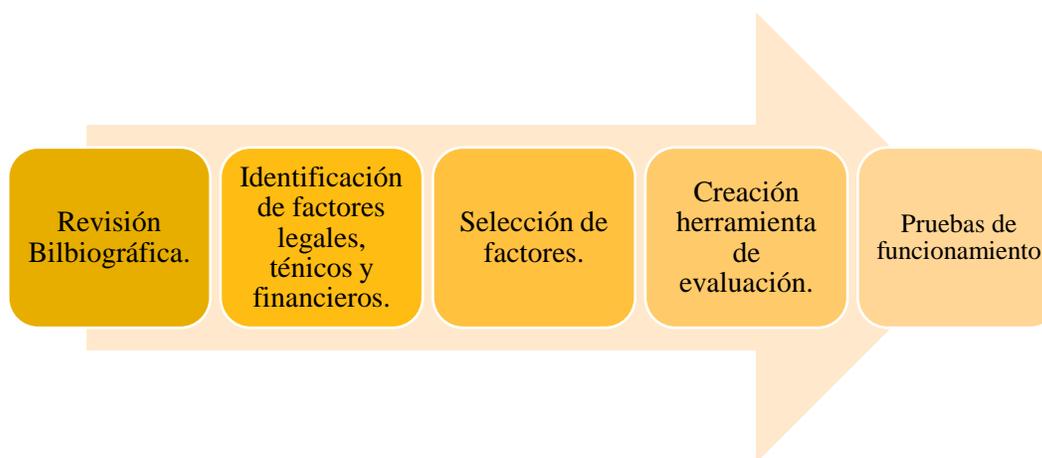
Otra investigación analizó la viabilidad de implementar un sistema solar fotovoltaico en una organización pública de Boyacá, capaz de abastecer el 100% de la energía eléctrica consumida, utilizando baterías para almacenar energía. Dentro de las consideraciones tuvieron presente las variables que intervienen en el proceso de planeación desde la identificación de la radiación solar de la zona hasta la viabilidad financiera del proyecto. En cuanto a los resultados de la investigación identificaron las variables geográficas y climatológicas que afectan el rendimiento y correcto funcionamiento del sistema, condiciones del área disponible, inversión y beneficio así como los requisitos legales; y concluyen que aunque en términos del tiempo que toma recuperar la inversión (14 años para el caso particular) parece poco favorable para un inversionista y por lo tanto, fue importante evaluar la implementación desde otras perspectivas como la ambiental y técnica ya que se logra suplir la demanda 100% a fin de que los procesos que allí se realizan no se vean afectados por intermitencias de energía en la zona (Arias Becerra & Martinez Gomez, 2019).

Por otro lado, el trabajo de investigación realizado por Parra, Carrión y Robayo muestra el análisis para la implementación de un sistema solar fotovoltaico que suple las necesidades energéticas eléctricas del sector floricultor de Cundinamarca, en búsqueda de sostenibilidad ambiental, económica y social. Realizan una evaluación de 3 escenarios en los cuales se evidencia que los beneficios tributarios marcan la diferencia en la viabilidad financiera y que los

costos operativos en una industria pueden verse reducidos por la implementación de FNCER así como tiempos de retorno de la inversión al ser empresas que tienen rentabilidad por sus actividades económicas (Parra Tabares et al., 2019).

Arias y Girón, plantean un protocolo para la implementación y gestión de elementos de energía fotovoltaica en edificios públicos de Cundinamarca, para personas naturales o jurídicas que estén interesadas en la inversión de este tipo de proyectos, incluyendo la utilización de baterías. Logran identificar que la implementación de estos sistemas requiere de una inversión inicial alta y que su aprovechamiento está relacionado con la radiación de la zona, así mismo que se requiere de mano de obra especializada para instalación y mantenimiento. Por otro lado, estos sistemas tienen bajos costos de operación y mantenimiento lo que favorece la implementación. Finalmente realizan un protocolo que permite orientar a otros interesados en la implementación de la energía solar fotovoltaica en la iniciación, planificación, proyección, ejecución y control, donde se evidencia que el retorno de la inversión es a largo plazo y que el beneficio en estas entidades se da en el ahorro de la factura de la luz (Giron Guerra & Arias Pulido, 2020).

6. METODOLOGÍA



El abordaje del presente trabajo de investigación se realiza en cinco fases: revisión bibliográfica, identificación de los factores legales, técnicos y financieros, validación con expertos, selección de los factores más influyentes o sensibles en el dimensionamiento y evaluación de la implementación y finalmente, la creación de una herramienta de evaluación utilizando los factores seleccionados.

En la primera fase: revisión bibliográfica, se realiza una revisión de la producción energética en el país y su relación con el crecimiento económico, el potencial energético y los agentes contaminantes asociados a la generación de energía eléctrica, los compromisos internacionales adquiridos y los proyectos que se han desarrollado en Colombia que apuntan al compromiso adquirido en la COP21, todo desde la perspectiva de implementación de FNCER para autogeneración, con el fin de contextualizar y dar a conocer la importancia y trascendencia de esta investigación.

Así mismo, se revisaron los marcos normativos que el país ha realizado en términos legales, técnicos y financieros, que establecen los lineamientos nacionales para la utilización de este tipo de sistemas e incentivan su implementación para entidades privadas como públicas.

Para el enfoque de esta investigación en el sector público, se realizó una revisión bibliográfica de los proyectos que se han desarrollado en el sector, para identificar su participación en las metas establecidas en los compromisos internacionales COP21 y los proyectos que se han desarrollado y documentado en el departamento de Cundinamarca, específicamente en la zona de Sabana Centro, para conocer el potencial de la zona y así incentivar este tipo de implementaciones; cabe resaltar que acorde a la documentación encontrada, se evidenció un enfoque en entidades privadas por lo que aún hay un amplio espacio a la investigación y documentación en el sector público. Finalmente se realizó una revisión bibliográfica sobre el dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos y las condiciones a tener en cuenta para llevar a cabo su implementación.

Por otro lado, se documentaron los antecedentes en el sector energético de Colombia, las transformaciones energéticas que se buscan lograr, los planes y estrategias que se han implementado, el potencial energético solar para Colombia, Cundinamarca y Sabana Centro, los proyectos que se han desarrollado, sus análisis y resultados a fin de identificar los factores que deben ser tenidos en cuenta, en cuanto al marco legal se extrajeron las normativas principales bajo las cuales se rige la utilización de FNCER para generación de energía eléctrica en Colombia.

En la fase dos: identificación de los factores, a partir de la revisión bibliográfica y la documentación realizada, se identificaron los factores legales, técnicos y financieros que se asocian a la implementación de un sistema solar fotovoltaico, posteriormente se listaron por categorías como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3

Factores que influyen en el dimensionamiento e implementación de sistemas solares fotovoltaicos.

FACTORES		
NOMBRE	UTILIDAD	
MARCO GEOGRÁFICO		
Latitud	Permite determinar la radiación solar de la zona	
Longitud	Permite determinar la radiación solar de la zona	
Elevación nivel sobre el mar	Permite determinar la radiación solar de la zona	
Temperatura promedio	Influye en el rendimiento de las placas solares	
Tipo de suelo	Influye en el tipo de paneles a implementar	
EVALUACIONES TÉCNICAS		
Potencial de generación a partir de radiación solar	Hora solar pico (hSp)	Influye en la capacidad de generación del panel
	Horas de sol efectivo al día o horas de insolación diaria	Influye en la capacidad de generación del panel
	Promedio de Número de Días al mes sin Brillo Solar	Influye en el diseño adecuado
	Irradiación global horizontal media diaria	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar
Vientos	Influye en el dimensionamiento del sistema	
Proyección de sombras acorde al POT	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar	
Edificaciones que generen sombra alrededor	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar	
Número de edificaciones	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar	
Otros elementos que generen sombra	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar	
Número de elementos que generen sombra	Influye en el dimensionamiento del sistema y tecnologías a utilizar	
CONSUMO		
Consumo promedio diario/mensual/anual	Influye en el dimensionamiento del sistema	
Días laborales de la semana	Influye en el dimensionamiento del sistema	
Horas laborales de la semana	Influye en el dimensionamiento del sistema	
Jornadas de consumo	Horario laboral día hábil (horas)	Influye en el dimensionamiento del sistema
	Horario laboral fin de semana (horas)	Influye en el dimensionamiento del sistema
	Horario de mayor consumo de energía (horas)	Influye en el dimensionamiento del sistema
CONEXIÓN SIN		
Tipo de sistema (On-grid Off-grid)	Influye en el dimensionamiento del sistema y la normatividad a considerar	
Porcentaje de la demanda a suplir	Influye en el dimensionamiento del sistema y la normatividad a considerar	
Porcentaje de ahorro en consumo	Influye en el dimensionamiento del sistema y la normatividad a considerar	
Entrega de excedentes	Influye en el dimensionamiento del sistema y la normatividad a considerar	
ÁREA A UTILIZAR		
Tipo de zona	Influye en la viabilidad de la implementación	
Antigüedad de la edificación	Influye en el dimensionamiento e implementación del sistema	
Carga a soportar	Influye en el dimensionamiento e implementación del sistema	
Espacio disponible	Influye en el dimensionamiento e implementación del sistema	
Área disponible de instalación	Influye en el dimensionamiento e implementación del sistema	
Material área disponible	Influye en la implementación del sistema	
Tipos de cubierta	Influye en la implementación del sistema	
Permiso para uso de techos	Influye en la implementación del sistema	
Permiso de obra para la instalación	Influye en la implementación del sistema	
Área disponible para mantenimiento	Influye en el dimensionamiento e implementación del sistema	
FINANCIEROS		
Año de inicio del proyecto	Influye en el retorno de la inversión	
TRM	Influye en los costos de la implementación	
Vida útil del activo	Influye en el VPN	
Variación del consumo anual	Influye en el ahorro anual que se logra con la implementación	
Precio unitario kWh	Influye en el ahorro mensual que se logra con la implementación	
Costo mensual/anual del consumo	Influye en el ahorro anual/mensual que se logra con la implementación	
Presupuesto disponible	Influye en viabilidad financiera de la implementación	
Fuentes de financiación	Influye en viabilidad financiera de la implementación	

Nota: La tabla muestra los factores que influyen en el dimensionamiento e implementación de sistemas solares fotovoltaicos, estos fueron extraídos de la revisión bibliográfica. Elaboración: propia.

Por otro lado, acorde a la revisión bibliográfica, para el marco técnico se documentaron las ecuaciones necesarias para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico, cabe resaltar que solo se tomaron las necesarias para estimar los elementos principales del sistema: paneles, estructuras, inversores, baterías y controladores:

Tabla 4

Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico.

Elemento	Ecuación
Número de módulos	$(\text{Energía necesaria}) / (\text{Irradiancia} * \text{Potencia pico del módulo})$
Potencia del Inversor	$\text{Potencia total} / \text{eficiencia}$
Corriente del controlador	$\text{Potencia generada por todos los módulos} / \text{Voltaje arreglo de baterías}$
Corriente a almacenar	$(\text{Consumo total diario} * \text{días de autonomía}) / \text{Voltaje} * \text{profundidad de descarga}$
Cantidad de baterías	$\text{Corriente para almacenar} / \text{Capacidad batería}$

Nota: La tabla muestra las ecuaciones recopiladas de los distintos documentos investigados y revisadas con el docente experto, que permiten estimar el dimensionamiento de los elementos principales de un sistema solar fotovoltaico, los elementos son estimados con una eficiencia del 80%. Elaboración: propia, datos tomados de proyectos mencionados en el estado del arte.

Así mismo, para estimar los costos de la implementación de estos sistemas, se realizó la investigación de los precios de los elementos individualmente en las páginas web de 7 proveedores: AutoSolar, Merkasol, Soleng, Solartex, Osaka, Nexosolar y Salcantay; con la información consolidada se realizó una interpolación en Excel, obteniendo así las ecuaciones que permiten estimar los costos aproximados de los elementos a utilizar, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 5

Funciones de estimación del costo de los elementos principales de un sistema solar fotovoltaico.

Elemento	Función de costo
Paneles solares	$y = 8E-06x^3 - 0,0068x^2 + 1,9801x - 60,454$
Inversor	$y = -7E-06x^2 + 0,2769x + 71,653$
Estructuras	$y = -0,1813x^2 + 36,768x + 29,499$
Baterías	$y = -6E-07x^3 + 0,0015x^2 + 1,0628x + 113,97$
Controlador	$y = -0,0019x^3 + 0,3387x^2 - 9,332x + 160,14$

Nota: La tabla muestra las funciones de costo, obtenidas de la interpolación de precios de los elementos principales de un sistema solar fotovoltaico. Los datos para la interpolación se obtuvieron en las páginas web de los proveedores ya mencionados. Elaboración: propia.

En la fase tres: selección, se realizó una revisión de los factores comunes asociados a los proyectos de autogeneración encontrados en la bibliografía del estado del arte y a su vez se validaron con 5 expertos en el área, a fin de identificar cuáles tienen mayor influencia o son de mayor sensibilidad en el dimensionamiento e implementación del sistema solar fotovoltaico.

En la fase cuatro: creación de la herramienta, inicialmente se utilizaron los factores identificados en la segunda fase, para la construcción de las secciones de la herramienta, definiendo:

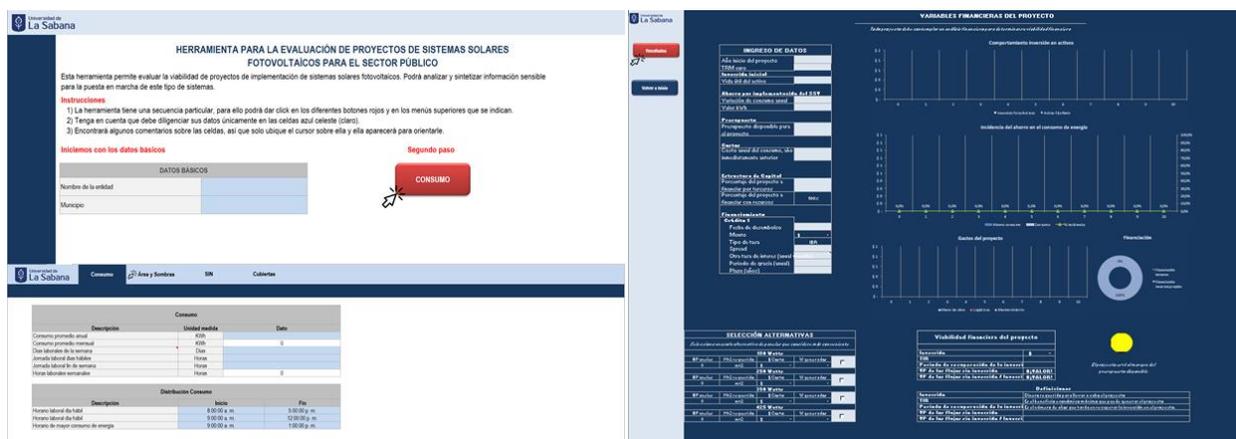
- Datos de entrada que el usuario debía ingresar acorde a las condiciones iniciales de la entidad.
- Datos de entrada para el dimensionamiento del sistema (utilizando las ecuaciones de la tabla 4).
- Datos de salida obtenidos de los dos puntos anteriores para estimar el costo del sistema dimensionado (utilizando las ecuaciones de la tabla 5)
- Datos de entrada para el análisis de viabilidad financiera a través de TIR y tiempo de retorno de la inversión.

- Datos de entrada como normativas, para la sección de marco legal y técnico, acorde a las condiciones iniciales y el sistema dimensionado.

Finalmente, para validar el funcionamiento de la herramienta se realizó una fase de pruebas con datos de dos proyectos encontrados en la revisión bibliográfica, a fin de comparar los resultados de las estimaciones calculadas con los obtenidos en los proyectos ya realizados. A continuación, se presentan algunas imágenes de la interfaz de la herramienta desarrollada.

Figura 7

Interfaz herramienta para la evaluación de proyectos de sistemas solares fotovoltaicos para el sector público.



7. RESULTADOS

De la información revisada y documentada en el estado del arte, correspondiente a los proyectos de Higuera y Carmona (2017), Estrada y Muñoz (2017), Espitia (2018), Benítez & Tello (2018), Barrera y Castilla (2018), Arias & Martínez (2019), Parra Tabares (2019), Arias y Girón (2020); así como de otras fuentes mencionadas anteriormente en secciones de este documento y validación con expertos, se identificaron y seleccionaron los siguientes factores legales, técnicos y financieros que deben ser tenidos en cuenta en la implementación de un sistema solar fotovoltaico.

Tabla 6

Factores legales, técnicos y financieros que enmarcan la utilización de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia para la autogeneración.

	Factor	Descripción
Legal	Capacidad instalada	Si es autogenerador a pequeña escala con capacidad instalada menor o igual a 0,1 MW o mayor a 0.1 MW y menor a 1 MW. Si es autogenerador a gran escala con capacidad instalada mayor a 1 MW y menor o iguales 5 MW.
	Conexión al SIN	Integración al Sistema Interconectado Nacional para suplir la demanda con el sistema solar fotovoltaico y con la red eléctrica.
	Entrega de excedentes	Si entrega o no excedentes hay requerimientos y procedimientos que se deben cumplir
	Incentivos tributarios	Dependiendo del tipo de entidad aplican o no todos los incentivos establecidos en la ley 1715 de 2014
Técnicos	Ubicación	Municipio donde se encuentra la entidad para conocer la irradiancia de la zona en particular.
	Consumo	Consumo de la entidad acorde a los recibos de la luz, para dimensionar el sistema acorde a la demanda a suplir. Puede ser total o parcial.
	Área disponible	Área de la entidad a utilizar y características referentes a ella para tener en cuenta en la implementación.
	Conexión al SIN	El tipo de sistema que se desea implementar: On-grid (integración al SIN) u Off-grid (autónomo) para dimensionar si utilizara acumuladores y regulador/controlador y los trámites correspondientes.
	Entrega de excedentes	Si se desea o no entregar excedentes para realizar los trámites correspondientes.
	Tipo de cubierta	El tipo de cubierta de la entidad para identificar el tipo de estructura para fijar los paneles que se deben utilizar.
Financieros	Presupuesto	Es el valor que la entidad estima para invertir en la implementación del sistema solar fotovoltaico.
	Año de inversión	Es el año en que se realizará la inversión a fin de proyectar los beneficios por ahorro en los años futuros.
	TRM euro	Tasa que permite estimar el costo de los elementos principales del sistema solar fotovoltaico en COP.
	Inversión	Valor estimado del costo del sistema solar fotovoltaico (elementos principales).

Otros gastos	Valor estimado de otros gastos asociados a la planeación, conexión y puesta en marcha del sistema solar fotovoltaico.
Financiamiento	Porcentaje de la inversión que la entidad desea financiera con recursos de terceros y permite la proyección de sus obligaciones financieras durante el tiempo de análisis.

Nota: La tabla muestra los factores legales, técnicos y financieros identificados y seleccionados acorde a la revisión bibliográfica de proyectos y guías metodológicas de implementación de sistemas solares fotovoltaicos. Elaboración: propia, datos tomados de la normatividad colombiana.

Teniendo en cuenta los factores mencionados, se realiza la evaluación de dos proyectos en la herramienta diseñada, uno On-grid y otro Off-grid.

Para el primer proyecto: Sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó, que busca iniciar con la implementación, supliendo solo una parte de su consumo total, se tienen las siguientes condiciones iniciales y dimensionamiento del sistema:

Tabla 7

Condiciones iniciales del proyecto: sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.

Condición inicial	Valor
Potencia requerida	5.5 KW/ h
Potencia estimada	26.400 W/d
Horas de operación	8 h / día
Número de paneles	20 unidades
Potencia de paneles	330 W
Inversores	1 de 15000W

Nota: La tabla muestra algunos datos entregados por la persona encargada de la Oficina Asesora de Planeación Estratégica sobre el sistema que fue instalado. Elaboración: propia, datos tomados de (Larquin, 2021).

Al realizar ingresar los datos en la herramienta, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 8

Dimensionamiento del número de paneles para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.

SELECCIÓN ALTERNATIVAS				
Selecciona una sola alternativa de paneles que considere más conveniente				
150 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
37	83 mt2	\$ 18.358.537	711	<input type="checkbox"/>
250 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
22	58 mt2	\$ 13.407.224	1.185	<input type="checkbox"/>
350 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input checked="" type="checkbox"/>
16	47 mt2	\$ 10.146.611	1.659	<input checked="" type="checkbox"/>
425 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
13	22 mt2	\$ 9.784.981	2.015	<input type="checkbox"/>

Aquí se evidencia que la herramienta estima que el sistema requiere de 16 paneles de 350W, los cuales entregarían 5.6 KWh (mayor a la potencia requerida 5.5 KWh). No obstante, en la revisión de la tabla se ve que la entidad implementó 20 paneles de 330 W que entregarían 6.6 KWh, la diferencia radica en que para los paneles implementados se estima un porcentaje de pérdida del sistema del 20% lo que lleva a incrementar el número de paneles para alcanzar una potencial más alta.

Al ser un sistema On-grid, que se conectará al SIN y por lo tanto no requiere de baterías ni controlados, el dimensionamiento y costos de los elementos principales que se requieren son:

Figura 9

Dimensionamiento de los elementos principales del sistema On-grid y sus costos para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA (ESTIMADO)				
Paneles solares				
Potencia Panel	#Paneles	Mi2 requerido	W generados	Mi2 requerido
350 Watts	16	47,1	\$ 1.659	\$ 10.146.611
Inversores				
Potencia del inversor requerida			Watts Inversor	\$ Costo
196 Watts			250 Watts	\$ 631.963
Estructuras				
\$ Costo				
\$ 2.543.159				
Selección tipo de sistema On-grid, por tanto no hay necesidad de Baterías				
Amperio hora requerido	Amperio batería	# baterías	\$ Costo	
	A	0	\$ -	
Selección tipo de sistema On-grid, por tanto no hay necesidad de Controlador				
Corriente del controlador	Amperios controladores	# controladores	\$ Costo	
			\$ -	
TOTAL INVERSIÓN ACTIVOS			\$	13.321.733

En la figura se evidencia que al ser un sistema On-grid, solo requiere de paneles, estructuras e inversor, y que el valor de la inversión en activos es de \$13.321.733.

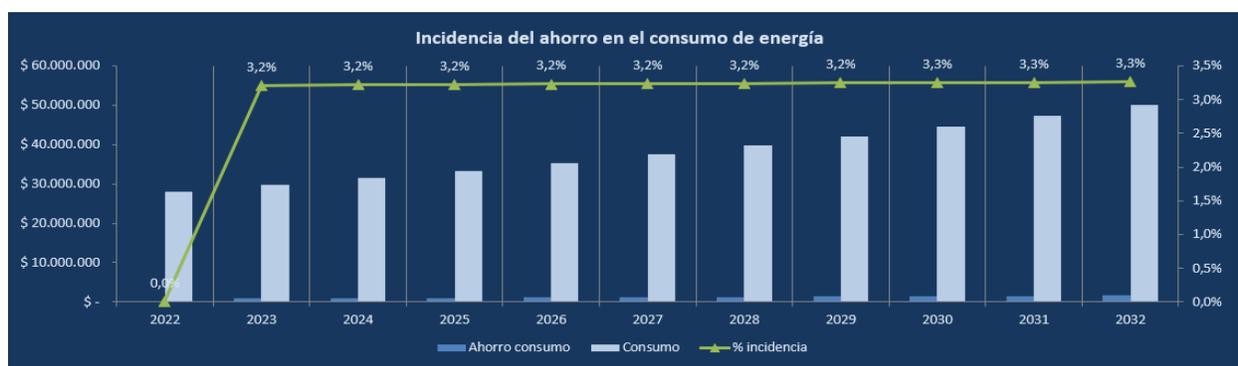
Figura 10

Comportamiento inversión de activos (depreciación en 7 años) para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.



Figura 11

Incidencia del ahorro en el consumo de energía para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.

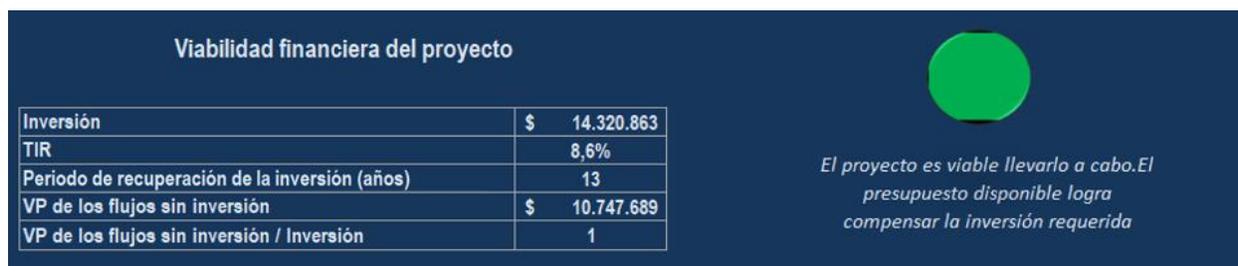


Ya que el sistema implementado solo sufre una pequeña parte del consumo total, y por lo tanto el sistema solar fotovoltaico entrega una potencia bastante menor en relación con el consumo anual estimado, cuyo costo es de \$ 27.993.492 (acorde a una factura del palacio municipal de otro municipio), el % incidencia del ahorro es relativamente bajo, 3.2% en los primeros 7 años incrementado 1 punto porcentual por los siguientes 3 años. Cabe resaltar que acorde a la información entregada por la persona encargada de la Oficina Asesora de Planeación Estratégica de Sopó el sistema implementado es una prueba piloto para la entidad.

Ya que la herramienta considera los marcos legales y técnicos para los autogeneradores, permite visualizar los apartados más importantes de las leyes, decretos y resoluciones, a ser tenidos en cuenta en la actividad de autogeneración (ver Anexo C)

Figura 12

Análisis de viabilidad financiera, TIR, Periodo de recuperación y VP de los flujos sin inversión para el sistema de energía solar fotovoltaico On-Grid para el palacio municipal de Sopó 2020.



Como se observa en la imagen, la implementación del sistema solar fotovoltaico es viable, para una inversión de \$14.320.863 (activos, mano de obra y logísticos) se tiene una TIR (> 1) de 8.6%, indicando que se tendrá rentabilidad (retorno de la inversión en ahorros) en 13 años.

Para el segundo proyecto: Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá, que realizó una implementación del sistema solar fotovoltaico Off-grid,

supliendo el 100% de su consumo total, se tienen las siguientes condiciones iniciales y dimensionamiento del sistema:

Tabla 8

Condiciones iniciales del proyecto: Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.

Condición inicial	Valor
Potencia estimada	12.191 W/d
Horas de operación	8 h / día
Número de paneles	10 unidades
Potencia de paneles	330 W
Inversores	1 de 4000W
Controlador	68.7 A
Número de baterías	8 de 150 Ah
Costo de la inversión total (considerando elementos de conexión y puesta en marcha)	\$17.293.300
Tiempo de retorno de la inversión	14 años

Nota: La tabla muestra algunos datos extraídos del documento Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá. (Arias Becerra & Martinez Gomez, 2019).

Elaboración: propia, datos tomados de (Arias Becerra & Martinez Gomez, 2019).

Al ingresar los datos en la herramienta, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 13

Dimensionamiento del número de paneles para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.

SELECCIÓN ALTERNATIVAS				
<i>Selecciona una sola alternativa de paneles que considere más conveniente</i>				
150 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
20	55 mt2	\$ 10.053.385	600	
250 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
12	41 mt2	\$ 7.341.978	1.000	
350 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input checked="" type="checkbox"/>
9	35 mt2	\$ 5.556.422	1.400	
425 Watts				
#Paneles	Mt2 requerido	\$ Costo	W generados	<input type="checkbox"/>
7	12 mt2	\$ 5.358.389	1.700	

Aquí se evidencia que la herramienta estima que el sistema requiere de 9 paneles de 350W, los cuales entregarían 3.15 KWh. Y en la revisión de la tabla se ve que la entidad implementó 20 paneles de 330 W que entregarían 3.6 KWh, la diferencia radica en dos variables principales, la irradiancia de la zona $4 \text{ KWh}/\text{m}^2/\text{día}$ para San Luis de Gaceno, Boyacá y que Arias y Martínez (2019) afirman que sistema que proponen se encuentra sobredimensionado.

Al ser un sistema Off-grid, que no se conectará al SIN, requiere de baterías y controlador; el dimensionamiento y costos de los elementos principales que se requieren son:

Figura 14

Dimensionamiento de los elementos principales del sistema On-grid y sus costos para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA (ESTIMADO)				
Paneles solares				
Potencia Panel	#Paneles	Mt2 requerido	W generados	Mt2 requerido
350 Watts	7	32,5	\$ 1.659	\$ 4.685.505
Inversores				
Potencia del inversor requerida	Watts Inversor	\$ Costo		
91 Watts	250 Watts	\$ 631.963		
Estructuras				
\$ Costo				
\$ 1.296.411				
Baterías				
Amperio hora requerido	Amperio batería	# baterías	\$ Costo	
4064 A	1400 A	3	\$ 4.136.019	
Controlador				
Corriente del controlador	Amperios controladores	# controladores	\$ Costo	
138 A	70 A	2	\$ 4.604.640	
TOTAL INVERSIÓN ACTIVOS			\$ 15.354.537	

En la figura se evidencia que al ser un sistema Off-grid, requiere de paneles, estructuras, inversores, baterías y controladores, también se visualiza que el valor de la inversión en activos es de \$15.354.537.

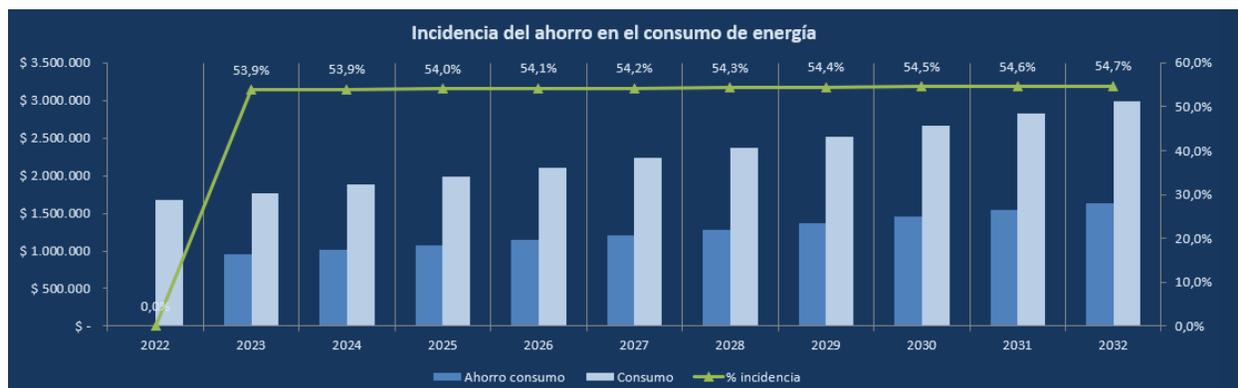
Figura 15

Comportamiento inversión de activos (depreciación en 5 años, escenario propuesto por los autores) para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.



Figura 16

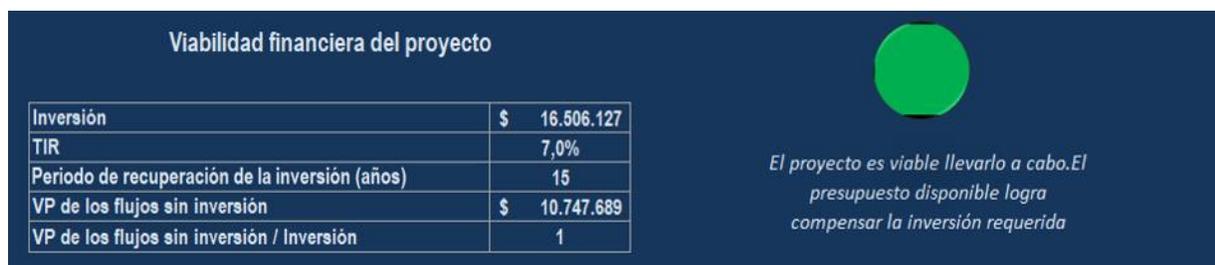
Incidencia del ahorro en el consumo de energía para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.



Ya que el sistema implementado suple el consumo total, con un costo del consumo anual de \$ 1.670.821 (tomando del documento), el % incidencia del ahorro es 53.9% en los primeros 2 años incrementado 0.1 punto porcentual por los siguientes años.

Figura 17

Análisis de viabilidad financiera, TIR, Periodo de recuperación y VP de los flujos sin inversión para el Sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno, Boyacá.



Como se observa en la imagen, la implementación del sistema solar fotovoltaico es viable; para una inversión de \$16.506.127 (equipos, mano de obra y logísticos) valor cercano al presentado en la tabla 6 (\$17.293.300), se tiene una TIR (> 1) de 7%, indicando que se tendrá rentabilidad (retorno de la inversión en ahorros) en 15 años, que en comparación con el tiempo dado en la tabla 6 (14 años) evidencia un acercamiento significativo entre la evaluación realizada por la herramienta y la presentada por Arias y Martínez en su documento.

Como se observa en los resultados mostrados para ambos proyectos, la herramienta permite al usuario elegir las alternativas en términos de cantidad de paneles a utilizar y acorde a su elección dimensiona el restante de elementos del sistema.

Así mismo presenta el marco legal y técnico (Anexo C), el cual se actualiza dependiendo de la normativa que aplica para la entidad, acorde a las condiciones iniciales de esta; y finalmente muestra un formulario de resumen en el que se consolidan la información más relevante de los datos de entrada (condiciones iniciales de la entidad) junto con el dimensionamiento y estimación de costos del sistema a implementar, como se presenta a continuación:

8. CONCLUSIONES

Para la implementación de un sistema solar fotovoltaico existen diversos factores legales, técnicos y financieros que afectan su implementación, los cuales dependerán de variables como el interés de la entidad (cuánto desea suplir, qué ahorro quiere lograr, si desea un sistema autónomo o no etc.), el recurso solar de la zona, así como el comportamiento de vientos y también de las condiciones iniciales del lugar donde se desea implementar (ubicación, área disponible, consumo etc.).

Por otro lado, pese a que la implementación de estos sistemas utiliza factores específicos a las variables particulares de cada entidad, es posible seleccionar factores generales a cualquier implementación, a través de una revisión de proyectos, guías metodológicas y validación con expertos, esta última acción permite a las entidades contar con un dimensionamiento y evaluación de estos proyectos más cercano a la realidad, pues hace funcional la herramienta no solo desde la perspectiva académica sino práctica.

Para los factores legales es importante tener presente el marco legal vigente, establecido por el gobierno nacional, ya que este se ha actualizado con normativas que mitigan las barreras que se vienen identificando en la promoción del desarrollo y utilización de FNCER, en términos de requerimientos, tramites y recomendaciones.

Por otra parte, al estimar los costos de los elementos principales de un sistema: paneles, estructuras, inversor, reguladores y baterías, es posible estimar el valor de la inversión en un 60% del valor real (Salamanca Avila, 2017), pese a que en una cotización final de la inversión se tiene en cuenta otras variables asociadas a la conexión y puesta en marcha del sistema como materiales eléctricos, obra civil, ingeniería y planificación, instalación entre otros.

En cuanto a la evaluación financiera, se evidencia que la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en entidades públicas tiene un tiempo de retorno de la inversión a mediano

y largo plazo, esto se debe a que la recuperación de la inversión está netamente asociada al ahorro por la implementación, y por lo tanto los ahorros logrados después del retorno de esta cuentan para la entidad como beneficio económico. También se observa en la evaluación financiera que los tiempos de retorno de la inversión son amplios y la TIR baja, esto se debe a que las entidades públicas de Sabana Centro tienen un consumo de energía bajo en comparación con entidades de otro tipo y otras zonas, lo que afecta su costo de consumo influyendo así en los dos indicadores de evaluación.

Así mismo, la evaluación técnica y financiera a través de esta herramienta (que considera aquellos factores más influyentes o sensibles en este tipo de proyectos) otorga a las entidades públicas una estimación del ahorro en los costos de consumo, el cual afecta directamente los costos de operación; una acción importante para entidades de este tipo ya que los ahorros logrados con la implementación podrían llegar a ser destinados para otras áreas de responsabilidad social asociadas a sus planes de gobierno.

Por otro lado, en este proyecto de investigación se logra sintetizar información compleja asociada al dimensionamiento e implementación de estos sistemas; a través de la herramienta las entidades públicas cuentan con un recurso (evaluación técnica y financiera) que les facilita la comprensión de la implementación de estos sistemas, así como la toma de decisiones frente a la puesta en marcha de sistemas solares fotovoltaicos en sus infraestructuras.

Cabe resaltar que los resultados legales, técnicos y financieros obtenidos, evidencian la necesidad que surge en las entidades públicas de contar con el apoyo necesario para que la implementación de este tipo de proyectos logre tiempos de retorno de la inversión más cortos y tasa más bajas, haciendo más significativo el aporte que entregan en la implementación de FNCER en sus infraestructuras.

Finalmente, de acuerdo con el desarrollo y resultados obtenidos en este proyecto, nuevos problemas de investigación que pueden abarcarse en futuros trabajos podrían ser:

- El análisis del impacto que tienen las entidades públicas, que implementan sistemas solares fotovoltaicos, en la transformación de la matriz energética del país, así como en las medidas de eficiencia energética.
- El análisis del impacto que tienen las entidades públicas, que implementan sistemas solares fotovoltaicos, en la minimización del gasto en el presupuesto nacional.
- • El análisis del impacto que tienen las entidades públicas, que implementan sistemas solares fotovoltaicos, en la disminución de las emisiones de GEI.
- Evaluar la posibilidad de suplir la demanda energética de otras entidades cercanas a partir del mismo sistema solar fotovoltaico, tomando los excedentes generados.
- Analizar posibles alianzas estratégicas entre entidades públicas y privadas para incentivar el financiamiento de proyectos asociados a energía solar.
- Ampliar el uso de la herramienta actual, para dimensionar y evaluar proyectos de otros tipos de energía como eólica, biomasa etc.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOLGEN. (2017). *VISION 2030*.

Arias Becerra, D. F., & Martinez Gomez, K. S. (2019). *Evaluación de la viabilidad para la implementación de un sistema solar fotovoltaico en la notaría única de San Luis de Gaceno Boyacá*. Universidad Libre.

Barrera Salazar, W. A., & Castilla Garzón, F. A. (2018). *PROPUESTA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA CONSUMO ELÉCTRICO EN EL MUNICIPIO DE QUEBRADANEGRA, CUNDINAMARCA*. UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA.

Benitez Soler, A. C., & Tello, I. D. (2018). *Estudio de factibilidad de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en la finca Villa Catalina*. Universidad Libre.

Celsia. (n.d.). *Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia*.

<https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>

Celsia. (2018). *Energía solar en Colombia: así es el panorama en cifras*.

<https://blog.celsia.com/new/energia-solar-en-colombia-panorama-en-cifras/#:~:text=Lo anterior equivale a una,9 kWh%2Fm2%2Fd.>

Chacón Enciso, R. J., & Leiva mutis, L. E. (2016). *Incorporación De Plantas Menores De Generación Al Mercado De Energía Colombiano Y Negociación De La Energía Eléctrica Generada*.

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2008). *Distribución de Energía Eléctrica. Comisión de Regulación de Energía y Gas -CREG*, 1–32.

https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-05/distribucion_energ_electrica.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – Cuenta de emisiones al aire (2016-2017)*. 1–14.

- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Instalación de sistemas solares fotovoltaicos individuales en zonas no interconectadas*.
- El Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014* (Issue May).
- El Congreso de Colombia. (2020). *Ley 1955 de 2010*. 1–140.
- Espitia Rey, C. M. (2017). *Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia*. UNIVERSIDAD DE SANTANDER.
- Estrada Martínez, L. C., & Muñoz Fuentes, A. J. (2017). *Proyecto para la gestión de paneles solares en la vereda La Esperanza del municipio de Convención, Norte de Santander, Colombia*. Universidad Nacional Abierta a Distancia.
- García Arbeláez, C., G. Vallejo, M. L. H. y E. M. E. (2016). *El Acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático* (1st ed.). WWF-Colombia.
- Gentil Orozco, A. O. (2020). *DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED* [UNIVERSIDAD DE LOS ANDES].
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/49055/u833765.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Giron Guerra, W. R., & Arias Pulido, B. N. (2020). *Elaboración de un protocolo para la implementación de energía fotovoltaica en edificios públicos de Cund. Fômeque y Jerusalén*. Universidad Católica de Colombia.
- Higuera Aguilar, L. H., & Carmona Valencia, H. (2017). *Análisis de factibilidad de un proyecto de autogeneración eléctrica fotovoltaica en Colombia para áreas productivas menores de 10.000 m²*. 175. <http://hdl.handle.net/10784/11690>
- Hincapié Vigoya, L. F. (2018). Caracterización, impacto e implementación de las energías alternativas en Colombia en empresas públicas y privadas. Estudio preliminar. *Inventum*,

13(25), 17–28. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inven-tum.13.25.2018>. 17-28

IDEAM. (2016). *INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA*.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

IDEAM. (2018). *Atlas climatológico, radiación y viento en Colombia*.

http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72007220/PDF_ATLAS/83b33ddd-09ef-4fa6-9419-cdf8b26db260

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización*. 180. www.minambiente.gov.co; www.co.undp.org

La República. (2018). *Emisiones del país de gases de efecto invernadero aumentaron 9,44%*.

<https://www.larepublica.co/economia/emisiones-del-pais-de-gases-de-efecto-invernadero-aumentaron-944-2807476#:~:text=De acuerdo con el Instituto,57%25 de las emisiones mundiales>.

Larquin. (2021). *Sistema de Energía Solar Sistema Solar On-Grid 5500 W/hp*.

Ministerio de minas y energía. (2015). Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*.

http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf

Ministerio de Minas y Unidad de Planeación Minero Energética. (2018). Boletín Estadístico.

Entre Ciencia e Ingeniería, III(97), 141.

http://biblioteca.ucp.edu.co/OJS/index.php/paginas/article/view/2570%5Cnhttp://unesdoc.unesco.org/images/0011/001163/116345s.pdf%5Cnhttp://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/sadpro/Documentos/docencia_vol3_n2_2002/8_art._5_fernando_Garcia.pdf%5Cnhttp://w

ww.

Parra Tabares, P. A., Carrión Camelo, V. A., & Robayo Morales, A. J. (2019).

*IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR PARA LA INDUSTRIA
FLORICULTORA EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA.
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROYECTOS.*

Salamanca Avila, S. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica.

Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*, 3(30), 263.

<https://doi.org/10.14483/23448350.12213>

The World Bank. (n.d.). *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/map?c=4.881144,-74.099075,11&m=site>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2010). Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales. *Ministerio de Minas Y Energía*, 47.

<http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2014). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. *Ministerio Minas y Energía*, 1, 28.

UPME. (2019). *Plan Energetico Nacional 2020-2050 (UPME)*. 83.

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Presentacion_PEN_V48.pdf

UPME. (2020). Informe de Registro de Proyectos de Generación. In *Ministerio de Minas y Energía MME* (Issue 0520).

http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2021/Registro_marzo_2021.pdf

10. ANEXO A

Tabla 9

Marco normativo de la autogeneración en Colombia, incluye artículos de interés para entidades públicas.

Legislación	De interés
Ley 1715 de 2014	Artículo 8. Promoción de la autogeneración a pequeña y gran escala. Se autoriza la entrega de excedentes, se reconocerán mediante la medición bidireccional como créditos de energía. Podrán negociar los créditos y los derechos inherentes a estos con terceros naturales o jurídicos.
	Artículo 12. Incentivo tributario IVA en equipos elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados.
	Artículo 13. Incentivo arancelario de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional.
	Artículo 19. Fomentar el aprovechamiento del recuso solar en edificaciones oficiales.
	Artículo 29. Intercambio de conocimiento sobre buenas prácticas de eficiencia energética entre los organismos del sector público.
	Artículo 30. Edificios pertenecientes a las administraciones públicas deben establecer objetivos de eficiencia energética. Destinar recursos para este objetivo.
	Artículo 32. Las administraciones públicas, en sus ámbitos territoriales, adoptarán la utilización de FNCE para los edificios y equipos.
	Artículo 41. Las administraciones públicas deben tomar acciones ejemplares en el desarrollo de la FNCER.
	Artículo 42. Las administraciones públicas fomentaran actividades de investigación, desarrollo e innovación en el campo de las FNCER.
	Decreto 2469 de 2014
Artículo 4. Parámetros para ser considerado autogenerador: (Decreto 1073 de 2015 - Artículo 2.2.3.2.4.7.) La energía eléctrica producida es para su propio consumo, y no utiliza activos de uso del Sistema de Transmisión Nacional y/o sistemas de distribución.	
La cantidad de energía sobrante o excedente puede ser superior en cualquier porcentaje al valor de su consumo propio.	
El autogenerador a gran escala deberá ser representado ante el mercado mayorista por un agente comercializador o por un agente generador.	
Los activos de generación pueden ser de propiedad de la persona natural o jurídica o de terceros y la operación de dichos activos puede ser desarrollada por la misma persona natural o jurídica o por terceros.	
Decreto 1073 de 2015	Artículo 2.2.3.2.4.8. Los autogeneradores a pequeña escala con capacidad instalada menor o igual a 0,1 MW no tienen la obligación de suscribir un contrato de respaldo de disponibilidad de capacidad de red.
	Artículo 2.2.3.8.3.1. Requisitos generales para acceder al incentivo de exclusión del IVA Artículo 2.2.3.8.4.1.- Requisitos generales para acceder al incentivo de exención de gravamen arancelario
Resolución 281 de 2015	Artículo 1°. El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de un (1) MW, y corresponderá a la capacidad instalada del sistema de generación del autogenerador.
Resolución 2000 de 2017	Artículo 4. La solicitud de acreditación para los beneficios tributarios debe presentarse a través de la ventanilla integral de tramites ambientales en línea (VITAL). Requisitos en el artículo 3 de esta resolución.
Ley 1955 de 2019	Artículo 287. El Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía - FENOGE podrá financiar proyectos de gestión eficiente de la energía y sistemas individuales de autogeneración con FNCE en ZNI y en el Sistema Interconectado Nacional, incluyendo el mantenimiento y reposición de equipos y la transferencia del dominio de los activos a los beneficiarios de los respectivos proyectos.
Resolución 203 de 2020	Artículo 2: inversiones susceptibles de los beneficios. ver anexo no. 1 listado de bienes y servicios de la resolución.
	Artículo 4 Requisitos para solicitar la certificación para beneficios tributarios.

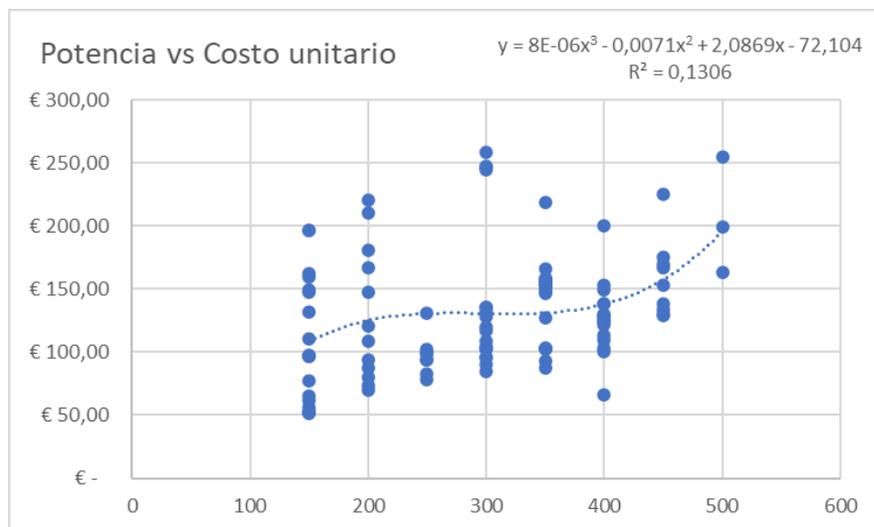
	Artículo 5. Procedimiento para la expedición de la certificación para la procedencia de los beneficios tributarios y Artículo 8: vigencia del certificado emitido por la UPME
Resolución 030 de 2018	Artículo 2. Aplica a los autogeneradores a pequeña escala. También aplica a las conexiones de los autogeneradores a gran escala mayores a 1 MW y menores o iguales 5 MW.
	Título II, Capítulo 1, Artículo 5. Estándares técnicos de disponibilidad del sistema en el nivel de tensión 1.
	Capítulo II, Artículo 10 y 11 Procedimiento simplificado de conexión al STR o SDL del AGPE ($\leq 0,1$ MW y $\geq 0,1$ MW).
	Capítulo III, Artículo 13 y 14. Sistema de medición para AGPE y Fronteras comerciales.
	Título III, Artículo 16 y 17. Alternativas de entrega de los excedentes de AGPE y Reconocimiento de excedentes de AGPE que utiliza FNCER.
	Artículo 18 y 21. Información al usuario AGPE por la entrega de excedentes y Obligación de información de usuarios AGPE.
Resolución CREG 002 de 2021	Artículo 5. Estándares técnicos de disponibilidad del sistema en el nivel de tensión 1. No aplica a los AGPE que no entregan excedentes, ni a los que entreguen o no conectados al nivel de tensión 2.
	Artículo 8. Condición para conectarse como AGPE.
	Artículo 11. Formatos de solicitud de conexión simplificada, estudios, sistemas de protección y pruebas a realizar.
	Artículo 12, 13 y 14. Procedimiento simplificado de conexión al SDL para AGPE con capacidad instalada menor a 0.1MW, menor a 1MW y menor a 5 MW, con y sin entrega de excedentes a la red.
	Artículo 16. Sistema de medición para AGPE que entrega excedentes.
	Artículo 20. Tratamiento de excedentes de los usuarios AGPE en el ASIC y el LAC.
	Artículo 21. Reconocimiento de excedentes de AGPE que utiliza FNCER,
	Artículo 22. Información al usuario AGPE por la entrega de excedentes.
NCT2050	Sección 690 Sistemas solares fotovoltaicos: sistemas solares fotovoltaicos para generación de energía eléctrica, incluye circuitos, unidades de regulación y controladores, así como sistemas autónomos o interconectados a otras fuentes de generación y con o sin almacenamiento.

Nota: Elaboración: propia, datos tomados de normatividad colombiana.

11. ANEXO B

Figura 19

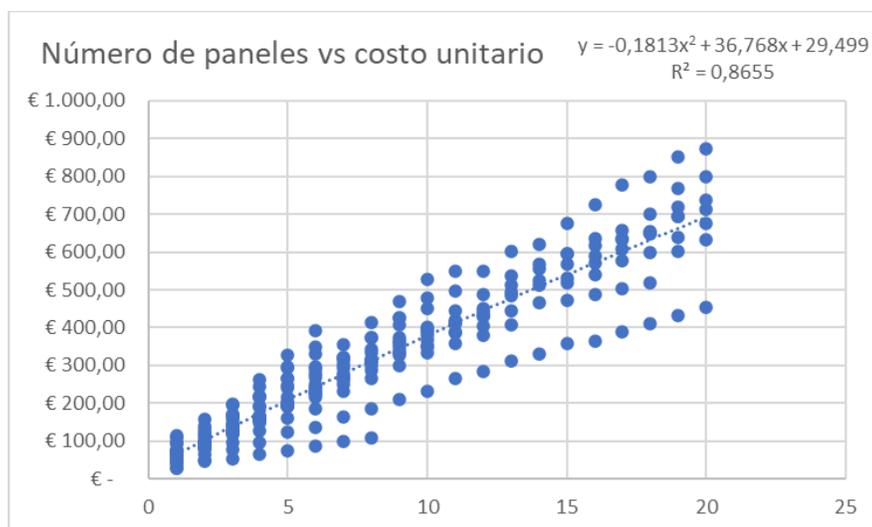
Gráfico de dispersión para la estimación del costo de los paneles solares.



Nota: El gráfico muestra la función de mayor confiabilidad (R^2 mayor): función polinómica de grado 3. Elaboración: propia.

Figura 20

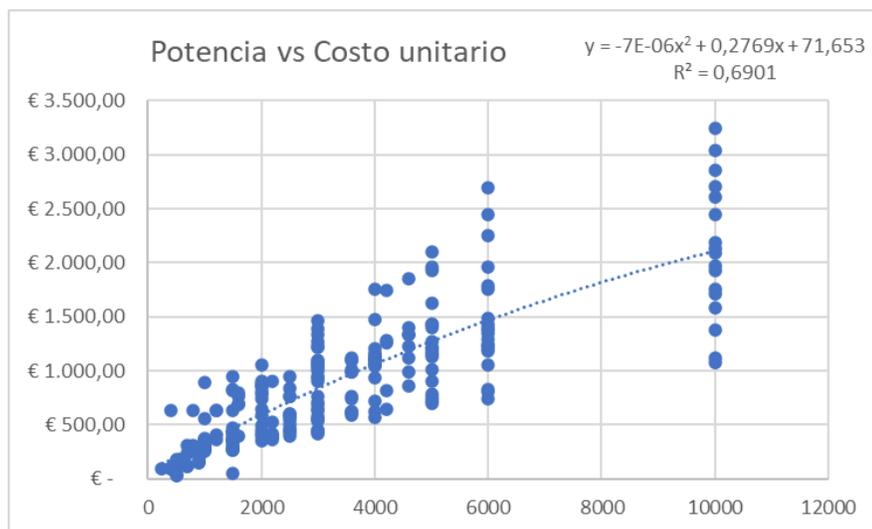
Gráfico de dispersión para la estimación del costo de las estructuras para paneles solares.



Nota: El gráfico muestra la función de mayor confiabilidad (R^2 mayor): función polinómica de grado 2. Elaboración: propia.

Figura 21

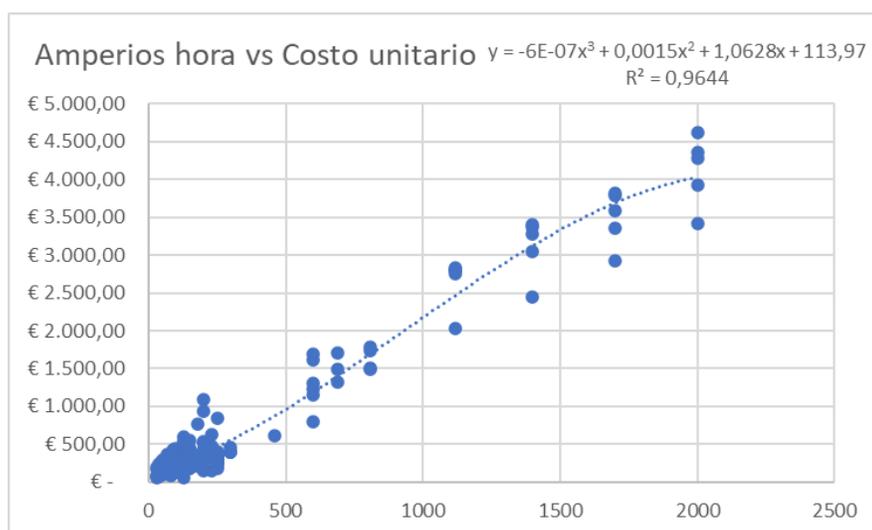
Gráfico de dispersión para la estimación del costo del inversor.



Nota: El gráfico muestra la función de mayor confiabilidad (R^2 mayor): función polinómica de grado 2. Elaboración: propia.

Figura 22

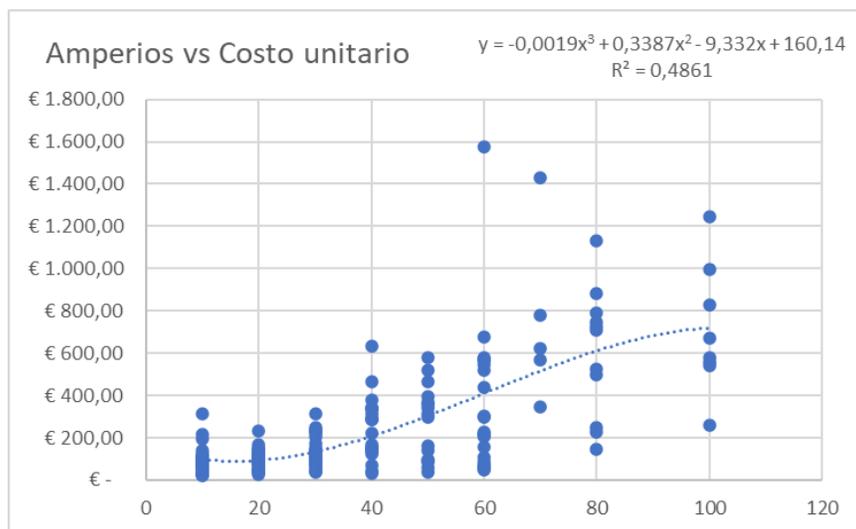
Gráfico de dispersión para la estimación del costo de las baterías.



Nota: El gráfico muestra la función de mayor confiabilidad (R^2 mayor): función polinómica de grado 3. Elaboración: propia.

Figura 23

Gráfico de dispersión para la estimación del costo del controlador/regulador.



Nota: El gráfico muestra la función de mayor confiabilidad (R^2 mayor): función polinómica de grado 3. Elaboración: propia.

12. ANEXO C

Figura 24

Ventana de Resultados (marco legal) para un autogenerador a pequeña escala, conectado al SIN y que entregará excedentes.

RESULTADOS	MARCO LEGAL			
	Si el ítem relacionado está chuleado revise el marco legal asociado			
1. MARCO LEGAL 2. MARCO TÉCNICO 3. FORMULARIO RESÚMEN	Autogenerador pequeña escala ✓	Autogenerador gran escala	Excedentes ✓	
	<p>1. La potencia instalada de un autogenerador regulado debe ser menor o igual a 0.1Mw (100 Kw).</p> <p>2. La energía eléctrica producida es para su propio consumo y no utiliza activos del Sistema de Transmisión Regional (STR) y/o Sistema de</p> <p>3. La cantidad de energía sobrante o excedente podrá ser cualquier porcentaje del valor de su consumo propio</p> <p>4. Los activos de generación pueden ser propios o de terceros y la operación de dichos activos puede ser desarrollada por los ya mencionados.</p> <p>*Un autogenerador puede ser una persona natural o jurídica (Decreto 1073 de 2015 Título III Cap 2 Sec 4º Art. 2.2.3.2.4.7.)</p>		<p>a) Los excedentes que entreguen a la red de distribución se reconocerán, mediante un esquema de medición bidireccional, como créditos de energía.</p> <p>b) Podrán usar medidores bidireccionales de bajo costo para la liquidación de sus consumos y entregas a la red, así como procedimientos sencillos de conexión y entrega de excedentes.</p> <p>*Si se cumple el punto 'a', podrán negociar dichos créditos y los derechos inherentes a los mismos con terceros naturales o jurídicos. (Ley 1715 Art 8)</p> <p>Los autogeneradores regulados no tienen la obligación de suscribir un contrato de respaldo de disponibilidad de capacidad de red. (Decreto 1073 de 2015 Título III Cap. 2 Sec. 4º Art. 2.2.3.2.4.8)</p> <p>Los autogeneradores a gran escala estarán obligados a suscribir un contrato de respaldo con el operador de red o transportador al cual se conecten. (Decreto 2463 de 2014 Art. 2)</p>	
	Incentivos ✓	Financiación		
	<p>Los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión e inversión, para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos estarán excluidos de IVA. (Ley 1715 Art. 12) Ver recomendaciones.</p> <p>Gozarán de exención del pago de los Derechos Arancelarios de Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de preinversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes. SÓLO APLICA no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de los mismos. (Ley 1715 Art. 13) Ver Anexo N 1 Decreto 203 de 2020 Art. 2</p>			

