



**DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL
MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ**

Andrea Carolina Jimenez Cañon

María Fernanda Pedroza Jimenez

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, 24 de Octubre de 2018

**DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL
MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ**

Andrea Carolina Jimenez Cañon

María Fernanda Pedroza Jimenez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

Edgar Felipe Cortes León

Línea de Investigación:

Gestión Integral Sustentable

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2018

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

A Dios y a nuestros padres por ser tan incondicionales y permitirnos llegar a esta etapa tan importante de nuestra formación profesional; sin su apoyo, guía, ánimos e inspiración, no hubiese sido posible alcanzar nuestros sueños.

Agradecimientos

Damos Gracias a Dios por permitirnos llevar a cabo con éxito éste estudio de investigación. A nuestros padres, por su apoyo, sacrificio y motivación en todo momento para culminar nuestra carrera de Ingeniería ambiental. A nuestros familiares por la colaboración que nos prestaron en todo momento para el desarrollo de este trabajo. A la ingeniera Lina Matamoros, por su disposición y colaboración en todo momento y A nuestro director Felipe Cortes por su interés y apoyo permanente en el presente trabajo de grado.

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción	3
2. Planteamiento del problema.....	5
2.1 <i>Situación Insatisfactoria</i>	6
2.2 <i>Situación Ideal</i>	6
3. Objetivos generales y específicos	7
3.1 <i>Objetivo General:</i>	7
3.2 <i>Objetivos Específicos:</i>	7
4. Justificación	7
5. Marco referencial	10
5.1 <i>Antecedentes</i>	10
5.2 <i>Estado del Arte</i>	12
5.3 <i>Marco teórico-conceptual</i>	14
5.3.1 <i>Energía</i>	14
5.3.2 <i>Energía convencional o no renovable</i>	14
5.3.3 <i>Energía no convencional o renovable</i>	15
5.5.3.1 <i>Energía solar</i>	16
5.5.3.2 <i>Energía solar fotovoltaica</i>	16
5.5.3.2.1 <i>Orientación, inclinación y sombras de los módulos fotovoltaicos</i>	18
5.5.3.2.2 <i>Vida útil del módulo fotovoltaico</i>	19
5.5.3.2.3 <i>Mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos</i>	19
5.5.3.2.4 <i>Disposición final de los módulos fotovoltaicos</i>	20
5.5.4 <i>Situación energética en Colombia</i>	20
5.5.5 <i>Eco Innovación</i>	25
5.5.6 <i>Factores ambientales que determinan la factibilidad del sistema fotovoltaico</i>	25
5.5.6.1 <i>Brillo solar</i>	25
5.5.6.2 <i>Radiación solar</i>	26
5.5.6.3 <i>Velocidad del viento</i>	26
5.5.6.4 <i>Nubosidad</i>	27
5.5.7 <i>Tasa interna de retorno y valor presente neto</i>	27
5.5.7.1 <i>Valor presente neto, o valor actual neto (VPN)</i>	27
5.5.7.2 <i>Tasa interna de retorno, o tasa de utilidad interna (TIR)</i>	28
5.5.8 <i>Plantas de tratamiento de aguas residuales</i>	29
5.5.9 <i>Huella de carbono</i>	30
5.6 <i>Marco institucional</i>	31

5.7	<i>Marco geográfico</i>	34
5.8	<i>Marco normativo</i>	37
6.	<i>Diseño metodológico</i>	43
6.1	<i>Metodología</i>	43
6.2	<i>Enfoque</i>	55
6.3	<i>Alcance</i>	56
6.4	<i>Método</i>	57
7.	<i>Plan de trabajo</i>	60
7.1	<i>Cronograma</i>	60
7.2	<i>Presupuesto</i>	61
8.	<i>Resultados y análisis</i>	62
8.1	<i>Diagnosticar una línea base de la situación actual de la Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá</i>	62
8.1.1	<i>Referencia documental y municipal sobre la PTAR</i>	62
8.1.2	<i>Documentación técnica de la PTAR</i>	65
8.1.2.1	<i>Equipos con mayor consumo de energía en la PTAR</i>	65
8.1.3	<i>Documentación económica de la PTAR</i>	68
8.1.4	<i>Documentación ecológica de la PTAR</i>	76
8.1.4.1	<i>Velocidad del viento en el municipio de Chiquinquirá</i>	76
8.1.4.2	<i>Brillo Solar</i>	78
8.1.4.3	<i>Radiación Solar</i>	81
8.2	<i>Diseñar alternativas técnicas, económicas y ambientales para el mejor rendimiento del sistema fotovoltaico</i>	82
8.2.1	<i>Sistemas fotovoltaicos</i>	82
8.2.1.1	<i>Comparación de sistemas fotovoltaicos</i>	83
8.2.2	<i>Diseño técnico del sistema fotovoltaico</i>	86
8.2.2.1	<i>Generador fotovoltaico</i>	86
8.2.2.2	<i>Regulador de carga</i>	87
8.2.2.3	<i>Acumulador eléctrico o batería</i>	87
8.2.2.4	<i>Inversor</i>	87
8.2.2.5	<i>Contadores</i>	88
8.2.2.6	<i>Soporte</i>	88
8.2.2.7	<i>Cálculo de número de módulos fotovoltaicos</i>	89
8.2.2.8	<i>Diagrama del sistema fotovoltaico aplicado en el área de estudio</i>	90
8.2.3	<i>Diseño económico del sistema fotovoltaico</i>	91
8.2.4	<i>Diseño ecológico del sistema fotovoltaico</i>	95
8.2.4.1	<i>Huella de carbono</i>	95
8.2.4.2	<i>Comportamientos ambientalmente responsables</i>	102

8.2.5	<i>Análisis de alternativas AHP de los sistemas fotovoltaicos</i>	105
8.3	<i>Evaluar el sistema fotovoltaico propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de Chiquinquirá, Boyacá</i>	110
8.3.1	<i>Identificación de aspectos e impactos ambientales del proyecto.</i>	110
8.3.2	<i>Evaluación de impacto ambiental del proyecto (EIA)</i>	111
8.3.3	<i>Medidas preventivas para los impactos severos de la implementación</i>	113
8.3.4	<i>Cotizaciones</i>	119
8.3.5	<i>Financiación</i>	121
8.3.6	<i>TIR y VPN</i>	121
9.	<i>Conclusiones</i>	125
10.	<i>Recomendaciones</i>	127
11.	<i>Referencias</i>	127
12.	<i>Anexos</i>	138
13.	<i>Glosario</i>	165

Listado de Tablas

Tabla 1.	<i>Comparación entre la energía renovable y la energía convencional</i>	16
Tabla 2.	<i>Componentes de la energía solar fotovoltaica</i>	17
Tabla 3.	<i>Diferencia entre los módulos según tecnología de fabricación.</i>	17
Tabla 4.	<i>Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país.</i>	23
Tabla 5.	<i>Valor de externalidades para energía solar</i>	24
Tabla 6.	<i>Escala de huracanes de Saffir-Simpson</i>	27
Tabla 7.	<i>Fórmulas para calcular el TIR</i>	28
Tabla 8.	<i>Función del ente organizacional</i>	32
Tabla 9.	<i>Distribución área urbana.</i>	34
Tabla 10.	<i>División área rural</i>	35
Tabla 11.	<i>Marco legal relacionado con la energía renovable</i>	37
Tabla 12.	<i>Criterios de valoración para el análisis AHP.</i>	47
Tabla 13.	<i>Escala de comparación de Saaty</i>	48
Tabla 14.	<i>Criterios para la evaluación de impacto ambiental.</i>	50
Tabla 15.	<i>Variables de la ecuación Importancia.</i>	53
Tabla 16.	<i>Significado de los criterios de significancia</i>	54
Tabla 17.	<i>Diseño metodológico para cada objetivo del proyecto</i>	57
Tabla 18.	<i>Presupuesto proyecto de investigación</i>	61
Tabla 19.	<i>Consolidado información consumo y gasto energético</i>	69
Tabla 20.	<i>Consolidado 2017.</i>	70
Tabla 21.	<i>Consolidado 2018.</i>	72
Tabla 22.	<i>Registro del consumo promedio de energía de la PTAR para el 2017.</i>	73
Tabla 23.	<i>Registro del consumo promedio de energía de la PTAR para el 2018.</i>	73
Tabla 24.	<i>Descripción de sistemas fotovoltaicos.</i>	84
Tabla 25.	<i>Comparación Sistemas Fotovoltaicos</i>	93
Tabla 26.	<i>Huella de carbono 2017</i>	96
Tabla 27.	<i>Huella de carbono 2018</i>	97

Tabla 28. <i>Huella de carbono 2017 con SFV</i>	99
Tabla 29. <i>Huella de carbono 2018 con SFV</i>	101
Tabla 30. <i>Aspectos proyecto módulos fotovoltaicos</i>	111
Tabla 31. <i>Ficha ambiental para el control de la modificación paisajística.</i>	113
Tabla 32. <i>Ficha ambiental para la prevención de accidentes generados por el ruido de la construcción.</i>	115
Tabla 33. <i>Ficha ambiental para el manejo integral de los residuos sólidos generados.</i>	117
Tabla 34. <i>Información requerida para las cotizaciones</i>	120
Tabla 35. <i>Flujo de caja- VPN y TIR propuesta de 576 módulos</i>	123
Tabla 36. <i>Flujo de caja- VPN y TIR propuesta de 184 módulos</i>	124

Listado de Figuras

Figura 1. <i>Módulo fotovoltaico</i>	18
Figura 2. <i>Explotación y producción nacional de recursos energéticos en el año 2012</i>	21
Figura 3. <i>Demanda de energía final por sector en el año 2012</i>	22
Figura 4. <i>Capacidad de generación eléctrica del SIN a diciembre de 2014.</i>	23
Figura 5. <i>Consumo energético medio de cada tratamiento en función de la capacidad de habitantes equivalente de la PTAR</i>	30
Figura 6. <i>Estructura orgánica de la Alcaldía Municipal de Chiquinquirá</i>	32
Figura 7. <i>Estructura organizacional de EMPOCHIQUINQUIRÁ</i>	33
Figura 8. <i>Mapa geográfico Chiquinquirá</i>	36
Figura 9. <i>Delimitación PTAR</i>	37
Figura 10. <i>Metodología aplicada para determinar la factibilidad de la implementación de energía fotovoltaica para el funcionamiento de la (PTAR) de Chiquinquirá</i>	44
Figura 11. <i>Cronograma estudio de investigación</i>	60
Figura 12. <i>PTAR Chiquinquirá</i>	64
Figura 13. <i>Imagen satelital de zona de estudio</i>	65
Figura 14. <i>Sopladores de desplazamiento de la planta</i>	66
Figura 15. <i>Consumo en kWh por equipos de la PTAR</i>	66
Figura 16. <i>Porcentaje de consumo- componentes PTAR</i>	67
Figura 17. <i>Consumo y costo energético PTAR Chiquinquirá</i>	75
Figura 18. <i>Mapa de velocidad de viento promedio de Chiquinquirá.</i>	76
Figura 19. <i>Mapa de velocidad máxima de vientos de Chiquinquirá.</i>	77
Figura 20. <i>Brillo solar de Chiquinquirá</i>	78
Figura 21. <i>Valor promedio de horas de sol al día de Chiquinquirá</i>	79
Figura 22. <i>Horas de luz del municipio de Chiquinquirá</i>	79
Figura 23. <i>Temperatura promedio de Chiquinquirá</i>	80
Figura 24. <i>Humedad relativa promedio mensual de Chiquinquirá</i>	80
Figura 25. <i>Radiación solar global en el municipio de Chiquinquirá</i>	81
Figura 26. <i>Radiación solar en días sin brillo solar del municipio de Chiquinquirá.</i>	82
Figura 27. <i>Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red (SFVR)</i>	85
Figura 28. <i>Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA)</i>	85
Figura 29. <i>Aplicación de SFV</i>	86
Figura 30. <i>Componentes de un sistema fotovoltaico</i>	88
Figura 31. <i>Planos en AutoCAD para la instalación de 576 módulos fotovoltaicos en la PTAR</i>	90
Figura 32. <i>Historial de precios de módulos fotovoltaicos a base de silicio</i>	95
Figura 33. <i>Comparación huella de carbono con SFV y sistema convencional</i>	102
Figura 34. <i>Programa para la disminución del consumo de energía.</i>	103
Figura 35. <i>Elementos principales del programa para el uso eficiente de los recursos energéticos</i>	104
Figura 36. <i>Matriz de comparación de criterios AHP</i>	105

Figura 37. Resultado de valoración de criterios para el análisis de alternativas AHP.....	106
Figura 38. <i>Jerarquización de los criterios</i>	107
Figura 39. <i>Análisis de alternativas AHP para los sistemas fotovoltaicos.</i>	109

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Resumen

El presente estudio de investigación se fundamenta en la determinación de la factibilidad para la implementación de energía fotovoltaica en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) ubicada en el municipio de Chiquinquirá del departamento de Boyacá, como una alternativa para disminuir los costos de energía, generar ahorro energético y aprovechamiento de los recursos naturales, en pro de aportar una posible solución a un problema crucial como la contaminación ambiental y el cambio climático, consecuencias de la generación de electricidad a partir de fuentes convencionales, desencadenando así impactos negativos en la población del municipio. El método implementado consistió en diagnosticar una línea base de la situación actual, diseñar alternativas ecológicas, técnicas, sociales y económicas para mejorar el rendimiento del sistema fotovoltaico propuesto y evaluarlo. A partir de los resultados obtenidos se pudo concluir que la zona de estudio es óptima para la implementación de sistemas fotovoltaicos gracias a los factores ambientales y características de su ubicación geográfica. También fue posible concluir que el sistema conectado a la red es el más factible para la planta debido a sus características técnicas, ecológicas y económicas. Finalmente, mediante la evaluación del sistema propuesto es posible dar por concluido que el proyecto beneficia técnica, económica, ecológica y socialmente tanto a la planta como al municipio, teniendo un análisis financiero factible, ya que se lograría la recuperación de la inversión realizada lo cual a su vez genera ahorros económicos.

Palabras clave: Factibilidad, Energía convencional, Energía fotovoltaica, PTAR, Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red (SFCR), Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA), Evaluación de proyectos.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Abstract

This investigation study is based into the determination of the feasibility to implement photovoltaic energy into the WWTP (Wastewater treatment plant) in Chiquinquirá, Boyacá, as an alternative to decrease energy costs, create an energetic saving and natural resources harnessing, to the aim to contribute to be a possible solution to a crucial problem as environmental contamination and global warming, which are electric energy generation from conventional sources consequences, triggering negative impacts in the population of the municipality. The implemented method consisted in diagnose a base line of the actual situation, design technique alternatives, ecological and environmental to improve the proposed photovoltaic system performance and evaluate it. From the obtained results it was possible to conclude that the study area has optimal conditions to implement a photovoltaic system because of the environmental factors and its geographical location characteristics. It was also possible to conclude that the system connected to the network it's better for the plant because of its technique, ecological and economic characteristics. Finally, through the system evaluation is possible to conclude that the project has technique, economic, social and environmental benefits to the plant as much as to the municipality, having a feasible financial analysis, because the investment made would be recovered likewise generate economic savings.

Key words: Feasibility, Conventional energy, photovoltaic energy, WWTP, On-Grid Systems, Off-Grid Systems, Projects evaluation.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

1. Introducción

La presente investigación se refiere a la producción y uso de energía; de la cual, a nivel global aproximadamente el 81% del consumo proviene de fuentes convencionales (petróleo, carbón, gas), mientras que el 19% restante derivan de fuentes no convencionales de energía (eólica, solar, biomasa) (UPME, 2015). Es evidente entonces que la mayoría de energía tanto producida como consumida actualmente es producto de fuentes convencionales, las cuales desde hace varios años han traído consigo el desarrollo de la sociedad, no obstante, dichas energías no renovables impactan desfavorablemente el ambiente y la salud de la población; pues estas, emiten Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂) entre otros, que se acumulan en la atmósfera, lo que impide la salida de la radiación proveniente del sol, provocando aumentos en la temperatura de la tierra y por consiguiente el cambio climático (Garzón & Martínez, 2017).

En el contexto colombiano, actualmente el país pasa por una crisis energética debido a la escasez de las fuentes de energía convencional, este problema es ocasionado principalmente por la sobreexplotación y uso indiscriminado de los recursos naturales. Colombia ha aprovechado la presencia de cuencas hídricas y el pronunciado relieve del país para la implementación de hidroeléctricas que infortunadamente generan grandes impactos ambientales y efectos negativos a la sociedad; a su vez, debido al cambio climático, la capacidad de generación de energía de estas sigue disminuyendo. Así mismo, se ha podido evidenciar a través de los diferentes fenómenos, conflictos ambientales y sociales, que la generación de energía a partir de recursos convencionales, ha desatado la necesidad de invertir en el desarrollo y aplicación de energías renovables inagotables (Pinzón, 2016).

El interés en realizar este estudio de investigación parte de la búsqueda de medidas correctivas como el racionamiento de energía, al igual que disminuir la limitación en el estudio de fuentes renovables que actualmente desata una gran preocupación por parte del Estado y la sociedad en general.

Con relación a las dificultades de la implementación de energía fotovoltaica en el país, cabe mencionar que el principal reto que afronta el presente estudio, es visibilizar y demostrar las ventajas de un proyecto de esta magnitud para la planta de tratamiento, cimentada en los costos

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

iniciales del mismo que serán amortizados con el tiempo y la importancia ecológica y social que conlleva este. También se debe tener en cuenta que este tipo de energía renovable está sometida a continuas variaciones más o menos abruptas, por ejemplo, la radiación solar es menor en temporadas de lluvia y los costos de los sistemas fotovoltaicos varían (Ortega, 2014).

El objetivo del presente estudio es determinar la factibilidad para la implementación de energía fotovoltaica en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá. Este estudio de investigación cuenta con 5 capítulos donde se estructura la investigación para alcanzar con éxito sus objetivos.

En el capítulo I se formula el planteamiento del problema de investigación, el cual es la base para desarrollar los objetivos del presente estudio, al igual que la justificación del mismo. El capítulo II, presenta el marco referencial donde se exponen los antecedentes históricos, las principales teorías y conceptualizaciones de la investigación abordando temas fundamentales acerca de energías renovables, la aplicación de estas, sus componentes y demás características. El III capítulo presenta el marco metodológico, tipo de investigación, la metodología y los instrumentos para la recolección de datos, adicionalmente, se encuentra el plan de trabajo de la investigación. El IV capítulo contiene los resultados obtenidos, el análisis y la discusión de los mismos. Por último, en el capítulo V se exponen las conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación, al igual que la bibliografía consultada a lo largo del estudio y los anexos pertinentes.

Por medio de la presente investigación, avances tecnológicos y el desarrollo de fuentes de energías renovables es posible prevenir, mitigar, compensar y corregir impactos negativos generados por el uso excesivo de las fuentes convencionales. Finalmente, en el campo de la ingeniería ambiental la importancia que tiene la aplicación de las energías renovables en especial la energía fotovoltaica, es la visión holística donde se integran y analizan diferentes componentes como el ecológico, social y económico.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

2. Planteamiento del problema

Cabe destacar que en la actualidad a nivel mundial para el avance de los procesos productivos, el desarrollo social de los países y el fortalecimiento del progreso tecnológico, es primordial la producción y el consumo de energía. En este sentido, uno de los sectores más poderosos en la industria y en la cotidianidad del ser humano, es el sector eléctrico (Castillo, Gutiérrez, Vanegas, Valencia & Villicaña, 2015).

El aumento masivo de la producción y consumo de las energías convencionales (petróleo, carbón, gas, hidroelectricidad y nuclear) en algunas zonas del mundo, ha generado efectos nocivos para la ecología, perturbaciones a la salud humana y amenazas para animales y vegetales con consecuencias inevitables e impredecibles (Uzcátegui, 2017). Un claro ejemplo de los efectos negativos que produce el uso de energía convencional es el aumento de la temperatura media terrestre, que a su vez ocasiona la elevación de los niveles del mar, erosión y salinización en áreas costeras, así como la propagación de enfermedades infecciosas, a causa de los 13.700 millones de toneladas de CO₂ que se concentran en la atmósfera por el uso de petróleo, gas y carbón. (Cepeda, 2017).

Teniendo en cuenta que la energía es fundamental para desarrollar procesos, se sabe que el municipio de Chiquinquirá en el departamento de Boyacá posee una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Esta planta usa un sistema de energía convencional, el cual permite su funcionamiento para reducir la carga contaminante y a su vez generar condiciones ambientales óptimas. Esta planta de tratamiento en el mes de julio del año 2015 presentó el pico más alto de consumo energético con 116422.55 kWh, con un costo energético de \$ 45'336.636.65¹

La planta de tratamiento de aguas residuales funciona permanentemente lo que genera un consumo de energía, gastos económicos e impactos ambientales altos para el municipio. Por otro lado la PTAR no hace uso de energías renovables para su funcionamiento, brindando la oportunidad de implementar nuevas tecnologías como la energía fotovoltaica, generando su funcionamiento de manera sostenible, disminuyendo los costos de energía y los impactos

¹ Valor del consumo real de la PTAR, descontando el valor de la multa de \$ 7.123.366,00 generado por el incumplimiento de pago de energía durante la etapa de construcción de esta.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

ambientales (Rincón & Camargo, 2018). Para de esta manera mejorar el desempeño ambiental de la PTAR y del municipio de Chiquinquirá.

2.1 Situación Insatisfactoria

La PTAR de Chiquinquirá trata un volumen considerable de aguas residuales mediante procesos de gran magnitud con ingeniería y tecnología moderna, por esta razón para su funcionamiento la planta requiere de un alto consumo de energía que genera un gasto económico e impactos ambientales altos. Dicha energía es utilizada en su mayoría por los equipos instalados en la PTAR con un consumo promedio mensual de 116422.55 kWh, lo que representa según la Empresa de Servicios Públicos de Chiquinquirá (EMPOCHIQUINQUIRA E.S.P., encargada de la administración de la planta), costos de operación general que se aproximan a dos mil millones de pesos al año; incurriendo así en gastos energéticos aproximados de más de 450 millones de pesos. La Alcaldía viene adelantando procesos para la inclusión de los costos de la PTAR en la tarifa del servicio de alcantarillado de los habitantes del municipio, lo cual provoca inconformidad en la población, pues consideran que estos son gastos los cuales no deben asumir.

2.2 Situación Ideal

La Planta implementa energía fotovoltaica; la administración y la comunidad son conscientes de los beneficios ecológicos, sociales y económicos que esta trae, promoviendo la utilización de energías renovables en una mayor variedad de campos aplicables. Apoyando a la administración municipal, en el plan de desarrollo “Unidos Por Chiquinquirá” con el fin de aportar al cumplimiento de los objetivos del plan sobre gestión de estudios, diseños y construcción de edificaciones con fuentes de energía amigables con el medio ambiente. Se crea un sistema de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio, el cual produce energía renovable que posiblemente permitirá el funcionamiento permanente y sostenible; disminuyendo así costos energéticos, creando un ahorro para la administración y generando energía de una forma nueva e innovadora, mitigando los impactos al medio ambiente teniendo en cuenta los factores ecológicos sociales y económicos.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

3. Objetivos generales y específicos

3.1 Objetivo General:

Determinar la factibilidad de la implementación de energía fotovoltaica para el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá

3.2 Objetivos Específicos:

- Diagnosticar una línea base de la situación actual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá.
- Diseñar alternativas técnicas, económicas y ecológicas para el mejor rendimiento del sistema fotovoltaico.
- Evaluar el sistema fotovoltaico propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá.

4. Justificación

El aumento de la producción y uso de las fuentes energéticas convencionales para la obtención de electricidad a causa del crecimiento exponencial industrial y tecnológico de los últimos años, ha generado altos impactos negativos en diferentes factores como el ecológico, reflejado en la escasez de recursos de tipo no renovables, sociales debido a la proliferación de enfermedades causadas por las constantes emisiones tóxicas; y económicos determinados por la interacción entre oferta y demanda de energía pues a medida que hay mayor demanda los productores incrementan el valor del servicio disminuyendo así el poder adquisitivo de las personas; como consecuencia de estas problemáticas se impulsa a crear y desarrollar propuestas innovadoras que permitan implementar tecnologías limpias que minimicen y mitiguen dichos impactos (Ramos, 2016).

La utilización de energías renovables ha sido considerada principalmente en Europa y Norteamérica como método de reducción de emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ que contribuye al aceleramiento del cambio climático. Con el fin de tomar decisiones

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

factibles para la implementación de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), como la energía fotovoltaica, se deben evaluar los impactos ecológicos, sociales y económicos (Pasqualino, Cabrera, & Vanegas, 2015).

Frente a la situación de Colombia, el país sufrió en 2015 un gran riesgo de apagón que demostró que no es viable depender de las hidroeléctricas para satisfacer la demanda energética debido a la inestabilidad climática actual, por eso a raíz de esta situación se generó la oportunidad de encontrar nuevas fuentes renovables de energía (Semana Sostenible, 2017). “El planeamiento energético del país requiere necesariamente considerar la utilización, despliegue y desarrollo de tecnologías con fuentes no convencionales de energía renovable”, reporta Informe de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) sobre las energías limpias en Colombia. Otra situación donde se evidencia que Colombia no debe depender únicamente de las hidroeléctricas es el caso de Hidruitango, proyecto que inicialmente fue presentado como de “interés nacional” y el más ambicioso en la generación de energía, el cual colapsó y generó un riesgo enorme para las comunidades, el medio ambiente y para los once mil trabajadores y el personal de ingeniería (Zuluaga, 2018). Es por esto que una alternativa a implementar en Colombia por su gran potencial y diversificación de matriz energética son las fuentes renovables de energía, las cuales son inagotables o poseen la capacidad de regeneración en un tiempo menor a su tiempo de uso (Ramos, 2016).

Teniendo en cuenta que el uso de energía es fundamental para llevar a cabo procesos como los que se ejecutan en una PTAR, se sabe que el consumo de energía de las mismas varía de acuerdo con el tamaño de planta, la carga contaminante, el tipo de tratamiento y la tecnología utilizada. Dentro de los costos de operación y mantenimiento de las PTAR, el costo de la energía es el mayor de todos, pues supone en la actualidad más del 56% de los valores totales de operación y mantenimiento (Ruiz, Muro & Asensi, 2015). La mayoría de las PTAR que se utilizan en la actualidad se han diseñado y construido sin tener en cuenta la demanda de energía, ya que antiguamente los costos de energía no eran una preocupación importante. Las plantas de tratamiento de aguas residuales por lo general consumen energía de forma considerable, por estos motivos, se están actualizando las infraestructuras obsoletas y se están adoptando tecnologías más avanzadas como las fuentes renovables (Di, Massarotti & Vanoli, 2018).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

La elaboración del presente estudio de investigación tiene en cuenta que por medio del PLAN DE DESARROLLO UNIDOS POR CHIQUINQUIRA 2016-2019, se plantean los esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para orientar y consolidar al municipio, utilizando nuevas tecnologías que permitan el desarrollo sostenible; es por esto, que promueve y fomenta la cultura de cambio climático, la conservación y recuperación de los recursos naturales y ecosistemas estratégicos (Plan de Desarrollo "Unidos por Chiquinquirá", 2016).

De igual manera esta propuesta de implementación de energía fotovoltaica apuesta al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible Agenda 2030, priorizando el objetivo 7: Energía asequible y no contaminante, de tal forma se contribuirá al cumplimiento de la meta de aumentar el uso de energías limpias a un 15 % para el año 2030. Adicionalmente, teniendo en cuenta que Colombia firmó el Acuerdo de Copenhague en el que asumió el compromiso para el año 2020 de aumentar la proporción de energías renovables pretendemos mediante el proyecto contribuir al desarrollo de los compromisos firmados.

A partir de esta perspectiva, el municipio debido a su posicionamiento geográfico y las características ambientales privilegiadas como radiación solar, velocidad del viento, brillo solar y temperatura que presenta, debe desarrollar e implementar proyectos haciendo uso de energías renovables e infraestructuras sustentables. Este estudio de investigación permite generar un avance en proyectos que contribuyan al desarrollo sostenible mediante la implementación de módulos fotovoltaicos para aportar a nuevas formas de producción de energía eléctrica inagotable en la PTAR. En aras de ampliar la producción de energía fotovoltaica a zonas diferentes a las edificaciones tradicionales, conservando un enfoque de producción direccionado al aprovechamiento de manera eficiente y sostenible de los recursos naturales y a su vez que contribuya en el desempeño ecológico, social y económico del municipio.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

5. Marco referencial

A continuación se relacionan las principales teorías, conceptualizaciones y datos epistemológicos que soportan y fundamentan el desarrollo investigativo. Este capítulo aborda algunos temas fundamentales acerca de energías renovables como lo es la energía fotovoltaica, la aplicación de esta, sus componentes y demás características. El presente marco de referencia se basa en antecedentes, estado de arte, teorías, conceptos y normatividad para la generación de energía por medio de módulos fotovoltaicos. De igual manera para el desarrollo del presente marco se tuvo en cuenta las características geográficas e institucionales del municipio de Chiquinquirá.

5.1 Antecedentes

Las energías renovables han formado parte importante de la energía utilizada por los seres humanos desde la antigüedad, el uso y dominio del fuego se constituye como el primer logro en la utilización de la energía, después sucedieron los avances en navegación a vela, los molinos de viento o de agua, el aprovechamiento agrícola y ganadero como fuente de energía en forma de alimentos, así como la aparición de los transportes con la invención de la rueda. A mitad del siglo XIX la principal fuente energética fue la madera (Salazar, Badii, Guillen, & Lugo, 2015).

En 1838 el efecto fotovoltaico fue descubierto por Alexandre Edmond Becquerel, el cual consistente en la transformación directa de la luz en electricidad utilizando un semiconductor. Años más tarde, en 1877, el inglés William Grylls Adams profesor de Filosofía Natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio (Vela, 2016). En el año 1953 Gerald Pearson de Laboratorios Bell fabricó una célula fotovoltaica basada en silicio que resultaba ser mucho más eficiente que cualquiera hecha de selenio. Daryl Chapin y Calvin Fuller tomaron la célula fabricada por Pearson y produjeron células fotovoltaicas de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas (Salazar, Badii, Guillen, & Lugo, 2015).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

En el año 1956 los primeros módulos fotovoltaicos estaban comercialmente disponibles pero el costo era bastante alto y no se encontraba al alcance de la gente común. Sin embargo, pequeñas células fotovoltaicas comenzaron a usarse en juguetes y radios. A principios de 1960, los satélites de los EE. UU y los programas espaciales soviéticos funcionaban con módulos fotovoltaicos. A finales de esta década la energía fotovoltaica suministraba a casi todos los satélites espaciales y las eficiencias de estos llegaban cerca del 14 %. En la década de 1970, el Dr. Elliot Berman, presidente y fundador de *Solar Power Corporation*, diseñó un módulo fotovoltaico mucho más económico al usar un grado de silicio menos puro y diferentes técnicas de fabricación (Solar Cell Central, 2011), a partir de este hecho comenzó el uso de células fotovoltaicas para diferentes actividades cotidianas.

Durante la misma década de 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales ya que dichas energías renovables tienen mayor disponibilidad en el presente y el futuro, adicionalmente producen menos impactos ambientales (Energiza, 2012).

Respecto a los antecedentes de la energía fotovoltaica en Colombia, el primer uso de este tipo de energía fue en Santa Marta durante el siglo XX, en las viviendas de los trabajadores de las bananeras se implementaron calentadores fotovoltaicos. Veinte años después La Universidad de los Andes y la Universidad Nacional de Bogotá basándose en las grandes consecuencias que generó la crisis petrolera, decidieron iniciar la implementación de calentadores fotovoltaicos domésticos y también grandes sistemas de calentamiento de agua. Colombia actualmente cuenta con la instalación de tan solo 6 MW de energía fotovoltaica, equivalentes a unos 78.000 módulos fotovoltaicos. El 57% de la energía fotovoltaica del país está destinado principalmente a las zonas rurales donde la demanda de energía es aislada y el coste para conectarse a la red nacional resulta muy elevado, el 43% restante se encuentra instalado en torres de comunicación y señalizaciones de tránsito (Suárez, 2018).

Durante los últimos años en Colombia, los sistemas eléctricos han presentado algunos cambios debido al interés por minimizar los impactos ambientales asociados a la generación de energía convencional. Esta situación ha promovido a diferentes sectores hacia la promoción y el desarrollo de energías renovables como una de las soluciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de esto en nuestro país aún existen obstáculos ya que la

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

promoción de este tipo de alternativas es todavía insuficiente, o tal vez inexistente (Correa, Marulanda & Panesso, 2016).

El desarrollo de este proyecto de investigación surge del interés por la innovación y el uso de energías renovables; de manera que se pueda minimizar, prevenir y mitigar la generación de contaminantes en el ambiente por el excesivo consumo de energía convencional. Teniendo en cuenta los ejes del desarrollo sostenible (ecológico, social y económico).

5.2 Estado del Arte

Para el desarrollo de este capítulo se consultaron alrededor de 20 referentes bibliográficos nacionales e internacionales de los cuales se seleccionaron tres teniendo en cuenta los referentes que más se ajustan al estudio de investigación, problema de investigación y objetivo que se quiere llegar, realizando el resumen analítico de investigación (Anexo 1). Adicionalmente, para filtrar los referentes consultados se tuvieron en cuenta aquellos que pueden aportar al marco teórico-conceptual y a la metodología de la presente investigación, para así lograr realizar la discusión de resultados. El presente estado del arte revisa ejemplos relevantes de la bibliografía disponible, que permite identificar a la investigación y análisis que se está considerando para la aplicación de la energía fotovoltaica en el funcionamiento de diferentes procesos. Para la revisión bibliográfica se presentan las ideas generales de cada estudio en cuanto al tema, metodología aplicada, resultados y conclusiones obtenidas de cada referente.

El primer referente seleccionado es el seminario titulado “Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de Suministro Eléctrico a través de ERNC, (Energías Renovables No Convencionales), específicamente fotovoltaica, para sector agrícola en la VII región (Parral)”. La tesis tiene como objetivo principal minimizar los costos de energía eléctrica que consume el sistema de riego del cultivo de arándanos. Para el cumplimiento del objetivo se realizó un estudio de factibilidad técnica y económica del sistema. Como metodología se estudiaron y dimensionaron dos sistemas fotovoltaicos (sistema ON-GRID y sistema OFF-GRID), los cuales fueron comparados con los sistemas de generador diesel y la red eléctrica ya existente. Estos dimensionamientos permitieron conocer la factibilidad técnica de cada uno, dadas las condiciones geográficas del lugar y la instalación del sistema más rentable. A manera de

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

conclusión se obtuvo que al estudiar, analizar y evaluar los distintos temas, no es posible tomar una decisión concluyente respecto a cuál sistema es más rentable, puesto que todo depende de cada variable, como la carga y su horario, la ubicación geográfica y otros factores a considerar (Fuentes & Vallejos, 2016).

El segundo referente tenido en cuenta es el trabajo titulado “Diseño del Sistema de Bombeo Automatizado con Energía Fotovoltaica para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Distrito de Vilavila”. Para el alcance del objetivo se realizó el cálculo del sistema a partir de datos de la planta, posteriormente se hizo el estudio de factibilidad técnica-económica del sistema. Como resultado de los datos obtenidos en el diseño del sistema fotovoltaico, es posible concluir que la radiación solar es suficiente para satisfacer la demanda de energía; sin embargo, mediante el análisis de factibilidad fue posible concluir que la implementación del sistema fotovoltaico como fuente de energía no es viable económicamente, debido a que el tiempo de recuperación de la inversión es mayor al tiempo de vida de útil del sistema (Ahumada, 2017).

Por último, se consideró el artículo titulado “Evaluación de la energía solar fotovoltaica para generación de electricidad en el municipio de Uribí, La Guajira – Colombia”, en este trabajo se dimensiona un sistema fotovoltaico para la comunidad indígena Wayúu. La metodología implementada consistió en recolectar datos sobre el municipio como la ubicación y características climáticas. Posteriormente desarrollaron el estudio de posicionamiento del sistema y se estimó la demanda de consumo eléctrico promedio para determinar la dimensión del generador fotovoltaico y la batería. Al finalizar el estudio se pudo concluir que Colombia es un país con gran potencial para la implementación de energía solar fotovoltaica debido a su posición geográfica privilegiada y ya que dichos sistemas son competitivos especialmente en la gama de bajo consumo de energía en las áreas remotas sin electricidad (Granada, 2017).

Teniendo en cuenta los referentes consultados para el estado del arte, es posible definir el rumbo en el que se orienta el estudio actual, pues estas investigaciones científicas demuestran que para llevar a cabo la adecuada implementación de los sistemas fotovoltaicos es necesario tener en cuenta factores ecológicos, sociales, técnicos y económicos. Por ejemplo, para el ámbito social se debe tener en cuenta si el proyecto fotovoltaico beneficia o afecta a la población de Chiquinquirá; en el componente técnico es importante la ubicación, orientación,

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

inclinación, eficiencia, entre otros de los módulos fotovoltaicos; para la dimensión económica se debe analizar el costo-beneficio y finalmente en el componente ecológico es fundamental tener en cuenta los posibles impactos que se generen al ambiente y la huella de carbono del proyecto.

5.3 Marco teórico-conceptual

Esta sección tiene como propósito fundamental, situar el problema de investigación dentro de un conjunto de conocimientos que permitan delimitar teóricamente los conceptos planteados, a través de la revisión bibliográfica.

5.3.1 Energía

Actualmente los seres humanos utilizan la energía como parte central de sus actividades sin pensar en los impactos que puede producir en el medio ambiente. En la era actual gran parte de la energía se produce por la quema de combustibles de origen fósil (petróleo, gas, carbón). Estos combustibles suministran el 66% de la energía eléctrica en todo el mundo y a la vez cubren el 95% de la demanda energética a nivel global, satisfaciendo así necesidades básicas como el transporte, la industria, la agricultura, suministro de alimentos, entre otros (Badii, Guillen, Abreu, & UANL, 2016).

El concepto de energía puede ser entendido desde diferentes perspectivas, pero científicamente la “energía” ha ido evolucionando, ampliando y perfeccionándose con el transcurso de los años (González, 2006). Para la Física, la energía es la capacidad potencial que tienen los cuerpos para producir trabajo o calor, y se manifiesta mediante un cambio, que se mide en Julios (J). El movimiento continuo del agua de un río, o el calor que desprende el carbón cuando se quema es energía. Desde siempre, el hombre ha utilizado las fuentes de energía a su alcance para hacer un trabajo o para obtener calor (Mosquera & Merino, 2003).

5.3.2 Energía convencional o no renovable

La energía convencional son todas aquellas fuentes de energía que a través de los años han sido producidas en las épocas geológicas y reciben el nombre de combustibles, además deben transcurrir miles de años para que este tipo de energías puedan volver a generarse; entre estas

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

encontramos: Carbón, petróleo, gas natural, energía nuclear (Bordas & Elías, 2011). La capacidad del hombre para aprovechar los recursos energéticos naturales, para mejorar su condición a partir de la producción y uso de energía convencional ha dado paso a la industrialización y el desarrollo económico. De acuerdo con esta definición, dos revoluciones industriales surgieron en los siglos XVIII y XIX, donde los recursos naturales como el carbón (primera revolución) y el petróleo (segunda revolución) respectivamente, fueron sobreexplotados para alcanzar niveles de energía mucho más altos de los que podrían ser obtenidos por humanos o animales (Lisserre, Sauter, & Hung, 2010).

5.3.3 Energía no convencional o renovable

La energía no convencional o renovable son todas aquellas fuentes de energía que utilizan recursos no agotables temporalmente a escala humana y aprovechan cualquier recurso natural de origen no fósil, ni procedente de la fusión nuclear (Martínez & Caro, 2010).

En los últimos años a nivel global, las tecnologías de energías renovables para generación de electricidad han tenido un progreso significativo, en este mismo orden estas tecnologías se han vuelto competitivas en costos respecto a la generación de energía convencional (Pendón, Williams, Cibeira, Couselo, Crespi, & Tittone, 2017). Las fuentes renovables de energía pueden clasificarse en dos categorías, las no contaminantes o limpias tales como: la energía fotovoltaica, eólica, hidráulica, mareomotriz y geotérmica y las potencialmente contaminantes como las que se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, por la emisión de CO₂, y la obtenida mediante los residuos sólidos urbanos que emiten material particulado y residuos no calcinables (Bordas & Elías, 2011). La guía de Energía Solar de Madrid-España, destaca las ventajas de las energías renovables respecto a las energías convencionales como se muestra en la tabla 1.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Tabla 1. Comparación entre la energía renovable y la energía convencional

	E. Renovables	E. Convencionales
Ventajas medioambientales	Las energías renovables no producen emisiones de CO ₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera.	Las energías producidas a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) sí los producen.
	Las energías renovables no generan residuos de difícil tratamiento.	La energía nuclear y los combustibles fósiles generan residuos que suponen durante generaciones una amenaza para el medioambiente.
	Las energías renovables son inagotables.	Los combustibles fósiles son finitos.
Ventajas estratégicas	Las energías renovables son autóctonas	Los combustibles fósiles existen sólo en un número limitado de países
	Las energías renovables disminuyen la dependencia exterior	Los combustibles fósiles son importados en un alto porcentaje
Ventajas socioeconómicas	Las energías renovables crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales.	Las energías tradicionales crean muy pocos puestos de trabajo respecto a su volumen de negocio
	Las energías renovables han permitido a España desarrollar tecnologías propias	Las energías tradicionales utilizan en su gran mayoría tecnología importada.

Fuente: Madrid Solar, 2006.

5.5.3.1 Energía solar

La energía solar constituye la principal fuente de vida en la Tierra, la cual dirige los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta. La energía del sol es la que induce el movimiento del viento y del agua, y el crecimiento de las plantas, por ello la energía solar es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovables: eólica, hidroeléctrica, biomasa, de las olas y corrientes marinas, además de la propia solar. (Espejo, 2004, p.6).

5.5.3.2 Energía solar fotovoltaica

La energía que proviene del sol y se transforma en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia es la energía solar fotovoltaica. Este tipo de energía se obtiene por medio de generadores fotovoltaicos que se componen por módulos conectados entre sí que a su vez están compuestos por células fotovoltaicas (Tabla 2) (Iza, Patricio, & Monta, 2016).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

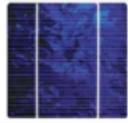
Tabla 2. Componentes de la energía solar fotovoltaica

<i>Células fotovoltaica</i>	<i>Módulo fotovoltaico</i>
Las células fotovoltaicas son mecanismos que convierten directamente la radiación solar a electricidad.	Los módulos fotovoltaicos (Figura 1) están compuestos por un grupo de células que generan electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. Se dividen en tres diferentes clases. <ul style="list-style-type: none"> - Silicio monocristalino - Silicio policristalino - Silicio amorfo

Fuente: Matsumoto, 2011.

Dadas las diferentes clases de módulos fotovoltaicos, estos se clasifican de acuerdo a las características y rendimientos relacionados con el tipo de silicio con el cual han sido fabricados. Como se evidencia en la tabla 3, las células monocristalinas son las que tienen mayor eficiencia tanto de forma directa como en el laboratorio, debido a que el silicio se obtiene de forma pura, mientras que la célula con menor rendimiento es la amorfa.

Tabla 3. Diferencia entre los módulos según tecnología de fabricación.

CÉLULA		EFICIENCIA EN LABORATORIO	EFICIENCIA DIRECTA
	Mono-cristalina	24%	14-17 %
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfas)	16%	<10%

Fuente: (Díaz & Carmona, 2010).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

5.5.3.2.1 Orientación, inclinación y sombras de los módulos fotovoltaicos

En la implementación de un sistema fotovoltaico, es importante tener en cuenta la orientación, la inclinación y las sombras. Para el primer criterio, se busca el aprovechamiento máximo de la radiación solar y como norma general se aplican los criterios de ubicación de módulo:

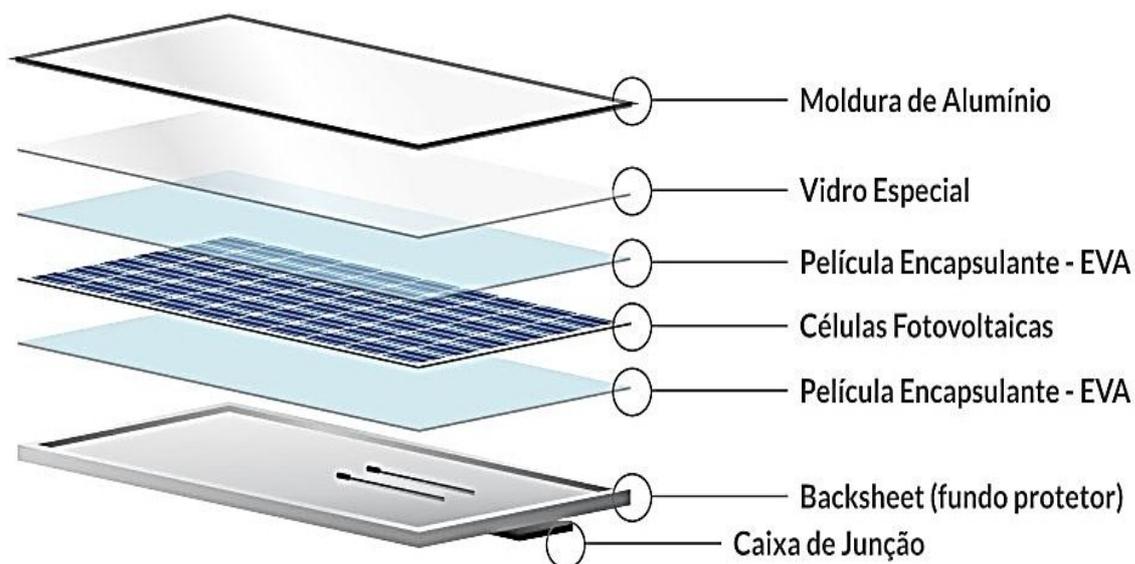
- Estando en el hemisferio Norte, con orientación hacia el Sur geográfico
- Estando en el hemisferio Sur, con orientación hacia el Norte geográfico

La inclinación del módulo fotovoltaico será, respecto al horizontal 10° superior a la latitud del lugar y el captador estará orientado hacia el sur. Donde el valor estimado para el ángulo α es:

$$\text{INCLINACIÓN } \alpha = \text{Latitud} + 10^\circ$$

En cuanto al criterio de las sombras, es indispensable elegir un lugar para la implementación de módulos fotovoltaicos evitando sombras que puedan surgir desde edificios, vegetación o terreno y los propios módulos (Roldán Viloria, 2008).

Figura 1. Módulo fotovoltaico



Fuente: BlueSol, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

5.5.3.2.2 Vida útil del módulo fotovoltaico

Una variable importante por considerar cuando se va a implementar un sistema fotovoltaico es la vida útil del módulo. Desde hace varias décadas la técnica de los módulos fotovoltaicos se encuentra desarrollada y se ha venido mejorando, lo que permite que en la actualidad un módulo perfeccione su tiempo de vida útil. Debido a lo anterior los productores actuales aseguran módulos con una vida útil mayor a la 20 años, obteniendo degradaciones inferiores al 20% durante la vida útil (Fernández, 2009).

5.5.3.2.3 Mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos

La capacidad de un sistema con condiciones determinadas para conservarse y ser devuelto a unas condiciones tales que pueda desarrollar su función original utilizando determinados procedimientos y recursos, se define como mantenimiento (Díaz, 2003). Según un estudio de factibilidad para la implementación de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía en el sector industrial de Colombia, se comparó la tecnología de módulos fotovoltaicos con la generación convencional de energía y se concluyó que en cuanto a costos de inversión y de operación, a pesar de que los generadores diésel requieren de una menor inversión inicial, sus costos de operación y mantenimiento a largo plazo aumentan los costos totales beneficiando a las fuentes renovables de energía. Adicionalmente en este mismo estudio realizado por Bitar y Chamas afirmaron que los sistemas fotovoltaicos requieren de bajo costo de mantenimiento, no generan emisiones perjudiciales para el medio ambiente y son de instalación factible en el lugar de establecimiento.

Los sistemas fotovoltaicos por lo general no requieren de mantenimiento complejo, sólo limpieza del módulo solar y estado de baterías (Fuentes & Vallejos, 2016). Para detectar de manera oportuna las posibles fallas del sistema fotovoltaico se recomienda hacer por lo menos 3 revisiones periódicas por año, de esta forma se pueden detectar y corregir pequeños errores, por esto se dice que el mantenimiento preventivo es el mejor mantenimiento (González & Velásquez, 2016). Como se mencionó anteriormente, las instalaciones fotovoltaicas requieren un mantenimiento mínimo, y de carácter preventivo, dos aspectos a tener en cuenta son, por un lado asegurar que ningún obstáculo haga sombra sobre los módulos y por el otro, mantenerlos limpios, concretamente las caras expuestas al sol (Madrid Solar, 2006).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

5.5.3.2.4 Disposición final de los módulos fotovoltaicos

En el ámbito internacional existen entidades encargadas del reciclaje y reutilización de módulos fotovoltaicos que cumplen su ciclo de vida útil. En Europa la asociación PV CYCLE ofrece la gestión de residuos y servicios para el cumplimiento normativo a empresas generadoras de residuos fotovoltaicos. Por otro lado el proyecto europeo HTWT emplea un modelo de gestión integral para la recolección y posterior tratamiento de módulos fotovoltaicos para su correcto reciclaje o reutilización, obteniendo así materias primas necesarias en la elaboración de nuevos productos. Finalmente, Recyclia asegura la gestión de los módulos en España desde 2013 cuando firmó un acuerdo de colaboración con la asociación europea PV CYCLE; gracias a este acuerdo, Recyclia en el año 2017 recogió 125 toneladas de módulos fotovoltaicos, permitiendo así recuperar 94 toneladas de vidrio, 15 de metales y 2,5 de plástico, que fueron introducidos en procesos productivos para fabricar nuevos productos (Ortiz & Rincón, 2018).

Actualmente Colombia no cuenta con empresas u organizaciones de reciclaje o disposición final de módulos fotovoltaicos; debido a lo anterior, se han planteado diferentes estrategias para la disposición de los mismos. Estrategias basadas en el desarme de los módulos fotovoltaicos para la venta individual de las partes que lo componen a empresas dedicadas a la fabricación y distribución de estos, así como reciclar las partes del módulo que estén en buen estado como vidrio u aluminio y contactar a empresas nacionales e internacionales dedicadas a la reutilización y disposición final de módulos que hayan cumplido su vida útil a los 20 o 30 años (Ortiz & Rincón, 2018).

5.5.4 Situación energética en Colombia

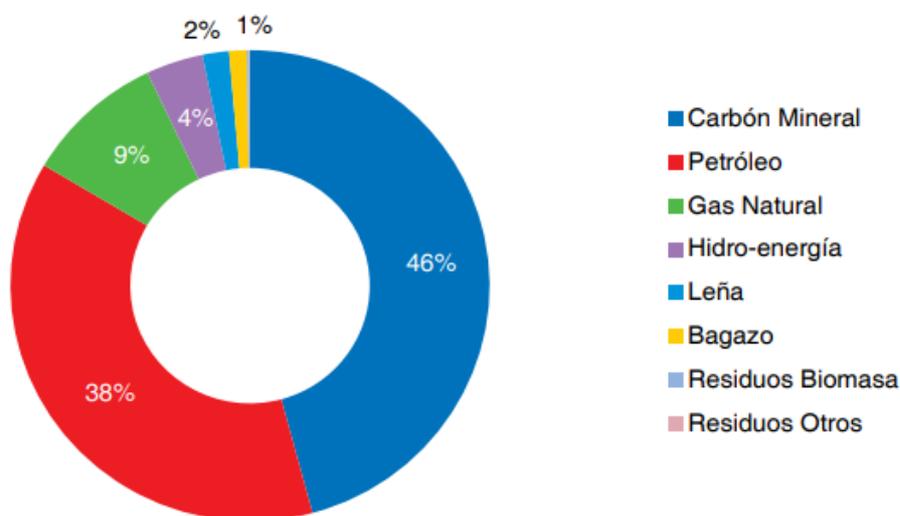
Debido al crecimiento poblacional y al acelerado avance de la industria a nivel global, la demanda de energía crece constante y considerablemente. Para la generación de energía actualmente se siguen utilizando en gran magnitud las fuentes convencionales, provocando así mayores problemas ambientales. A nivel global aproximadamente el 81% de la energía consumida es producida por fuentes convencionales y el 19% restante proviene de fuentes renovables asociadas al uso de biomasa e hidroeléctricas (Cepeda, 2017). Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Colombia es privilegiada por tener un campo

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

energético abundante en energía convencional y renovable; en este sentido, actualmente la explotación y producción energética del país está constituida en un 93% de recursos primarios de origen fósil, aproximadamente un 4% de hidroenergía y un 3% de biomasa y residuos (Figura 2).

Figura 2. *Explotación y producción nacional de recursos energéticos en el año 2012*



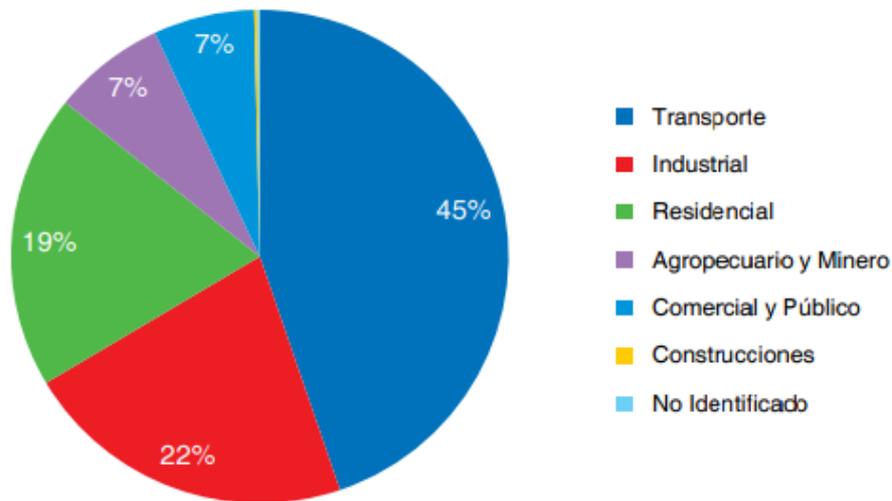
Fuente: UPME, 2015.

La UPME también afirma que la energía mencionada anteriormente (petróleo y gas natural) es utilizada principalmente por los sectores de consumo correspondientes al transporte y la industria como se puede observar en la figura 3.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 3. *Demanda de energía final por sector en el año 2012*



Fuente: UPME, 2015.

Debido a su posición geográfica Colombia posee variedad de climas y ecosistemas que aumentan su potencial para desarrollar energías renovables a partir del agua, viento y sol (Portafolio, 2016).

Gracias a estas condiciones ambientales las Fuentes de Energía Renovable (FER) en el país son elevadas y con alto potencial de desarrollo. A pesar de ello, el avance de estas fuentes es bajo por limitantes como el alto costo de inversión, carencia de normativa para la generación de electricidad con FER, competencia dominante de las fuentes de energía convencional establecidas a lo largo del país, falta de conocimiento sobre las FER, la evaluación inadecuada y la información escasa sobre el potencial de recursos FER (Granada, 2017).

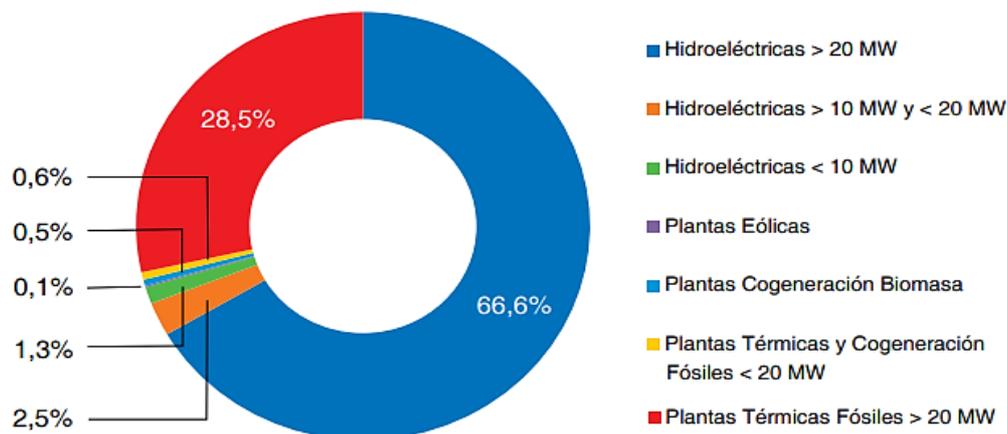
Los módulos fotovoltaicos hoy en día son fabricados a base de silicio, el costo de estos módulos ha disminuido pasando de 76,76 US\$/Wp en 1977 a 0,36 US\$/Wp en 2014 (Granada, 2017). Considerando las ventajas que traería la inclusión de la energía solar en el componente energético nacional se empieza a generar la ampliación de la canasta energética del país, fundamentada en la disponibilidad de recursos, reducción en los costos de inversión asociados a su aprovechamiento y la evolución en términos de rendimiento de las energías renovables (UPME, 2015). Según la UPME en el país existen sistemas fotovoltaicos aislados en las Zonas No Interconectadas (ZNI) para el empleo en telecomunicaciones y electrificación rural principalmente, se estima una potencia instalada de 9MW, sin embargo la capacidad de

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

generación de energía eléctrica está dada principalmente por las hidroeléctricas con potencia mayor a 20MW equivalentes al 66,6% de energía a nivel nacional (Figura 4).

Figura 4. Capacidad de generación eléctrica del SIN a diciembre de 2014.



Fuente: UPME, 2015.

Para la producción de energía solar a partir de módulos fotovoltaicos es importante tener en cuenta la radiación solar en la zona de implementación. Para el caso de Colombia, las fuentes disponibles de información de recurso solar indican que el país cuenta con una radiación promedio de 4,5 kWh/m²/d en la región Andina donde se lleva a cabo el presente estudio, la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/d), país que hace mayor uso de la energía fotovoltaica a nivel mundial, con aproximadamente 36 GW de capacidad instalada, lo cual supondría una posibilidad de aprovechamiento de la energía renovable (Tabla 4) (UPME, 2015).

Tabla 4. Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país

Tabla 2.2. Valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país.	
Región	Promedio irradiación (kWh/m ² / día)
Guajira	6,0
Costa Atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Amazonía	4,2
Región Andina	4,5
Costa Pacífica	3,5

Fuente: UPME, 2015.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Como se muestra en la tabla 5 proporcionada por la UPME, la energía fotovoltaica genera externalidades positivas que no son normalmente consideradas en los análisis de los inversionistas privados, y que tendrían beneficios concretos para la sociedad colombiana como se muestra en la tabla. La externalidad que produce mayores beneficios respecto a las demás es la disminución de emisiones de CO₂, pero también se encuentran beneficios tales como, que no se perjudicaría la biodiversidad por la implementación de la energía fotovoltaica, la generación de empleo es favorable, se tiene un claro respeto a la salud, el valor económico a largo plazo es positivo y adicionalmente el ahorro de combustibles fósiles es significativo.

Tabla 5. Valor de externalidades para energía solar

Tabla 5.18. Valor de externalidades para energía solar.			
Externalidad	2014 – USD/ MWh	Valor Presente Neto (tasa de descuento social 12%) - USD	Valor Presente Neto (tasa de descuento social 3,5%) - USD
Emisiones CO2	24.00	1.050.461	364.236
Empleo	6.71	964.858	431.374
Valor económico	21.64	3.111.702	1.391.196
Costo de integración	-	0	0
Complementariedad con El Niño	-	0	0
Ahorro de combustibles fósiles	7.16	1.029.248	460.162
Salud	0.84	120.653	53.942
Biodiversidad	0.06	8.459	3.782
Total		6.285.380	2.704.692

Fuente: UPME, 2015.

Finalmente el análisis realizado por la UPME en el informe de Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia muestra que, actualmente, la energía solar fotovoltaica no es rentable en Colombia sin subsidios o fuentes de financiamiento, la razón principal es que los costos de estos sistemas son relativamente altos a causa de la escasa madurez del mercado (ej. 3,2 USD/W instalado comparado con 1,9 USD/W en Alemania a nivel de gran escala).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

5.5.5 *Eco Innovación*

A partir de la Cumbre de Rio de Janeiro en el año 1992 para el desarrollo sostenible, los gobiernos y distintos sectores económicos se comprometieron a cumplir las políticas enfocadas en la innovación y cambio de tecnologías, infraestructura y hábitos que contribuyan con mejoras en el uso de la energía y la reducción de los fenómenos nocivos para el medio ambiente. Dichas prácticas se conocen como Eco Innovación y su metodología se centra principalmente en rediseñar la planeación de un ente público o privado para que este enfoque sus futuros lineamientos en pro del cuidado del medio ambiente (Bitar & Chamas, 2017). Una de las aplicaciones de la eco innovación es la construcción de infraestructura urbana sustentable, donde es necesario optar por tecnologías alternativas que permitan reutilizar los componentes ambientales y regresarlos a la naturaleza con buena calidad, sin hacer un uso excesivo de energía y sin producir contaminantes (Lahera, 2010); para reducir ese uso intensivo de energía, se deben implementar energías renovables las cuales disminuyan costos y mejoren la eficiencia de la planta de tratamiento.

5.5.6 *Factores ambientales que determinan la factibilidad del sistema fotovoltaico*

5.5.6.1 *Brillo solar*

El brillo solar es el nombre que recibe aquel fenómeno en el cual la luz solar está presente en algún punto de la tierra, desde que amanece hasta que se oculta, en otras palabras el brillo solar, es la cantidad de energía captada en un tiempo determinado y se mide en horas solares pico (HSP).

Dicho fenómeno permite a su vez calcular el brillo solar total mensual y el brillo total anual (IDEAM, 2011). En días nublados es posible que un sistema fotovoltaico genere mayor energía de la esperada, incluso mayor a la capacidad de diseño en un día soleado, conociendo este efecto como efecto de borde de la nube, y sucede cuando el sol ilumina el extremo del borde de las nubes, lo que funciona como un lente que magnifica la luz solar (Restrepo, 2016).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

5.5.6.2 Radiación solar

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), determinar la radiación solar es importante cuando se va hacer el diseño para la implementación de las energías renovables como lo es la fotovoltaica. La energía emitida por el sol, que se propaga en diferentes direcciones del espacio mediante ondas electromagnéticas es la radiación solar, esa energía determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. Los módulos fotovoltaicos funcionan con la radiación solar, es por ello que operan sólo durante el día, incluso aunque esté nublado, lo único que impide a un módulo fotovoltaico producir electricidad, es la oscuridad (América Fotovoltaica, 2018).

Según el Atlas de Radiación Solar de Colombia, el país cuenta con un recurso solar alto debido a su posición geográfica, tomando como referencia que la radiación de la tierra se encuentra entre 1,9 kWh/m²día y 7,4 kWh/m²día, es decir la radiación solar global promedio es de 4,6 kWh/m²día, en Colombia se estima una radiación promedio mensual que varía entre los 4 y 6 kWh/m²día, siendo las regiones de la Guajira, Arauca, parte del Vichada, las regiones de los valles del Río Cauca y del Río Magdalena y San Andrés y Providencia las de mayor recurso solar, mientras que en la región Andina (zona actual del presente estudio) posee una radiación solar de 4,5 kWh/m²día. Comparado con los porcentajes mundiales, Colombia se encuentra entre el 58% y 84% de los máximos registrados (Castillo, Gutiérrez, Vanegas, Valencia, & Villicaña, 2015).

5.5.6.3 Velocidad del viento

Los fabricantes de módulos fotovoltaicos especifican que los módulos deben resistir una velocidad de viento perpendicular a su superficie de 227,68 km/h, que corresponde con un huracán de categoría 4 (Stolik, 2017). La escala de huracanes de *Saffir-Simpson* es una escala que clasifica los ciclones tropicales según la intensidad del viento, clasificación vigente desde 1 de junio de 2012 (Tabla 6).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Tabla 6. *Escala de huracanes de Saffir-Simpson*

Categoría	Km/h	Daños
1	119 – 153	Mínimos
2	154 – 177	Moderados
3	178 – 208	Extensos
4	209 – 251	Extremos
5	252 o más	Catastróficos

Fuente: Stolik, 2017.

5.5.6.4 Nubosidad

Uno de los fenómenos meteorológicos con gran importancia climática, es la presencia de nubes. Las nubes representan el fenómeno de condensación del vapor de agua y el origen de las precipitaciones, formando parte del ciclo hidrológico. Además, las nubes reflejan, dispersan y absorben tanto radiación solar como terrestre (Llach & Calbó, 2004). Los sistemas fotovoltaicos funcionan con poca radiación solar, ya que en días grises aún pueden producir entre un 10% y 25% de su capacidad total (Restrepo, 2016).

5.5.7 Tasa interna de retorno y valor presente neto

Para un proyecto de inversión es importante enfocar su atención en la valoración de las decisiones de inversión mediante modelos que toman en cuenta el valor del dinero en el tiempo y el costo medio ponderado de capital como datos fundamentales para su cálculo (Altuve & Germán, 2004).

5.5.7.1 Valor presente neto, o valor actual neto (VPN)

El VPN es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial (Baca, 2006). La elección de inversión debe aumentar el valor total de la empresa, es por esto que se dice que si el $VPN \geq 0$ se acepta la propuesta de inversión si el

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

VPN < 0 se debe rechazar el proyecto (Altuve & Germán, 2004). La fórmula para hallar el VPN se muestra a continuación:

$$VPN = \sum_{t=1}^n FFt/(1+i)^t - I_0$$

(Altuve & Germán, 2004).

Dónde:

VPN = Valor actual neto

FFt = Flujos esperados de fondos desde el momento cero hasta el momento t

i = Costo de capital o tasa de descuento

I₀ = Inversión inicial en el momento cero

5.5.7.2 Tasa interna de retorno, o tasa de utilidad interna (TIR)

En proyectos de inversión para la toma de decisiones se calcula la tasa interna de retorno que es la tasa de descuento, la cual hace referencia al valor presente de los ingresos de un proyecto con el valor presente de los egresos. En otras palabras la TIR es la tasa efectiva anual compuesto de retorno que hace que el valor actual neto de todos los flujos de efectivo de una determinada inversión sea igual a cero (Mete, 2014). La TIR se utiliza para evaluar la factibilidad económica de un proyecto como se mencionó anteriormente, cuanto mayor sea la tasa interna de retorno, más deseable será llevar a cabo dicho proyecto (Enciclopedia financiera, 2018). La fórmula de la Tasa Interna de Retorno se puede expresar de la siguiente forma:

Tabla 7. Fórmulas para calcular el TIR

Opción 1	Opción 2
----------	----------

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Opción 1	Opción 2
$\sum_{t=0}^n \frac{FE^t}{1 + TIR} = VPN = 0$ <p>(Mete, 2014)</p> <p>Dónde:</p> <p>TIR: Tasa Interna de Rendimiento/Retorno</p> <p>VPN: Valor Presente Neto</p> <p>FE (t): flujo de efectivo neto del período t</p> <p>n: número de períodos de vida útil del proyecto</p>	$VPN = \frac{\sum Rt}{(1 + i)^t} = 0$ <p>(Enciclopedia Financiera, 2018)</p> <p>Dónde:</p> <p>t: el tiempo del flujo de caja</p> <p>i: la tasa de descuento</p> <p>Rt: el flujo neto de efectivo (la cantidad de dinero en efectivo, entradas menos salidas) en el tiempo t.</p>

Fuente: Mete, 2014 y (Enciclopedia Financiera, 2018)

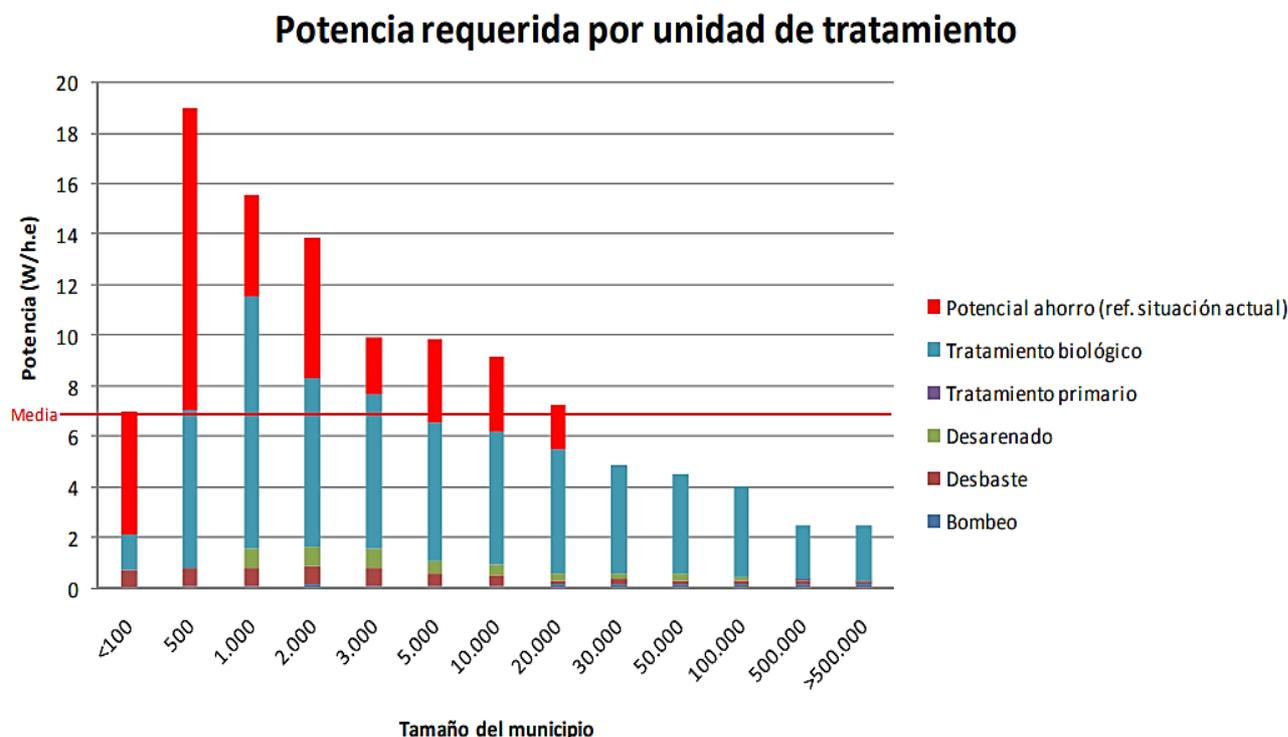
5.5.8 Plantas de tratamiento de aguas residuales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales realizan procesos unitarios (químico, físico o biológico) con el objetivo de purificar o potabilizar el agua para que pueda ser aprovechada para el consumo o procesos productivos (Vargas, 2004). Según el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) de España, en un estudio sobre el consumo energético, afirmó que el consumo energético de una PTAR se debe principalmente al consumo de sus equipos. En consecuencia el estudio establece que en las PTAR donde se tratan las aguas de 1.000 a 100.000 habitantes la línea de lodos suele ser el mayor consumidor de energía, principalmente por los equipos de deshidratación (Figura 5).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 5. Consumo energético medio de cada tratamiento en función de la capacidad de habitantes equivalente de la PTAR



Fuente: Consumo Energético en el sector del agua, IDEA.

5.5.9 Huella de carbono

Es una herramienta utilizada para calcular la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera a causa de las actividades humanas. Estos gases en su mayoría contaminantes se concentran en la atmósfera lo que impide que la radiación solar pueda salir y provoque aumentos de la temperatura global (Espíndola & Valderrama, 2012). En otras palabras la huella de carbono es la medida del impacto de los gases de efecto invernadero y puede ser expresada como la cantidad en toneladas o kilos de CO₂ equivalente de GEI (Schneider & Samaniego, 2010). El cálculo de la huella de carbono establece tres alcances relacionados con la profundidad del análisis: el alcance 1, corresponde al cálculo de las emisiones directas asociadas al consumo de combustibles fósiles; el alcance 2, cuantifica las emisiones indirectas ligadas al consumo de energía eléctrica; y finalmente, el alcance 3, mide las emisiones indirectas asociadas a bienes y servicios adquiridos por el objeto en estudio (PIGA, 2013).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Colombia adquirió compromisos al suscribirse a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), por lo cual debe remitir a la conferencia de las partes los Inventarios Nacionales de Emisiones antropogénicas de todos los gases de efecto invernadero (GEI) no controlados por el protocolo de Montreal. Para cumplir con este compromiso, se decidió emplear la metodología planteada por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En 2003 se contrató a la Academia Colombiana de Ciencias exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) para obtener una calculadora en Excel y un informe con factores de emisión de 68 combustibles. Para el año 2015, se vio la necesidad de actualizar los factores de emisión, y garantizar la trazabilidad de los datos, por lo que, a través de la Fundación Natura, donde se realizó la actualización, se obtuvieron los factores y cálculos utilizados en la nueva versión FECOC-WEB 2016 (UPME, 2017).

La huella de carbono constituye un indicador muy potente y con gran capacidad de difusión, por tres motivos principales: Es capaz de identificar las principales fuentes de emisión de GEI del objeto en estudio y cuantificar dichas emisiones, las unidades en las que se expresa resulta comprensible por la sociedad y puede ser empleado como base de actuación en estrategias de reducción de emisiones de GEI por parte de los gestores del objeto en estudio (Blanquer, 2012).

Por último, es importante considerar el Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero de Colombia en el que el IDEAM² reporta las emisiones generadas según el sector económico; esto debido a que el sector energético es responsable del 10 % de las emisiones de GEI a nivel nacional. Según estudios para el año 2012 en energía, las emisiones a nivel nacional fueron de 78,0 Mton de CO₂, mientras que a nivel departamental en la zona de estudio, Boyacá generó cerca de 2,81Mton de CO₂ (IDEAM, 2016).

5.6 Marco institucional

Como método de indagación y obtención de información acerca de la PTAR para su posterior análisis de factibilidad sobre la implementación de energía fotovoltaica en Chiquinquirá, es necesario entender las responsabilidades que recaen en los entes relacionados con su

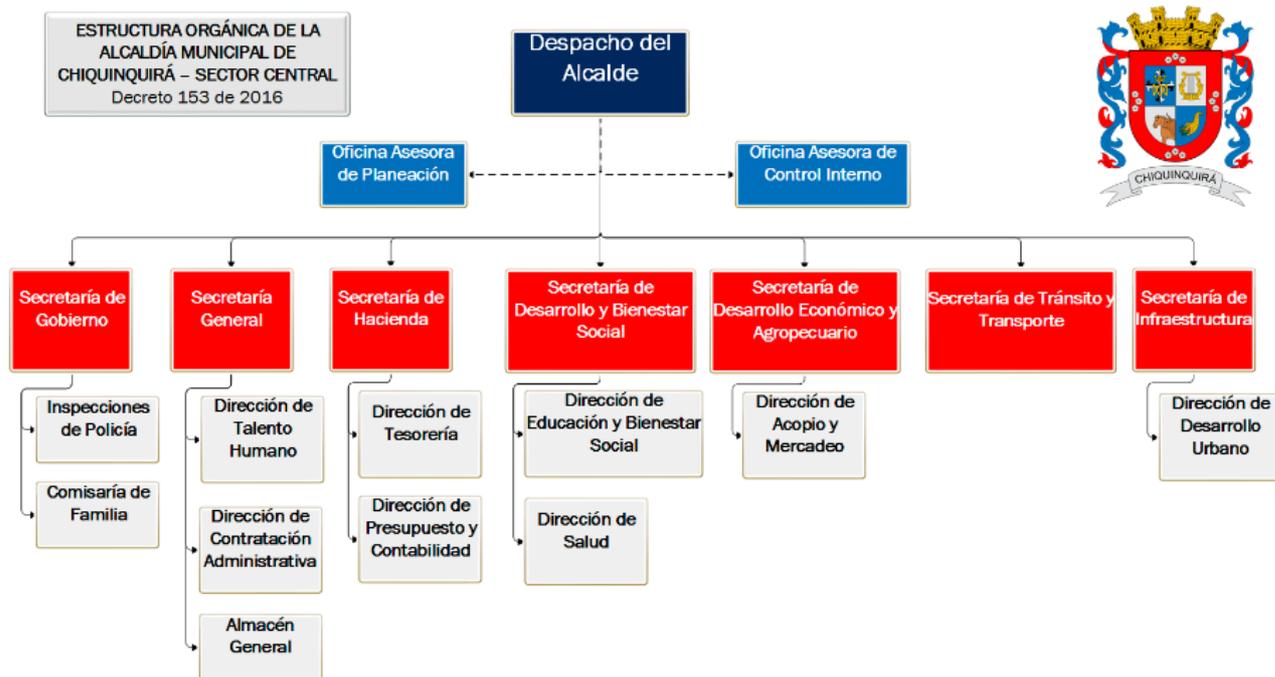
² Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

funcionamiento, esto con el fin de recurrir a ellos para tener una extensión más clara del estudio y la situación actual de la planta. Como referente al tema de estudio, se muestra el organigrama del municipio.

Figura 6. Estructura orgánica de la Alcaldía Municipal de Chiquinquirá



Fuente: Alcaldía Municipal de Chiquinquirá, 2018.

Tabla 8. Función del ente organizacional

ENTIDAD	FUNCIÓN
Alcaldía Municipal de Chiquinquirá	Tiene como misión y objetivos generales asegurar el desarrollo sociopolítico, económico y ambiental del municipio, el bienestar general y el mejoramiento continuo de la calidad de vida de su población; mediante el ejercicio a través de la Administración Municipal.
Empresa de Servicios Públicos de Chiquinquirá	Desde 1997 es la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo para los habitantes del municipio de Chiquinquirá, con el fin de contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los Chiquinquireños, con criterios de calidad, eficiencia, eficacia, transparencia, competitividad, rentabilidad social y económica

Fuente: Alcaldía Municipal de Chiquinquirá y EMPOCHIQUINQUIRÁ, 2018.

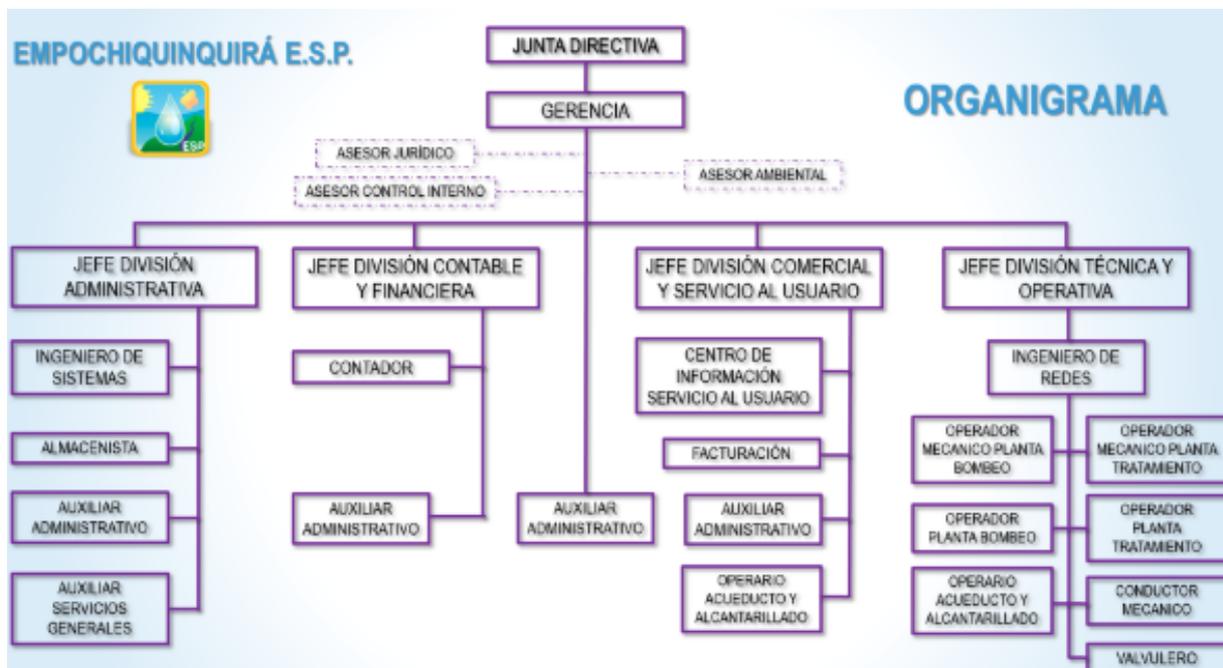
DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

La administración municipal 2016-2019 por medio del plan “Unidos por Chiquinquirá”, trabaja en el desarrollo integral territorial bajo una estrategia social, económico, físico-territorial e institucional, mediante un enfoque cultural del cambio climático teniendo en cuenta procesos relevantes del sector de servicios públicos como el acueducto, alcantarillado y aseo entre otros; para así lograr satisfacer necesidades básicas de la población, ser garante de los derechos fundamentales, sociales, económicos, culturales y ambientales (Plan de Desarrollo "Unidos por Chiquinquirá", 2016).

La Empresa de Servicios Públicos de Chiquinquirá EMPOCHIQUINQUIRÁ E.S.P. creada mediante Acuerdo Municipal N° 019 de 1997, tiene como objetivo social la prestación de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo en la jurisdicción urbana del municipio de Chiquinquirá, bajo lo contemplado en la Ley 142 de 1994 y sus normas complementarias. Debido a lo anterior, desde el año 2015 EMPOCHIQUINQUIRÁ es la encargada de administrar la PTAR del municipio y su estructura organizacional se puede observar en el siguiente diagrama (Plan de Desarrollo "Unidos por Chiquinquirá", 2016).

Figura 7. Estructura organizacional de EMPOCHIQUINQUIRÁ



Fuente: EMPOCHIQUINQUIRÁ, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

5.7 Marco geográfico

El municipio de Chiquinquirá, está ubicado en la provincia de occidente del Departamento de Boyacá; a los 05° 36' 48" de latitud norte y 73° 48' 59" de longitud oeste; a una altura sobre el nivel del mar de 2.556 metros. Limita por el norte con Saboya; por el sur, con San Miguel de Sema, Simijaca y Caldas; por el oriente con Tinjacá y Simijaca; y por el occidente con Caldas y Briceño (Figura 8).

Chiquinquirá, es el centro económico y de comercio de la región occidente y del alto Ricaurte, del departamento de Boyacá, y de los municipios aledaños de los departamentos de Santander y Cundinamarca, a los cuales abastece con toda clase de bienes y servicios para su desarrollo. Según el censo realizado en el 2005 por el DANE, el municipio de Chiquinquirá cuenta con 54.949 habitantes en el municipio, 46.827 habitantes en el área urbana y 8.122 en el área rural, siendo el cuarto más poblado del departamento, después de Tunja, Sogamoso y Duitama (que superan los 100.000 habitantes), cuenta con una división político-administrativa adoptada por el Acuerdo Municipal No. 018 del 30 de junio de 2000 "Plan Básico de Ordenamiento Territorial De Chiquinquirá", con una extensión de 133 km² divididos en 6.855 predios rurales (15.810 ha) y 10.137 predios urbanos (39.5 ha) (Secretaría de Desarrollo y Bienestar Social, 2013).

Según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial, el municipio de Chiquinquirá presenta un área de 3,02 km² de superficie urbana. Conformada por 3 comunas que comprenden 9 barrios de la siguiente manera:

Tabla 9. Distribución área urbana.

Ubicación	Barrios
Nororiental	Jardín del Norte Terebinto La Pola Sucre

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Ubicación	Barrios
Occidente	Centro Boyacá
Suroccidental	El Bosque Santa Marta Laureles

Fuente: Secretaría de Desarrollo y Bienestar Social.

De igual manera se encuentra dividido políticamente en 17 veredas las cuales ocupan el 89,01% de la extensión total, dividida en 4 corregimientos:

Tabla 10. División área rural

Corregimientos	Veredas
Condor	Varela, Resguardo (fusionada con Tenería) y Los Andes (fusión de Molino, Casa Blanca y la Mesa), su cabecera corregimiento está ubicada en Escuela de la Antigua Tenería.
Comuneros	Veredas Sasa (fusión con Arboledas) Carapacho, Balsa, Moyavita y Quiche, estando la cabecera en inmediaciones de la escuela Vereda Sasa.
Terebinto	Veredas Córdoba y Hato de Susa, su cabecera se encuentra en la escuela de Córdoba sector bajo.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Corregimientos	Veredas
Mariscal Sucre	Sucre Occidental, Sucre Oriental y Tierra de Páez, la cabecera del corregimiento se encuentra en La Portada.

Fuente: Secretaría de Desarrollo y Bienestar Social.

Figura 8. Mapa geográfico Chiquinquirá



Fuente: Secretaría de Desarrollo y Bienestar Social.

El municipio cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (Figura 9), donde la descarga de aguas negras se realiza directamente a los colectores de la red de alcantarillado. La PTAR se construyó en el 2014 con una proyección de 30 años de vida útil, esta planta entró en operación a partir del mes de mayo de 2015 (Plan de Desarrollo "Unidos por Chiquinquirá", 2016). Esta obra fue construida en un predio ubicado en la vereda Casa Blanca, a 5 kilómetros aproximadamente del perímetro urbano de Chiquinquirá.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 9. Delimitación PTAR



Fuente: Google Earth Pro.

5.8 Marco normativo

Teniendo en cuenta las diversas normas que existen en el sector ambiental y en energías renovables en el país, relacionadas con el eje de la investigación se incluye lo pertinente a la declaración de Estocolmo, Declaración de Rio, Protocolo de Kyoto, Constitución Política de Colombia de 1991, Código Nacional de recursos naturales renovables y protección de medio ambiente, leyes 677 de 2001, 1665 de 2013, 1775 de 2014, resoluciones y decretos referentes al tema como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11. Marco legal relacionado con la energía renovable

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
Declaración de Estocolmo Sobre el	<i>Principio 1.</i> "El hombre tiene derecho fundamental (...) y el disfrute de condiciones de vida adecuadas en un medio

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
<p>Medio Ambiente Humano.</p>	<p>ambiente de calidad tal que le permita llevar una vida digna y gozar de bienestar, y tiene la solemne obligación de proteger y mejorar el medio ambiente para las generaciones presentes y futuras (...)".</p> <p><i>Principio 2.</i> Los recursos naturales de la tierra incluidos el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras, mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga.</p> <p><i>Principio 3.</i> Debe mantenerse y, siempre que sea posible, restaurarse o mejorarse la capacidad de la tierra para producir recursos vitales renovables.</p>
<p>Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático - Ley 629 De 2000</p>	<p>Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.</p> <p><i>Artículo 2.</i> Con el fin de promover el desarrollo sostenible, al cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones</p> <p>i) Fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional</p> <p>iv) Investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales.</p>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
<p>Constitución Política de 1991</p>	<p>En la Constitución Política de 1991, el medio ambiente y energías alternativas no están incluidos en el capítulo de derechos fundamentales, sin embargo, aparece en el que se refiere a los derechos colectivos y del ambiente.</p> <p><i>Artículo 79.</i> Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano.</p> <p><i>Artículo 80.</i> El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.</p>
<p>Código Nacional De Recursos Naturales Renovables Y De Protección De Medio Ambiente.</p>	<p><i>Artículo 1.</i> El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social.</p> <p><i>Artículo 9.</i> El uso de elementos ambientales y de recursos naturales renovables, debe hacerse de acuerdo con los siguientes principios:</p> <p>a.- Los recursos naturales y demás elementos ambientales deben ser utilizados en forma eficiente</p> <p><i>Artículo 13.</i> Con el objeto de fomentar la conservación, mejoramiento y restauración del ambiente y de los recursos naturales renovables, el Gobierno establecerá incentivos económicos.</p>
<p>Ley 1931 de 2018</p>	<p>“Por la cual tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación,</p>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
	<p>Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono”.</p>
Ley 1715 de 2014	<p>Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.</p>
Ley 1665 de 2013	<p>Por medio de la cual se aprueba el "ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.</p> <p><i>ARTÍCULO II.</i> La Agencia promoverá la implantación generalizada y reforzada y el uso sostenible de todas las formas de energía renovable</p>
Ley 697 de 2001	<p>Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.</p>
Ley 99 de 1993	<p>Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del Medio Ambiente y los Recursos Naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA, y se dictan otras disposiciones.</p>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
Resolución 1670 de 2017	Por el cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental - EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de uso de energía solar fotovoltaica y se toman otras disposiciones.
Resolución Ministerio de Ambiente 1283 de 8 agosto de 2016	"Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones
Resolución CREG 024 de 2015	"Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)".
Decreto 1543 de 2017	"Por el cual se reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE"
Decreto 2469 de 2014	"Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración"
NTC 5287: 2009	Esta norma tiene por objeto establecer las principales definiciones utilizadas en las normas técnicas relativas a energía solar fotovoltaica.
NTC 2883:2006	Esta norma indica los requisitos para la calificación del diseño y la aprobación del tipo de módulos fotovoltaicos

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

MARCO LEGAL	ARTÍCULOS
	para aplicación terrestre y para una utilización de larga duración en climas moderados al aire libre, según se define en la norma IEC 60721-2-1.
NTC 2775:2005	Esta norma tiene por objeto establecer las principales definiciones utilizadas en las normas técnicas relativas a energía solar fotovoltaica.
NTC 4405: 1998	<p>Esta norma presenta una metodología para la evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos, reguladores y acumuladores.</p> <p>La presente norma cubre de los sistemas fotovoltaicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Etapa de paneles o de módulos b) Etapa de regulación c) Etapa de acumulación.

Fuente: Autores, 2018.

El marco normativo presentado anteriormente aporta las bases legales que sustentan el tema de investigación; por medio de este, es posible identificar las acciones legales sobre el uso de energía fotovoltaica, información acerca de los equipos, financiación de proyectos de energías renovables y sus respectivos incentivos tributarios y demás elementos para la producción y utilización de energía exentos de IVA (ACER, 2018).

Cabe resaltar que el artículo 10 de la Ley 1715 de 2014 creó el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), para financiar programas de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) y Gestión Eficiente de la Energía (GEE), así mismo indica que dicho Fondo puede recibir recursos públicos, privados y de organismos

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

multilaterales e internacionales, y que el mismo será reglamentado por el Ministerio de Minas y Energía y administrado por una fiducia seleccionada por este mismo ministerio.

Por medio de la elaboración del marco normativo, se permite dar una justificación, peso jurídico y técnico a nivel normativo en cuanto al uso de energías renovables en Colombia y la viabilidad en la implementación de sistemas fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, siendo el amparo legal de la decisión en la implementación de estos sistemas.

6. Diseño metodológico

La determinación de la factibilidad para la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR de Chiquinquirá, se realizó mediante un diseño metodológico según el tipo de investigación y el paso a paso para el desarrollo del estudio, en la cual se busca la evolución de la infraestructura convencional de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio hacia la implementación de una infraestructura sustentable a través de módulos fotovoltaicos, donde se beneficien los componentes ecológicos, sociales y económicos.

6.1 Metodología

La metodología llevada a cabo para el avance del estudio consistió en el desarrollo de tres fases establecidas una para cada objetivo específico; así entonces, se establece una serie de actividades basadas en la recolección de información, observación, diagnóstico, diseño, análisis y evaluación de alternativas. Cabe resaltar que los costos y los respectivos cálculos en el estudio de investigación se realizaron en pesos colombianos los cuales tienen la siguiente relación

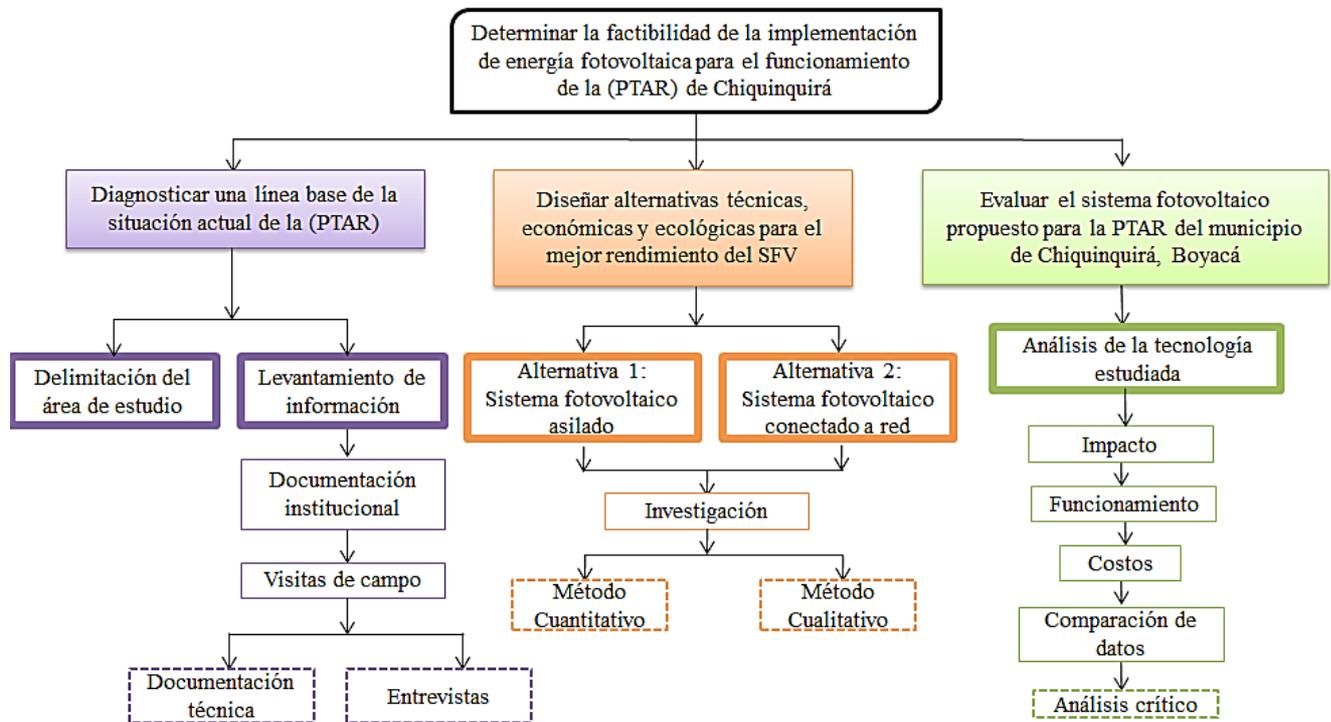
$$1 \text{ DOLAR} = 3078.25 \text{ COP}$$

A continuación, en la figura 10 se explica la metodología realizada en cada fase del presente estudio de investigación.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 10 Metodología aplicada para determinar la factibilidad de la implementación de energía fotovoltaica para el funcionamiento de la (PTAR) de Chiquinquirá



Fuente: Autores, 2018.

Metodología primer objetivo: “Diagnosticar una línea base de la situación actual de la Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá”

Para el cumplimiento del primer objetivo, se lleva a cabo una metodología de tipo cualitativa y cuantitativa. Como primera medida se gestionó el levantamiento de información para la línea base en documentos institucionales proporcionados por funcionarios de la Empresa de Servicios Públicos (EMPOCHIQUINQUIRA E.S.P), y se realizó la proyección de la población al año 2018 para contar con datos actualizados. El cálculo de la proyección se determinó utilizando el método geométrico, ya que corresponde al nivel alto de complejidad del RAS 002:

$$r = \left(\frac{Puc}{Pci}\right)^{\frac{1}{Tuc-Tci}} - 1$$

$$Pf = Puc (1 + r)^{Tf-Tuc}$$

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Dónde:

r: Tasa de crecimiento poblacional.

Tci: Año correspondiente al censo inicial con información

Pf: Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

Puc: Población correspondiente a la proyección de la fuente (habitantes).

Pci: Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes).

Tuc: Año correspondiente al último año censado por la fuente.

Tf: Año al cual se quiere proyectar la información.

(Ríos, 2016)

Posteriormente por medio de la herramienta *Google Earth Pro* se delimitó el área de estudio y la zona disponible para los módulos fotovoltaicos. De igual manera por medio de visitas técnicas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, se desarrolló una entrevista semiestructurada (Anexo 2) a la Ingeniera encargada Lina Fernanda Matamoros Gil, la cual se realizó con el objetivo de conocer el diseño, funcionamiento, plan operativo y problemática de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales; para de esta manera lograr integrar un sistema fotovoltaico de manera que se pueda llegar a reducir tanto la generación de CO₂ como los gastos económicos correspondientes al uso de energía. Este tipo de entrevista parte de preguntas planeadas y su ventaja es la posibilidad de aclarar términos, identificar ambigüedades y reducir formalismos (Díaz, Torruco, Martínez & Varela, 2013).

A partir de la documentación suministrada por EMPOCHIQUINQUIRA E.S.P, se analizó la información existente para el diagnóstico del gasto económico y energético histórico de la PTAR; de acuerdo a este diagnóstico, se registró el consumo y costo de energía de la PTAR desde el año 2015 hasta el año en curso. Para el desarrollo del estudio de investigación fueron seleccionados los datos obtenidos del año 2017 hasta el mes de septiembre del 2018; encontrando así el pico más alto de consumo energético de la PTAR en el mes de agosto del 2017; y a su vez tomando este dato como referencia para el alcance de los diferentes objetivos

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

propuestos. Cabe resaltar que no se tuvieron en cuenta los datos de los años anteriores, debido a la falta de información requerida para desarrollar con éxito el estudio.

La metodología cuantitativa consistió en realizar cálculos matemáticos con el fin de determinar el consumo energético total, por equipo y el gasto económico que estos conllevan. Adicionalmente se revisó la documentación técnica de la PTAR, donde se identificó el funcionamiento de los equipos, la energía requerida por cada uno y su costo correspondiente, permitiendo así determinar cuáles eran los equipos que presentan mayor consumo. Por último, se realizó la inspección de la documentación ambiental de la planta que junto a las coordenadas geográficas de la zona de estudio se tuvieron en cuenta para realizar revisiones bibliográficas, mapas geográficos, atlas de viento de Colombia y el atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono del país.

Metodología segundo objetivo: *“Diseñar alternativas técnicas, económicas y ecológicas para el mejor rendimiento del sistema fotovoltaico”.*

Mediante una investigación amplia se estudiaron los diferentes métodos de aplicación de energía fotovoltaica, teniendo en cuenta los modelos aptos para las condiciones del territorio. Según la información encontrada existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos: Sistema Autónomo de Red o Aislado y Sistema Conectado a Red, describiendo cada uno de ellos y la respectiva comparación.

Posteriormente se elaboró un análisis de alternativas, con el fin de determinar qué sistema es más factible teniendo en cuenta criterios de evaluación. Este análisis de alternativas se desarrolló por el método AHP (Analytic Hierarchy Process), donde se pudo seleccionar cuál de los sistemas fotovoltaicos es más factible para la PTAR de Chiquinquirá, debido a que permite resolver el análisis mediante una cantidad de criterios, motivos y justificaciones determinadas, la decisión a tomar. El método AHP evidencia ventajas en pro de identificar y priorizar tanto los problemas como las acciones. Algunas de las ventajas del método AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio, es el sustento matemático, el desglose y análisis de un problema por partes; de igual manera permite medir criterios cuantitativos y cualitativos, verificando el índice de consistencia y si es necesario realizar correcciones.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

El resultado del método AHP es una jerarquización con prioridades donde muestran los criterios relevantes para cada una de las alternativas de decisión (Juan, 2015). Para el desarrollo del método AHP, se inició por la etapa de modelización donde se realizó la jerarquización del problema el cual se estructuró bajo tres niveles. El primer nivel es el objetivo del problema, en el segundo se definieron los criterios, los cuales se construyeron siguiendo una estructura jerárquica descendente desde uno o varios objetivos y desglosándolos en sub-objetivos que permitieron valorar las alternativas para cada criterio. En el tercer nivel se encontraron las alternativas consideradas en el problema (Juan, 2015). A continuación, la tabla 12 teniendo en cuenta la modelización según los criterios seleccionados muestra que para el desarrollo de estos se tuvo en cuenta las características económicas, técnicas y ecológicas. En este caso las alternativas analizadas son los sistemas fotovoltaicos conectados a la red y los sistemas fotovoltaicos aislados, el objetivo al que se quiso llegar es determinar cuál de los dos sistemas es más factible para la PTAR del municipio de Chiquinquirá.

Tabla 12. Criterios de valoración para el análisis AHP.

Diseño	Criterio de valoración	Definición del criterio
Técnico	Vida útil del sistema (CR1)	Duración estimada del sistema
	Eficiencia (CR2)	Eficiencia energética del sistema
	Cantidad de módulos (CR3)	Número de módulos según el sistema
	Pérdida de energía (CR4)	Cuántos kWh se producen de más en cada configuración, es decir, cuanta energía producida se desecha.
	Fiabilidad (CR5)	Valora si el sistema llega a abastecer en todo momento la demanda o existe algún periodo de demanda no cubierta.
Económico	Costo de construcción (CR6)	Desembolso inicial que habría que hacer para la implementación del sistema.
	Costo de mantenimiento (CR7)	Costes que requerirá la manutención del sistema para que funcione adecuadamente.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Diseño	Criterio de valoración	Definición del criterio
	TIR (CR8)	Valor presente de los ingresos del proyecto con el valor presente de los egresos
Ecológico	Huella de Carbono (CR9)	Cantidad de CO ₂ reducido por el sistema
	Disposición final (CR10)	Complejidad de la gestión de residuos
	Impacto paisajístico (CR11)	Grado de afectación al paisaje

Fuente: Juan, 2015.

El siguiente paso que se desarrolló en el método AHP fue la ponderación de criterios, para la aplicación de ésta técnica se siguieron los pasos propuestos por Saaty en su investigación. En ese sentido, en la tabla 13 se presenta la matriz de comparaciones pareadas de los criterios, y se realiza la jerarquización de los criterios del estudio de investigación.

Tabla 13. Escala de comparación de Saaty

Igual	Moderada	Fuerte	Muy Fuerte	Extremadamente Fuerte
1	3	5	7	9

Fuente: Saaty, 1980.

A partir de lo anterior se realizó un diseño técnico donde se describieron los componentes del sistema fotovoltaico, para dar paso al desarrollo de la metodología cuantitativa donde se realizó el cálculo del número de módulos fotovoltaicos necesarios para la PTAR; cálculo desarrollado mediante la ecuación del Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de un Modelo de Energía Fotovoltaica en el Área Administrativa en Corona Planta Madrid como Aporte a la Ecoeficiencia. Es importante tener en cuenta que para el desarrollo de este cálculo se tomó un factor de seguridad de (1,5), el cual previene la variabilidad de radiación según la época del año y la posible presencia de partículas que reduzcan la sensibilidad y captura de dicha

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

radiación solar; esto junto con la energía cedida por el sistema ya sea a los conductores o a su fuente principal de energía debido a una autodescarga de esta.

$$N^{\circ} \text{ de módulos fotovoltaicos} = \frac{\text{Consumo energético } W\text{día} * 1,5^3}{\text{Potencia de los módulos } W * HSP}$$

Luego de esto, se realizó un diagrama del sistema fotovoltaico aplicado en el área de estudio por medio del programa AutoCAD. Posteriormente se realizó el diseño ambiental donde se desarrolló una metodología cuantitativa y cualitativa para el cálculo de la huella de carbono producida en la PTAR actualmente y la huella de carbono que se produciría con la implementación de módulos fotovoltaicos para los años 2017 y 2018, de igual manera se realizó una estrategia de conductas responsables. Por último, se planteó el diseño económico donde se identificaron las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de los sistemas fotovoltaicos, se desarrolló un análisis de las cotizaciones recibidas por parte de diferentes empresas de energía fotovoltaica escogiendo así el sistema fotovoltaico más factible económicamente para la PTAR de Chiquinquirá.

Metodología tercer objetivo: *“Evaluar el sistema fotovoltaico propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá”.*

Una vez cumplidas las fases anteriores mediante métodos cualitativos y cuantitativos, se continuó con la evaluación de la factibilidad mediante la identificación de las acciones e impactos que se desarrollarían en la zona de estudio por medio de una matriz. Esto se realizó mediante una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del estudio de investigación mediante la metodología de CONESA y análisis de los factores sociales, económicos y ambientales.

La metodología llevada a cabo para la identificación de aspectos e impactos ambientales consistió en la revisión bibliográfica de los impactos ambientales asociados a la energía fotovoltaica mediante artículos científicos, tesis de grado, maestría y estudios de proyectos ya ejecutados en diferentes regiones del mundo. Esta revisión bibliográfica tuvo como finalidad identificar los impactos reportados sobre los factores biótico, abiótico y socioeconómico, las

³ Factor de seguridad

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

actividades involucradas en las etapas de construcción, operación, desmantelamiento y por último las medidas de manejo propuestas en cada caso.

La metodología aplicada para poder realizar con éxito la identificación y evaluación de los aspectos ambientales tuvo en cuenta principalmente las posibles áreas de incidencia en la implementación del estudio de investigación y en consecuencia los impactos ambientales que genera o puedan generar. Los aspectos ambientales, son el resultado de los POA⁴ que pueden repercutir sobre las condiciones naturales del medio ambiente, generando alteraciones o modificaciones específicas (impacto ambiental), donde se produce una relación causa-efecto (Ihobe, 2009). Para obtener unos resultados óptimos se siguieron los siguientes pasos:

- I. Identificar los procesos en las actividades y operaciones definidas de la construcción, operación y desmantelamiento de sistema fotovoltaico.
- II. Análisis de las etapas o fases del proyecto asociados a operaciones y procesos.
- III. Identificación de aspectos en cada una de las etapas.
- IV. Elaboración de tablas para el registro de aspectos.

Para poder actuar sobre los impactos ambientales, se identificaron todos los aspectos ambientales, para luego evaluarlos y priorizar sobre los que se va a actuar mediante una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Para llevar a cabo la EIA de implementación de energía fotovoltaica en la PTAR, se implementó la metodología formulada en 1993 por Vicente Conesa, ingeniero agrónomo español y otros colaboradores. Esta metodología tiene ciertos criterios para evaluar los impactos, los cuales se presentan en la tabla 14 (Arboleda, 2008).

Tabla 14. Criterios para la evaluación de impacto ambiental.

CRITERIOS		SIGNIFICADO
Signo	+/ -	Hace alusión al carácter <i>benéfico</i> (+) o <i>perjudicial</i> (-) de las distintas acciones que van a actuar sobre los distintos factores considerados

⁴ Proyectos, obras o actividades

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

CRITERIOS		SIGNIFICADO
Intensidad	IN	<i>Grado de incidencia</i> de la acción sobre el factor en el ámbito específico en el que actúa. Varía entre 1 y 12, siendo 12 la expresión de la destrucción total del factor en el área en la que se produce el efecto y 1 una mínimo afectación.
Extensión	E X	<i>Área de influencia</i> teórica del impacto en relación con el entorno de la actividad (% de área, respecto al entorno, en que se manifiesta el efecto). Si la acción produce un efecto localizado, se considera que el impacto tiene un carácter <i>puntual</i> (1). Si por el contrario, el impacto no admite una ubicación precisa del entorno de la <i>actividad</i> , teniendo una influencia generalizada en todo él, el impacto será <i>Total</i> (8).
Momento	M O	<i>Alude al tiempo</i> entre la aparición de la acción que produce el impacto y el comienzo de las afectaciones sobre el factor considerado. Si el tiempo transcurrido es <i>nulo</i> , el momento será <i>Inmediato</i> , y si es inferior a un año, <i>Corto plazo</i> , asignándole en ambos casos un valor de <i>cuatro</i> (4). Si es un tiempo mayor a cinco años, <i>Largo Plazo</i> (1).
Persistencia	P E	<i>Tiempo</i> que supuestamente <i>permanecerá el efecto</i> desde su aparición y, a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por los medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

CRITERIOS		SIGNIFICADO
Reversibilidad	R V	Se refiere a la <i>posibilidad de reconstrucción</i> del factor afectado como consecuencia de la acción acometida, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, <i>por medios naturales</i> , una vez aquella deje de actuar sobre el medio.
Recuperabilidad	M C	Se refiere a la posibilidad de <i>reconstrucción</i> , total o parcial, del factor afectado como consecuencia de la actividad acometida, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción.
Sinergia	SI	Este atributo contempla el <i>reforzamiento de dos o más efectos simples</i> . La componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría de esperar cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente, no simultánea.
Acumulación	A C	Este atributo da idea del <i>incremento progresivo</i> de la manifestación del efecto cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
Efecto	E F	Este atributo se refiere a la <i>relación causa-efecto</i> , o sea, a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción. Puede ser <i>directo o primario</i> , siendo en este caso la repercusión de la acción consecuencia directa de ésta, o <i>indirecto o secundario</i> , cuando la manifestación no es consecuencia directa de la acción, sino que tiene lugar a partir de un efecto primario, actuando este como una acción de segundo orden.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

CRITERIOS		SIGNIFICADO
Periodicidad	P R	Se refiere a la <i>regularidad de manifestación del efecto</i> , bien sea de manera <i>cíclica o recurrente</i> (efecto periódico), de forma <i>impredecible en el tiempo</i> (efecto irregular) o <i>constante en el tiempo</i> (efecto continuo)

Fuente: Arboleda, 2008.

De acuerdo a estos criterios y los rangos que se muestran en la tabla adjunta (Anexo 3), se obtiene la importancia (I) de las consecuencias ambientales del impacto aplicando el siguiente algoritmo:

$$I = (3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

Dónde:

Tabla 15. Variables de la ecuación Importancia.

IN = Intensidad	EX = Extensión
MO = Momento	PE = Persistencia
RV = Reversibilidad	SI = Sinergia
AC = Acumulación	EF = Efecto
PR = Periodicidad	MC = Recuperabilidad

Fuente: Arboleda, 2008.

El reglamento de EIA, establece que los impactos con valores:

- Inferiores a 25 son **irrelevantes o compatibles** con el ambiente
- Entre 25 y 50 son impactos **moderados**.
- Entre 50 y 75 son **severos**
- Superiores a 75 son **críticos**

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 16. Significado de los criterios de significancia

ESCALA DE IMPORTANCIA DE IMPACTOS POSITIVOS	POSITIVO	VALOR	COLOR
	Irrelevante	< 25	
	Moderado	≥ 25 y < 50	
	Severo	≥ 50 y < 75	
Critico	≥ 75		
ESCALA DE IMPORTANCIA DE IMPACTOS NEGATIVOS	NEGATIVO	VALOR	COLOR
	Irrelevante	< -25	
	Moderado	≥ -25 y < -50	
	Severo	≥ -50 y < -75	
Critico	≤ 75		

Irrelevante	La afectacion del mismo es irrelevante en comparación con los fines y objetivos del Proyecto en cuestión
Moderado	La afectacion del mismo, no precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas
Severo	La afectación de este, exige la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras. El tiempo de recuperación necesario es un periodo prolongado
Critico	La afectación del mismo, es superior al umbral aceptables. Se produce un pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales. NO hay posibilidad de recuperación alguna

Fuente: Hidroar S.A, s.f.

Adicionalmente a la metodología CONESA, en la matriz de EIA se adicionó una columna para determinar mediante una sumatoria de impactos cuál o cuáles de las fases (construcción, operación y desmantelamiento) de la implementación de módulos fotovoltaicos presentan mayor importancia para la PTAR del municipio de Chiquinquirá y de esta manera tomar medidas sobre dichos impactos.

Dados los tipos de impacto obtenidos en el EIA (irrelevante, moderado, severo, crítico) y la medida del Programa de Manejo Ambiental (preventiva, mitigatoria, correctiva, compensatoria) estos dos componentes se correlacionan y presentan por medio de las fichas ambientales, pues si se presentan los impactos más complejos (severos y críticos) se deben

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

implementar medidas de prevención y mitigación; mientras que, si se presentan impactos de menor complejidad como los irrelevantes y/o moderados las medidas a optar son las correctivas y compensatorias. (Calderón & Prada, 2013).

Por último, se realizó una evaluación económica donde se tuvieron en cuenta diferentes cotizaciones de empresas proveedoras de sistemas fotovoltaicos y de acuerdo con esto se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN).

Para ello se desarrolló un análisis económico representado en un flujo de caja a un plazo de 10 años, involucrando diferentes indicadores representativos para el proyecto, siendo estos de tipo operacional y tributario. Entre estos indicadores tenidos en cuenta para realizar el flujo de caja, se pueden encontrar el descuento tributario (3%), la depreciación acelerada (6%) y la exclusión del IVA (16%), estipulados como incentivos en la ley 1715 de 2014. Adicionalmente para el cálculo de la TIR se tuvo en cuenta la tasa para depósitos a término fijo (DTF) que es un tipo de interés que se calcula a partir del promedio ponderado semanal por monto de las tasas promedios de captación diarias de los Certificados de Depósitos a Término a 90 días. De igual manera, se pueden encontrar gastos operativos y de mantenimiento, determinados por la cotización seleccionada de la empresa. Por último, se tuvieron en cuenta los ingresos operativos, siendo estos los ahorros incurridos por la reducción del 19% de los costos operacionales generados por energía convencional.

A partir de la metodología desarrollada, se analizaron y discutieron los resultados obtenidos en el proceso de investigación para determinar la factibilidad de la implementación de los sistemas fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, Boyacá. Cabe resaltar que los resultados fueron analizados y discutidos en un mismo capítulo con el fin de llevar un mejor orden de estos.

6.2 Enfoque

La implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, permite desarrollar una estrategia para conocer los hechos, procesos y estructuras que se llevan a cabo de esta. Por este motivo el enfoque a desarrollar es de tipo mixto ya que éste establece suposiciones o ideas que se generan a través de la observación o evaluaciones realizadas. Este

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

enfoque permite la búsqueda de soluciones prácticas y ejecutables para poder efectuar la investigación utilizando los criterios y diseños más apropiados.

Los enfoques mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (meta inferencias) y lograr así un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio. (Sampieri, 2014, p.534)

El enfoque mixto, se desarrolla en el estudio de investigación ya que en la mayoría de las fases se encuentran los dos tipos de enfoques teniendo la posibilidad de encontrar diferentes rutas para conducirlo a una comprensión e interpretación lo más amplia de la investigación. De esta manera permite tener una visión holística donde se integran todos los componentes y las relaciones que se crean en el desarrollo, análisis y solución práctica de la investigación para las diferentes problemáticas (Sampieri, 2014).

6.3 Alcance

El tipo de investigación será descriptiva, ya que es un estudio que nace a partir de una problemática, cuyo fin es generar sensibilidad, reflexión, sobre lo vital que es el uso de energías renovables como lo son los módulos fotovoltaicos en infraestructuras como las plantas de tratamiento de aguas residuales. Siendo un proceso continuo en el que se analizan los hechos, se conceptualizan los problemas, se planifican y se ejecutan acciones en gestión de una transformación de la situación en contexto.

Sabino (1992) expresa que la investigación descriptiva se realiza sobre realidades de hechos, este alcance descriptivo se basa en características como el comportamiento de los fenómenos en estudio en él se cual se proporciona información sistemática y comparable con la de otras fuentes. A partir de esta investigación se va a poder generar una información detallada, donde se identifica la problemática del uso excesivo de energía convencional, ocasionando alteración en el medio y un menor desempeño ambiental. Donde se planificara un diseño de módulos fotovoltaicos los cuales generaran energía para el uso de la PTAR del municipio de Chiquinquirá.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

6.4 Método

Debido al enfoque del proyecto de investigación, la hipótesis y el camino que se quiere lograr con este, a través del método mixto se tendrán como métodos tanto el inductivo como el deductivo, donde se integrarán y desarrollarán de mejor manera la investigación. Algunos autores consideran los diseños investigación-acción como diseños técnicos ya que recolectan datos cuantitativos y cualitativos, y a su vez se mueven de manera simultánea entre el esquema inductivo y el deductivo (Sampieri, 2014).

El método inductivo se basa en la observación, estudio y experimentación de sucesos reales en la determinación de la factibilidad para la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, donde por medio de este se llega a la conclusión general de la eficiencia y los beneficios generados por la implementación de estos módulos. Se realizará una secuencia metodológica en la cual se observará, se generará un análisis y se clasificará la información recogida para llegar a una conclusión del proceso de investigación. Este método permite el estudio de varios elementos por separado, donde se pueden establecer modelos o hipótesis generales, aplicables no sólo al municipio en estudio sino a otros sistemas (Sampieri, 2014).

Debido al consumo de energía en la PTAR se deben seleccionar los puntos estratégicos a tratar para realizar una buena elección de la metodología, instrumentos y técnicas que se implementaran (Sampieri, 2014). Para el planteamiento del diseño metodológico se tuvieron en cuenta diferentes técnicas para acceder al conocimiento como lo son las de recursos y las de procedimientos; estas, a su vez se apoyan en instrumentos para guardar la información encontrada, entre los cuales se encuentran: el cuaderno de notas para el registro de observación y hechos, el diario de campo, los mapas, la cámara fotográfica, la grabadora, la filmadora, el software de apoyo, entre otros; y estos resultan ser elementos indispensables para registrar lo observado durante el proceso de investigación (Medina, 2011).

Teniendo en cuenta el método de la investigación y su objetivo general, se plantearon actividades desarrolladas para cada objetivo específico, las cuales tienen técnicas e instrumentos dependiendo el fin de cada objetivo como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17. Diseño metodológico para cada objetivo del proyecto

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Objetivo General:			
Determinar la factibilidad de la implementación de energía fotovoltaica para el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá.			
Objetivos Específicos	Actividad	Técnica	Instrumento
Diagnosticar una línea base de la situación actual de la Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR en el municipio Chiquinquirá, Boyacá.	Revisión de la documentación acerca de la PTAR, recolección de datos del consumo energético, pagos realizados por el uso de energía en la planta; adicionalmente, análisis de las características meteorológicas del municipio.	La técnica que se utilizó en la presente investigación fue la toma de datos del lugar del estudio, para recoger la información sobre la situación actual de la PTAR -Observación -Trabajo de campo -Recolección de datos primarios	Documentos institucionales Sistemas de información geográfica Entrevista (Guión) Planos de la PTAR de Chiquinquirá Diarios de campo Mapas Coordenadas geográficas Datos técnicos de PTAR. Cámara fotográfica Computador
Diseñar alternativas técnicas,	Revisión bibliográfica y técnica de los	Métodos cualitativos para el levantamiento	Literatura aplicada Computador Programas de diseño

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Objetivos Específicos	Actividad	Técnica	Instrumento
económicas y ecológicas para el mejor rendimiento del sistema fotovoltaico	modelos fotovoltaicos. Determinar el diseño teniendo en cuenta los modelos y los factores técnicos, económicos y ecológicos	de información sobre sistemas fotovoltaicos y métodos cuantitativos para el cálculo de huella de carbono y diseño técnico	Calculadora de huella de carbono
Evaluar el sistema fotovoltaico propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio	Desarrollo de EIA, fichas ambientales y evaluación económica (TIR, VPN)	Método de investigación crítica en los que se tiene en cuenta el ámbito científico, documental, y lógico de la situación.	Computador Calculadora Programa Excel Listas costo-beneficio Literatura

Fuente: Autores, 2018.

La metodología se realizó con el fin de identificar las actividades que se van a desarrollar para cada uno de los objetivos planteados y el estudio de la factibilidad del proyecto.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

7. Plan de trabajo

7.1 Cronograma

Un cronograma en el trabajo de investigación es el calendario de trabajo o de actividades y se considera como una herramienta en la gestión de proyectos, los cronogramas pueden ser representados mediante gráficos o por un diagrama de Gantt (Reyes & Jáuregui, 1999). El presente trabajo de investigación pretende alcanzar los objetivos mediante el cumplimiento del siguiente cronograma.

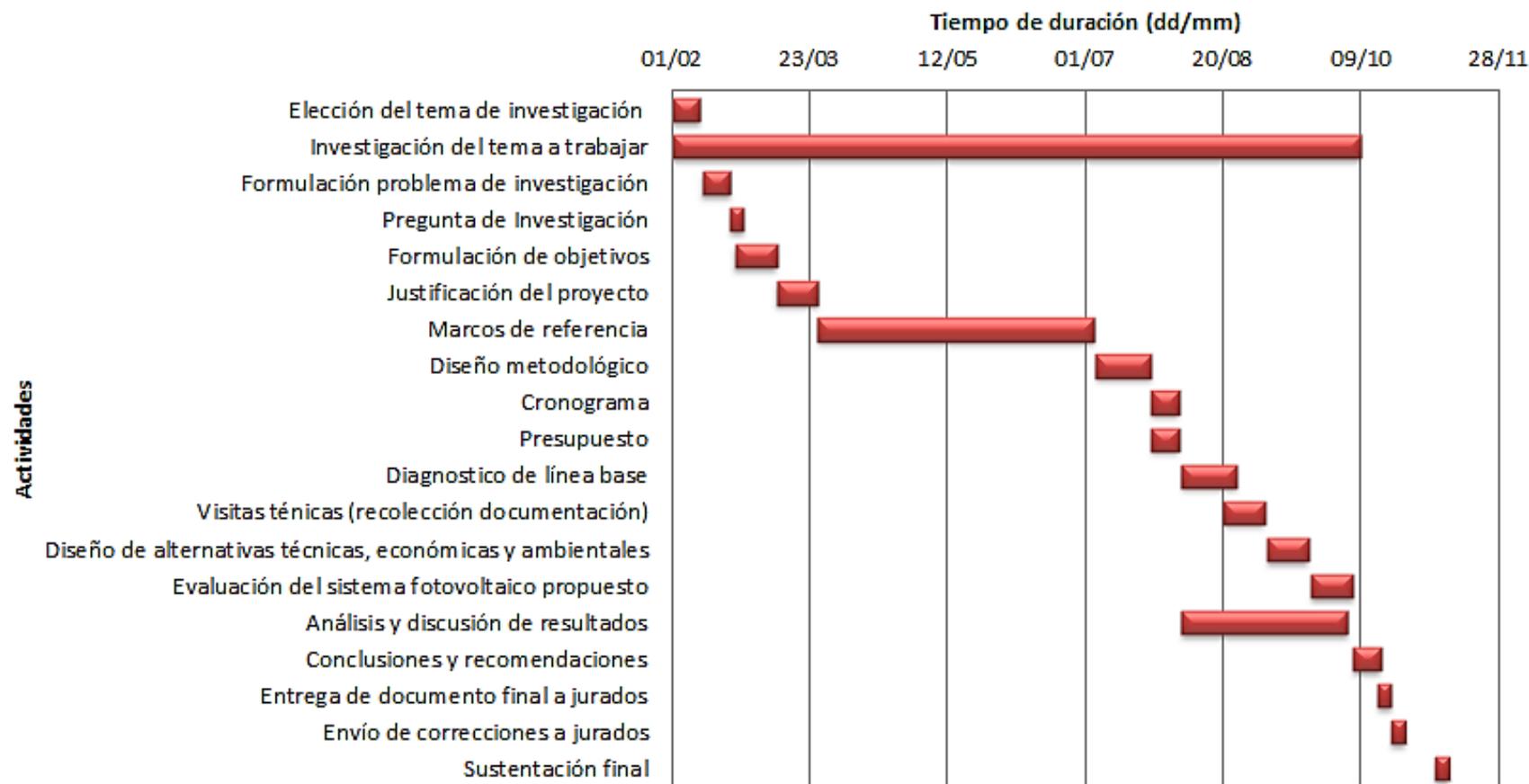
En el diagrama de Gantt elaborado para el presente estudio se plasman las actividades de manera que se cumplan los objetivos de investigación en un tiempo determinado. Se espera cumplir a cabalidad las actividades en el tiempo estipulado, sin embargo cada actividad fue planeada en tiempos mayores a los previstos de manera que si hay algún tipo de inconveniente pueda ser solucionado. Como se observa en la figura 11, el proyecto tiene una duración aproximada de un año, iniciando actividades en febrero de 2018 y terminando en noviembre del mismo año; cabe destacar que hay actividades que pueden llevarse a cabo simultáneamente como el desarrollo de los objetivos, análisis y discusión de los resultados.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
 María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 11 Cronograma estudio de investigación

Cronograma del proyecto- Diagrama de Gantt año 2018



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

7.2 Presupuesto

Para el desarrollo del estudio de investigación y alcanzar con éxito los objetivos propuestos, se contó con recursos institucionales, humanos y materiales que permitieron culminar cada una de las actividades propuestas. Cabe resaltar que los costos tomados para el estudio de investigación se realizaron en pesos colombianos los cuales tienen la siguiente relación

$$1 \text{ DOLAR} = 3078.25 \text{ COP}$$

De acuerdo a lo anterior, se contaron con los siguientes recursos:

- ✓ Recursos institucionales: Universidad El Bosque, Empresa de Servicios Públicos de Chiquinquirá (EMPOCHIQUINQUIRA E.S.P.).
- ✓ Recursos Humanos: Asesoría profesional Docente Edgar Felipe Cortes León, Asesoría Ingeniera encargada de la PTAR Lina Fernanda Matamoros Gil.
- ✓ Recursos Materiales: Medios bibliográficos, electrónicos como computadores, celulares, medio de transporte, papelería, escritorios.

Tabla 18. Presupuesto proyecto de investigación

PRESUPUESTO PROYECTO				
CONCEPTO	CANTIDAD	HORA	VALOR HORA	VALOR TOTAL
PERSONAL				
Investigador	2		\$ 15.000,00	\$ 3.000.000,00
Director	1			\$ 8.000.000,00
TOTAL PERSONAL				\$ 11.000.000,00
MATERIALES Y SUMINISTROS				
	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Documentos y fotocopias	2	Unidad	\$ 150.000,00	\$ 300.000,00
Internet		Unidad	\$ 120.000,00	\$ 120.000,00
Impresiones	2	Unidad	\$ 100.000,00	\$ 200.000,00
Papelería	2	Unidad	\$ 40.000,00	\$ 80.000,00
TOTAL DE MATERIALES				\$ 420.000,00
TRANSPORTE				
	CANTIDAD		VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Terrestre	8	VIAJE	\$ 20.000,00	\$ 160.000,00
TOTAL DE TRANSPORTE				\$ 160.000,00
ALOJAMIENTO				
	CANTIDAD	DÍA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Hotel	2	2	\$ 100.000,00	\$ 200.000,00
TOTAL DE ALOJAMIENTO				\$ 200.000,00
VIATICOS				
	CANTIDAD	DÍA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Comida	8	DÍA	\$ 20.000,00	\$ 160.000,00
Bebidas	12	DÍA	\$ 3.000,00	\$ 36.000,00
Imprevistos				\$ 150.000,00
TOTAL VIATICOS				\$ 196.000,00
TOTAL				\$ 11.976.000,00

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Fuente: Autores, 2018

Como se puede evidenciar el costo total del estudio de investigación para determinar la factibilidad de la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá es de \$ 11.976.000. Cabe aclarar que los costos por recursos humanos se tomaron a partir de la guía salarial de Colombia pero de esto no se generó ninguna remuneración, sin embargo se mantuvieron estos costos debido a la valoración laboral que se tuvo en el desarrollo del estudio de investigación.

8. Resultados y análisis

El presente capítulo, tiene como objetivo principal presentar los resultados obtenidos de la metodología desarrollada para determinar la factibilidad de la implementación de energía fotovoltaica para el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá. Se optó por plasmar en un mismo capítulo los resultados, análisis y discusión de los mismos para tener mayor comprensión y orden en el desarrollo de estos. Los resultados son mostrados según cada objetivo específico como se evidencia a continuación.

8.1 Diagnosticar una línea base de la situación actual de la Planta de Tratamiento de aguas residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, Boyacá

Para conocer el estado actual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Chiquinquirá, se realizó un diagnóstico sobre las referencias documentales y municipales que se tienen sobre la PTAR.

8.1.1 Referencia documental y municipal sobre la PTAR

En primer lugar para contar con datos actualizados se realizó la proyección de la población del municipio de Chiquinquirá, tomando como referencia el censo realizado por el DANE en el año 2005. Dicha proyección de la población para el año 2018 se calculó con la población correspondiente al último año censado con información (Puc=63.381 habitantes)⁵, la población correspondiente al censo inicial con información (Pci=55.786 habitantes)⁶, el año correspondiente al último censo con información (Tuc=2013), el año correspondiente al censo

⁵ Proyección de población de Colombia hasta 2020 (DANE)

⁶ Censo año 2005 realizado por el DANE

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

inicial con información ($T_{ci}= 2005$), el año al cual se quiere proyectar la información ($T_f=2018$) y la tasa de crecimiento. El resultado de la proyección fue el siguiente:

$$r = \left(\frac{63.381 \text{ habitantes}}{55.786 \text{ habitantes}} \right)^{\frac{1}{2013-2005}} - 1$$

$$r = 0.016$$

$$pf = 63.381 (1 + 0.016)^{2018-2013}$$

$$pf = 68.616 \text{ habitantes}$$

El municipio de Chiquinquirá para el año 2005 por medio del censo realizado por el DANE, contaba con una población de 47.498 habitantes en la zona urbana, se realizó la proyección al año 2018, ya que EMPOCHIQUINQUIRA presta sus servicios a la jurisdicción urbana. El resultado fue el siguiente:

$$r = \left(\frac{54.358 \text{ habitantes}}{47.498 \text{ habitantes}} \right)^{\frac{1}{2013-2005}} - 1$$

$$r = 0.016$$

$$pf = 54358 (1 + 0.016)^{2018-2013}$$

$$pf = 59.430 \text{ habitantes}$$

Este resultado se aproxima a las proyecciones realizadas por el DANE y puede decirse que la planta actualmente recibe el caudal de 59.430 habitantes, teniendo como fin recuperar el río Suarez, fuente principal del acueducto de Chiquinquirá. La PTAR, utiliza ingeniería de punta considerada una de las más modernas de Latinoamérica; en sus instalaciones, tiene una estación de bombeo, cuatro tanques de almacenamiento de 50 metros de largo, 25 de ancho y 5 de alto; lo que garantiza la recepción de un gran volumen de aguas residuales, sistema de desinfección por radiación ultravioleta y un mecanismo de deshidratación de lodos. Además, cuenta con una caseta de operaciones automatizado, que permite controlar aperturas, cierre de válvulas, duración de procesos, entre otras operaciones. De esa manera, las aguas residuales son entregadas a la naturaleza en el río Suarez en condiciones recuperadas de más del 90% (EMPOCHIQUINQUIRA, 2016).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 12. *PTAR Chiquinquirá*



Fuente: Autores, 2018.

La imagen tomada de Google Earth Pro (Figura 13) muestra la ubicación satelitalmente de la PTAR en el municipio de Chiquinquirá, con unas coordenadas de 5°37'52.87" N y 73°47'40.74"O. Esta planta tiene un área total de aproximadamente 41,250.15 m² (Anexo 4) de los cuales para la ubicación de los módulos fotovoltaicos, se cuenta con un área disponible de aproximadamente 8,016.55 m² (Anexo 5). Por otro lado durante la visita de campo realizada el día 13 de septiembre del presente año, se pudo evidenciar que en el área disponible para la implementación de módulos fotovoltaicos, no hay presencia de asentamientos humanos, construcciones, ni ecosistemas ambientales estratégicos que puedan verse afectados por la implementación del estudio de investigación (Anexo 6).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 13 Imagen satelital de zona de estudio



Fuente: Autores, 2018

Durante la visita técnica fue posible entrevistar a la ingeniera Lina Fernanda Matamoros Gil encargada del funcionamiento de la PTAR; en esta entrevista (Anexo 2) fue posible conocer detalladamente la situación actual de la planta, obteniendo así información sobre el funcionamiento de los equipos, consumo y gastos energéticos que tiene la planta (Anexo 7). Los datos proporcionados en la entrevista sirvieron de referencia durante el desarrollo del estudio de investigación.

8.1.2 Documentación técnica de la PTAR

8.1.2.1 Equipos con mayor consumo de energía en la PTAR

Teniendo en cuenta que la planta debido a las características y tiempo de funcionamiento de cada equipo para sus procesos utiliza tecnología de punta, demanda un alto consumo de energía. Según el consumo de energía utilizada en los procesos operativos de la PTAR (Anexo 7) los equipos que tienen mayor demanda son los 4 sopladores de desplazamiento de tecnología Alemana (Figura 14); una de las razones por la cual estos equipos consumen mayor energía es debido a la potencia requerida de 111,855 kW; consumiendo así 2684,54 kWh, implicando un costo mensual de aproximadamente \$1, 209,644.71 (Figura 15). La función de

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

estos sopladores es aplicar el aire a compresión para expandir el lecho de filtro y quebrar el material compactado; para ello se bombea agua limpia contra corriente hacia el interior, poniendo en suspensión el material suelto y posteriormente eliminándolo (Gardner Denver, 2018).

Otros equipos que presentan alta demanda de consumo energético son las bombas sumergibles que envían agua hasta la parte superior del tanque de aireación; presentando un consumo de 626.388 kWh a un costo mensual de aproximadamente \$ 282,250.43 (Figura 15). Por otro lado, los equipos que generan menor consumo energético son las válvulas de purga del sistema difusor ya que requieren una potencia de solamente 0,013 kWh (Anexo 7).

Figura 14. Sopladores de desplazamiento de la planta

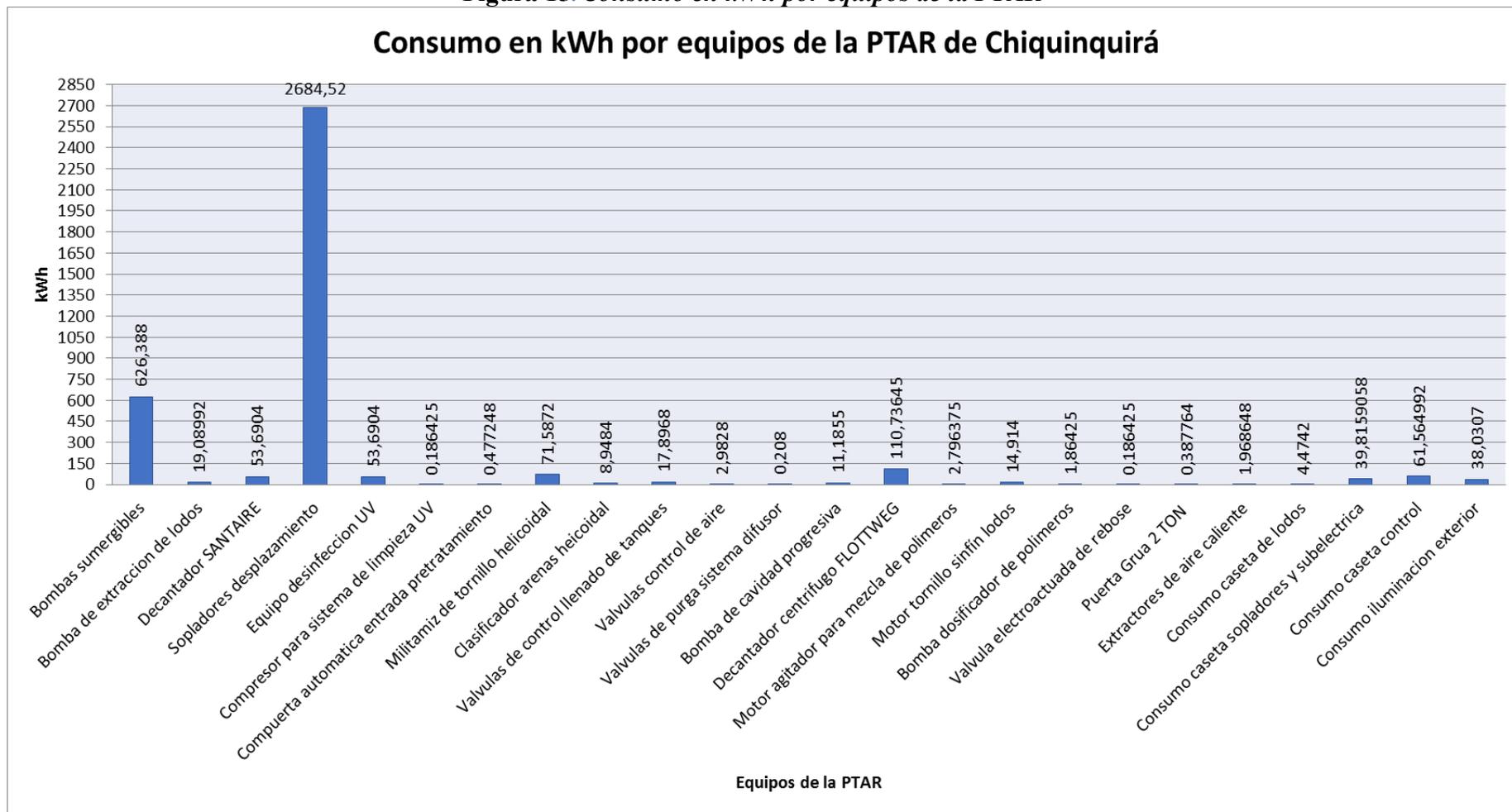


Fuente: Autores, 2018

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 15. Consumo en kWh por equipos de la PTAR



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Basados en la información obtenida sobre la potencia requerida por unidad de tratamiento en la PTAR de Chiquinquirá, lo que más consume energía son los sopladores y esto difiere con el estudio sobre el consumo energético del IDAE, en el que afirma que los equipos que generan mayor consumo son los de tratamiento biológico. Con relación a lo anteriormente dicho por IDAE, las plantas donde se tratan las aguas de 1.000 a 100.000 habitantes, la línea de lodos suele ser el mayor consumidor de energía principalmente por los equipos de deshidratación; sin embargo, teniendo en cuenta que en el municipio de Chiquinquirá la población es de 68.616 habitantes se hallaron diferencias con los expresado por IDAE ya que en esta PTAR como se muestra en la figura 16 los equipos que generan mayor consumo energético son los sopladores. En un esfuerzo por reducir el consumo energético de los sopladores, la administración de la planta decidió restringir el funcionamiento a solamente 2 de los 4 disponibles; a pesar de esto, el consumo sigue siendo alto lo cual hace inferir que se deben buscar diferentes alternativas para un mayor ahorro económico.

8.1.3 Documentación económica de la PTAR

Según la empresa de servicios públicos, el municipio de Chiquinquirá asume el compromiso de responsabilidad ambiental. Sin embargo, según la ingeniera encargada de la planta los costos de operación se aproximan a dos mil millones de pesos al año; de los cuales, por servicio de energía se gastan más de 450 millones que se pagan a la Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P (EBSA). Para el registro de energía promedio de la PTAR se realizó la siguiente consolidación de consumo y costo energético de la planta desde el año 2015 a la fecha (Tabla19) teniendo en cuenta las facturas de pago (Anexo 8). Actualmente EMPOCHIQUINQUIRA S.A.S asume una multa de \$7.123.366 mensuales por 36 meses, iniciando el pago de esta en noviembre de 2016; esta situación, se originó por el incumplimiento de pago oportuno de consumo energético por parte del contratista en el momento de la construcción de la PTAR (Anexo 9), el valor de esta multa no se tuvo en cuenta en el estudio de investigación ya que esta deuda es ajena al consumo energético actual de la planta.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 19. Consolidado información consumo y gasto energético

AÑO	MES	kWh	VALOR REAL (COP)	VALOR + MULTA⁷ (COP)
2015	Julio	116422.55	\$ 45,336,636.65	\$ 52,460,002.65
2016	Diciembre	75680	\$ 32,159,194.00	\$ 39,282,560.00
2017	Enero	73920	\$ 33,271,794.00	\$ 40,395,160.00
2017	Febrero	59840	\$ 25,436,464.00	\$ 32,559,830.00
2017	Marzo	48400	\$ 22,107,021.00	\$ 29,230,387.00
2017	Abril	57200	\$ 25,689,851.00	\$ 32,813,217.00
2017	Mayo	25520	\$ 12,437,304.00	\$ 19,560,670.00
2017	Junio	56760	\$ 25,304,164.00	\$ 32,427,530.00
2017	Julio	79200	\$ 44,781,211.00	\$ 51,904,577.00
2017	Agosto	73040	\$ 32,309,941.00	\$ 39,433,307.00
2017	Septiembre	66000	\$ 29,902,614.00	\$ 37,025,980.00
2017	Octubre	63653	\$ 28,390,541.00	\$ 35,513,907.00
2017	Noviembre	60427	\$ 26,636,421.00	\$ 33,759,787.00
2017	Diciembre	69520	\$ 30,498,111.00	\$ 37,621,477.00
2018	Enero	58960	\$ 26,332,574.00	\$ 33,455,940.00
2018	Febrero	57230	\$ 26,441,996.80	\$ 33,565,362.80

⁷ El valor de la multa es de \$ 7.123.366 (Anexo 8)

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

AÑO	MES	kWh	VALOR REAL (COP)	VALOR + MULTA⁷ (COP)
2018	Marzo	58960	\$ 27,209,009.60	\$ 34,332,375.60
2018	Abril	55440	\$ 25,648,382.40	\$ 32,771,748.40
2018	Mayo	52800	\$ 24,477,912.00	\$ 31,601,278.00
2018	Junio	61306	\$ 28,249,132.16	\$ 35,372,498.16
2018	Julio	59937	\$ 27,642,172.32	\$ 34,765,538.32
2018	Agosto	84677	\$ 38,610,898.72	\$ 45,734,264.72
2018	Septiembre	75680	\$ 34,622,201.00	\$ 41,745,567.00

Fuente: EBSA S.A. E.S.P, 2018.

A partir del consolidado presentado anteriormente se pudo realizar el cálculo del costo real de energía anual para el año 2017. Conforme a la entrevista llevada a cabo con la ingeniera encargada se conoció que en el mes de mayo de 2017 se encontraba fuera de operación la mitad de la planta debido a daños en los equipos, mostrando un consumo y costo energético bajo. A su vez en el mes de julio se presentó un incremento notable en el consumo y costo energético, causado por la reactivación de la totalidad de equipos y operaciones de la PTAR, como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 20. Consolidado 2017

AÑO	MES	kWh	VALOR REAL (COP)
2017	Enero	73920	\$ 33,271,794.00
2017	Febrero	59840	\$ 25,436,464.00

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

AÑO	MES	kWh	VALOR REAL (COP)
2017	Marzo	48400	\$ 22,107,021.00
2017	Abril	57200	\$ 25,689,851.00
2017	Mayo	25520	\$ 12,437,304.00
2017	Junio	56760	\$ 25,304,164.00
2017	Julio	79200	\$ 44,781,211.00
2017	Agosto	73040	\$ 32,309,941.00
2017	Septiembre	66000	\$ 29,902,614.00
2017	Octubre	63653	\$ 28,390,541.00
2017	Noviembre	60427	\$ 26,636,421.00
2017	Diciembre	69520	\$ 30,498,111.00
	TOTAL	733480	\$ 336,765,437.00

Fuente: EBSA S.A. E.S.P, 2018.

Mientras que para el año 2018 se tomaron valores de enero a septiembre, se evidencia una homogeneidad en el valor del consumo energético, ya que se repararon los daños en los equipos y se está haciendo un mantenimiento preventivo adecuado para la operación óptima de la planta, como se ve en la tabla 21.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 21. Consolidado 2018

AÑO	MES	kWh	VALOR REAL (COP)
2018	Enero	58960	\$ 26,332,574.00
2018	Febrero	57230	\$ 26,441,996.80
2018	Marzo	58960	\$ 27,209,009.60
2018	Abril	55440	\$ 25,648,382.40
2018	Mayo	52800	\$ 24,477,912.00
2018	Junio	61306	\$ 28,249,132.16
2018	Julio	59937	\$ 27,642,172.32
2018	Agosto	84677	\$ 38,610,898.72
2018	Septiembre	75680	\$ 34,622,201.00
	TOTAL	564990	\$ 259,234,279.00

Fuente: EBSA S.A. E.S.P, 2018.

Estos consolidados permitieron realizar el registro de consumo promedio de energía de la PTAR del municipio de Chiquinquirá, Boyacá para así lograr tener un mayor control sobre los niveles energéticos y los costos que estos representan, como se presenta a continuación:

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 22. Registro del consumo promedio de energía de la PTAR para el 2017.

Consumo energético (kWh/año)	Consumo promedio (kWh/mes)	Valor kWh (COP)	Costo de energía mensual promedio (COP)	Costo de energía anual⁸ (COP)
733480	61123.33333	\$ 391,05	\$ 28,063,786.42	\$ 336,765,437.00

Fuente: EBSA S.A. E.S.P, 2017.

Tabla 23. Registro del consumo promedio de energía de la PTAR para el 2018.

Consumo energético (kWh/año)	Consumo promedio (kWh/mes)	Valor kWh (COP)	Costo de energía mensual promedio (COP)	Costo de energía anual⁹ (COP)
564990	62776.66667	\$ 443,36	\$ 28,803,808.78	\$ 259,234,279.00

Fuente: EBSA S.A. E.S.P, 2018.

Desde el año 2015, el historial energético y económico del funcionamiento de la PTAR ha presentado cambios debido a los altos costos energéticos como se muestra en la tabla 19. En el mes de julio de 2015 la planta representó un consumo energético de 116422,55 kWh con un valor correspondiente a \$45.336.636,65 como se muestra en la figura 17, siendo el mes y el año donde se tuvo el pico más alto de consumo energético y económico, ocasionado por la operación de los 4 sopladores simultáneamente.

⁸ Se tuvo en cuenta el valor del consumo energético de Enero a Diciembre del 2017, sin multa.

⁹ Se tuvo en cuenta el valor del consumo energético de Enero a Septiembre del 2018, sin multa.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

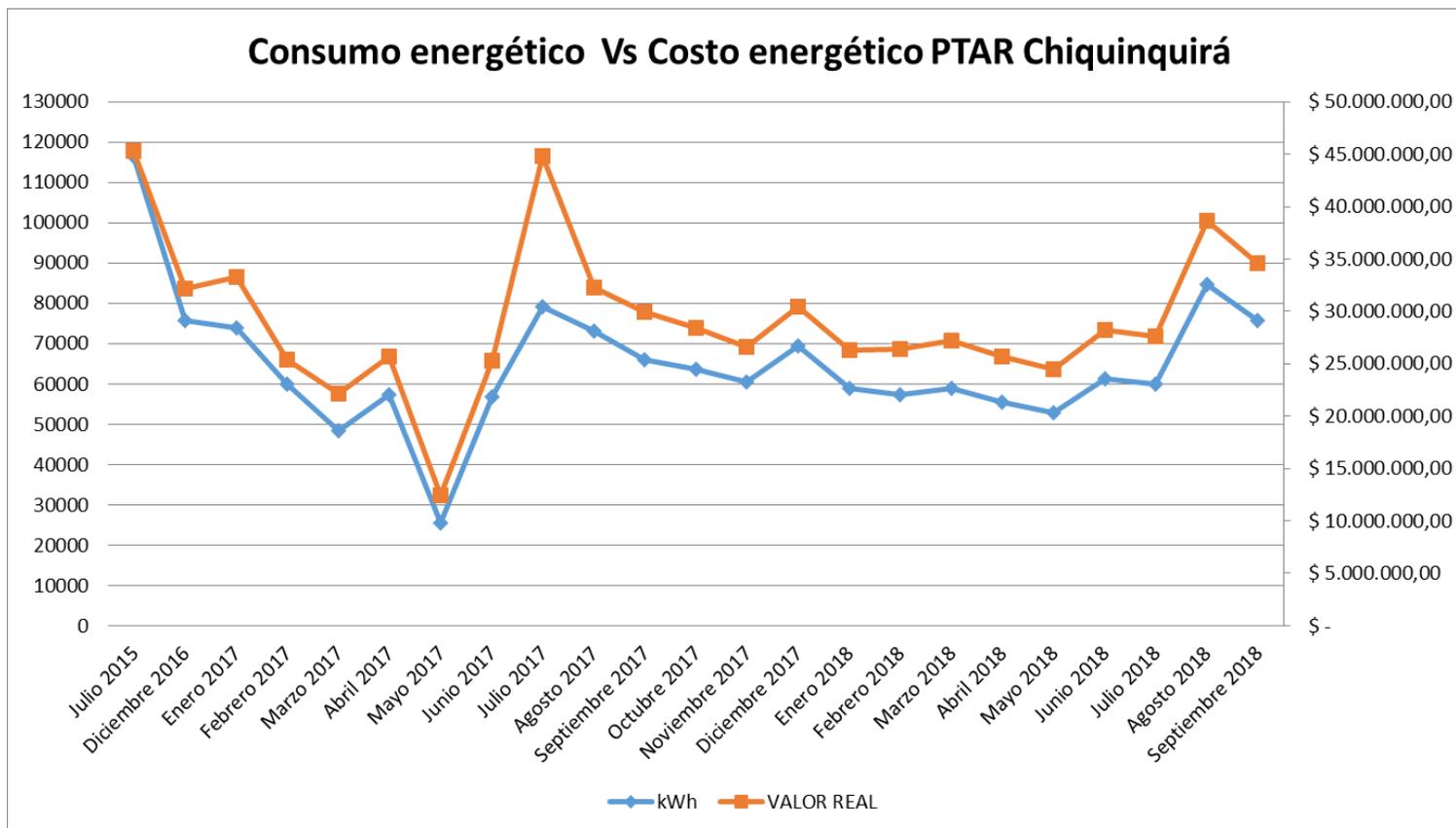
A causa del alto costo que se generó en 2015, como se mencionó anteriormente, se optó por utilizar 2 sopladores simultáneamente y alternarlos para el funcionamiento; la administración de EMPOCHIQUINQUIRÁ pudo determinar que la productividad de la planta no se veía afectada pero el consumo y gasto de energía seguían siendo altos. Como se muestra en las tablas 22 y 23, para el año 2017 el costo de energía anual fue de \$ 336, 765,437.00, mientras que para lo que lleva del año 2018 (9 meses) es de \$ 259, 234,279.00. Se podría inferir que el costo energético anual del 2018, posiblemente será mayor que el del año 2017, así se haya disminuido el número de sopladores en funcionamiento. Por lo tanto el alto costo energético para la operación de la planta no se le atribuye únicamente a los sopladores, sino también se debe considerar el decantador centrífugo FLOTTWEG y el consumo general de la caseta de control (Anexo 7).

En la figura 17 se muestra el consumo vs el costo energético de la PTAR, se puede observar que del año 2016 en adelante, no existe una representación significativa de ahorro con la toma de decisión de disminuir el número de sopladores en operación. Analizando este comportamiento del consumo y costo energético, se puede interpretar que podrían existir otras alternativas para generar un ahorro energético y económico; eficiente y significativo como es la implementación de módulos fotovoltaicos para el funcionamiento de la PTAR.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
 María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 17. Consumo y costo energético PTAR Chiquinquirá



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

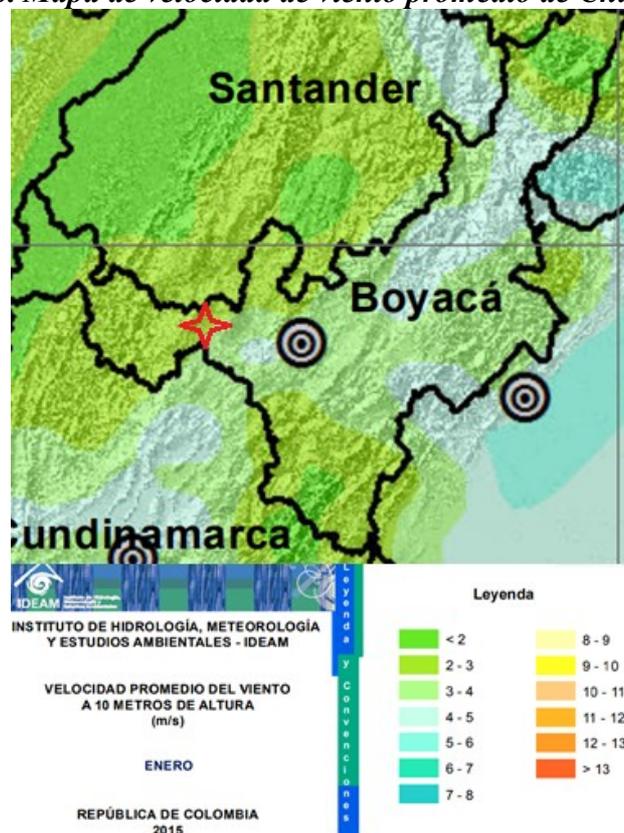
8.1.4 Documentación ecológica de la PTAR

Por medio de la documentación ecológica es posible analizar si los factores ambientales (radiación solar, frío, lluvia, polvo, humedad, nieve, viento y tormentas eléctricas, ente otras) presentes en la zona garantizan la integridad de las instalaciones fotovoltaicas, ya que estas se encuentran a la intemperie por su principio de funcionamiento, para así determinar la posible implementación de los sistemas fotovoltaicos en la PTAR (Reguera, 2015).

8.1.4.1 Velocidad del viento en el municipio de Chiquinquirá

Para el anclaje de los módulos fotovoltaicos es necesario contar con una estructura soporte y conocer el comportamiento del viento en el lugar de instalación del sistema. Según el Atlas de Viento de Colombia, en el municipio de Chiquinquirá la velocidad promedio sobre la superficie es de 3 m/s, es decir 10,8 km/h (Figura 18), donde la estrella hace referencia a la ubicación del municipio de Chiquinquirá.

Figura 18. Mapa de velocidad de viento promedio de Chiquinquirá.



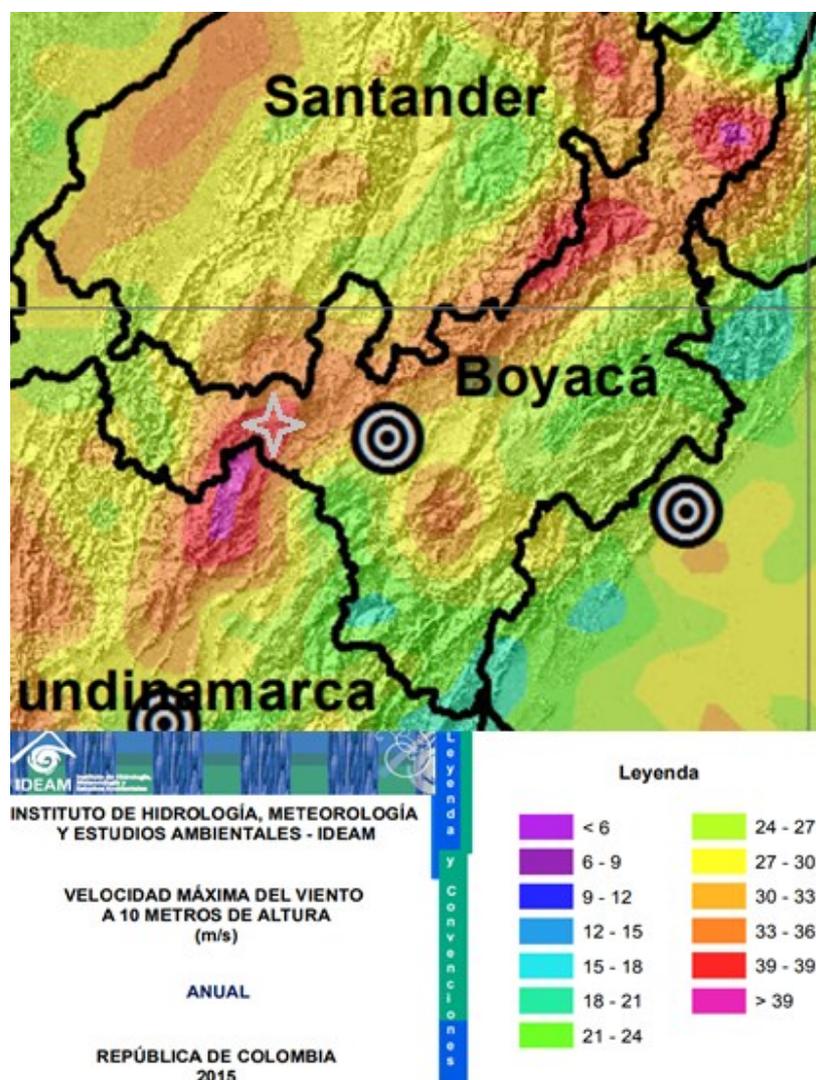
Fuente: Atlas de Viento de Colombia, 2015.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Por otro lado la velocidad máxima del viento en el municipio es de 39 m/s (Figura 19), es decir 140,4 km/h, clasificándose en la categoría de vientos mínimos de la escala de huracanes de Saffir-Simpson. Como plantea Stolik, la velocidad máxima que pueden soportar los módulos es de 227, 68 km/h, de acuerdo a los datos obtenidos anteriormente en la zona de estudio es factible la implementación y el anclaje correcto del sistema fotovoltaico por la condición favorable de viento, ya que no hay peligro de vientos superiores a los establecidos.

Figura 19. Mapa de velocidad máxima de vientos de Chiquinquirá.



Fuente: Atlas de Viento de Colombia, 2015.

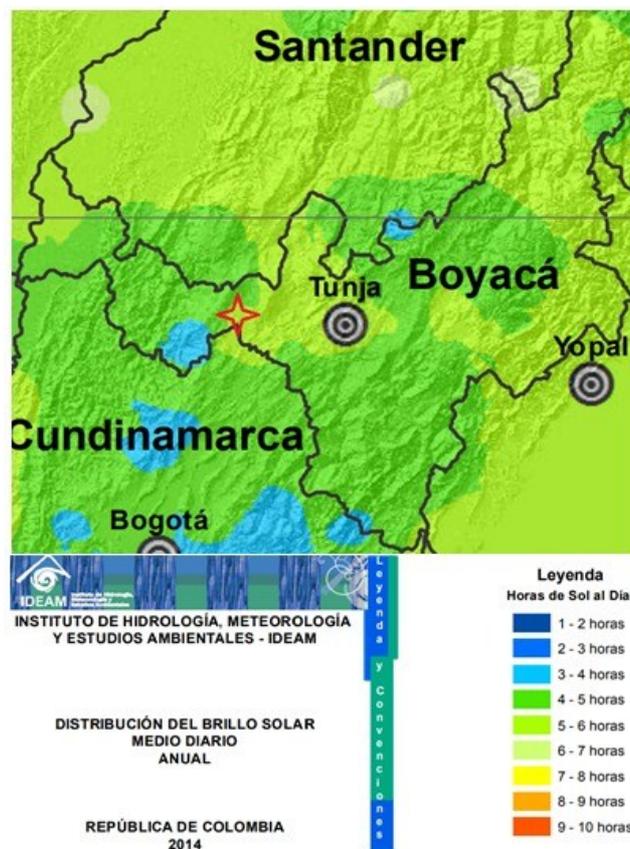
DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

8.1.4.2 Brillo Solar

Esta variable meteorológica es uno de los factores que permite determinar el clima y estimar cuantitativamente la nubosidad de una zona. Por medio del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (Figura 20) el promedio de distribución del brillo solar medio anual en el municipio de Chiquinquirá es de 5 – 6 horas, este valor de hora solar pico es favorable para el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos ya que por sí mismos estos dispositivos no son capaces de producir su potencia máxima en ausencia de brillo solar. Este dato es de suma importancia ya que es indispensable para calcular el número de módulos fotovoltaicos necesarios para el sistema.

Figura 20. Brillo solar de Chiquinquirá



Fuente: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, 2014.

Según el IDEAM, en el informe de promedios mensuales de brillo solar (horas de sol al día), en la estación meteorológica del municipio de Chiquinquirá ubicada en Esclusa Tobón, se registraron los datos obtenidos entre los años 1983-1990; el mes de enero es el que presenta

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

mayor registro a lo largo de la historia (6,6 horas brillo solar), mientras que junio y octubre presentan la menor cantidad de horas de brillo solar (4,6 para ambos casos horas de brillo solar); en este sentido el promedio anual de brillo solar en el municipio es de 5,3 horas de sol al día (Figura 21).

Figura 21. Valor promedio de horas de sol al día de Chiquinquirá



Fuente: Autores, 2018

Adicionalmente como se muestra en la figura 21, la duración del día en Chiquinquirá no varía considerablemente durante el año, solamente varía 26 minutos de las 12 horas en todo el año. En 2018, el día más corto es el 21 de diciembre, con 11 horas y 48 minutos de luz natural; mientras que el día más largo es el 21 de junio, con 12 horas y 27 minutos de luz natural.

Figura 22. Horas de luz del municipio de Chiquinquirá



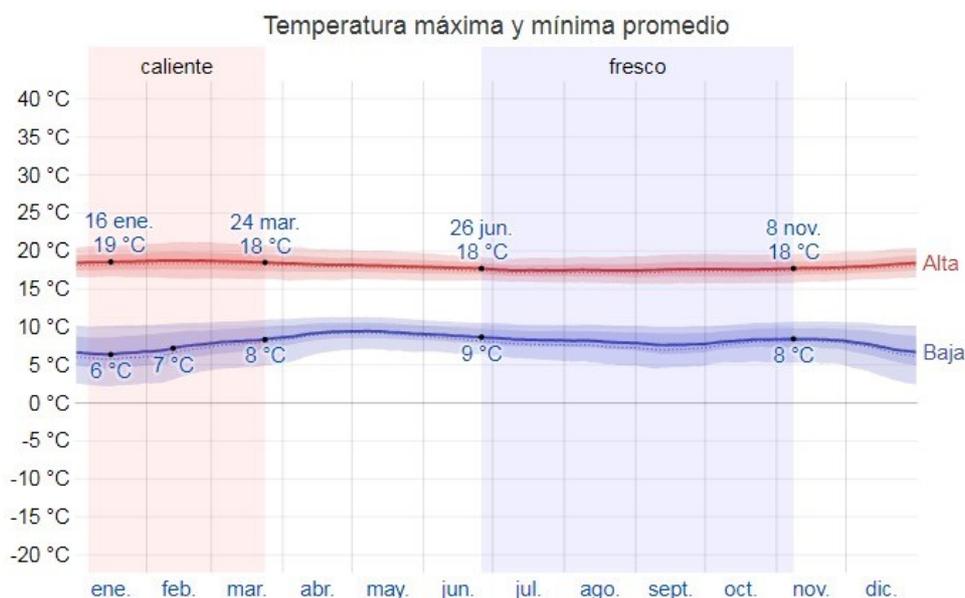
Fuente: Weather Spark.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

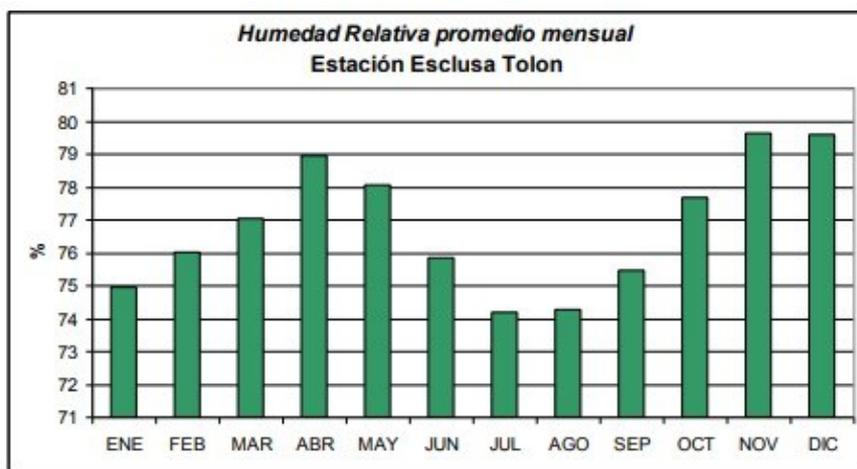
Teniendo en cuenta que el brillo solar está directamente relacionado con la temperatura y la humedad relativa, se observó que la temperatura promedio que presenta el municipio de Chiquinquirá, es de 6°C a 19°C (Figura 23) lo que favorece las condiciones nubladas, puesto que la humedad (Figura 24) es directamente proporcional a la nubosidad e indirectamente proporcional a la temperatura, afectando la disponibilidad de brillo solar (h/d) y el aprovechamiento efectivo de los sistemas fotovoltaicos.

Figura 23. Temperatura promedio de Chiquinquirá



Fuente: Edelose de Diagnostico, 2005

Figura 24. Humedad relativa promedio mensual de Chiquinquirá



Fuente: Edelose de Diagnostico, 2005.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

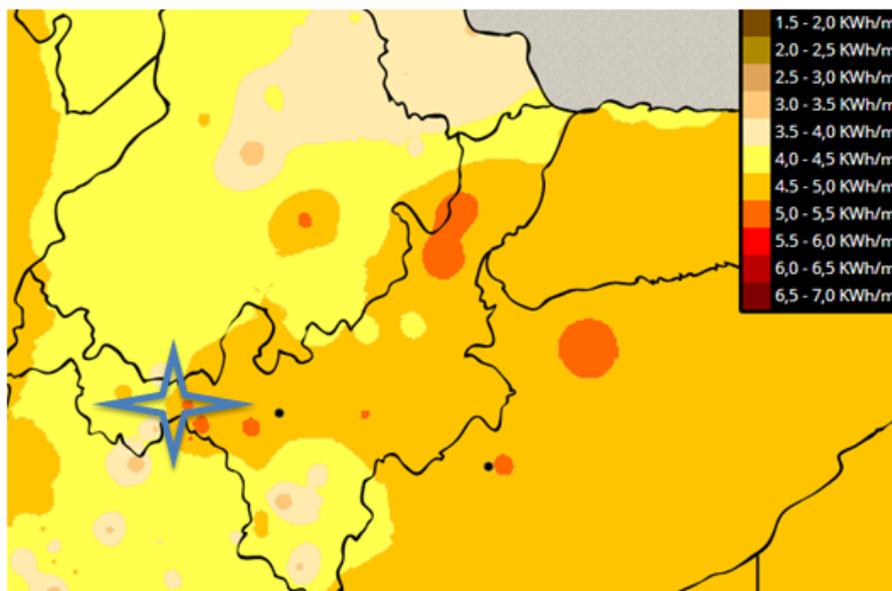
Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

De acuerdo con los datos obtenidos anteriormente, se infiere que los meses con mayor disponibilidad de brillo solar son enero, febrero y diciembre, por lo tanto el sistema puede llegar a ser más eficiente en el transcurso de estos meses. Para finalizar, se puede analizar que aunque los valores de brillo solar no son tan altos, las tecnologías implementadas en las células fotovoltaicas son capaces de producir energía bajo estas condiciones.

8.1.4.3 Radiación Solar

El principio elemental en el que se fundamenta cualquier sistema fotovoltaico es el aprovechamiento de energía del sol mediante un conjunto de captadores y su transferencia a un sistema de almacenamiento que abastece el consumo cuando sea necesario (IDAE, 2006).

Figura 25. Radiación solar global en el municipio de Chiquinquirá



Fuente: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, 2014.

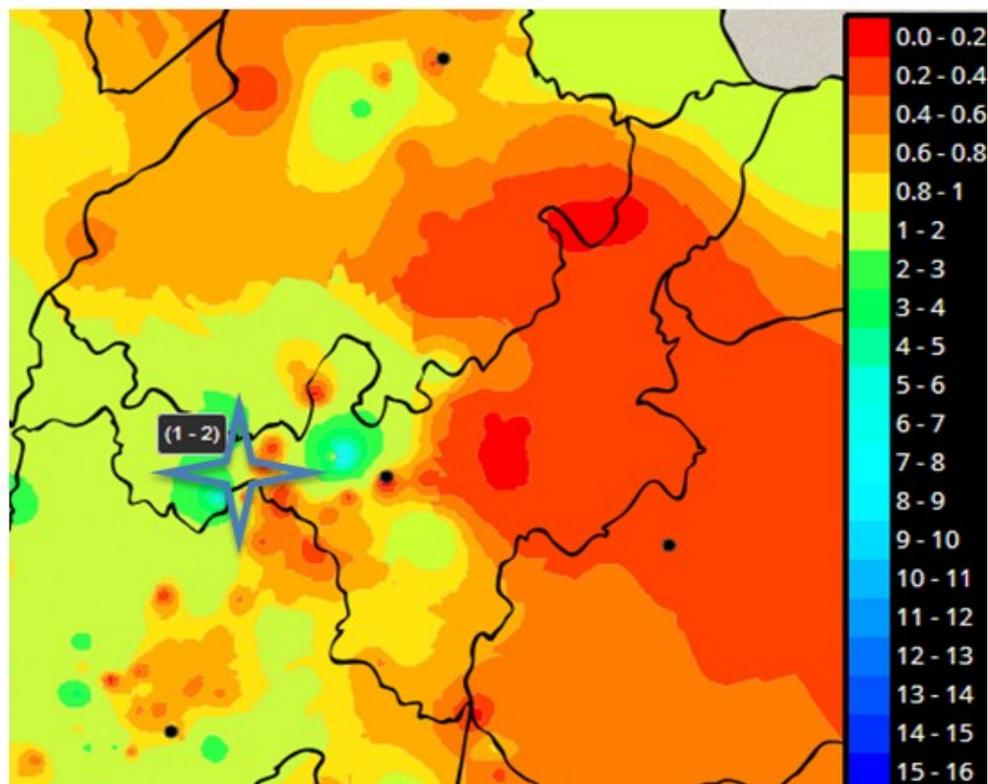
La radiación solar total promedio del municipio de Chiquinquirá según el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, es de 4,5-5,0 kWh/m² (Figura 25) y en días sin brillo solar es de 1-2 kWh/ m² (Figura 26). Estos valores de radiación y brillo solar son favorables para los sistemas fotovoltaicos ya que estos funcionan con poca radiación solar. Según Restrepo (2016), los módulos fotovoltaicos producen entre 10 y 25 % de su capacidad total en

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

días grises y nublados por medio del efecto de borde de la nube¹⁰. Teniendo en cuenta esta interpretación sobre la radiación solar es factible la implementación de módulos solares en la PTAR del municipio de Chiquinquirá.

Figura 26. Radiación solar en días sin brillo solar del municipio de Chiquinquirá.



Fuente: Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, 2014.

8.2 Diseñar alternativas técnicas, económicas y ambientales para el mejor rendimiento del sistema fotovoltaico.

8.2.1 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía a partir de radiación solar. El principal componente de este sistema es el módulo fotovoltaico, compuesto por células capaces de transformar la energía solar en energía

¹⁰ Este efecto se sucede cuando el sol ilumina el extremo del borde de las nubes, lo que funciona como un lente que magnifica la luz solar. Este fenómeno temporal aumenta la salida de energía y puede compensar las pérdidas por nubosidad. La nube actúa como un reflector y un concentrador de luz.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

eléctrica. El resto de equipos incluidos en un sistema fotovoltaico depende en gran medida de la aplicación a la que está destinado. A grandes rasgos los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en dos grandes grupos: conectados a red (grid connected) y autónomos (off-grid) (Lamigueiro, 2013).

Los sistemas conectados a red producen energía eléctrica para ser inyectada a la red convencional. Estos sistemas no deben satisfacer ninguna demanda de consumo de forma directa ni garantizar el mismo, no necesitan incorporar equipos de acumulación de energía para permitir el correcto acoplamiento con la red eléctrica; e incorporan un equipo inversor que adecúa la potencia producida por el generador fotovoltaico a las condiciones de la red convencional (Lamigueiro, 2013).

Estos sistemas conectados a red se dividen en sistemas instalados sobre suelo y sistemas en edificación. Los sistemas sobre suelo, se usan únicamente para producir energía y obtener el rendimiento económico asociado, suelen superar los 100 kW de potencia. Los sistemas en edificación se concentran en funciones adicionales a la producción de energía, tales como sustitución de componentes arquitectónicos, efecto estético, etc. Una gran diferencia entre estos sistemas es que los instalados en edificaciones, son más pequeños que los instalados sobre suelo, y normalmente son de potencias inferiores a los 100 kW (Lamigueiro, 2013). Los sistemas autónomos, se denominan de esta manera por la necesidad de satisfacer una demanda energética determinada con una variedad amplia de aplicaciones. Por esta razón, prácticamente todos los sistemas autónomos incorporan un equipo de acumulación de energía (Lamigueiro, 2013).

8.2.1.1 Comparación de sistemas fotovoltaicos

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos, se realiza la descripción de cada uno de estos, para ser un punto de partida al momento de determinar la factibilidad (Tabla 24).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 24. Descripción de sistemas fotovoltaicos.

<p><i>Conectados a red (grid connected)</i></p> <p>Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red SFCR (Figura 27)</p>	<p><i>Autónomos (off-grid)</i></p> <p>Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) (Figura 28)</p>
<p>Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional.</p> <p>Un SFCR se compone del generador fotovoltaico, un inversor y un conjunto de protecciones eléctricas</p> <p>La energía producida por este sistema será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo.</p> <p>Tradicionalmente se distingue entre SFCRs instalados sobre suelo y en edificación.</p> <p>Dentro de los instalados sobre suelo existen los sistemas estáticos, con una inclinación y orientación fija, y los sistemas de seguimiento, que varían la posición del generador a lo largo del día y año para maximizar la radiación efectiva incidente.</p> <p>En los instalados sobre edificación es</p>	<p>Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA) produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los períodos cuando la generación es inferior al consumo.</p> <p>Los sistemas domésticos (SHS) suelen incorporar únicamente cargas en continúa. Por esta razón, no es necesario que el SFA incluya un inversor.</p> <p>Estos sistemas están compuestos por el generador, un acumulador electroquímico y un regulador de carga y descarga.</p> <p>Existe una probabilidad no nula de fallo de suministro. Así, durante un año típico, es previsible que un porcentaje de la energía demandada por la red de consumo no pueda ser correspondida por el SFA.</p> <p>El dimensionado de un SFA consiste en elegir los tamaños de generador y acumulador como una solución de compromiso entre mínima probabilidad de</p>

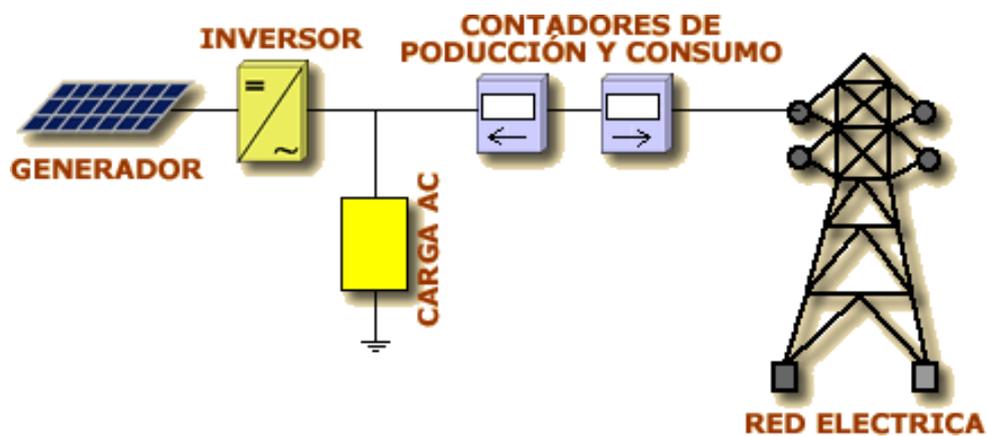
DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

<i>Conectados a red (grid connected)</i>	<i>Autónomos (off-grid)</i>
Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red SFCR (Figura 27)	Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) (Figura 28)
frecuente diferenciar los sistemas según el grado de integración del sistema con el edificio.	fallo y mínimo coste.

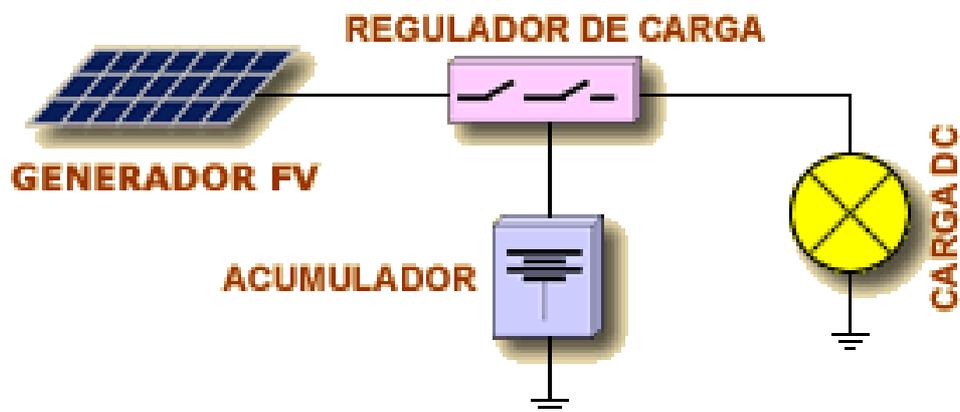
Fuente: (Lamigueiro, 2013).

Figura 27. Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red (SFCR)



Fuente: Universidad de Jaén, s.f.

Figura 28. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA)



Fuente: Universidad de Jaén, s.f.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Los sistemas fotovoltaicos, presentan diferentes aplicaciones teniendo en cuenta el sistema de red con el que cuenten, si son conectados o aislados a la red, depende la instalación que estos puedan tener (Figura 28). Por otro lado es importante resaltar que en el caso de las instalaciones fotovoltaicas, el periodo de vida es superior a los 30 años (Madrid Solar, 2006).

Figura 29. Aplicación de SFV



Fuente: (Montoya, 2011).

8.2.2 Diseño técnico del sistema fotovoltaico

El diseño técnico a desarrollar de los módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá – Boyacá, se basa en explicar los sistemas fotovoltaicos ya que estos se diferencian en cuanto a la cantidad de equipos que se utilizan en el funcionamiento de cada uno.

8.2.2.1 Generador fotovoltaico

Elemento encargado de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Esta electricidad se produce en corriente continua y sus características dependen de la intensidad energética de la radiación solar y de la temperatura ambiente (Hernández, 2012).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

8.2.2.2 Regulador de carga

Un regulador solar (o de carga) es un dispositivo encargado de controlar constantemente el estado de carga de las baterías así como de regular la intensidad de carga con el fin de alargar la vida útil de las baterías. De igual manera, controla la entrada de corriente proveniente de los módulos fotovoltaicos y evita que se produzcan sobrecargas y sobre-descargas en la batería.

En cuanto a la carga, su objetivo, es garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecargar, asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería (Suarez & Martínez).

8.2.2.3 Acumulador eléctrico o batería

Las baterías son dispositivos capaces de transformar la energía química en eléctrica independiente, en mayor o menor medida según las condiciones de radiación solar existente; dado que las baterías almacenan energía eléctrica, dan al sistema autonomía para los momentos de inactividad solar. El objetivo de los acumuladores es suministrar energía a la carga independientemente de la producción eléctrica del generador fotovoltaico (FV).

Las funciones principales que desempeñan los acumuladores en un sistema fotovoltaico autónomo son:

- Autonomía: Satisfacen los requerimientos de consumo para cualquier momento.
- Suministro de picos de intensidad: Arranque de motores.
- Estabilización del voltaje: Actúan como reguladores evitando fluctuaciones dañinas para los consumos (Componentes de un sistema fotovoltaico, n.d.).

8.2.2.4 Inversor

Este componente convierte la corriente continua y de bajo voltaje proveniente de las baterías o controlador en corriente alterna o convencional. Corresponde a la demanda máxima de los equipos que se van a conectar. Se puede prescindir de este componente cuando los equipos a conectar puedan ser alimentados por corriente directa. Como es el caso de algunos tipos de iluminación, motores y equipos diseñados para trabajar con energía solar (Suarez & Martínez).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

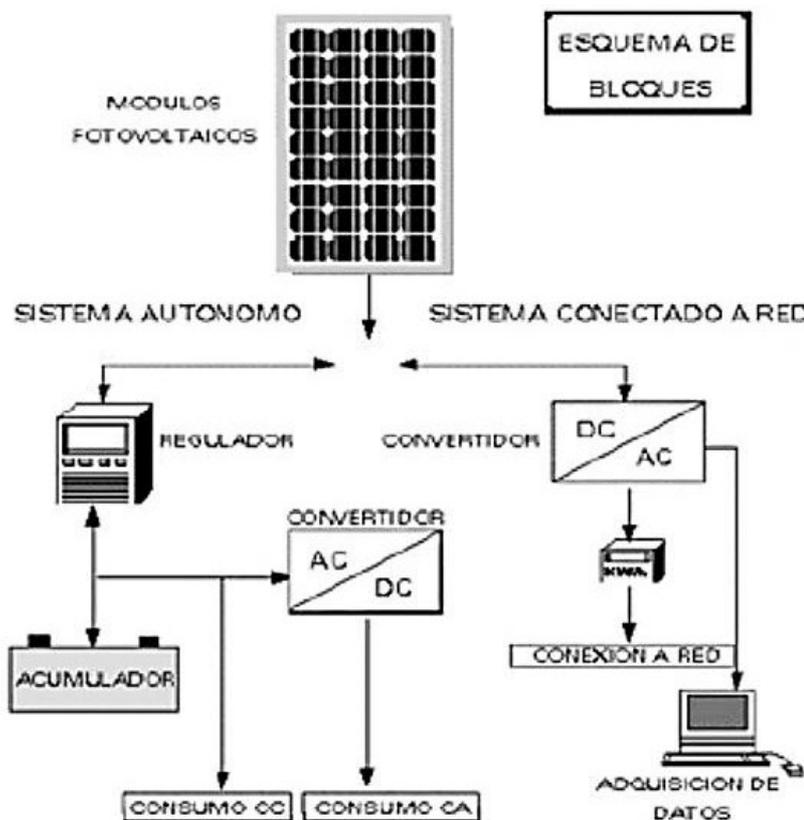
8.2.2.5 Contadores

Los módulos fotovoltaicos necesitan dos contadores ubicados entre el inversor y la red, uno para cuantificar la energía que se genera e inyecta a la red para su facturación y otro para cuantificar el pequeño consumo (< 2 kWh/año) del inversor fotovoltaico en ausencia de radiación solar (Hernández, 2012).

8.2.2.6 Soporte

Encargado de mantener en su lugar los módulos fotovoltaicos, debe tener una vida útil de como mínimo 25 años para soportar la intemperie de forma constante, expansiones térmicas, entre otros. También se encarga de dotar a los módulos la orientación e inclinación adecuadas. El soporte debe estar anclado correctamente para resistir la fuerza del viento, y tener capacidad de soportar vientos de mínimo 150 km/h (Componentes de un sistema fotovoltaico, n.d.)

Figura 30. Componentes de un sistema fotovoltaico



Fuente: Blanco, s.f

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Cada uno de los anteriores componentes de un sistema de energía fotovoltaica hace a los sistemas más o menos robustos y brindan otro tipo de propiedades de acuerdo a su implementación; además cada uno de ellos usa diferentes tecnologías dependiendo de la necesidad que se presente en cada proyecto (Figura 30).

8.2.2.7 Cálculo de número de módulos fotovoltaicos

Las variables consideradas para el cálculo de número de módulos fotovoltaicos para satisfacer el 100% de la energía en la planta fueron tres; la primera fue el consumo promedio donde se tuvo en cuenta el pico más alto de consumo energético de los años 2017 y 2018 (28222,56 W¹¹), la segunda la hora solar pico (5,3 horas) y la tercera la potencia del panel según la cotización recibida por la empresa Erco Energía S.A.S (270 W). A continuación, se realiza el cálculo correspondiente para el total del consumo energético:

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = \frac{2822566,66 \text{ W} * 1,5^{12}}{5,3 \text{ horas} * 270 \text{ W}}$$

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = \frac{4233849,99 \text{ W}}{1431 \text{ W}}$$

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = 2959$$

Para satisfacer el 100% de energía de la planta se requirieron 2959 módulos fotovoltaicos. Con base a la cotización recibida por parte de Erco Energía S.A.S se pudo establecer que se necesitan alrededor de 562 módulos para satisfacer el 19% (536287,66 W) del consumo energético de la PTAR.

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = \frac{536287,66 \text{ W} * 1,5}{270 \text{ W} * 5,3 \text{ horas}}$$

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = \frac{804431,49 \text{ W}}{1431 \text{ W}}$$

$$\text{No de módulos fotovoltaicos} = 562$$

¹¹ Conversión 84677 kWh a W/día

¹² Factor de seguridad por posibles pérdidas de energía

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

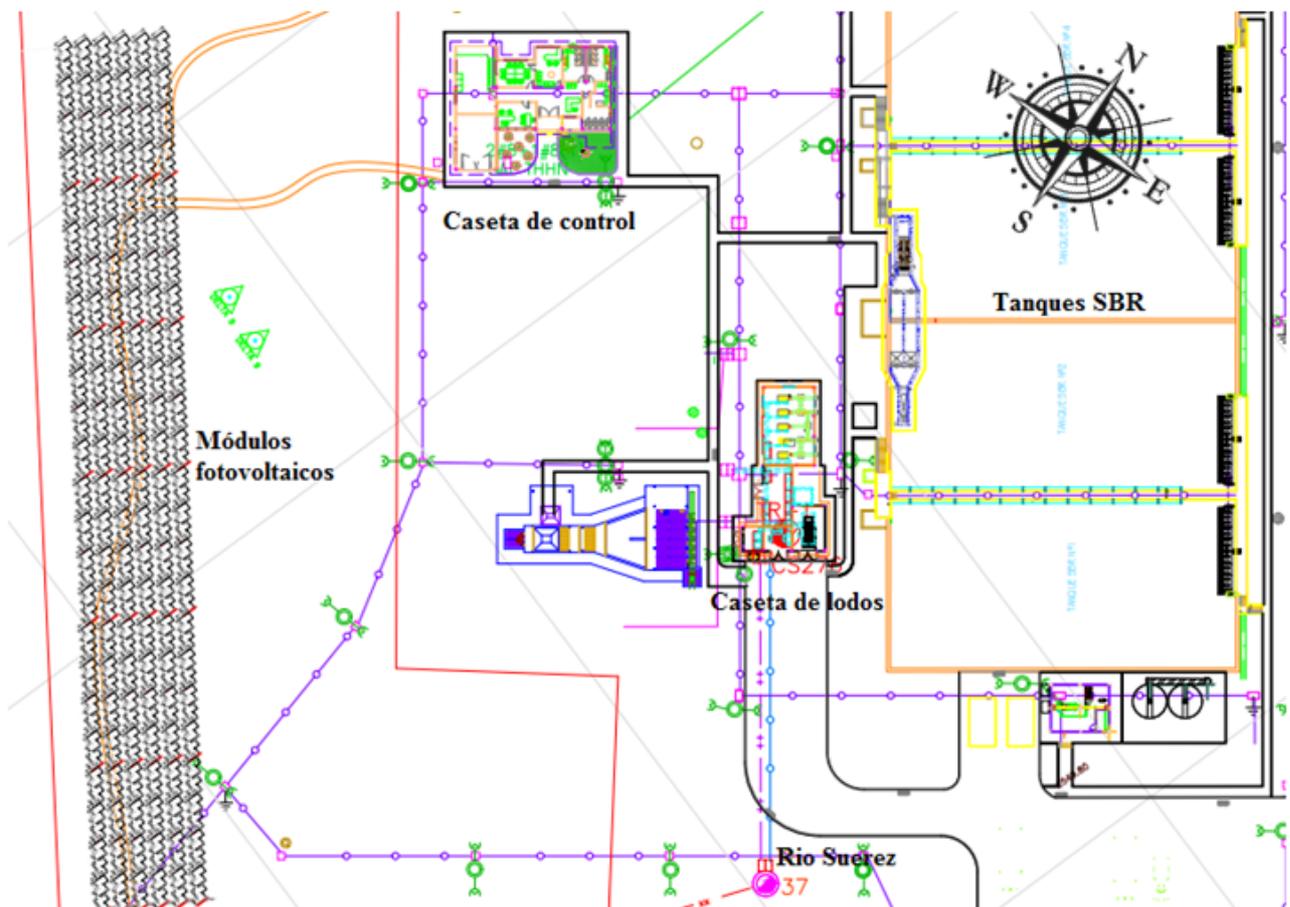
Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Se puede inferir que posiblemente la empresa cuenta con un factor de seguridad similar al utilizado en el estudio de investigación, dado que el número de módulos fotovoltaicos se aproximan entre sí, ya que en la cotización para satisfacer el 19% de energía se necesitan 576 módulos. Mostrando que en alguno de los dos cálculos en el factor de seguridad se priorizan ciertos parámetros determinantes en la cantidad optima de módulos fotovoltaicos.

8.2.2.8 Diagrama del sistema fotovoltaico aplicado en el área de estudio

Teniendo en cuenta el área disponible en la PTAR para la implementación de módulos fotovoltaicos (Anexo 5), se desarrollaron los diseños del sistema fotovoltaico para la planta mediante el programa AutoCAD.

Figura 31. Planos en AutoCAD para la instalación de 576 módulos fotovoltaicos en la PTAR



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Estos diseños se realizaron con base a la cotización suministrada por la empresa de Energía Renovable de Colombia ERCO (Anexo 11) quienes implementaron módulos fotovoltaicos con dimensiones de 0,99m X 1,65m y el espacio entre ellos debe ser de 2cm, además el espacio entre filas debe ser entre 70cm a 90cm (Anexo 12). La empresa postula 2 tipos de implementación; la primera, involucra la instalación de 576 módulos fotovoltaicos para la reducción del 19 % de consumo energético convencional en la planta (Figura 31) y la segunda propone la implementación de 184 módulos para la reducción del 6 % de consumo energético convencional (Anexo 13). Independientemente la propuesta seleccionada y considerando las dimensiones de los módulos, se puede apreciar que el área máxima utilizada es del 14% sobre la total disponible, lo cual resulta factible pues el impacto ecológico será mínimo ya que no se requiere remover tanta cobertura vegetal como la considerada inicialmente; además, permite la posibilidad de generar una ampliación del sistema fotovoltaico en un futuro.

Cabe resaltar que debido a la posición geográfica de Colombia en el hemisferio norte, los módulos deben ir orientados hacia el sur geográfico, esto con el fin de aprovechar al máximo la radiación solar. Además, la inclinación del módulo fotovoltaico será, respecto al horizontal 10° superior a la latitud ($5^\circ 37' 52.87''$ N) de la zona de implementación de los módulos, es decir $15^\circ 37' 52.87''$. En cuanto a las sombras, el lugar de la implementación no presenta en sus alrededores edificios, vegetación o terreno que la generen o impidan el paso de la radiación solar. Finalmente se realizó el diseño teniendo en cuenta las especificaciones anteriores obteniendo como resultado los planos adjunto en el anexo 13.

8.2.3 Diseño económico del sistema fotovoltaico

Para este diseño, se realiza la comparación económica de los dos sistemas de energía fotovoltaica, con el fin de analizar cuál de los dos sistemas es factible para la PTAR. Para ello se procedió a realizar cotizaciones en diferentes empresas de energía fotovoltaica, al igual que referentes teóricos y se escogió la mejor opción para cada sistema.

Según Greencol Energy SAS, el sistema fotovoltaico aislado económicamente presenta mayores costos ya que como lo dice Lamigueiro (2013), el sistema aislado necesita la implementación de baterías, las cuales hacen que el funcionamiento de este sistema

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

económicamente sea mayor que un sistema conectado a red. Esto se debe a que estas baterías tienen un alto valor económico y su vida útil es de apenas 4 a 5 años; mientras que, el valor del sistema fotovoltaico conectado a la red según la empresa de Energía Renovable de Colombia ERCO tiene un valor de \$ 582.196.794 para que el sistema reduzca en un 19% el consumo de energía convencional (Anexo 11).

La razón por la cual el Sistema Conectado a Red es más económico es porque el generador fotovoltaico al no requerir baterías para su funcionamiento, se ahorra el costo de la construcción del cuarto de almacenamiento y el costo de cambio para baterías cada periodo que dejen de funcionar. Adicionalmente, el on-grid se interconecta a la red eléctrica a través de un inversor, que es un equipo que convierte la corriente directa generada por el arreglo de módulos a corriente alterna. En estos sistemas interconectados, la energía es inyectada a la red cuando la generación supera al consumo en un determinado instante y extrae energía de ella en caso contrario. Los SFVCR¹³ representan la aplicación de la energía solar fotovoltaica de mayor eficiencia, ya que la generación tiene lugar en el sitio de consumo (se evitan pérdidas de transporte y distribución) con pocas pérdidas de transformación (los inversores operan típicamente a elevados niveles de eficiencia y en baja tensión) y pueden aprovecharse en su totalidad, debido a la elevada fiabilidad de la red (Hernández, 2012).

Por otro lado, como lo dice en la Guía de la Energía Solar en Madrid, las instalaciones aisladas se emplean sobre todo en aquellas zonas en las que no se tiene acceso a la red eléctrica y resulta más económico instalar un sistema fotovoltaico que tender una línea entre la red y el punto de consumo; dado que, éste no es el caso de la PTAR ya que su ubicación permite el uso de conexión a red para la generación de energía no se implementara este sistema.

Así mismo para el diseño económico del sistema fotovoltaico es fundamental tener en cuenta el costo de mantenimiento del sistema ya que este puede repercutir en su instalación, por ejemplo en los sistemas aislados a la red se requiere de un mantenimiento mayor debido a las baterías que deben ser cambiadas aproximadamente cada 5 años, en cambio según la empresa de Energía Renovable de Colombia ERCO el servicio de mantenimiento integral preventivo de un sistema on-grid tiene un valor aproximado de \$ 8.547.289 y el proceso perdura por 5 años ;

¹³ Sistemas fotovoltaicos conectado a red

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

además, este valor incluye la inspección de módulos, estructura, acometidas e inversores, limpieza de módulos fotovoltaicos; revisión de conexiones eléctricas; revisión del funcionamiento del inversor; correcciones menores para mejorar el desempeño del sistema e informes del antes y después del mantenimiento. Considerando dichas actividades preventivas es posible afirmar que el costo de mantenimiento es bajo para el sistema conectado a la red, siendo la alternativa más factible para la planta.

A continuación se evidencian las ventajas y desventajas de los sistemas interconectados a la red y de los sistemas aislados.

Tabla 25. Comparación Sistemas Fotovoltaicos

Sistema Fotovoltaico conectado a red		Sistema Fotovoltaico Aislado	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<p>-El costo del sistema y su instalación es mucho más económico.</p> <p>-Permiten que el sistema se haga en etapas, al tener la red como proveedor adicional.</p> <p>-Requiere de un área menor</p> <p>-En horas o épocas de no regadío, la energía que se genera se le vende a la compañía de</p>	<p>-Estos sistemas no funcionan ante un corte de energía, ya que por su naturaleza aportan electricidad en sincronía con la red eléctrica existente.</p> <p>Económicamente no es factible instalar este sistema en zonas aisladas y sin red eléctrica.</p>	<p>-Es un sistema independiente de la compañía eléctrica</p> <p>-Es más económico donde la red eléctrica no llega.</p>	<p>-El costo es más alto por la integración de baterías. Tienen un dimensionamiento más grande para cubrir varios días sin generación.</p> <p>-Requiere de un área mayor para su funcionamiento</p> <p>-Necesita mayor número de módulos fotovoltaicos</p> <p>-Puede haber pérdidas de</p>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Sistema Fotovoltaico conectado a red		Sistema Fotovoltaico Aislado	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
electricidad -Necesita menor número de módulos.			energía cuando los acumuladores se encuentren llenos. -Contiene elementos tóxicos. (Baterías).

Fuente: Autores, 2018.

Teniendo en cuenta la información desarrollada a lo largo del estudio de investigación acerca de los sistemas fotovoltaicos óptimos para Colombia, es posible inferir que la opción más factible económicamente para la PTAR del municipio de Chiquinquirá, es el sistema fotovoltaico conectado a la red, ya que como se mencionó anteriormente la ubicación geográfica de la planta permite acceder a la conexión eléctrica actual, lo que facilita su conexión a la misma. Adicionalmente, se da un aprovechamiento total de la energía fotovoltaica producida.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Por otro lado, al no contar con baterías las frecuencias y complejidad del mantenimiento son menores lo que hace aún más factible el funcionamiento del sistema en la PTAR pues son costos que se ahorra la administración comparándolo con el sistema aislado. Es importante resaltar que el costo de los módulos solares a base de silicio a lo largo de la historia ha disminuido (Figura 32) lo que hace más factible la implementación de sistemas fotovoltaicos. Otra de las razones para escoger el sistema fotovoltaico conectado a red se debe a que el sistema aislado necesita mayor área para poder instalar los módulos fotovoltaicos y su área de almacenamiento para las baterías.

Figura 32. Historial de precios de módulos fotovoltaicos a base de silicio



Fuente: Beltrán, 2017.

8.2.4 Diseño ecológico del sistema fotovoltaico

8.2.4.1 Huella de carbono

Como se menciona en el Plan Institucional de Gestión Ambiental en la Guía para la elaboración del Informe de Huella de Carbono Corporativa y el alcance de la investigación. Se realizara la huella de carbono en el alcance dos, el cual cuantifica las emisiones indirectas ligadas al consumo de energía eléctrica para la PTAR del municipio de Chiquinquirá.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Por medio de la Calculadora Fecoc 2016¹⁴ se pudo determinar que un kW produce aproximadamente 0,1990 kg CO₂

$$1 kWh = 0,1990 kg CO_2$$

Teniendo en cuenta el consumo que ha tenido la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Chiquinquirá, se calculó la huella de carbono para los periodos 2017 y 2018 y de esta manera realizar una comparación de la huella de carbón que se reduce por medio de la implementación de módulos fotovoltaicos. A continuación, se presenta el cálculo que se desarrolló para obtener la huella de carbonó producida por mes y la sumatoria de estas por el año respectivo.

La huella de carbono para el mes de enero de 2017 es:

$$73920 kWh \times \frac{0,1990 kg CO_2}{1 kWh} = 14710,080 kg CO_2$$

Se realizó el mismo cálculo para los siguientes meses de 2017 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 26. Huella de carbono 2017

HUELLA DE CARBONO 2017			
AÑO	MES	kWh	Huella de Carbono (kg CO ₂)
2017	Enero	73920	14710.080
2017	Febrero	59840	11908.160
2017	Marzo	48400	9631.600
2017	Abril	57200	11382.800
2017	Mayo	25520	5078.480
2017	Junio	56760	11295.240

¹⁴ http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

HUELLA DE CARBONO 2017			
AÑO	MES	kWh	Huella de Carbono (kg CO₂)
2017	Julio	79200	15760.800
2017	Agosto	73040	14534.960
2017	Septiembre	66000	13134.000
2017	Octubre	63653	12666.947
2017	Noviembre	60427	12024.973
2017	Diciembre	69520	13834.480
TOTAL			145962.520 kg CO₂
			145.963 ton CO₂¹⁵

Fuente: Autores, 2018

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el año 2017 tuvo una huella de carbono de **145,963 ton CO₂**. Mientras para el año 2018 se ha generado una huella de carbono de **112,433 ton CO₂**.

Huella de carbono de carbono para el mes de enero 2018:

$$58960 \text{ kWh} \times \frac{0,1990 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh}} = 11733,0140 \text{ kg CO}_2$$

Tabla 27. Huella de carbono 2018

HUELLA DE CARBONO 2018			
AÑO	MES	kWh	Huella de Carbono (kg CO₂)
2018	Enero	58960	11733.040

¹⁵ 1 Tonelada equivalen a 1000 kg

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

HUELLA DE CARBONO 2018			
AÑO	MES	kWh	Huella de Carbono (kg CO₂)
2018	Febrero	57230	11388.770
2018	Marzo	58960	11733.040
2018	Abril	55440	11032.560
2018	Mayo	52800	10507.200
2018	Junio	61306	12199.894
2018	Julio	59937	11927.463
2018	Agosto	84677	16850.723
2018	Septiembre	75680	15060.320
TOTAL			112433.010 kg CO₂
			112.433 ton CO₂

Fuente: Autores, 2018

La energía que consume la PTAR del municipio de Chiquinquirá, es generada por hidroeléctricas produciendo una huella de carbono (2017-2018) de 258,396 ton CO_2 . Ésta impacta al medio ambiente contribuyendo al cambio climático que se está viviendo en la actualidad. Una de las problemáticas asociadas con el cambio climático por aumentos de los GEI en el país es el aumento en la deforestación con una cifra alarmante de 219.973 hectáreas¹⁶ deforestadas; pues son justamente los bosques, quienes permiten abordar y contrarrestar el cambio climático, ya que estos absorben gases de efecto invernadero (GEI). Al implementar un sistema fotovoltaico se desarrollan prácticas responsables y se reduce el impacto generado por el excesivo uso de energías convencionales y se aporta a la cultura del cambio climático desarrollada por el municipio.

¹⁶ Panorama actual, respecto a la meta de deforestación de pasar de las casi **219.000** ha actuales de deforestación a 0 ha en el 2030 en el cumplimiento del objetivo 15 de los ODS

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

De acuerdo a la cotización solicitada a la empresa Erco Energía S.A.S (Anexo 11) mediante la implementación de módulos fotovoltaicos se reduce un 19% el consumo mensual de energía convencional. También se realizó el cálculo de la huella de carbono que se hubiese obtenido si en los años 2017 y 2018 se contara con módulos fotovoltaicos; para de esta manera, realizar una comparación en cuanto a la reducción de emisiones que se generan a la atmosfera por parte de la PTAR del municipio de Chiquinquirá. A continuación, se muestra el cálculo y datos obtenidos. Calculo de la huella de carbono para 2017 con sistema fotovoltaico, paso a paso para el mes de enero de 2017.

- a) Calculo del 19 % de reducción de consumo energético por la implementación de módulos fotovoltaicos.

$$73920 \text{ kWhmes} \times \frac{19\%}{100\%} = 14044,8 \text{ kWh}$$

Se obtiene el consumo energético de los paneles solares siendo de 14044,8 kWh

- b) Calculo del consumo energético por energía convencional con la implementación de módulos fotovoltaicos.

$$73920 \text{ kWh} - 14044,8 \text{ kWh} = 59875,2 \text{ kWh}$$

- c) Calculo de la huella de carbono

$$59875,2 \text{ kWh} \times \frac{0,1990 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kWh}} = 11915,165 \text{ kgCO}_2$$

Se realizó el mismo paso a paso para el cálculo de la huella de carbono para el año 2017 y 2018.

Tabla 28. Huella de carbono 2017 con SFV

HUELLA DE CARBONO 2017					
AÑO	MES	kWh (1)	19% reduce SFV (kWh) (2)	kWh consumo convencional (1-2)	Huella de Carbono (kg CO₂)
2017	Enero	73920	14044.8	59875.2	11915.165

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

HUELLA DE CARBONO 2017					
AÑO	MES	kWh (1)	19% reduce SFV (kWh) (2)	kWh consumo convencional (1-2)	Huella de Carbono (kg CO₂)
2017	Febrero	59840	11369.6	48470.4	9645.610
2017	Marzo	48400	9196	39204	7801.596
2017	Abril	57200	10868	46332	9220.068
2017	Mayo	25520	4848.8	20671.2	4113.569
2017	Junio	56760	10784.4	45975.6	9149.144
2017	Julio	79200	15048	64152	12766.248
2017	Agosto	73040	13877.6	59162.4	11773.318
2017	Septiembre	66000	12540	53460	10638.540
2017	Octubre	63653	12094.07	51558.93	10260.227
2017	Noviembre	60427	11481.13	48945.87	9740.228
2017	Diciembre	69520	13208.8	56311.2	11205.929
TOTAL					118229.641 kg CO₂
					118.230 ton CO₂

Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Tabla 29. Huella de carbono 2018 con SFV

HUELLA DE CARBONO 2018					
AÑO	MES	kWh (1)	19% reduce SFV (kWh) (2)	kWh consumo convenci onal (1-2)	Huella de Carbono (kg CO₂)
2018	Enero	58960	11202.4	47757.6	9503.762
2018	Febrero	57230	10873.7	46356.3	9224.904
2018	Marzo	58960	11202.4	47757.6	9503.762
2018	Abril	55440	10533.6	44906.4	8936.374
2018	Mayo	52800	10032	42768	8510.832
2018	Junio	61306	11648.14	49657.86	9881.914
2018	Julio	59937	11388.03	48548.97	9661.245
2018	Agosto	84677	16088.63	68588.37	13649.086
2018	Septiembre	75680	14379.2	61300.8	12198.859
TOTAL					91070.738 kg CO₂
					91.071 ton CO₂

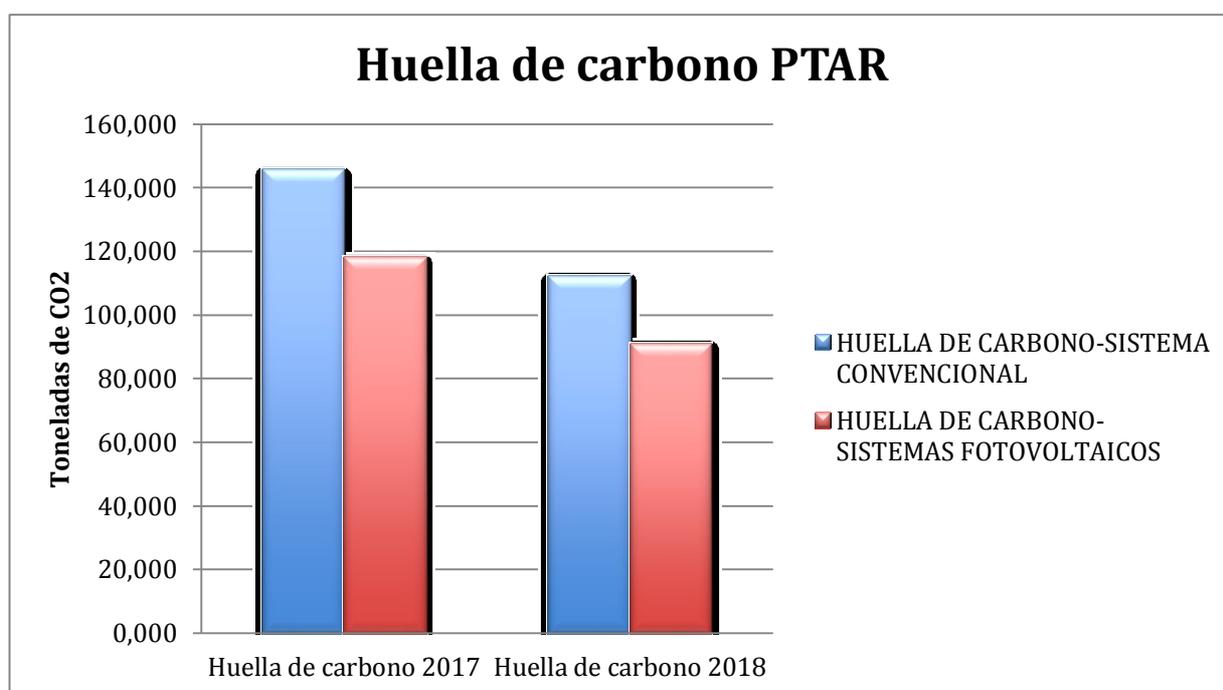
Fuente: Autores, 2018.

A partir de los datos obtenidos anteriormente, se puede decir que mediante la implementación de módulos fotovoltaicos para los años 2017 y 2018 se hubiese reducido un 19 % la cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Como se muestra en la figura 31, la huella de carbono de la planta si operara mediante energía fotovoltaica, esta huella sería menor respecto a la huella de carbono de la planta operando con el sistema convencional de energía. Es por esto que se podría afirmar que gracias a la implementación de módulos fotovoltaicos, se reducen las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) como lo es el CO₂.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 33. Comparación huella de carbono con SFV y sistema convencional



Fuente: Autores, 2018.

8.2.4.2 Comportamientos ambientalmente responsables¹⁷

El Concejo municipal de Chiquinquirá en el Plan de Desarrollo 2016-2019, tiene como visión para el 2020 ser reconocido como un municipio competitivo, equitativo, organizado, garante e incluyente del desarrollo integral, convirtiéndose en un pilar de progreso regional, ambientalmente sostenible, dentro de la cultura del cambio climático, seguro y participativo, que contribuya con el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes en un ambiente de paz y posconflicto. Para contribuir con estos objetivos, la administración de la PTAR debe comprometerse a realizar acciones de responsabilidad que protejan los recursos naturales, se respete el bien común y se dé un aprovechamiento adecuado de estos. Esto se manifiesta con la creación de programas de cultura del cambio climático (Plan de Desarrollo "Unidos por

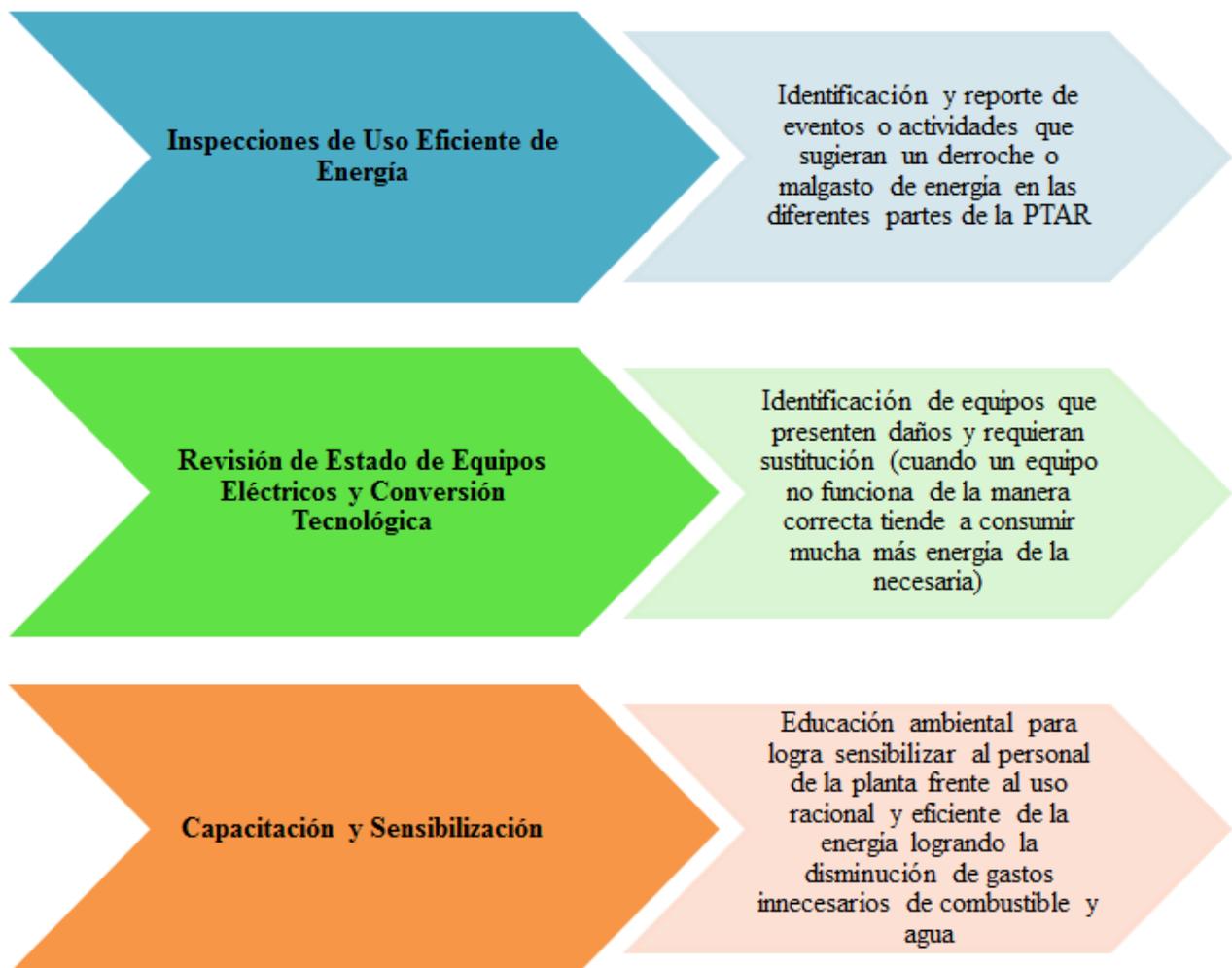
¹⁷ Es un instrumento, el cual pretende conseguir transformar actitudes, generar conocimiento acerca de la problemática ambiental para formar ciudadanos los cuales apliquen conductas sostenibles en sus labores diarias.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Chiquinquirá", 2016). De acuerdo a lo anterior se plantea una estrategia para que el municipio alcance su objetivo entorno al uso responsable de energía (Figura 34).

Figura 34. Programa para la disminución del consumo de energía.



Fuente: Los autores, 2018.

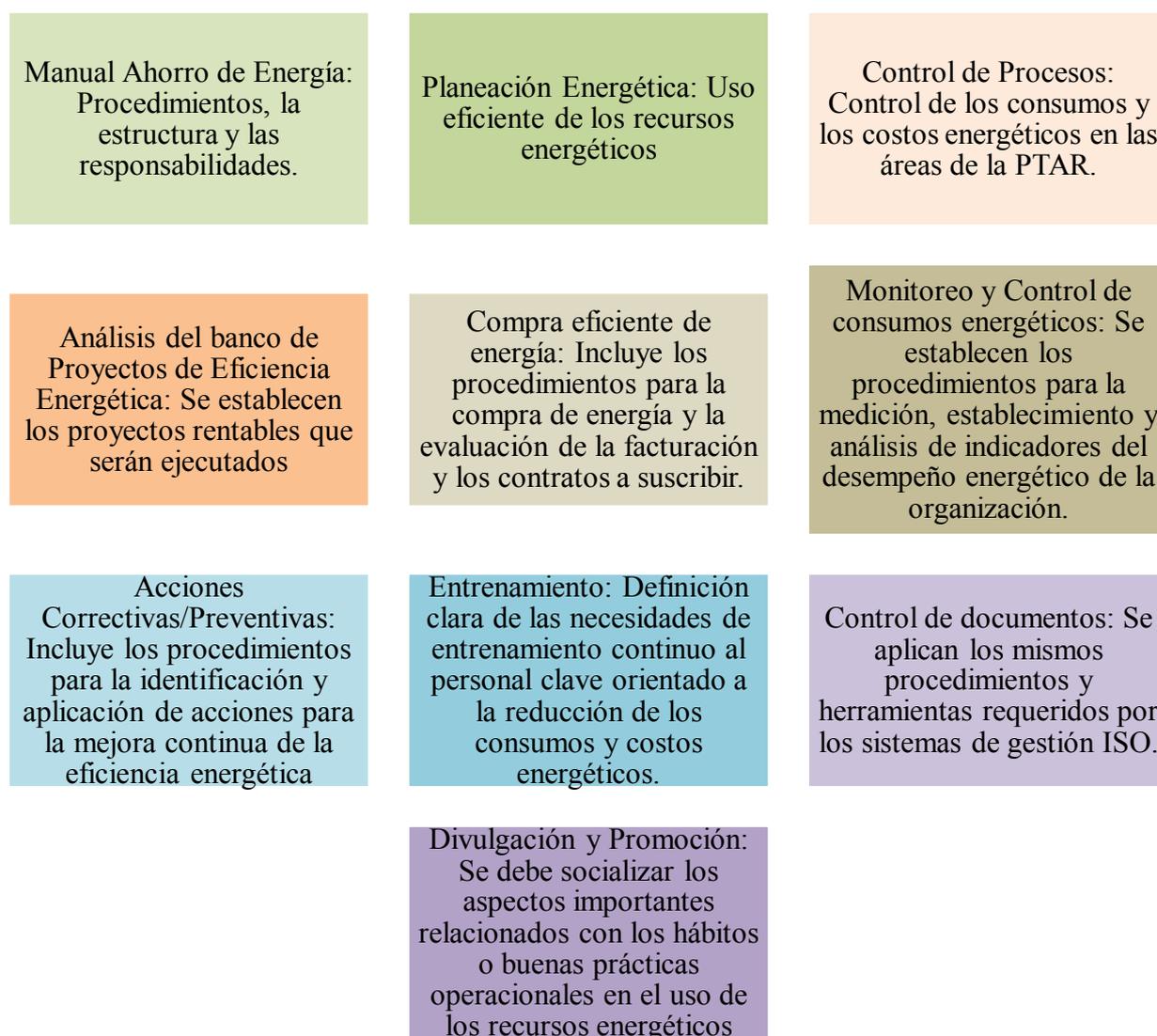
Manteniendo estos lineamientos, como lo dice el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales (PROURE) del Ministerio de Minas y Energía se podrá disminuir la intensidad y mejorar la eficiencia energética de los sectores de consumo y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, como lo son los sistemas de energía fotovoltaica. Adicionalmente, el municipio puede utilizar el sistema fotovoltaico implementado como una herramienta de educación para los estudiantes por medio de las diferentes instituciones educativas del municipio.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Por otro parte, en el Programa para el Uso Eficiente de los Recursos Energéticos- Guía de Apoyo al Empresario, se plantean los elementos principales para asegurar una gestión exitosa y de largo plazo en la administración de la energía:

Figura 35. Elementos principales del programa para el uso eficiente de los recursos energéticos



Fuente: Autores, 2018.

La implementación o guía para la realización de este programa *Comportamientos ambientalmente responsables*, puede ser ejecuta por parte de la asesora ambiental de EMPOCHIQUINQUIRA.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

8.2.5 Análisis de alternativas AHP de los sistemas fotovoltaicos

En la siguiente tabla se muestra la evaluación de los criterios según la escala de comparación de Saaty, como se explicó en la metodología, los once criterios son comparados entre sí. Estos fueron evaluados según un estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables, obteniendo como resultado que la eficiencia y la vida útil del sistema son los criterios con mayor importancia respecto a los demás.

Figura 36. Matriz de comparación de criterios AHP

	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR7	CR8	CR9	CR10	CR11
CR1	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$
CR2	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$
CR3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{1}$
CR4	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$
CR5	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
CR6	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
CR7	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
CR8	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
CR9	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$						
CR10	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$						
CR11	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{1}$								

Fuente: Autores, 2018

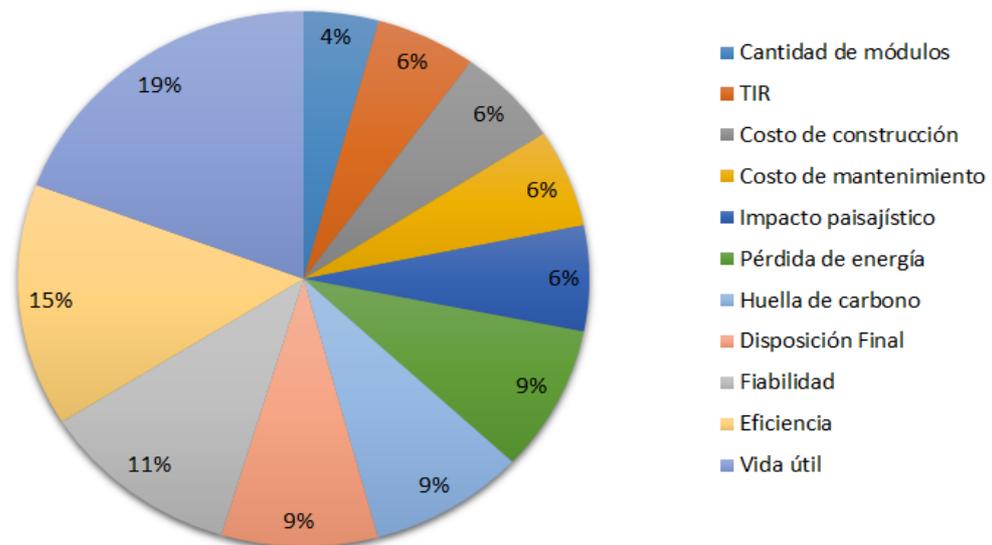
Los resultados de la importancia de cada criterio se muestran en la siguiente gráfica:

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 37. Resultado de valoración de criterios para el análisis de alternativas AHP

Porcentaje de valoración de criterios para el analisis de alternativas AHP



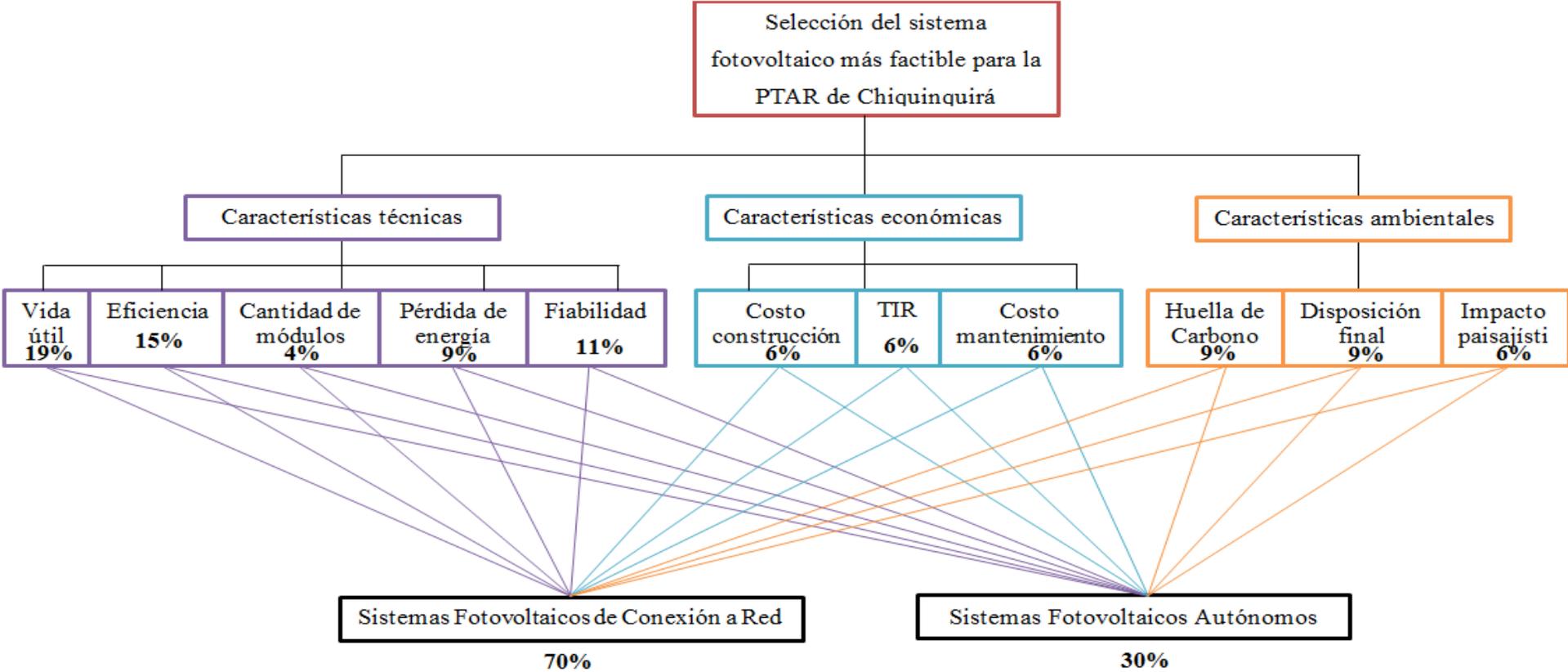
Fuente: Autores, 2018.

Como puede observarse en la figura 37, los criterios fueron evaluados y como resultado se obtuvo que el criterio con mayor porcentaje de importancia es la vida útil (19%) de los módulos fotovoltaicos, como lo dice Fernández (2009) en la Caracterización de Módulos Fotovoltaicos actualmente la vida útil de estos sistemas supera los 20 años y González y Velázquez (2016) en su tesis afirman que el periodo de vida es superior a los 30 años. Además otra de las variables con mayor relevancia es la eficiencia (15%), siendo considerada como una de las más importantes ya que según Bitar y Chamas (2017), la eficiencia de los módulos se define como la capacidad de transformar la luz solar en corriente directa útil, que es lo que se busca con la implementación de estos sistemas.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Figura 38. Jerarquización de los criterios



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Como puede observarse en la jerarquización de los criterios, las características técnicas son las que tienen mayor cantidad de criterios y por esta razón es el componente con mayor importancia sobre el económico y el ambiental. A partir de los criterios evaluados y de la valoración de las alternativas de cada uno, se obtuvo que el sistema fotovoltaico de conexión a red es la alternativa más factible para la PTAR con un 70% (Figura 38) ya que cumple con la mayoría de los criterios, en especial con los criterios de pérdida de energía, costo de construcción, costo de mantenimiento y TIR (Figura 39). En cuanto a la pérdida de energía el SFA como afirma Lamigueiro (2013) necesita de equipos de acumulación de energía que pueden no ser suficientes para acumular la energía que se produce de más, en cambio los SFCR dado que no deben satisfacer ninguna demanda de consumo no necesitan incorporar equipos de acumulación de energía y de esta forma no hay pérdida de energía en el sistema ya que lo que sobra se inyecta a la red, que en este caso sería a la red de la empresa EBSA.

Por otro lado, el costo de construcción, mantenimiento y la TIR son menores en los SFCR como ya se mencionó anteriormente en el diseño económico. Como lo afirma la Guía Solar de Energía de Madrid, la inversión inicial de un sistema fotovoltaico será mayor frente al sistema convencional, si bien su coste de funcionamiento durante los más de 25 de años de vida de la instalación será irrelevante comparado con el de compra de combustible o energía eléctrica, reparaciones, mantenimiento, etc asociado al sistema convencional. Así, la instalación de energía fotovoltaica resulta económicamente más ventajosa, de esta forma, una instalación con módulos fotovoltaicos acaba rentabilizándose a lo largo de los años, ya que el ahorro energético que produce se materializa en ahorro económico, el cual permite equilibrar y superar el coste de inversión para su la instalación. Esta amortización puede oscilar entre los 5 y 12 años dependiendo del tamaño de la instalación, de las ayudas obtenidas a fondo, y de la zona donde se instale.

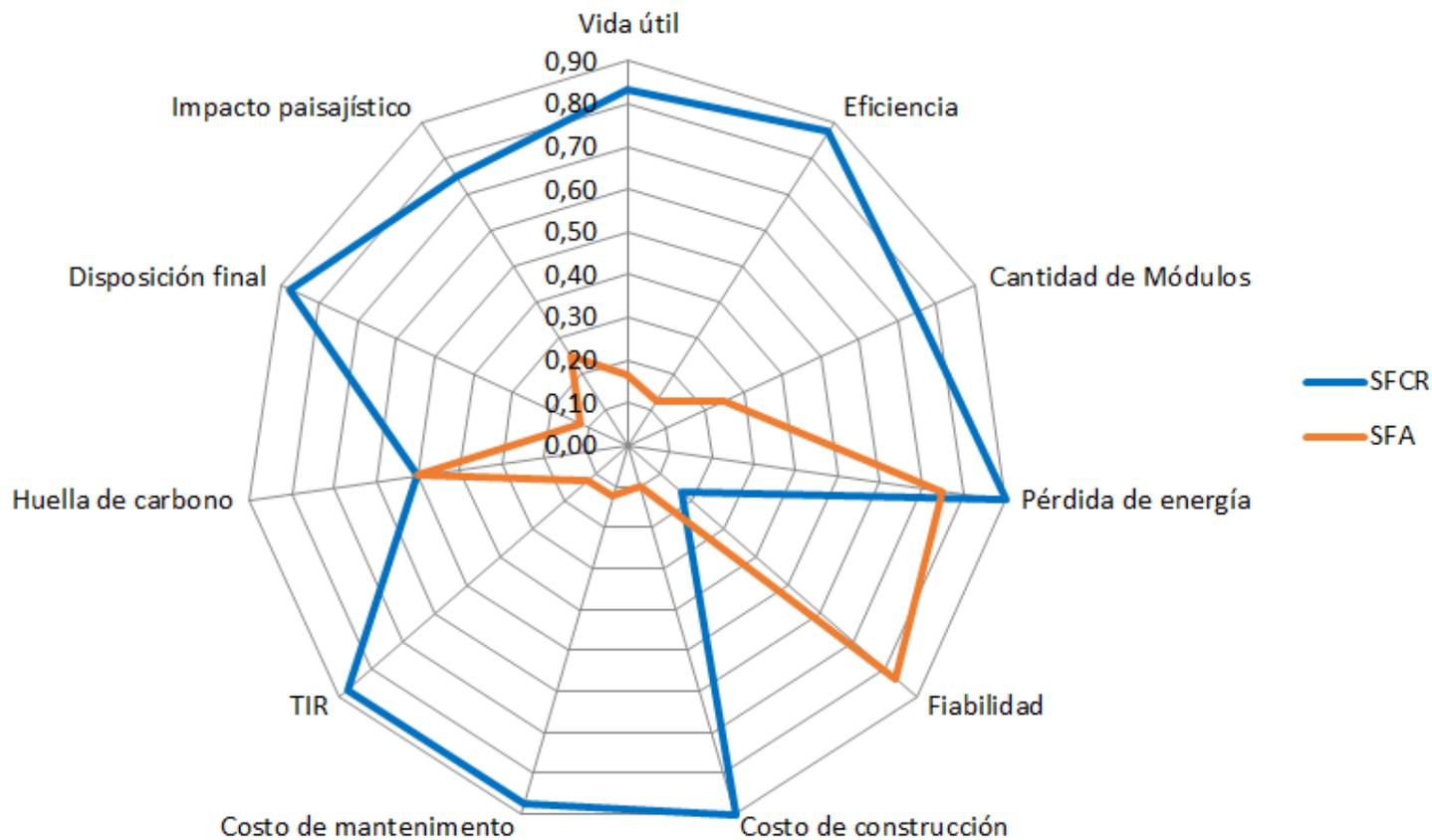
Es importante considerar que para ambas alternativas la disminución de huella de carbono sería significativa ya que como lo afirma Bitar y Chamas (2017) los sistemas fotovoltaicos no generan emisiones perjudiciales para el medio ambiente, por otro lado el impacto paisajístico es mayor en los SFA ya que requieren mayor área para operar por el uso de baterías.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Figura 39. Análisis de alternativas AHP para los sistemas fotovoltaicos.

Análisis de alternativas AHP para los sistemas fotovoltaicos



Fuente: Autores, 2018.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

8.3 *Evaluar el sistema fotovoltaico propuesto para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de Chiquinquirá, Boyacá*

8.3.1 *Identificación de aspectos e impactos ambientales del proyecto.*

Algunos estudios muestran que dentro de la etapa de construcción, operación y desmantelamiento de proyectos de energía solar, los impactos generados dentro de los componentes bióticos (flora y fauna), abióticos (aire, agua, suelo, paisaje, clima), y socioeconómicos (economía local, factores sociales y culturales), son mínimos en comparación con los impactos generados por los sistemas tradicionales de generación de energía. El proceso de conversión de energía solar en electricidad está prácticamente libre de emisiones y generación de ruidos, ya que las únicas partes móviles son los dispositivos de seguimiento solar, los cuales se desplazan muy lentamente. Los principales impactos reportados durante la operación son los visuales de afectación al paisaje (Pasqualino, Cabrera & Vanegas, 2015).

Según un estudio de impacto ambiental de una planta solar fotovoltaica realizado en Valencia España, en la fase de construcción algunos impactos que pueden influir de forma negativa en la percepción de las instalaciones por parte de los ciudadanos son: La contaminación producida en el proceso productivo de los componentes, la utilización del territorio y el impacto visual. La contaminación que se produce en la fabricación de los componentes de los módulos fotovoltaicos y la emisión de contaminantes depende de la tecnología que se utilice. Los sistemas fotovoltaicos más utilizados son los basados en silicio monocristalino, policristalino y amorfo. EL proceso de fabricación no implica el uso de sustancias peligrosas o contaminantes y hay que tener en cuenta que a día de hoy el silicio puede obtenerse del reciclaje de los desechos de la industria electrónica.

En cuanto a la fase de construcción se consideran las actividades: Desbroce y limpieza del terreno, Retirada de tierra, Construcción de losa corrida y casetas, colocación de estructuras y módulos fotovoltaicos, Tendido de conductores y cables de tierra. En caso de abandono se tendrá en cuenta el desmontaje de los módulos fotovoltaicos, sus soportes y líneas de distribución, demolición de las edificaciones y cimentaciones, recuperar y reciclar los elementos que componen la instalación (módulos, inversores, transformadores, etc), la

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

restauración y reposición de la cubierta vegetal y demás acciones encaminadas a normalizar el terreno conforme al resto del entorno natural (Lleó, 2017). Teniendo en cuenta los estudios mencionados anteriormente se pudieron identificar los aspectos e impactos, la matriz completa se puede observar en el anexo 12.

Tabla 30. Aspectos proyecto módulos fotovoltaicos

FASES	ASPECTOS
CONSTRUCCIÓN	Transporte de maquinaria, equipos y materiales
	Construcción de canaletas de cableado
	Cercado del terreno
	Desbroce y nivelación del terreno
	Excavación de cimientos
	Almacenamiento de materiales
	Construcción de instalaciones provisionales
	Montaje de soportes y paneles
	Pruebas y puesta en marcha
	Entrenamiento del personal
	Manejo y disposición de residuos de la etapa de construcción
OPERACIÓN	Generación de energía
	Ocupación del territorio
	Operaciones y mantenimiento
DESMANTELAMIENTO	Desmontaje de estructuras
	Desmontaje de módulos
	Extracción de cimentación
	Desmontaje de inversores
	Desmantelamiento centro de transformación
	Retirada de equipos
	Retirada de interconexiones
	Gestión de residuos
Restitución de terrenos	

Fuente: Autoras, 2018.

8.3.2 Evaluación de impacto ambiental del proyecto (EIA)

Según los resultados obtenidos en la EIA para la implementación de energía fotovoltaica en la PTAR (Anexo 13 matriz EIA), se evidencia que en el componente de la dimensión física, el impacto más significativo es la modificación paisajística ya que esta alteración se produce

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

principalmente por la visualización de elementos antrópicos (no naturales, asociados a la actividad humana) ajenos al paisaje original. En total son 17 las acciones que repercuten negativamente sobre el paisaje, la acción que genera mayor impacto es el desbroce y nivelación del terreno debido al movimiento de tierras; donde se realiza una limpieza de los arbustos, plantas, árboles y basura que pueda haber, de igual manera se ubican rampas para la entrada y salida de camiones y se delimita el área de actuación, marcando los puntos de referencia externos que sirven como datos topográficos. Por otro lado esta modificación paisajística se realiza por el movimiento de tierras que se encuentra por encima del plano de la zona de estudio. De igual manera la instalación de módulos fotovoltaicos podrían afectar la armonía y estética del paisaje circundante debido al tamaño, genera que sean visibles a grandes distancias afectando la belleza escénica del paisaje (Tovar, 2014).

Otro impacto negativo al ambiente se genera en la actividad de excavación de cimientos, ocupación del terreno y desmantelamiento del centro de transformación en los procesos de construcción, operación y desmantelamiento del proceso de implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR. Sin embargo una vez instalados los módulos fotovoltaicos no se requiere de algún tipo de fuente de energía principal, no genera contaminantes ni vertimientos al suelo o fuentes hídricas y tampoco generan algún tipo de ruido (Tovar, 2014).

En la fase de construcción se genera un alto impacto en la generación de residuos debido a las actividades que se desarrollan en el momento de adecuación de la zona de estudio. Actividades como: Construcción de canaletas de cabreado, cercado del terreno, desbroce y nivelación del terreno, excavación de cimientos, construcción de instalaciones provisionales y montaje de soportes y módulos fotovoltaicos.

Otro impacto que se evidencia por medio de la Evaluación de Impacto Ambiental, es el aumento de decibeles de ruido en la fase de construcción debido a la operación de máquinas y equipos utilizados en actividades de excavación, transporte y descargue de materiales. Los elevados niveles de contaminación por ruido alteran a trabajadores y al entorno. En este sentido, Galindo & Silva (2016) plantean que el ruido producido por una obra de construcción puede afectar el derecho al silencio, la comodidad y la salud de residentes y la población; para

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

el caso de la zona de estudio una ventaja importante que se debe considerar es que no hay asentamientos humanos cercanos que puedan verse afectados.

Es importante tener en cuenta que al llevar a cabo el desmantelamiento del sistema, se debe hacer búsqueda de una organización certificada para la recolección, tratamiento y disposición final de los módulos fotovoltaicos, para de esta manera prevenir los posibles impactos que produzcan la disposición inadecuada de los mismos.

Por otro lado los impactos positivos que se generan en el proyecto de implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, Boyacá es el fortalecimiento de la económica municipal debido a la posible reducción de los costos del consumo energético de la PTAR, de igual manera posiblemente se impactará positivamente en la generación de expectativas sociales sobre el desarrollo territorial del municipio debido a la implementación de tecnologías renovables y al fortalecimiento e innovación en la cultura generando así mayor interés y compromiso por parte de la comunidad en el desarrollo de proyectos mediante energías renovables no convencionales.

8.3.3 Medidas preventivas para los impactos severos de la implementación

De acuerdo con la EIA, se realizó para cada impacto significativo identificado una ficha ambiental integrando aspectos como: plan de manejo, objetivo de cada plan, metas, aspecto ambiental intervenido, impacto, acciones a desarrollar para mitigar el impacto, indicadores de desempeño ambiental y controles de dichos impactos.

Tabla 31. Ficha ambiental para el control de la modificación paisajística.

PROGRAMA DE MANEJO	FICHA No. 1
Programa de control de modificación paisajística en la implementación de módulos solares en la PTAR del municipio de Chiquinquirá	
Objetivo	

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Favorecer la integración paisajística de las infraestructuras e instalaciones creadas mediante el acondicionamiento estético.			
<i>Impacto a manejar</i>	<i>Tipo de manejo</i>	<i>Actividades que los producen</i>	<i>Componente afectado</i>
Modificación paisajística	Prevención del impacto que se produce sobre el paisaje tanto en la fase de construcción como en la fase de operación	Construcción de canaletas de cableado, desbroce y nivelación del terreno, excavación de cimientos, montaje de paneles y ocupación del territorio.	Dimisión física: El impacto paisajístico es, sin duda alguna el factor más importante puesto a que es el factor ambiental que más acciones le afectan negativamente sobre el paisaje
<i>Acciones a desarrollar</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Vigilancia de los procesos de movimientos de tierras. • Plantar en parcelas no afectadas por el proyecto especies nativas como Cajeto (<i>Trichanthera gigantea</i>) y Chocho (<i>Altramuz</i>). • Limitar el acceso en aquellas zonas de las parcelas no afectadas por el proyecto. • Adecuar las infraestructuras creadas, construyéndola de modo que no suponga una alteración visual impactante y que se integre en la zona de manera adecuada. 			
<i>Indicadores de seguimiento</i>		<i>Periodo de ejecución</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Diversidad Singularidad • Grado de naturalidad • Complejidad topográfica • Grado de actividad humana 		Durante toda la fase de construcción y operación para la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR	

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

<ul style="list-style-type: none"> • Fondo escénico • Incidencia visual 	
<i>Área de ejecución</i>	<i>Personal necesario y responsables</i>
El área donde se va a ejecutar este plan es directamente en la PTAR del municipio de Chiquinquirá.	Contratista para la elaboración de las actividades y programas, los cuales deben ser consultados, apoyados por parte del área de administración ambiental de la PTAR de Chiquinquirá.

Fuente: Autores, 2018.

Tabla 32. Ficha ambiental para la prevención de accidentes generados por el ruido de la construcción.

PROGRAMA DE MANEJO			FICHA No. 2
Programa de seguridad y salud ocupacional en los trabajadores para la prevención de accidentes por aumento de decibeles de ruido			
Objetivo			
Diseñar e implementar un plan de seguridad y salud ocupacional para los trabajadores de la obra por la generación de ruido en la fase de construcción			
<i>Impacto a manejar</i>	<i>Tipo de manejo</i>	<i>Actividades que los producen</i>	<i>Componente afectado</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de los decibeles 	Prevención de situaciones que	Falta de matriz de peligros	Dimisión social: Seguridad de los

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

de ruido en la fase de construcción.	generen riesgo o peligro a los trabajadores de la construcción	Falta de elementos de protección personal Ausencia de panorama de riesgos	trabajadores
<i>Acciones a desarrollar</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar un plan de seguridad en el trabajo para prevenir situaciones de peligro que generen accidentes de trabajo. • Programar capacitaciones a los trabajadores sobre los posibles riesgos y acciones a realizar en caso de accidentes • Verificar el cumplimiento de los planes de seguridad y salud ocupacional propuestos • Dotar a los trabajadores con Elementos de Protección Personal (EPP) requeridos. 			
<i>Indicadores de seguimiento</i>		<i>Periodo de ejecución</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Incide de frecuencia • Severidad o gravedad • Numero de lesiones • Tasa de incidencia • Tasa de prevalencia. 		<p>Durante toda la fase construcción para la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR</p>	

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

<i>Área de ejecución</i>	<i>Personal necesario y responsables</i>
El área donde se va a ejecutar este plan es directamente en la PTAR del municipio de Chiquinquirá.	Contratista para la elaboración de las actividades y programas, los cuales deben ser consultados, apoyados y seguimiento por parte del área de salud ocupacional o personal encargado en la PTAR de Chiquinquirá.

Fuente: Autores, 2018.

Tabla 33. Ficha ambiental para el manejo integral de los residuos sólidos generados.

PROGRAMA DE MANEJO			FICHA No. 3
Programa para el manejo integral de los residuos generados en el proyecto de implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá.			
Objetivo			
Recolectar, separar, aprovechar y disponer de forma adecuada los residuos generados durante el proceso de implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, Boyacá			
<i>Impacto a manejar</i>	<i>Tipo de manejo</i>	<i>Actividades que los producen</i>	<i>Componente afectado</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del suelo • Contaminación 	Preventivo y de control, pues se previene la	Falta de programas para la disposición de residuos sólidos	Dimensión física: contaminación

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

<p>n visual</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accidentes por almacenamiento inadecuado 	<p>contaminación de espacios, se genera el aprovechamiento de los residuos y se controla la generación de residuos</p>	<p>Ausencia de zonas específicas y demarcadas para el almacenamiento de estos</p> <p>Falta de empresas u organizaciones dedicadas a la disposición final de módulos fotovoltaicos</p>	<p>de espacios con residuos solidos</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------

Acciones a desarrollar

- Almacenar los residuos sólidos producidos en canecas plásticas dotadas con su respectiva bolsa plástica en su interior.
- Disponer un área de clasificación de residuos, los cuales deberán ser almacenados en recipientes respetivamente separados
- Generar el aprovechamiento de los residuos generados en otras actividades o en espacios que puedan ser útiles para disminuir la disposición de los residuos.
- Los residuos de construcción o escombros deberán ser llevados a zonas de disposición establecidas y debidamente demarcadas.
- En cuanto a los residuos del sistema fotovoltaico se debe realizar el desarme de los módulos para la venta individual de las partes que lo componen a empresas dedicadas a la fabricación y

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

distribución de estos, así como reciclar las partes del módulo que estén en buen estado como vidrio u aluminio y contactar a empresas nacionales e internacionales dedicadas a la reutilización y disposición final de módulos	
<i>Indicadores de seguimiento</i>	<i>Periodo de ejecución</i>
<p>Índices de generación.</p> <p>Producción</p> <p>Tipo de residuos</p> <p>Aprovechamiento de residuos</p>	<p>Aplica durante todas la etapa del proyecto.</p>
<i>Área de ejecución</i>	<i>Personal necesario y responsables</i>
<p>El área donde se va a ejecutar este plan es directamente en la PTAR del municipio de Chiquinquirá.</p>	<p>Contratista de la construcción en el desarrollo del programa para el manejo integral de los residuos sólidos, aprovechamiento y disposición de estos. Personal de la PTAR en el control y seguimiento de los planes.</p>

Fuente: Autores, 2018.

8.3.4 Cotizaciones

Con el objetivo de seleccionar la mejor propuesta en términos técnicos y económicos. Se contactaron 32 empresas a nivel nacional dedicadas a la ingeniería y construcción de proyectos de energía fotovoltaica (Anexo 15). Estas empresas solicitaron datos relevantes como el consumo total de energía, el área disponible para el montaje de los módulos, el precio del kW/mes, coordenadas de ubicación geográfica de la zona de estudio, cuadro de carga de cada

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

uno de los equipos, horas de trabajo de la planta y especificación del lugar de instalación (suelo o techo). Los datos que se proporcionaron fueron:

Tabla 34. Información requerida para las cotizaciones

Parámetro	Valor
Coordenadas de la PTAR	5°37'52.87" N 73°47'040.74" O
Cuadro de carga de cada uno de los dispositivos	Anexo 7
Área disponible para el montaje de los módulos	8.015,55 m ² (Anexo 5)
Área disponible para el montaje de módulos fotovoltaicos	24 horas (Permanente)
kWh consumidos	84677 kWh
Instalación	Suelo
Precio por kWh	\$443,36

Fuente: Autores, 2018

Se recibieron 4 cotizaciones por parte de las empresas: Erco Energía S.A.S, Greencol Energy S.A.S, INGELUMEN S.A.S y Clean Energy. La primera cotización recibida fue por parte de la empresa Greencol Energy S.A.S, esta fue descartada debido a que proponían un modelo económico excesivo de \$1.330.118.520, se tuvo en cuenta un sistema de instalación a techo y esta instalación requería de 765 módulos fotovoltaicos (Anexo 10). La segunda cotización descartada fue por parte de la empresa INGELUMEN S.A.S, ya que contaba con un modelo económico excesivo de \$937.500.000, adicionalmente no se especificaba la cantidad de módulos fotovoltaicos y de igual manera realizaron un dimensionamiento a techo (Anexo 15). La tercera cotización omitida fue por parte de la empresa Clean Energy, ya que ofrecía una reducción de solamente el 0.98 % de energía convencional y se estimaba un valor de 183.846.000,00 (Anexo 16).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Por último, la propuesta seleccionada fue la cotización presentada por la empresa ERCO Energía S.A.S (Anexo 11), ya que presento una oferta detallada y completa de lo solicitado. Para esta propuesta se requieren 576 módulos fotovoltaicos, con un modelo económico de \$582.196.794, generando 19% de reducción de consumo energético mantenimiento del sistema con un costo fijo durante 5 años de \$29.319.659 y un retorno de la inversión del 25 % en 4 años y descuentos tributarios de \$80.000.000.

Adicional a la primera propuesta, como valor agregado la empresa realizo una segunda cotización del proyecto con una menor inversión de tan solo \$200.000.000. Esta propuesta requiere de 184 módulos fotovoltaicos, con una reducción del 6 % del consumo de energía convencional, con una inversión de \$ 201.969.707, mantenimiento del sistema por 5 años de \$10.171.274. Teniendo en cuenta que el retorno de la inversión se logra a los 4 años, los descuentos tributarios son de \$ 28.000.000 y el TIR es del 25%.

8.3.5 Financiación

En Colombia existen diferentes tipos de financiación para proyectos de energías renovables; también llamadas Líneas verdes de financiamiento, a unas tasas de interés especiales y a cómodos plazos a través diferentes bancos como: BANCOLOMBIA, BANCO AGRARIO DE COLOMBIA y FINDETER. En Colombia, el Banco de Comercio Exterior (Bancóldex) apoya el desarrollo de mercados y demanda de crédito a través del programa de eficiencia energética en el sector servicios (ALIDE, 2013). Por otro lado, la ley 1715 de 2014 promueve diferentes incentivos tributarios los cuales generan una deducción del 50% en la renta por los primeros 5 años al igual que la exclusión del IVA, y la reducción en la depreciación acelerada. Adicionalmente mediante esta ley, con el registro ante la VUCE¹⁸ se pretende realizar una exención del pago arancelario, de importación de maquinaria y equipos destinados a la implementación de fuentes renovables.

8.3.6 TIR y VPN

Para conocer la rentabilidad del proyecto y evaluar el comportamiento de la inversión, se realizó un análisis costo-beneficio en el cual se halló la tasa interna de retorno (TIR) y el valor

¹⁸ Ventanilla Única de Comercio Exterior

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

presente neto (VPN). Los datos utilizados para el análisis de costo-beneficio, fueron seleccionados de la cotización suministrada por la empresa Erco Energía S.A.S, ya que presentaba una propuesta detallada y el sistema más económico; además, un mayor porcentaje de reducción de consumo energético por energía convencional, opción de mantenimiento preventivo y detalle de los equipos del sistema (Anexo 11).

Teniendo en cuenta que la empresa Erco Energía S.A.S, realizó dos propuestas de implementación de módulos fotovoltaicos con diferentes inversiones, se llevaron a cabo dos flujos de caja en los cuales se pueden evidenciar los costos del proyecto.

Para la implementación de 576 módulos fotovoltaicos, se realizó el primer flujo de caja a un plazo de 10 años con una inversión de \$582, 196,794.00 y un costo de mantenimiento de \$ 26, 387,693.10 con cobertura por los próximos 5 años. Determinando de esta manera una tasa interna de retorno del 23 %, en el cual a los 4 años se recupera la inversión inicial y a partir de ese momento se empieza a generar un ahorro anual de \$ 106, 853,410.59. Según Altuve y German (2004) se debe aceptar la propuesta de inversión ya que el VPN¹⁹ es mayor a cero (\$ 476.632.821,20), además según Baca (2016) entre mayor sea la TIR más factible será llevar a cabo el proyecto (Tabla 35).

¹⁹ Para calcular el VPN se tuvo en cuenta el DTF= 4%

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Tabla 35. Flujo de caja- VPN y TIR propuesta de 576 módulos

Flujo de Caja Financiero	0	1	2	3	4
Total Ingresos	\$ 92.955.791,00	\$ 137.794.953,72	\$ 139.582.155,61	\$ 141.860.838,03	\$ 144.663.617,40
Ingresos Operativos (19%)	\$ -	\$ 89.360.094,72	\$ 91.147.296,61	\$ 93.425.979,03	\$ 96.228.758,40
Descuento tributario (3%)	\$ -	\$ 16.144.953,00	\$ 16.144.953,00	\$ 16.144.953,00	\$ 16.144.953,00
Exclusión del IVA (16%)	\$ 92.955.791,00				
Depreciación acelerada (6 %)		\$ 32.289.906,00	\$ 32.289.906,00	\$ 32.289.906,00	\$ 32.289.906,00
Total Egresos	\$ 582.196.794,00	\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62
Gastos preoperativos	\$ 582.196.794,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Gastos de Mantenimiento		\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62	\$ 5.277.538,62
Saldo Final Caja	\$ -489.241.003,00	\$ 132.517.415,10	\$ 134.304.616,99	\$ 136.583.299,41	\$ 139.386.078,78

VPN	\$ 476.632.821,20
TIR	23%

	5	6	7	8	9	10
\$ 147.550.480,15	\$ 102.089.089,79	\$ 105.151.762,48	\$ 108.306.315,36	\$ 111.555.504,82	\$ 114.902.169,96	
\$ 99.115.621,15	\$ 102.089.089,79	\$ 105.151.762,48	\$ 108.306.315,36	\$ 111.555.504,82	\$ 114.902.169,96	
\$ 16.144.953,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 32.289.906,00						
\$ 5.277.538,62	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 5.277.538,62	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78	\$ 5.435.864,78
\$ 142.272.941,53	\$ 96.653.225,01	\$ 99.715.897,70	\$ 102.870.450,58	\$ 106.119.640,04	\$ 109.466.305,18	

Fuente: Autores, 2018.

En comparación al flujo de caja para la implementación de 184 módulos fotovoltaicos con una inversión de \$201, 969,707.00 y un costo de mantenimiento de \$ 10, 171,274.00 con cobertura por los próximos 5 años, se genera una tasa interna de retorno solo del 15 %, con una recuperación de la inversión inicial hasta los 6 años, con un ahorro anual de \$35, 916,253.79 (Tabla 36).

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Tabla 36. Flujo de caja- VPN y TIR propuesta de 184 módulos

Flujo de Caja Financiero	0	1	2	3	4
Total Ingresos	\$ 32.247.264,00	\$ 34.715.228,14	\$ 35.443.087,81	\$ 36.338.355,22	\$ 37.260.480,65
prestamo		\$ -			
Ingresos Operativos (19%)	\$ -	\$ 29.114.387,14	\$ 29.842.246,81	\$ 30.737.514,22	\$ 31.659.639,65
Descuento tributario (3%)	\$ -	\$ 5.600.841,00	\$ 5.600.841,00	\$ 5.600.841,00	\$ 5.600.841,00
Exclusión del IVA (16%)	\$ 32.247.264,00				
Depreciación acelerada (6%)		\$ 11.201.681,00	\$ 11.201.681,00	\$ 11.201.681,00	\$ 11.201.681,00
Total Egresos	\$ 201.969.707,00	\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80
Gastos preoperativos	\$ 201.969.707,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Gastos de Mantenimiento		\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80	\$ 2.034.254,80
Saldo Final Caja	\$ -169.722.443,00	\$ 32.680.973,34	\$ 33.408.833,01	\$ 34.304.100,42	\$ 35.226.225,85
				\$ 235.788.637,51	
					\$ 100.632.854,76
					15%

5	6	7	8	9	10
\$ 38.210.269,83	\$ 33.587.711,70	\$ 34.595.343,05	\$ 35.633.203,34	\$ 35.633.203,34	\$ 37.803.265,43
\$ 32.609.428,83	\$ 33.587.711,70	\$ 34.595.343,05	\$ 35.633.203,34	\$ 35.633.203,34	\$ 37.803.265,43
\$ 5.600.841,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 11.201.681,00					
\$ 2.034.254,80	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 2.034.254,80	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44	\$ 2.095.282,44
\$ 36.176.015,03	\$ 31.492.429,26	\$ 32.500.060,61	\$ 33.537.920,90	\$ 33.537.920,90	\$ 35.707.982,98

Fuente: Autores, 2018.

Partiendo de los resultados obtenidos anteriormente, se puede inferir que es más factible realizar la implementación de los 576 módulos fotovoltaicos, debido a que la inversión se retorna en un tiempo menor, derivando en un ahorro mayor; lo cual genera un mayor interés en posibles inversionistas y la misma administración encargada de la planta. A su vez, se expone la posibilidad de ampliar el proyecto implementando un mayor número de módulos fotovoltaicos, gracias a la relación directamente proporcional entre la cantidad de módulos y los beneficios obtenidos.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

9. Conclusiones

En el desarrollo de esta investigación mediante la metodología propuesta, se cumplieron en su totalidad los objetivos y actividades planteadas, pese a los obstáculos encontrados como el alto costo de inversión por kWp instalado y la falta de un mercado competitivo de calidad; además, no existe una normatividad para la selección de equipos, configuración, instalación y conexión al SIN de sistemas de generación con energía fotovoltaica. Pese a esto, se pudo concluir que es factible la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR del municipio de Chiquinquirá, puesto que la documentación ecológica, técnica, social y económica evidencia la necesidad de implementar energías renovables para mejorar el desempeño ambiental.

A partir de las características ambientales evaluadas, según los factores ambientales como la velocidad del viento, la radiación, brillo solar y la estructura del lugar, permite la implementación de módulos fotovoltaicos; además, haciendo uso de los sistemas fotovoltaicos en la planta, se puede reducir un 19% de la generación de CO₂, ayudando a la disminución de la huella de carbono de la planta y así mismo generar alternativas frente al cambio climático que se presenta en la actualidad. Por medio del análisis de alternativas realizado se logró identificar que para la necesidad energética que presenta la planta, el sistema más factible para su implementación es el sistema fotovoltaico conectado a la red ya que cumple con la mayoría de criterios evaluados y en especial porque requiere un menor número de módulos para su funcionamiento, resaltando que no requiere de baterías siendo estas el equipo de mayor costo.

No obstante, por medio del diseño de la implementación de módulos fotovoltaicos en la PTAR a través del programa AutoCAD permite observar con claridad la ubicación del sistema fotovoltaico en la planta, el cual cuenta con el espacio suficiente para cumplir con los parámetros de construcción y da la posibilidad de ampliar la capacidad de instalación de módulos en un futuro, para así aumentar el porcentaje de dependencia de la planta sobre la energía fotovoltaica, generando a su vez mayores ingresos.

Por otro lado es importante resaltar que por medio de la divulgación del programa Comportamientos ambientalmente responsables sobre la implementación de módulos fotovoltaicos, podría generar una transformación de comportamiento en el uso del recurso

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

energético a través de los trabajadores de EMPOCHIQUINQUIRA, logrando así crear una cultura basada en la conservación de los recursos naturales por medio de fuentes de energía no convencionales, desencadenando una red de conocimiento para mejorar las practicas diarias en las que se ve reflejado el uso de energía.

A partir de la evaluación de impacto ambiental del sistema fotovoltaico conectado a la red, se evidenció que no se generan impactos negativos críticos; sin embargo, para aquellos impactos severos se propusieron medidas de prevención anticipándose a posibles problemáticas ambientales. Haciendo referencia a la evaluación económica del estudio, con base a la cotización recibida por la empresa de Energía Renovable de Colombia ERCO y la investigación desarrollada, se pudo concluir que mediante una inversión de \$582, 196,794.00 y una inversión de \$201, 969,707.00, es factible la instalación de los módulos fotovoltaicos debido a que se genera un retorno de la inversión y un ahorro económico en la planta en un tiempo menor al de la vida útil de sistema. De igual manera el proyecto es factible económicamente gracias a la Ley 1715 de 2014, ya que contempla los beneficios tributarios que el Gobierno otorga. Cabe resaltar que a partir del análisis económico se puede concluir que la tecnología solar fotovoltaica no es rentable en Colombia sin beneficios tributarios o financiación debido a que los costos de estos sistemas son relativamente altos debido a que es un mercado relativamente nuevo en el país y no se ha cimentado por completo.

Para las autoras del presente estudio, y como ingenieras en formación, es importante resaltar que desde el punto de vista de la Ingeniería Ambiental se concluye que el desarrollo de este estudio de investigación permitió aplicar una visión holística mediante los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica y profesional. Se aplicaron conocimientos y capacidades fundamentadas en la planeación, evaluación y gestión ambiental de alternativas encaminadas al uso sostenible de los recursos naturales, promoviendo el uso de tecnologías renovables para la prevención, control y manejo de factores ambientales; en especial, la mitigación y adaptación al cambio climático. A través del presente estudio de investigación se podrá afrontar y resolver las exigencias ambientales que se presentan en la actualidad o en el futuro, respondiendo a las necesidades ecológicas, sociales y económicas para ser excelentes profesionales en el campo de la ingeniería ambiental.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

10. Recomendaciones

Se recomienda instalar el proyecto de \$582, 196,794.00 debido a que los indicadores de TIR y VPN muestran una recuperación de la inversión en un tiempo menor y un mayor ahorro.

Debido a los altos costos de inversión para la reducción del consumo energético en la planta, se considera que el proyecto se realice de forma escalable ya que el diseño del sistema se planteó con un inversor de mayor capacidad, para que en un futuro se pueda ampliar la potencia del sistema sin necesidad de cambiar el inversor o reemplazar equipos.

Teniendo en cuenta que la información climatológica es del Atlas de radiación y viento de Colombia, se recomienda realizar un estudio de soleamiento de geometría solar in-situ para corroborar información y diseñar el sistema de una forma más precisa.

Se recomienda medir periódicamente la huella de carbono que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales genera, con el fin de realizar un seguimiento y mejorar el desempeño ambiental

Para finalizar se sugiere que el estudio continúe con el desarrollo de un plan de uso eficiente de la energía a partir de energía fotovoltaica, teniendo en cuenta el seguimiento del tema de investigación

11. Referencias

ACER. (2018). Colombia Con Marco Legal Para Energías Alternativas. Retrieved from <https://www.asorenovables.com/colombia-marco-legal-energias-alternativas/>

Ahumada Valdez, R. (2017). Diseño del sistema de bombeo automatizado con energía fotovoltaica para la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Vilavila.

ALIDE. (2013). Líneas verdes de financiamiento pdf - Google Search. Retrieved from https://www.google.com.co/search?safe=active&ei=9PK2W6DSBYfvzgKPrLPYDw&q=lineas+verdes+de+financiamiento+pdf&oq=lineas+verdes+de+financiamiento+pdf&gs_l=psy-

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

ab.3...428505.430287.0.431078.4.4.0.0.0.0.456.956.2-2j0j1.3.0....0...1c.1.64.psy-

ab..1.2.500...0i22i30k1j33i22i29i30k1.0.2BwI46xwMNE

Altuve, G., & Germán, J. (2004). El uso del valor actual neto y la tasa interna de retorno para la valoración de las decisiones de inversión. *Actualidad contable FACES*, 7(9).

América Fotovoltaica. (2018). Preguntas frecuentes energía solar - América Fotovoltaica. Retrieved from <http://www.americafotovoltaica.com/preguntas-frecuentes-sobre-energia-solar>

Arboleda, J. (2008). *Manual para la Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos, Obras o Actividades*.

Baca, G. (2006). *Evaluación de proyectos* (5th ed., pp. 220-241). México: Mc Graw Hill.

Badii, M. H., Guillen, A., Abreu, J. L., & UANL, S. N. D. L. G. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation). *Daena: International Journal of Good Conscience*, 11(1), 141-155.

Bitar, S., Susana, M., & Chamas, B. (2017). Estudio de factibilidad para la implementación de sistemas fotovoltaicos como fuente de energía en el sector industrial de Colombia.

Bordas, S., & Elías, X. (2011). *Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Blanquer Rodríguez, M. (2012). Aproximación metodológica al cálculo de Huella de Carbono y Huella Ecológica en centros universitarios: el caso de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid.

Calderón, J. T., & Prada, R. M. (2013). Métodos de evaluación de impacto ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 43-53.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Inventario de la Oferta Financiera Sector Eléctrico*. Retrieved from

https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/13667/Oferta%20Financiera%20EE%20Y%20ER%20-%20Validaci%C3%B3n%20entidades%20financieras_v2.pdf?sequence=4

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Castillo, Y., Gutiérrez, M. C., Vanegas-Chamorro, M., Valencia, G., & Villicaña, E. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano. *Prospectiva*, 13(1), 39-51.

Cepeda Moya, J. S. (2017). Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones.

Componentes de un sistema fotovoltaico. [Ebook]. Retrieved from <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Constitución Política Colombiana (1991). Asamblea Nacional Constituyente, Bogotá, Colombia, 6 de Julio de 1991.

Correa Flórez, C. A., Marulanda García, G. A., & Panesso Hernández, A. F. (2016). Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano. *Tecnura*, 20(50), 85-95.

De Juana, J. M. (2003). *Energías renovables para el desarrollo*. Madrid: Editorial Paraninfo.

Di Fraia, S., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2018). A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants. *Energy Conversion and Management*, 163, 304-313. doi:10.1016/j.enconman.2018.02.058.

Díaz-Bravo, L., Torruco-García, U., Martínez-Hernández, M., & Varela-Ruiz, M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Investigación en educación médica*, 2(7), 162-167.

Díaz, T., & Carmona, G. (2010). Componentes de una instalación solar fotovoltaica. *Técnico en instalaciones eléctricas y automáticas*. Reforma LOE.

Díaz Villar, P. (2003). *Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: Aplicación a la electrificación rural* (Doctoral dissertation, Telecommunication).

Decreto 1543. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. 113 septiembre de 2017.

Decreto 2469. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. 2 diciembre de 2014.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Decreto 2811. Presidente de la República de Colombia. Bogotá, Colombia. 18 de diciembre de 1974.

Eficiencia de los paneles solares -Energía solar fotovoltaica.org. (2017). Retrieved from https://energiasolarfotovoltaica.org/eficiencia-de-los-paneles-solares/#Eficiencia_del_panel_solar

EMPOCHIQUINQUIRA. (2016). PTAR - Planta de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas de Chiquinquirá, una de las más modernas de Latinoamérica. Retrieved from <http://www.empochiquinquirá.gov.co/es/novedades/noticias/15394-ptar-planta-de-tratamiento-agua-residuales-domesticas-de-chiquinquir>

Enciclopedia Financiera. (15 de Marzo de 2018). Obtenido de <https://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/tasa-interna-de-retorno.htm>

Energiza. (2012). Energiza. Obtenido de <http://www.energiza.org/anteriores/energizaenero2012.pdf>

Espejo Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España.

Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163-176.

Fernández Ferichola, J. (2009). Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil (Bachelor's thesis).

Fuentes Orellana, J., & Vallejos Vergara, L. (2016). Estudio De Factibilidad Técnica Y Económica De Suministro Eléctrico A Través De Ernc, (Energías Renovables No Convencionales), Específicamente Fotovoltaica, Para Sector Agrícola En La Vii Región (Parral). Universidad Del Bío-Bío. Sistema De Bibliotecas - Chile.

Galindo, J., & Silva, H. (2016). Impactos Ambientales Producidos por el Uso de Maquinaria en el Sector de la Construcción.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Garzón S, & Martínez J. (2017). Estudio de Factibilidad para la Implementación de Energía Solar Fotovoltaica en la Zona de Preescolar del Colegio Agustiniiano Suba. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11349/6212>

González, A. (2006). El concepto "energía" en la enseñanza de las ciencias. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/28104547_El_concepto_energia_en_la_ensenanza_d_e_las_ciencias

González, E., & Velásquez, F. (2016). “Diseño de un Sistema Solar Fotovoltaico de Bajo Consumo Para Uso Domiciliar en Comunidades Rurales Fuera del Sistema Interconectado Nacional”. Tesis Monográfica para optar al Título de Ingeniero Eléctrico.

Granada, L. J. S. (2017). Evaluación de la Energía Solar Fotovoltaica para generación de Electricidad en el municipio de Uribía, La Guajira-Colombia. *Energética*, (47), 65-72.

Hernández Mora, J. A. (2012). Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. Sexta Edición. Editorial Mc Graw Hill. México.

IDAE. (2006). Manual de energía renovable. Retrieved from <http://www.aperca.org/temp/pdf/EnergiaSolarTermica.pdf>

IDAE. Consumo Energético en el sector del agua. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Estudio_de_prospectiva_Consumo_Energetico_en_el_sector_del_agua_2010_020f8db6.pdf

IDEAM. (2011). Brillo solar. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125581/41-90+HM+Brillo+solar+3+FI.pdf/9e3a2479-6c7c-445c-adae-ff72bfd1fa97>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

IDEAM. (2016). Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

IDEAM. (2018). Radiación Solar - IDEAM. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>

Ihobe. (2009). Identificación y Evaluación de Aspectos Ambientales.

Iza, L., Patricio, W., & Monta Iza, S. P. (2016). Implementación de un sistema fotovoltaico para energizar un sistema de oxigenación de agua en la crianza y reproducción de truchas (Bachelor's thesis, LATACUNGA/UTC/2016).

Juan Escrivá, L. (2015). Aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) Al Dimensionamiento de Sistemas Renovables. Retrieved from https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73178/21004036_TFG_14683619461433974905392726327662.pdf?sequence=3

Lahera Ramón, V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quivera, 12(2).

Lamigueiro, O. P. (2013). Energía solar fotovoltaica. Creative Commons ebook.

Ley No 1931. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 27 Julio de 2018.

Ley No 1715. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 13 mayo de 2014.

Ley No 1665. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 26 de enero de 2013.

Ley No 1196. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 5 Junio de 2008.

Ley No 697. Congreso de la República de Colombia. 3 de octubre de 2001.

Ley No 629. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 27 diciembre de 2000.

Ley No 99. Congreso de la República de Colombia, Colombia, 22 diciembre de 1993.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Lisserre, M., Sauter, T., & Hung, J. Y. (2010). Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics. *IEEE industrial electronics magazine*, 4(1), 18-37.

Llach, M., & Calbó, J. (2004). Aproximación a la climatología de la nubosidad en Cataluña.

Lleó Pascual, B. (2017). Estudio de Impacto Ambiental de una Planta Solar Fotovoltaica de 100kw en el Término Municipal de Losa del Obispo, Valencia. Retrieved from https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/94555/01_MEMORIA.pdf?sequence=1

Madrid Solar. (2006). Guía de energía solar. Retrieved from <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM005612.pdf>

Martínez, A. C., & Caro, R. (2010). Fuentes energéticas. In *La Nueva Geopolítica de la Energía* (pp. 21-34). Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Matsumoto, Y. (2011). Celdas solares de silicio: fundamento y tendencia. Sección de Electrónica del Estado Sólido. México.

Medina, M. I. R. (2011). Políticas públicas en salud y su impacto en el seguro popular en Culiacán, Sinaloa, México. *Hospital general*, 68(45), 03.

Mete, Marcos Roberto (2014). Valor Actual Neto y Tasa de Retorno: Su Utilidad Como Herramientas para el Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 7(7), 67-85. Recuperado en 16 de agosto de 2018, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2014000100006&lng=es&tlng=es.

Mosquera Martínez, P., & Merino Ruesga, L. (2003). Empresa y energías renovables: lo que su empresa debe saber sobre energías

Norma Técnica Colombiana No 5287. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Colombia. 15 julio de 2009.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

Norma Técnica Colombiana No 2883. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Colombia. 26 julio de 2006.

Norma Técnica Colombiana No 4405. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación & Instituto de Neurociencias Aplicadas, Colombia. 24 junio de 1998.

Ortega, R. M. B. (2014). Estudio de las perspectivas de las energías renovables en los países del este. El caso de Bulgaria (Doctoral dissertation).

Ortiz Chacón, M. L., Rincón, C., & Emid, D. (2018). Evaluación de los impactos en la implementación de energía solar fotovoltaica para una vivienda unifamiliar (vereda la Cecilia Villavicencio-Meta-Colombia).

Pasqualino, J., Cabrera, C., & Vanegas Chamorro, M. (2015). The environmental impacts of folic and solar energy implementation in the Colombian Caribe. *Prospectiva*, 13(1), 68-75.

Pendón, M. M., Williams, E. A., Cibeira, N., Couselo, R., Crespi, G., & Tittone, M. (2017, May). Energía renovable en Argentina: cambio de paradigma y oportunidades para su desarrollo. In *IV Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 2017)*.

PIGA. (2013). Guía para la elaboración del informe de Huella de Carbono Corporativa en entidades públicas del Distrito Capital. Retrieved from http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=015755de-1e95-49fb-8c7c-667c4fb398fa&groupId=10157

Pinzón A, L. (2016). Alternativa en el aprovechamiento de energía solar ante crisis energética en Colombia. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/15275/3/PinzonArevaloLadyViviana2016.pdf>

Portafolio. (2016). Energías renovables, la apuesta que debe hacer el país. Retrieved from <http://www.portafolio.co/innovacion/energias-renovables-en-colombia-502061>

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

PBOT. (2016). Programa Divulgación Plan Básico De Ordenamiento Territorial. Retrieved from <http://chiquinquira-boyaca.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionYControl/PLAN%20BASICO%20DE%20ORDENAMIENTO%20TERRITORIAL.pdf>

Plan de Desarrollo "Unidos por Chiquinquirá" (2016).

Prias Caicedo. (2018). Programa De Uso Racional Y Eficiente De Energía Y Fuentes No Convencionales – PROURE. Retrieved from https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Proure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347

Ramírez, C. A. Y., & Guzmán, Y. A. (2017). Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad. *Scientia et technica*, 22(3), 273-280.

Ramos Mora, C. L. (2016). Análisis costo-beneficio de la implementación de las energías renovables no convencionales en la industria química (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).

RCN Radio. (21 de Diciembre de 2017). Porcentaje de aguas tratadas en Colombia no alcanza el 50%: Viceministro de Aguas. Obtenido de <https://www.rcnradio.com/colombia/eje-cafetero/porcentaje-aguas-tratadas-colombia-no-alcanza-50-viceministro-aguas>

Reguera. (2015). Análisis De La Degradación De Módulos Fotovoltaicos. Retrieved from http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3524/0675_Reguera.pdf?sequence=1

Resolución No 1670. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. 15 agosto 2017.

Resolución No 1283. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. 3 agosto de 2016.

Resolución No 024. Comisión de Regulación de Energía y Gas, Colombia. 13 marzo de 2015.

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Restrepo, H. (2016). ¿Los Paneles solares funcionan en días nublados? | Globalem. Retrieved from <http://globalem.co/paneles-dias-nublados/>

Reyes, J., & Jáuregui, L. B. (1999). El Proyecto De Investigación- Guía para su elaboración.

Rincón, S. M., & Camargo, A. K. V. (2018). Energías Renovables Un Futuro Óptimo Para Colombia. Punto De Vista, 9(13).

Ríos. (2016). Métodos Para Calcular La Población Futura. Retrieved from <https://www.scribd.com/doc/147294050/Metodos-Para-Calcular-La-Poblacion-Futura>

Rodríguez Murcia, H. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de ingeniería, (28), 83-89.

Roldán Vilorio, J. (2008). Estudio de viabilidad de instalaciones solares. Necesidades energéticas y propuestas de instalaciones solares (pp. 38, 39,40). Madrid.

Ruiz, A. A., Muro, J. L. M., & Asensi, J. M. S. (2015). Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana. Tecnoaqua, (11), 55-61.

Sabino, C. (1992). El proceso de investigación. Caracas.

Salazar, O., Badii, M., Guillen, A., & Lugo, O. (2015). Historia y Uso de Energías Renovables. International Journal of Good Conscience.

Secretaría de Desarrollo y Bienestar Social. (2013). Análisis de Situación de Salud con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud de Chiquinquirá. Chiquinquirá.

Semana Sostenible. (10 de Junio de 2017). Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/energias-alternativas-se-toman-colombia/37756>

Solar Cell Central. (2011). Solar Cell Central. Obtenido de http://solarcellcentral.com/history_page.html#

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez

Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios. Retrieved from <http://ingenieros.es/files/proyectos/La%20huella%20del%20carbono%20en%20la%20producci%C3%B3n,%20distribuci%C3%B3n%20y%20consumo.pdf>

Stolik, V. (2017). Las estructuras FV y el viento. | Blog de Energía Fotovoltaica. Retrieved from <http://www.imre.uh.cu/vtfotovoltaica/?p=330>

Suárez Andrade, J. C. (2018). La energía solar: una fuente energética sobre la que el estado debe legislar más profundamente para masificar su uso y aprovechamiento.

Suárez, & Martínez. (2017). Estudio De Factibilidad Para La Implementación De Energía Solar Fotovoltaica En La Zona Preescolar Del Colegio Agustiniiano-Suba. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6212/1/Garz%C3%B3nSu%C3%A1rezDianaAlejandra2017.pdf>

Tovar Castillo, A. (2014). Evaluación De Impacto Ambiental De La Energía Solar Y Eólica En La Abiota De Colombia. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12054/1/Proyecto%20Final%20-%20Ambiental.pdf>

UPME. (2017). Acerca de la calculadora Fecoc 2016. Retrieved from http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/acercade.html

UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

UPME. (2014). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/Documents/Cartilla_IGE_Incentivos_Tributarios_Ley1715.pdf

DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL MUNICIPIO DE CHIQUINQUIRÁ, BOYACÁ

**Andrea Carolina Jiménez Cañón
María Fernanda Pedroza Jiménez**

UPME. (03 de 2014). Unidad de Planeación Minero Energética. Recuperado el 10 de 03 de 2018, de https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/iaao/5-_INM_UPME_Energias_Renovables_Nov_6_2014_Version_Final.pdf

Uzcátegui, E. Y. L. (2017). Algunos efectos de la energía en el medio ambiente. Revista FADES, Facultad deficiencias económicas y sociales.

Vargas. (2004) Procesos unitarios de plantas de tratamiento. Cap. 3. DE TRATAMIENTO, P. U. Y. P.

Varón, R. (2018). Programa Para El Uso Eficiente De Los Recursos Energéticos. Retrieved from <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3988179/Gu%C3%ADa+programa+para+el+uso+eficiente+de+los+recursos+energ%C3%A9ticos.pdf>

Vegas, A. (2009). Diseño de una instalación fotovoltaica de 200 kW en un edificio (Tesis de pregrado). Madrid.

Vela Ruiz, M. A. (2016). Implementación y ejecución de un sistema de energía alternativa (fotovoltaica) para mejorar la calidad de vida de sus moradores en la comunidad de palmeras.

Zuluaga. (2018). HidroItuango: El fracaso de un gran negocio impuesto en medio de asesinatos, desapariciones y destrucción masiva de la naturaleza. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/325272889_HidroItuango_El_fracaso_de_un_gran_negocio_impuesto_en_medio_de_asesinatos_desapariciones_y_destruccion_masiva_de_la_naturaleza.

12. Anexos

Anexo 1: Resumen analítico de investigación para el estado del arte.

RAI N° 1

Autor del RAI: JIMÉNEZ Cañón Andrea Carolina, PEDROZA Jiménez María Fernanda.