

Análisis técnico-financiero para la potabilización de agua por medio de energía solar en una vereda de Santander con deficiencia en el servicio

Laura Daniela Carvajal Pinzón y María Paula Ríos Pinzón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Química

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Con todo mi amor y gratitud, dedico este logro a mi familia, por ser el pilar que sostuvo cada paso de este camino y por acompañarme con amor incondicional en cada etapa de este proceso.

En especial a mis padres, Carolina Pinzón y Dagoberto Carvajal, quienes han sido mi mayor ejemplo de fortaleza, amor y sacrificio. Gracias por enseñarme que, aun cuando el camino parecía no tener salida, siempre existía una forma de seguir adelante. Por cada esfuerzo silencioso y por cada dificultad que enfrentaron con valentía, incluso cuando por dentro también estaban luchando.

Admiro profundamente la manera en que, a pesar de los momentos difíciles, siempre encontraron la forma de hacer que todo pareciera más sencillo para mí, mostrándome los problemas como pequeños y enseñándome a no rendirme. Gracias por cada sacrificio, por su comprensión constante y por sus palabras de aliento, que fueron fundamentales para llegar hasta aquí.

Su esfuerzo, dedicación y ejemplo han sido mi mayor inspiración para perseverar y seguir luchando por mis sueños, aun en los momentos de incertidumbre. Todo lo que soy y lo que he logrado es reflejo de su amor y de su incansable compromiso por verme salir adelante. Este logro no es solo mío, es de ustedes, porque sin ustedes nada de esto habría sido posible.

Laura Carvajal

A Dios quien me dio la sabiduría, provisión e infinita gracia, toda la gloria y honra sea para ti.

A mis padres un especial agradecimiento por ser mi sostén, ejemplo de fuerza,
determinación y valentía. Han sido mi guía y mi mayor motivación.

A mis hermanos por todo su amor y apoyo incondicional en los momentos más importantes.

A mi familia por su compañía e inspiración en el cumplimiento de este sueño.

Paula Ríos

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director, Giovanni, por su acompañamiento constante, su disposición para orientarnos y por compartir su conocimiento a lo largo de todo el proceso. Su guía fue fundamental para darle rumbo y solidez a este proyecto.

A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, (CDMB), por brindarnos información clave y detallada sobre las propiedades del agua en la zona de estudio, así como por su apoyo con datos adicionales que resultaron esenciales para el desarrollo técnico de la investigación.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química, por su compromiso con nuestra formación profesional, por los conocimientos impartidos y por brindarnos las bases necesarias para afrontar los retos académicos y futuros desafíos en nuestra vida laboral.

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Marco conceptual	16
2.1 Índice de riesgo para la calidad del agua potable	19
2.2 Radiación solar como fuente energética	19
2.3 Localización geográfica	19
2.4 Población beneficiada	20
2.5 Etapas del proceso de potabilización	22
3. Metodología	23
4. Resultados	26
4.1 Diseño conceptual	26
4.1.1 Descripción del problema de diseño	26
4.1.2 Limitaciones y restricciones	28
4.1.3 Alternativas de diseño	29
4.1.3.1 Alternativas para la etapa de desinfección	31
4.1.3.1.1 Desinfección con energía solar térmica	31
4.1.3.1.2 Desinfección con radiación ultravioleta	32
4.1.3.1.3 Selección alternativa de desinfección	33
4.1.3.2 Selección alternativa de almacenamiento y distribución	34
4.1.4 Alternativas de abastecimiento energético	34
4.1.5 Sistema fotovoltaico	36
4.1.5.1 Consumo energético	37
4.1.5.2 Dimensionamiento	37
4.2 Diseño básico	38
4.2.1 Diagrama PFD	38
4.2.2 Diagrama P&ID	39
4.2.3 Análisis de seguridad HAZOP	42
4.2.4 Plot Plan	43
4.3 Evaluación financiera	44
4.3.1 Estimación de costos de capital (CAPEX)	44
4.3.2 Estimación de costos de operación (OPEX)	45
4.3.3 Flujo de caja e indicadores financieros	46
4.3.4 Análisis de sensibilidad	47
5. Conclusiones	49
6. Recomendaciones	51
Referencias	52
Apéndices	64

Lista de tablas

Tabla 1. Riesgo sanitario, recurso hídrico y energético en Municipios de Santander	20
Tabla 2. Etapas del proceso de potabilización de agua	22
Tabla 3. Limitaciones y restricciones	29
Tabla 4. Alternativas de diseño del proceso de potabilización	29
Tabla 5. Tipos de colectores solares	32
Tabla 6. Comparación de métodos de desinfección según criterios de evaluación	33
Tabla 7. Comparación cualitativa de alternativas de abastecimiento energético	35
Tabla 8. Comparación cuantitativa de alternativas de abastecimiento energético	35
Tabla 9. Elementos que conforman el diagrama P&ID	41
Tabla 10. Análisis HAZOP de las variables críticas	42
Tabla 11. Análisis de sensibilidad frente a la variación del precio de venta del agua	47
Tabla 12. Análisis de sensibilidad frente a la variación en el número de tanques de almacenamiento	48
Tabla 13. Clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA	64
Tabla 14. Criterios de evaluación para el método de promedios ponderados	64
Tabla 15. Factores determinantes para la selección de la población beneficiada	65
Tabla 16. Distribución poblacional y fuentes hídricas por vereda	65
Tabla 17. Análisis DOFA	69
Tabla 18. Características del desarenador	69
Tabla 19. Características del vertedero rectangular hidráulico	70
Tabla 20. Características del floculador	70
Tabla 21. Características del sedimentador	71
Tabla 22. Características del filtro	71
Tabla 23. Características del tanque de retrolavado	72
Tabla 24. Características de los colectores de tubo vacío	72
Tabla 25. Características de la lámpara ultravioleta	73
Tabla 26. Características de los tanques de almacenamiento	73
Tabla 27. Características de los paneles solares	73
Tabla 28. Características de las baterías	74
Tabla 29. Características del controlador	74
Tabla 30. Características del inversor	75
Tabla 31. Equipos con su consumo energético diario y potencia	75
Tabla 32. Características técnicas de los paneles solares cotizados	76

Tabla 33. Características técnicas de las baterías cotizadas	76
Tabla 34. Características técnicas de los inversores cotizados	77
Tabla 35. Especificaciones de las corrientes del proceso de potabilización	82
Tabla 36. Factores porcentuales de los valores de inversión de capital fijo	83
Tabla 37. Costo materia prima anual	83
Tabla 38. Costos mano de obra anual	84
Tabla 39. Costos de inversión (CAPEX)	84
Tabla 40. Costos de operación (OPEX)	85
Tabla 41. Flujo de caja	85

Lista de figuras

Figura 1. Zonas veredales del municipio de El Playón	21
Figura 2. Esquema metodología	25
Figura 3. Diagrama de entradas y salidas	28
Figura 4. Diagrama de flujo de proceso (PFD) del proceso de potabilización de agua	39
Figura 5. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del proceso de potabilización de agua	40
Figura 6. Plot Plan de la planta de potabilización de agua	44
Figura 7. Equipos con mayor contribución al CAPEX	45
Figura 8. Costos de operación	46
Figura 9. Flujo de caja	46
Figura 10. Horas Solar Pico	75
Figura 11. Diagrama de flujo de bloques (BFD) del sistema fotovoltaico	77
Figura 12. Diagrama de flujo de bloques (BFD) del proceso de potabilización de agua	79

Lista de apéndices

Apéndice A. Índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA)	64
Apéndice B. Método de selección localización	64
Apéndice C. Veredas del municipio de El Playón	65
Apéndice D. Normativa vigente	66
Apéndice E. Análisis DOFA	68
Apéndice F. Hojas de especificaciones de los equipos	69
Apéndice G. Sistema fotovoltaico	75
Apéndice H. Diagrama BFD del sistema de potabilización	78
Apéndice I. Balance de masa	79
Apéndice J. Análisis Financiero	83

Glosario

Aguas superficiales: Es cualquier cuerpo de agua que se encuentra en la superficie terrestre como ríos, lagos, arroyos, mares, quebradas, etc.

Colector solar: Es un dispositivo diseñado para captar la energía del sol, absorberla y con ella calentar la temperatura de un fluido interno.

Coliformes: Grupo amplio de bacterias que se encuentran comúnmente en el medio ambiente y en el tracto intestinal de animales y humanos.

Energía solar: Es aquella que se obtiene a partir del sol en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta) para generar energía térmica o eléctrica.

Energía solar fotovoltaica: Es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico.

Flóculos: Es una masa esponjosa o grumo formado por la unión de partículas finas suspendidas en un líquido.

Hidráulico: Operado por, movido por o que emplea agua u otros líquidos en movimiento.

HSP: Las horas Solar Pico (HSP) representan el número de horas durante el día en las que la radiación solar incidente sobre una superficie es equivalente a una irradiancia de 1000 W/m².

Irradiancia: Potencia de la energía solar que incide sobre una superficie por unidad de área en un instante determinado. Esta magnitud se mide en vatios por metro cuadrado (W/m²).

Módulo fotovoltaico: También conocido como panel solar, es un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas que convierten la radiación solar en energía eléctrica de corriente continua.

Potabilización: Es el proceso mediante el cual se trata el agua para que pueda ser consumida por los seres humanos sin que presente un riesgo para su salud.

Radiación difusa: Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre después de ser dispersada en la atmósfera. En días despejados o soleados puede representar aproximadamente el 15 % de la radiación global y va aumentando a medida que el cielo está más nublado.

Radiación incidente: Se refiere a la energía radiante total que llega a una superficie, que puede ser directa o difusa.

Sólidos suspendidos: Son partículas orgánicas e inorgánicas sólidas como arena, arcilla, microorganismos o residuos industriales suspendidas en el agua, con un tamaño generalmente superior a 2 micras, que no sedimentan rápidamente.

Turbidez: Falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido, más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez.

Resumen

Título: Análisis técnico-financiero para la potabilización de agua por medio de energía solar en veredas de Santander con deficiencia en el servicio*

Autores: Laura Daniel Carvajal Pinzón, María Paula Ríos Pinzón**

Palabras clave: Potabilización, energía solar, sistema fotovoltaico, agua, sostenibilidad.

Descripción: El presente trabajo de grado tiene como objetivo principal desarrollar un análisis técnico y financiero para la implementación de un sistema de potabilización de agua mediante energía solar, tomando como caso de estudio la vereda La Ceiba, ubicada en el municipio de El Playón, Santander. Esta propuesta está orientada a beneficiar aproximadamente a 100 familias de la zona, donde actualmente se presenta un déficit en el acceso a agua potable.

Para ello, se incluyó un diagnóstico de la calidad y disponibilidad del recurso hídrico, la evaluación del potencial solar de la zona, el diseño del proceso de tratamiento y el análisis del flujo de caja proyectado. El sistema de potabilización propuesto considera los procesos de desarenación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, desinfección por radiación ultravioleta y almacenamiento y distribución, integradas en un diseño autónomo alimentado por paneles solares. El diseño resultante tiene capacidad para tratar hasta 58.56 m³/día, cumpliendo con los estándares de calidad de agua potable requeridos.

La evaluación financiera reveló un valor presente neto (VPN) de \$ 474,765,509, una tasa interna de retorno (TIR) del 20%, un retorno de inversión (ROI) del 64.5% y un periodo de recuperación (*Payback*) de 5 años. Estos indicadores confirman la viabilidad económica del proyecto. Además, el uso de energía solar garantiza la autonomía del sistema aportando sostenibilidad al suministro de agua potable en la comunidad.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Doctor en Ingeniería Química

Abstract

Title: Technical and financial analysis for potabilization using solar energy in a rural area of Santander with a deficient water service*

Authors: Laura Daniel Carvajal Pinzón, María Paula Ríos Pinzón**

Keywords: Potabilization, solar energy, photovoltaic system, water, sustainability.

Description: This undergraduate thesis aims to develop a technical and financial analysis for the implementation of a solar-powered potabilization system, using the La Ceiba village, located in the municipality of El Playón, Santander, as a case study. This proposal is intended to benefit approximately 100 families in the area, which currently suffers from a lack of access to potable water.

To this end, a diagnosis of the quality and availability of the water resource was included, along with an evaluation of the area's solar potential, the design of the treatment process, and an analysis of the projected cash flow. The proposed potabilization system incorporates the processes of sand removal, coagulation-flocculation, sedimentation, filtration, ultraviolet disinfection, and storage and distribution, all integrated into a self-contained system powered by solar panels. The resulting design has the capacity to treat up to 58.56 m³/day, meeting the required drinking water quality standards.

The financial evaluation revealed a net present value (NPV) of \$ 474,765,509, an internal rate of return (IRR) of 20%, a return on investment (ROI) of 64.5%, and a payback period of 5 years. These indicators confirm the project's economic viability. Furthermore, the use of solar energy ensures the system's autonomy, contributing to the sustainability of the community's drinking water supply.

*Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Giovanni Morales Medina. PhD in Chemical Engineering

Introducción

El agua es un recurso vital que contribuye al bienestar humano, el equilibrio de los ecosistemas y el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, a pesar de su abundancia en ríos, mares y lagos, sigue siendo un bien escaso debido a las brechas de desigualdad en la población (Iberdrola, 2026). Para el año 2023 uno de los informes en materia de agua potable, saneamiento e higiene de la organización mundial de la salud y la UNICEF, indicó que en el mundo hay alrededor de 2,200 millones de personas que carecen de acceso a un servicio de agua potable y 3,500 millones no cuentan con servicios de saneamiento seguros, viéndose obligadas a beber agua contaminada y acarreado a su vez problemas de salud pública (UN Water, 2023).

En Colombia, aunque el rendimiento hídrico es superior al promedio mundial, la disponibilidad de agua potable es limitada en zonas costeras y descentralizadas donde la falta de recursos económicos y condiciones geográficas dificultan el acceso a un servicio de calidad. Así mismo, en muchas zonas rurales las fuentes hídricas enfrentan una creciente contaminación asociadas a prácticas no sostenibles en la agricultura, la ganadería y la minería, además de la carencia de infraestructura para la gestión de los residuos sólidos, haciendo que los sistemas de abastecimiento sean cada vez más vulnerables y se comprometa la calidad en el suministro de agua a la población (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

El uso de la energía solar constituye una alternativa sostenible, ya que permite aprovechar un recurso renovable, libre de emisiones e inagotable, además de reducir la dependencia de fuentes fósiles (Maldonado, et al., 2019). El país presenta una radiación solar importante que puede ser utilizada en la potabilización de agua de efluentes hídricos, en línea con el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) No. 6, orientado a garantizar el acceso universal al agua potable y al saneamiento (Organización de las Naciones Unidas, s. f.), promoviendo así el bienestar social. Según el Atlas

de Radiación Solar, los valores de radiación global al suroriente del departamento de Santander rondan hacia el 4.5 kWh/m² por día, lo que favorece su uso en sistemas de tratamiento de agua (IDEAM & UPME, 2005).

Este aprovechamiento puede realizarse mediante tecnologías basadas en energía solar térmica como colectores solares y por medio de sistemas fotovoltaicos que convierten la radiación solar en energía eléctrica para alimentar los equipos con demanda energética. En los últimos años, Colombia ha acelerado la adopción de la energía solar fotovoltaica como una alternativa limpia orientada a la transición energética y a la reducción progresiva del uso de los combustibles fósiles en el sistema eléctrico nacional. El marco normativo fue establecido con la Ley 1715 de 2014, la cual fomenta el uso de fuentes no convencionales de energía renovable ofreciendo incentivos y beneficios fiscales para proyectos de generación solar (Congreso de la República de Colombia, 2014).

Teniendo en cuenta la problemática identificada y reconociendo el potencial que ofrece la radiación solar en Colombia como fuente energética, en el presente documento se plantean y evalúan diferentes alternativas para la potabilización del agua orientadas a que las comunidades rurales puedan disponer de agua potable de manera sostenible. La pregunta de investigación fue ¿Cuál es la factibilidad técnica y financiera de aplicar un sistema de potabilización de agua basado exclusivamente en el potencial de la radiación solar?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un análisis técnico y financiero para la potabilización de agua por medio de energía solar en una vereda de Santander, teniendo en cuenta la capacidad de operación, la disponibilidad de recursos y la sostenibilidad a largo plazo.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar la disponibilidad de fuentes hídricas y solares en veredas de Santander con deficiencia de agua potable, con base en fuentes de información gubernamentales y de ONG, seleccionando los lugares con mayor potencial de aplicación del diseño.
- Proponer un diseño básico de un sistema de potabilización de agua, mediante la selección de tecnologías disponibles en el mercado y el uso de la radiación solar, la aplicación de ecuaciones de balance, heurísticas, correlaciones empíricas, los principios inherentemente seguros, evaluando la viabilidad técnica de operación para el lugar seleccionado.
- Evaluar el valor presente neto, la tasa interna de retorno, el tiempo (*Payback*) y el retorno de la inversión (ROI) del sistema diseñado, teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como beneficios en un flujo de caja, con el propósito de determinar la rentabilidad a 20 años.

2. Marco conceptual

La disponibilidad de agua potable se ha vuelto cada vez más limitada obligando al consumo de agua de baja calidad que representa graves riesgos para la salud, provocando enfermedades e incluso la muerte, es por esta razón que se opta por desarrollar un sistema de potabilización de agua que emplee alternativas sostenibles como el uso de la energía solar. Esta opción se presenta como una solución eficaz y amigable con el medio ambiente que facilita el acceso al agua limpia especialmente en zonas rurales.

Para diseñar un sistema de potabilización de agua mediante energía solar se requieren de diversas tecnologías como: desalinización solar, fotocátalisis solar, desinfección solar y procesos avanzados, que al integrarse en un sistema garantizan la calidad del agua y la eficiencia energética para llevar a cabo el proceso de potabilización (Zhang et al., 2018).

Desalinización solar: La desalinización de agua de mar y agua salobre es ampliamente reconocida como una alternativa viable para proveer agua dulce a numerosas regiones afectadas por la falta de agua. En sistemas de desalinización solar directa, la energía solar se utiliza directamente para la producción de agua destilada en colectores solares, siendo el destilador solar la tecnología más representativa; mientras que, en sistemas de desalinización solar indirecta, la energía solar es cosechada ya sea por colectores solares térmicos para proporcionar calor o paneles fotovoltaicos para generar electricidad.

Fotocatálisis solar: La fotocatalisis es una de las tecnologías más eficaces para la mineralización de compuestos orgánicos refractarios y patógenos del agua entre los procesos de oxidación avanzada (PAO). Los principales tipos de fotocatalisis, en términos de fundamentos, incluyen la fotocatalisis heterogénea, que emplea catalizadores semiconductores para el tratamiento del agua, y la fotocatalisis homogénea, que se refiere principalmente al proceso foto-Fenton.

Desinfección solar: La desinfección solar del agua se ha considerado como una alternativa sostenible para la eliminación de microorganismos patógenos en sistemas de potabilización, especialmente en regiones con acceso limitado a infraestructura convencional. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los sistemas que emplean lámparas ultravioletas (UV) alimentadas mediante energía solar fotovoltaica, los colectores solares térmicos y métodos de desinfección solar directa como SODIS (Desinfección Solar del Agua), los cuales aprovechan la radiación solar para inactivar bacterias, virus y otros microorganismos presentes en el agua (McGuigan et al., 2012).

Un ejemplo representativo es el sistema propuesto por (Mawale et al., 2024) que utiliza paneles solares para alimentar una bomba de alta presión que impulsa el proceso de ósmosis

inversa. Además, incorpora sensores de turbidez y un microcontrolador Arduino para monitorear la calidad del agua y automatizar el proceso.

Otro ejemplo es el sistema desarrollado por (Ingle et al., 2024) que usa como alimentación la energía solar e integra varias etapas de purificación como: filtración por sedimentos, carbón activado y membranas de ósmosis inversa, combinadas con tecnologías de desinfección solar y calentamiento por resistencias, teniendo en cuenta cálculos de eficiencia energética, lo cual permite optimizar tanto la capacidad del panel como la autonomía de la batería.

En ambas propuestas se obtuvieron resultados satisfactorios teniendo un alto rendimiento en la producción de agua purificada, así como una viabilidad técnica y económica para su implementación a mayor escala. Asimismo, los autores destacan que el sistema es altamente eficaz para eliminar sales disueltas, bacterias y otros contaminantes, produciendo agua que cumple con los estándares de potabilidad.

En relación con tecnologías específicas de desinfección solar, se han desarrollado diversos sistemas experimentales que emplean radiación ultravioleta alimentada mediante energía solar. Un ejemplo es el estudio presentado por Kumar et al. (2023), en el cual se implementó un sistema de desinfección de agua mediante lámparas UV alimentadas por paneles solares y baterías. Durante las pruebas experimentales, el sistema logró una eficacia del 99.9%, en inactivación de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* y *Pseudomonas aeruginosa*.

De forma similar, diversos estudios han realizado investigaciones experimentales sobre sistemas basados en colectores solares térmicos para la desinfección del agua mediante procesos de pasteurización solar. Los resultados obtenidos demuestran que estos sistemas son capaces de elevar la temperatura del agua hasta niveles adecuados para la eliminación de agentes patógenos presentes en el agua (Da Silva et al., 2016).

2.1 Índice de riesgo para la calidad del agua potable

El agua sin tratamiento previo, en su estado natural, puede poner en peligro la salud de las personas, al servir como vehículo para la transmisión de virus, bacterias, parásitos y enfermedades infecciosas. El índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA) considera los puntajes de riesgo asociados al incumplimiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas analizadas en las muestras de vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano bajo la resolución 2115 de 2007 (Ver Apéndice A).

2.2 Radiación solar como fuente energética

La radiación solar es la energía electromagnética emitida por el Sol y es la fuente de energía más abundante y renovable disponible en la Tierra, varía según la ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas y se propaga en forma de ondas electromagnéticas, su composición se describe mediante el espectro solar, el cual se encuentra en un rango de longitudes de onda que va desde la radiación ultravioleta, pasando por el espectro visible, hasta la infrarroja (Sepulveda, 2014). Al interactuar con la atmósfera y la superficie terrestre, se transmite mediante procesos de radiación y difusión, influyendo en fenómenos tales como la evaporación, el derretimiento de nieve y el desarrollo de la vida, lo que la convierte en una variable fundamental en meteorología, agronomía, hidrología y biología (Gonzales, 2021). Además, puede aprovecharse directamente mediante dos tipos de sistemas: los que convierten la radiación solar en electricidad mediante tecnología fotovoltaica y los que se utilizan para la producción de energía térmica (Gonzales, 2021).

2.3 Localización geográfica

En el caso del departamento de Santander, aunque todos los municipios cuentan con sistemas de acueducto, no todos se encuentran en operación. Esta situación hace indispensable identificar los territorios que carecen de agua potable con el fin de brindar soluciones efectivas a

las comunidades. De acuerdo con la información reportada por Mateus (2022) en el informe ambiental titulado *El estado de los recursos naturales en el departamento de Santander*, se evidenció que los municipios del Playón, Santa Helena del Opón y Sucre presentan acueductos que no se encuentran en funcionamiento.

Tabla 1

Riesgo sanitario, recurso hídrico y energético en Municipios de Santander

Municipio	Población beneficiada	Fuente hídrica principal	IRCA	Nivel de riesgo	Radiación solar [kWh/ m²]	Altitud [msnm]
El Playón	46,760	Rio Playonero, Quebrada La naranjera	91%	Inviabile sanitaria mente	4.26	1,049
Santa Helena Del Opón	4,329	Quebrada Las Cruces	68.7%	Alto	3.34	900
Sucre	8,998	Quebrada Alto Jazmín	91%	Inviabile sanitaria mente	3.63	1,044

Nota: Los datos del IRCA se obtuvieron del boletín de vigilancia de la Calidad del agua para el consumo humano según el reporte publicado en julio del 2024. Con base en los porcentajes y niveles de riesgo reportados se le asigno a cada municipio su respectiva clasificación.

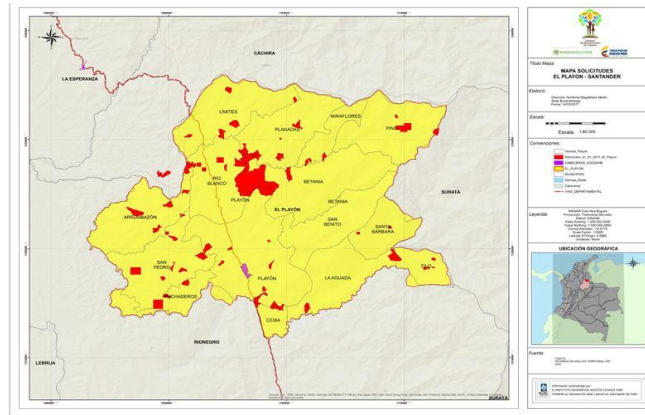
2.4 Población beneficiada

Para seleccionar la ubicación más adecuada del sistema de potabilización se aplicó el método de promedios ponderados, considerando factores determinantes con diferentes niveles de importancia de manera que el resultado final refleje la alternativa más conveniente (Ver apéndice B). Como resultado, se estableció que el municipio de El Playón es la mejor alternativa, sustentado en la necesidad de atender una problemática de riesgo sanitario y a su vez aprovechar las condiciones favorables del recurso energético. Este municipio se encuentra en el departamento de Santander, aproximadamente a 41 kilómetros al norte de Bucaramanga. Su territorio abarca cerca de 467 km² y se localiza a una altitud de 600 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con

Cáchira, al oriente con Suratá, y al sur y occidente con los municipios de Rionegro y Matanza. El clima es cálido, con una temperatura media cercana a los 24 °C. El municipio se encuentra en la cuenca del río Lebrija y cuenta con diversas microcuencas y quebradas que abastecen a sus veredas.

Figura 1

Zonas veredales del municipio de El Playón



Nota. Adaptado de Mapa del municipio de El Playón, Santander [Mapa], por Alcaldía Municipal de El Playón, 2023. Nuestro municipio. <http://www.elplayon-santander.gov.co/municipio/nuestro-municipio>

Según la OMS, una persona consume en promedio 100 litros de agua al día. Sin embargo, de acuerdo con datos del Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, el consumo real en esta ciudad es de aproximadamente 122 litros diarios por persona. Para el cálculo de la demanda de agua en las veredas se tomó como referencia este último valor.

Para la selección de la vereda con mayor viabilidad en la ejecución del proyecto, se priorizó aquellas con menor población y con cercanía a fuentes hídricas de tipo quebrada (Ver Apéndice C), debido a que su flujo se mantiene constante durante todo el año al estar alimentadas por manantiales subterráneos o nacimientos de montaña lo que favorece la calidad del agua, pues la probabilidad de que arrastre sedimentos o contaminantes es baja y aunque su caudal pueda ser

relativamente menor, resultan más confiables y permanentes en comparación con los caños, cuyo caudal es estacional. Con base en estos criterios, la zona seleccionada para implementar la propuesta es la vereda La Ceiba con acceso a la Quebrada La naranjera.

2.5 Etapas del proceso de potabilización

La potabilización del agua es el proceso mediante el cual se eliminan contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua cruda con el fin de garantizar que sea apta para el consumo humano y la preparación de alimentos. Este tratamiento busca remover metales pesados, sólidos suspendidos, algas, bacterias y virus que puedan representar un riesgo para la salud. Este proceso se desarrolla a través de las siguientes etapas presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2

Etapas del proceso de potabilización de agua

Etapa	Función	Tipos o Procesos	Referencias
Captación	Consiste en recoger el agua directamente de ríos, quebradas, lagos, lagunas o embalses para ponerla al alcance de la comunidad. Para que funcione bien, es fundamental elegir adecuadamente el punto de toma, definir el tipo de tubería y la instalación que se usará.	Toma lateral: Su función principal es desviar parte del caudal hacia un canal de conducción de forma estable, minimizando la entrada de sedimentos, es la estructura más utilizada en aguas superficiales. Toma de fondo o tirolesa: Consiste en extraer agua desde la zona inferior del cauce, modificando las condiciones naturales de escurrimiento mediante una cámara transversal de captación.	(Stauffer y Spuhler, 2023; Magne, 2008).
Pre-tratamiento	Su función es acondicionar el agua cruda para proteger los equipos y facilitar las fases posteriores.	Cribado: Consiste en el uso de rejillas para retener sólidos grandes como ramas, plásticos o telas que podrían obstruir válvulas y tuberías. Desarenación: Separa partículas finas como arena y grasas para evitar la acumulación de sedimentos en las conducciones. Precloración: Aplica una dosis inicial de cloro con el fin de oxidar compuestos y reducir la carga bacteriana.	(Aqualep, s.f.).
Clarificación	Es una de las etapas centrales en el tratamiento de agua, donde se reduce la turbidez y se facilita la eliminación de microorganismos.	Coagulación: Se agrega un coagulante al agua para desestabilizar las partículas suspendidas y promover la formación de flóculos. Floculación: Consiste en una agitación suave que favorece que esas partículas se	(Cropaia, 2024; Piskura, 2025; Pérez, 1981).

		agrupen y formen flóculos de mayor tamaño y peso, más fáciles de separar Sedimentación: Los flóculos se aglomeran y sedimentan como partículas más pesadas por acción de la gravedad.	
Filtración	Permite retener las partículas finas que no fueron eliminadas en la sedimentación, mediante el paso del agua a través de un medio poroso. Generalmente, el lecho filtrante está compuesto por capas de arena y grava con diferentes granulometrías.	Filtros de gravedad: Su superficie se encuentra expuesta al medio ambiente y el empuje está dado por acción de la gravedad sobre el agua. Se caracterizan por su diseño sencillo, bajo costo de operación y reducido consumo energético. Filtros a presión: Se conocen como unidades cerradas herméticamente que incorporan cartuchos filtrantes reemplazables, a través de los cuales el agua es forzada bajo la presión hidráulica a la que está sometida la unidad.	(Lozano y Lozano, 2015).
Desinfección	Se garantiza la inactivación de los microorganismos patógenos presentes en el agua cruda que no fueron eliminados en los procesos previos de tratamiento.	Desinfectantes: Los más empleados en sistemas de potabilización son el cloro, el dióxido de cloro y el ozono Métodos físicos: Desinfección solar y la radiación ultravioleta.	(Lozano y Lozano, 2015).
Almacenamiento y Distribución	El agua ya tratada se conserva en estructuras diseñadas para regular el caudal, asegurar la continuidad del suministro y permitir la compensación de variaciones en la demanda.	Tanques superficiales: Se posicionan a nivel del suelo o ligeramente enterrados de tal manera que se garantice la presión mínima en todos los puntos del sistema. Tanques elevados: Se encuentran instalados sobre torres o estructuras que permiten que el agua se distribuya por gravedad.	(Magne, 2008).

3. Metodología

La metodología de este proyecto establece tres fases principales para diseñar y evaluar un sistema de potabilización de agua alimentado con energía solar en una vereda de Santander.

Fase 1: Identificación fuentes hídricas y solares

Actividad 1. Diagnóstico de las condiciones de radiación solar, por medio del atlas de radiación solar y fuentes oficiales, para estimar el potencial energético disponible en los municipios de Santander.

Actividad 2. Diagnóstico de disponibilidad de fuentes hídricas y caracterización de la población beneficiaria en municipios de Santander.

Actividad 3. Selección de la zona con mayor potencial, considerando la radiación solar y el índice de riesgo de la calidad del agua.

Actividad 4. Descripción del problema de diseño, incluyendo calidad de agua cruda, caudal requerido y normativa aplicable.

Actividad 5. Identificación de limitaciones y restricciones que condicionan el sistema.

Fase 2: Diseño básico del sistema de potabilización

Actividad 1. Desarrollo del diseño básico del sistema de potabilización, definiendo las etapas de tratamiento y su integración con la energía solar.

Actividad 2. Selección de la alternativa tecnológica y dimensionamiento de equipos principales, incluyendo unidades de tratamiento y sistema fotovoltaico.

Actividad 3. Elaboración del diagrama de flujo de procesos (PFD) y del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).

Actividad 4. Elaboración del Plot Plan.

Fase 3: Evaluación financiera

Actividad 1. Estimación de los costos asociados al proyecto inversión inicial (CAPEX) y costos de operación (OPEX). Según la Ley 1715 de 2014 los equipos de la planta están excluidos del impuesto a las ventas (IVA), además de la exención del pago de derechos arancelarios por tratarse de un proyecto que fomenta el uso de la energía procedente de fuentes no convencionales. Adicionalmente, los costos asociados al transporte dentro del territorio nacional fueron asumidos como el 3% y los costos de instalación como el 10% del costo unitario por equipos.

Actividad 2. Proyección del flujo de caja considerando los siguientes supuestos: Horizonte del proyecto a 20 años, impuesto de renta del 35%, inflación promedio de los últimos 10 años

estimada en el 6% y aplicación de depreciación acelerada del 33.33% para paneles solares, baterías, controladores e inversor del sistema fotovoltaico durante los tres primeros años del proyecto.

Actividad 3. Cálculo de indicadores financieros como valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), retorno de inversión (ROI) y periodo de recuperación de la inversión (*Payback*) para evaluar la viabilidad del proyecto. El valor del VPN se determinó a partir de la suma de los flujos de caja netos F_t en cada periodo t , descontados a una tasa r , menos la inversión inicial C_0 según la Ecuación 1, por su parte, la TIR se calculó para medir la rentabilidad del proyecto, haciendo que el VPN sea igual a 0. El *Payback* se estimó con la Ecuación 2, donde a representa el último año previo a la recuperación, b el flujo acumulado hasta ese momento y F_a el flujo del año de recuperación. Finalmente, el ROI se calculó a partir de la Ecuación 3, como la relación entre el beneficio neto generado y la inversión inicial, expresado en porcentaje.

$$VPN = \sum \frac{F_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (\text{Ec.1})$$

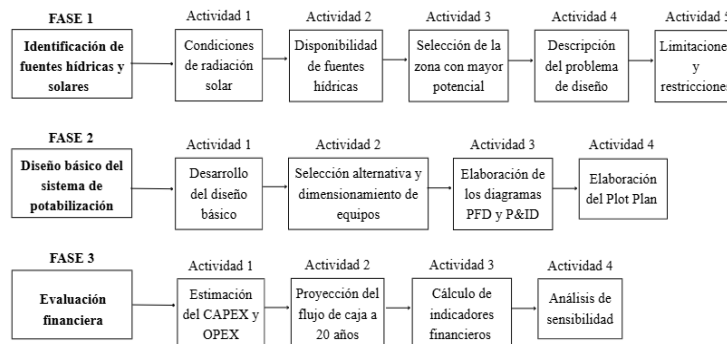
$$Payback = a + \frac{C_0 - b}{F_a} \quad (\text{Ec.2})$$

$$ROI = \frac{VPN}{C_0} * 100 \quad (\text{Ec.3})$$

Actividad 4. Análisis de sensibilidad considerando variaciones en costos y capacidad del sistema de almacenamiento.

Figura 2

Esquema metodología



4. Resultados

4.1 Diseño conceptual

4.1.1 Descripción del problema de diseño

El problema de diseño consiste en desarrollar un sistema de potabilización de agua en la vereda la Ceiba del municipio de El Playón, Santander, incorporando el uso de la radiación solar, con un promedio de aproximadamente 4.26 kWh/m²·día, garantizando así el suministro de agua apta para consumo humano establecidos en la Resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1575 de 2007.

El alcance del diseño comprende desde la etapa de pretratamiento hasta el almacenamiento y distribución del agua tratada. No se incluye el dimensionamiento de la etapa de captación, debido a que implica un análisis hidráulico y estructural asociado a la interacción directa con la fuente hídrica y las condiciones del terreno.

Se toma como una dotación de 122 L/persona·día, considerando una población estimada de 400 habitantes, lo que corresponde a un caudal medio diario de 48.8 m³/día y un caudal máximo diario de 58.56 m³/día. Este último valor representa el caudal máximo requerido para satisfacer la demanda de la población y, por tanto, se establece como el valor objetivo que el sistema debe garantizar a la salida del proceso de tratamiento. El sistema operará 8 horas al día, pero la comunidad se abastecerá por las 24 horas del día, considerando el escenario de mayor demanda diaria proyectada, con el fin de garantizar la capacidad operativa del sistema en condiciones críticas, asegurando continuidad y estabilidad en la prestación del servicio

El agua cruda presenta condiciones que representan un riesgo sanitario, con valores promedio de turbidez de 35.76 NTU, pH de 7.48, sólidos suspendidos de 101.23 mg/L y una elevada carga microbiológica (171,668 NMP/100 mL de coliformes totales y 52,317 NMP/100 mL de coliformes fecales). Estos datos fueron reportados por la CDMB, tomando como referencia

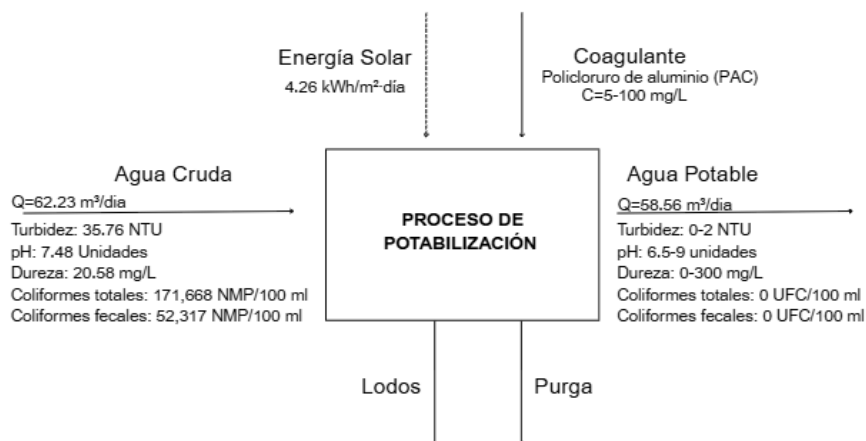
el punto PY-02A de la estación Puente San Alonso, ubicada en la fuente hídrica del río Playonero, en el municipio de El Playón.

La selección de este punto como referencia es debido a la ausencia de información fisicoquímica y microbiológica de la quebrada La Naranjera. Sin embargo, ambas fuentes hídricas pertenecen a la misma cuenca hidrográfica, siendo el río Playonero la fuente principal de la cual derivan varias microcuencas del sector, presentando condiciones climáticas, geológicas y de uso del suelo similares, lo que permite asumir que los parámetros de calidad del agua no difieren significativamente en términos generales.

El sistema incorpora un esquema de abastecimiento energético mediante radiación solar, utilizada como fuente energética para el sistema fotovoltaico que alimenta los equipos eléctricos de la planta, garantizando la autonomía energética de la vereda.

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se consideran las horas solares pico (HSP) como parámetro base (Ver Figura 10 del apéndice F). El valor promedio anual es de 4.42 horas, mientras que el valor crítico estimado es de 3.96 correspondiente al mes de noviembre, cuando se presenta la menor disponibilidad solar. Estos valores se obtienen a partir de PVGIS, una herramienta de estimación solar que combina diferentes bases de datos. Este valor crítico se considera como condición del diseño energético, garantizando que el sistema pueda cubrir la demanda eléctrica incluso en escenarios de menor irradiación. Las HSP permiten estimar la energía diaria generada por los paneles solares y asegurar que el sistema garantice el suministro necesario para la operación continua del proceso.

A partir de las condiciones definidas, se presenta el diagrama de entradas y salidas del sistema de potabilización, el cual permite identificar las corrientes principales que intervienen en el proceso.

Figura 3*Diagrama de entradas y salidas*

Como corrientes de entrada se consideran, el agua cruda que ingresa al sistema de potabilización, la radiación solar utilizada como fuente energética primaria para el sistema fotovoltaico y el coagulante incorporado durante el proceso de coagulación. Como corriente de salida principal se obtiene agua potable apta para consumo humano, resultado de las etapas de potabilización seleccionadas. Asimismo, el sistema genera corrientes residuales compuestas por los lodos removidos en la sedimentación y las purgas operativas correspondientes a los drenajes y descargas de las unidades de proceso. Sin embargo, estas corrientes no fueron cuantificadas debido a que su estimación requiere información adicional como parámetros que dependen del diseño y características del agua.

4.1.2 Limitaciones y restricciones

La Tabla 3 presenta las principales limitaciones y restricciones identificadas para el diseño, implementación y operación del sistema de potabilización de agua, considerando aspectos ambientales, económicos, técnicos y sociales, así como las normativas vigentes en Colombia (Ver Apéndice D), que pueden influir en la viabilidad y sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Tabla 3

Limitaciones y restricciones

Factor	Limitaciones	Restricciones	Referencias
Ambiental	Incremento de la turbidez y contaminantes en épocas de lluvias.	Necesidad de obtener concesión de aguas por parte de la autoridad ambiental.	(Superservicios, 2022; Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)
	Variación estacional en el caudal de la quebrada.	Cumplimiento de la normativa ambiental para el manejo y disposición final de los lodos provenientes de la etapa de sedimentación.	
	Afectación de componentes eléctricos por condiciones de alta humedad.		
Económico	Alta inversión inicial en el sistema de potabilización y fotovoltaico.	Capacidad limitada de pago de la población beneficiada.	(CRA, 2019)
	Costos logísticos adicionales por transporte de insumos e infraestructura a zona rural.	Viabilidad económica demostrada mediante el análisis de indicadores financieros.	
Técnico	Dependencia de proveedores para obtener materias primas y repuestos.	Necesidad de que los parámetros de calidad del agua tratada cumplan los estándares microbiológicos establecidos.	(Minprotección y MAVDT, 2007; Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)
	Disminución de la eficiencia energética por variabilidad de la radiación solar.	Requerimiento de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos con el fin de garantizar la continuidad operativa.	
Social	Requerimiento de capacitación y concientización comunitaria para fortalecer la apropiación.	Dependencia de la gestión comunitaria y de la aceptación de los habitantes locales para la implementación del sistema.	(Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

4.1.3 Alternativas de diseño

En la Tabla 4 se presentan las alternativas propuestas para el diseño del sistema de potabilización teniendo en cuenta las etapas de pretratamiento, clarificación, filtración, desinfección, almacenamiento y distribución. El desglose de las especificaciones de diseño para cada equipo se encuentra en el Apéndice F.

Tabla 4

Alternativas de diseño del proceso de potabilización

Pretratamiento		
Tamices para cribado	Unidades de remoción de arena para desarenación	Bombas para precloración

Clarificación		
Coagulación	Floculación	Sedimentación
Mezclador mecánico	Floculador de flujo horizontal	Sedimentador convencional
Mezclador hidráulico	Floculador de flujo vertical	Clarificador lamelar
Filtración		
Filtro por gravedad		Filtro a presión
Desinfección		
Colector solar		Lámpara UV
Almacenamiento y distribución		
Tanque superficial		Tanque elevado

Para la etapa de pretratamiento se consideró aplicar el proceso de desarenación ya que permite remover partículas sólidas que podrían afectar el funcionamiento del sistema, lo que contribuye a prolongar la vida útil de los equipos al prevenir obstrucciones y fallas operativas. (Boss Tech, s. f.). Por otro lado, la etapa de clarificación se seccionó en tres procesos: coagulación, floculación y sedimentación. En primera instancia, para lograr la dispersión del coagulante se consideraron mezcladores hidráulicos y mecánicos, sin embargo, no es común implementar este último por los elevados costos de consumo eléctrico, mantenimiento y cambio de piezas, por lo cual se optó por dimensionar un mezclador hidráulico de tipo vertedero rectangular, aplicable para caudales entre 0.1 y 500 L/s. De acuerdo con las características fisicoquímicas del agua del río Playonero, y los datos reportados por la CDMB, se seleccionó el policloruro de aluminio (PAC) como el coagulante más adecuado, ya que trabaja eficazmente con dosis entre 5 y 100 mg/L y con un pH óptimo mayor a 7. Dado que el pH promedio del agua es de 7.48, este se encuentra dentro del rango óptimo de operación (Rodríguez, 2024, p. 61). En el proceso de floculación se seleccionó un floculador hidráulico de tabiques con flujo horizontal, debido a que es comúnmente utilizado en sistemas con caudales inferiores a 50 L/s a diferencia del floculador hidráulico de flujo vertical que opera con caudales mayores, entre 50 y 1,000 L/s. En cuanto al proceso de sedimentación, el equipo más apropiado corresponde a un sedimentador lamelar por su alta eficiencia en la remoción

de sólidos suspendidos y menor requerimiento de espacio por trabajar con un régimen laminar considerando un Re entre 100 y 500 en comparación de los sedimentadores convencionales que trabajan con un régimen turbulento con valores entre 10,000 y 25,000 (Lozano y Lozano, 2015).

Para garantizar la retención de las partículas de turbidez remanente y los microflóculos que no fueron removidos en la floculación y sedimentación, así como los metales oxidados y una fracción importante de microorganismos resistentes a la desinfección (Lozano y Lozano, 2015), se optó por implementar un filtro a presión con un lecho dual de arena y antracita soportado en grava por ser la alternativa más compacta y de fácil instalación, ya que aunque los filtros rápidos a gravedad son los más usados en plantas convencionales (Romero, 2006), requieren de amplias estructuras en concreto con sistemas de drenaje y canaletas de lavado lo que incrementa los costos de construcción.

4.1.3.1 Alternativas para la etapa de desinfección. Para la etapa de desinfección del sistema de potabilización propuesto se evaluaron dos alternativas tecnológicas: la lámpara UV y los colectores solares térmicos. Ambas permiten la inactivación de microorganismos patógenos presentes en el agua, aunque operan mediante mecanismos distintos. La lámpara UV actúa mediante radiación electromagnética que altera el ADN de los microorganismos e impide su reproducción, mientras que los colectores solares aprovechan la energía térmica del sol para elevar la temperatura del agua hasta niveles suficientes para lograr su pasteurización.

4.1.3.1.1 Desinfección con energía solar térmica. La energía solar térmica hace referencia a la conversión de energía solar en calor técnicamente utilizable, ayudando a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo la sostenibilidad. Los dispositivos que absorben la radiación solar y la convierte en calor útil son llamados colectores solares térmicos utilizados principalmente para calentar fluidos y espacios. Sus principales componentes incluyen placa

absorbente, cubierta transparente, aislamiento, fluido de transferencia de calor y tuberías o tubos (Hulatt, 2024). Se distinguen principalmente tres tipos que son relevantes para aplicaciones de calentamiento de fluidos: colectores de placa plana, colectores de tubo vacío, y colectores parabólicos (de concentración).

El proceso de desinfección del agua mediante calor o radiación es conocido como pasteurización solar. En este método, el agua alcanza temperaturas que oscilan entre 65 °C y 75 °C, rango suficiente para inactivar la mayoría de los microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos (Emergency WASH, s.f.). Dado a que el proceso requiere alcanzar y mantener temperaturas específicas para la inactivación de los microorganismos, se compararon distintos tipos de colectores solares para seleccionar el más eficiente.

Tabla 5

Tipos de colectores solares

Criterios	Colector de Placa Plana	Colector de Tubo Vacío	Colector Parabólico	Referencias
Costo [US\$]	467- 1,558	597-1,688	2,078-5,195	(Ecoled, s. f.)
Eficiencia [%]	33-54	38-61	60-80	(Venkatachalam & Solomon, 2018)
Temperaturas [°C]	30-80	50-200	150-400	(Venkatachalam & Solomon, 2018)
Complejidad de Instalación	Baja	Moderada	Compleja	(SolarSquare, 2025)
Mantenimiento	Bajo	Medio	Alto	(SolarSquare, 2025)

4.1.3.1.2 Desinfección con radiación ultravioleta. La desinfección del agua mediante radiación ultravioleta tiene lugar en lámparas germicidas diseñadas para emitir radiación en la longitud de onda de 200 a 280 nm dentro del espectro UV-C. Cuando la luz ultravioleta penetra sobre los microorganismos patógenos y es absorbida por sus ácidos nucleicos (ADN y ARN) provoca una alteración en la estructura molecular, lo que impide su replicación (Tarrán, 2002). Los factores que influyen en la adecuada transmisión de la dosis UV a virus, bacterias y protozoos

incluyen la turbidez del agua, la concentración de sólidos suspendidos, el envejecimiento de la lámpara, el diseño del reactor y la presencia de incrustaciones en el tubo de cuarzo que protege la lámpara (Wright y Cairns, 1998). Una emisión de radiación ultravioleta con una longitud de onda cercana a 254 nm es la condición óptima para la absorción de la luz por el ácido nucleico en la célula, permitiendo alcanzar eficiencias de inactivación de hasta el 99.99% bajo condiciones adecuadas de operación (Tarrán, 2002). Por lo general, la lámpara UV está conformada por mercurio y un gas inerte en un tubo de transmisión de rayos ultravioleta elaborado de cuarzo (Díaz, 2009) y funciona de tal manera que la descarga de corriente eléctrica entre los polos de la lámpara provoque que los átomos del gas incrementen su energía y que los electrones de órbitas externas desciendan a órbitas de menor nivel emitiendo la energía sobrante en forma de radiación UV (Amézquita y Carvajal, 2022). A diferencia de los desinfectantes químicos como el cloro, este tipo de desinfección no genera subproductos químicos y no altera el olor ni el sabor del agua, lo que la convierte en una opción ambientalmente limpia y de bajo mantenimiento.

4.1.3.1.3 Selección alternativa de desinfección. Para la selección del método de desinfección más viable se consideraron criterios como el costo, mantenimiento, eficiencia, vida útil e impacto ambiental mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6

Comparación de métodos de desinfección según criterios de evaluación

Criterios	Lámpara UV	Colector Solar	Referencias
Costo [COP\$]	8,018,800	782,744	(Viqua, 2019; Alibaba, s. f.)
Mantenimiento	Bajo	Bajo	(Tarrán, 2002; Kumar et al., 2023)
Eficiencia [%]	90-99	69	(Tarrán, 2002)
Vida Útil	9,000-10,000 hrs	15-25 años	(EPA, 1999; Ecofener, s.f.)
Impacto Ambiental	Alto	Bajo	(Amézquita y Carvajal, 2022; Kumar et al., 2023)

Desde el punto de vista económico la implementación del sistema de desinfección con lámpara UV es más favorable, ya que para cubrir la demanda de agua, solo se necesita una unidad, lo que implica un menor costo de inversión estimado en \$8,018,800, comparado con el sistema de desinfección mediante colectores solares, el cual requiere 100 colectores de tubo vacío para cubrir el caudal de agua a tratar y aportar la energía térmica necesaria para alcanzar la temperatura objetivo que permite la inactivación de los microorganismos presentes en el agua, lo que implica una mayor inversión correspondiente a \$78,473,000, además de mayor requerimiento de espacio para instalación. En cuanto a la eficiencia de desinfección, aunque el desempeño de la lámpara UV puede disminuir ante turbidez elevada y fluctuaciones de voltaje, bajo condiciones controladas alcanza niveles de inactivación entre el 90 y el 99 % (Tarrán, 2002), frente al 69% del colector solar de tubo vacío. Con base en estos resultados se seleccionó la lámpara UV VIQUA VP600 como la alternativa más adecuada para el proceso de desinfección al ofrecer una mejor relación entre el costo, eficiencia y espacio requerido para su instalación.

4.1.3.2 Selección alternativa de almacenamiento y distribución. El sistema de almacenamiento está diseñado para compensar las variaciones de la demanda durante las 24 horas del día, para ello se optó por una configuración a nivel superficial de tres tanques cilíndricos de polietileno conectados en serie, lo cual permite independizar las unidades para labores de mantenimiento y limpieza sin suspender el servicio (RAS, 2010).

4.1.4 Alternativas de abastecimiento energético

La puesta en marcha de los equipos involucrados en una planta de potabilización requiere un suministro energético continuo y confiable, debido a la operación permanente de sistemas de bombeo, automatización, desinfección y control de caudal. Este requerimiento energético puede satisfacerse mediante el sistema eléctrico nacional interconectado o mediante fuentes renovables,

siendo la energía solar fotovoltaica una de las alternativas más viables para zonas con alta radiación solar (Amoroso et al., 2021). Sin embargo, la dependencia exclusiva del sistema interconectado implica un impacto ambiental indirecto que depende de la composición de la matriz eléctrica nacional, lo que ha impulsado la transición energética hacia el uso de fuentes limpias como la fotovoltaica para reducir la vulnerabilidad del sistema y las emisiones de gases de efecto invernadero (UPME, 2026). El diagrama BFD de esta alternativa se encuentra en el Apéndice G.

Tabla 7

Comparación cualitativa de alternativas de abastecimiento energético

Criterios	Energía Fotovoltaica	Red Eléctrica Municipal	Híbrido (Fv+Red)	Referencias
Continuidad	Alto	Intermitente	Alto	(Amoroso et al., 2021)
Disponibilidad de espacio	Alto	Bajo	Medio	(Avaada Electro, 2024)
Impacto ambiental	Bajo	Alto	Medio	(Carvajal y Marin, 2013)
Costo de inversión	Alto	Medio	Medio	(Avaada Electro, 2024; Carvajal y Marin, 2013)
Mantenimiento	Bajo	Medio	Medio	(Avaada Electro, 2024; Ortiz, 2013)

Tabla 8

Comparación cuantitativa de alternativas de abastecimiento energético

Criterios	Energía fotovoltaica	Red eléctrica municipal	Híbrido (FV+Red)
Continuidad	5	3	5
Disponibilidad de espacio	2	4	3
Impacto ambiental	4	2	3
Costo de inversión	2	3	3
Mantenimiento	4	3	3
Costos de operación	5	2	2
Total	22	17	19

Para la selección de la alternativa energética se realizó un análisis cuantitativo y cualitativo de tres opciones de abastecimiento: energía fotovoltaica, red eléctrica municipal y un sistema híbrido que combina ambas fuentes. La Tabla 7 presenta la valoración cualitativa en la cual se

evaluaron los criterios de continuidad del suministro, disponibilidad de espacio, impacto ambiental, costo de inversión y mantenimiento. Complementariamente la Tabla 8 muestra la valoración cuantitativa con una escala ponderada de 1 a 5, donde 5 representa la condición más favorable y 1 la condición más deficiente. De acuerdo con los resultados obtenidos, la energía fotovoltaica obtuvo el mayor puntaje ponderado con 22 puntos, seguida del sistema híbrido con 19 puntos y la red eléctrica con 17 puntos, lo que la posiciona como la alternativa energética más conveniente. Si bien en el análisis cualitativo se evidencia que la energía fotovoltaica requiere una mayor inversión inicial, disponibilidad de espacio para la instalación de los paneles solares y el banco de baterías, esta alternativa presenta ventajas significativas a largo plazo, particularmente en la reducción de los costos de operación y en la minimización del impacto ambiental al tratarse de una fuente de energía renovable que no genera emisiones directas. Dado lo anterior, la implementación del sistema fotovoltaico se considera como la alternativa más adecuada para garantizar la operación continua de la planta durante las 24 horas del día, con paneles solares que aprovechan la radiación solar durante las horas diurnas, sin necesidad de depender de la red eléctrica para el suministro energético y la incorporación de un banco de baterías que garantiza el suministro durante la noche o en periodos de baja radiación (Avaada Electro, 2024).

4.1.5 Sistema fotovoltaico

El diseño de un sistema fotovoltaico autónomo se fundamenta en el análisis del recurso solar disponible del sitio de aplicación, la demanda energética de la planta y el adecuado dimensionamiento de sus componentes como los paneles solares, las baterías, el regulador de carga y el inversor de tal manera que su implementación garantice un desempeño óptimo, así como su viabilidad económica y la durabilidad operativa (Style, 2012).

4.1.5.1 Consumo energético. El consumo energético se determinó a partir de cada uno de los equipos eléctricos de la planta considerando su potencia nominal y las horas de uso diferenciadas en un periodo diurno con 8 horas de operación y un periodo nocturno con 16 horas de operación. Debido a que el sistema propuesto es un sistema fotovoltaico autónomo con banco de baterías, los paneles solares deben dimensionarse para cubrir la demanda energética diurna de 42.15 kWh y simultáneamente generar la energía necesaria para cargar el banco de baterías que abastecerá la demanda nocturna de 33.76 kWh, alcanzando así una demanda energética total de 75.91 kWh/día. En la Tabla 31 del Apéndice G se detallan los equipos eléctricos considerados y el consumo energético estimado para cada uno de ellos.

4.1.5.2 Dimensionamiento. El número de los paneles solares se determinó a partir de la relación entre la demanda energética diaria y la energía generada por cada panel, teniendo en cuenta las horas solar pico, la potencia del módulo y un factor global de pérdidas estimado en 0.8. Como resultado, se requieren 44 paneles solares de 550 W para abastecer el sistema. Tras la comparación de proveedores (Ver Tabla 32 del apéndice G) se seleccionó el panel de silicio monocristalino PERC JAM72S30-550/MR de JA solar por su mejor desempeño en eficiencia, calidad y costo.

El banco de baterías se dimensionó con 1 día de autonomía y una profundidad máxima de descarga de 0.8 (Aguilera y Hontoria, 2004). Para una demanda de 33.76kW, se seleccionaron baterías de litio de 48 V y 100 Ah, requiriéndose un total de 9 unidades.

Por su parte se escogió un controlador de carga de tipo MPPT encargado de regular la energía proveniente de los paneles solares hacia el banco de baterías, permitiendo que los paneles trabajen a su voltaje de máxima potencia y convirtiendo esa energía al voltaje de operación de las baterías. El dimensionamiento se realizó a partir de la relación entre la potencia total del sistema

fotovoltaico y la tensión nominal del banco de baterías. Considerándose una potencia instalada de 24.2 kW y una tensión de trabajo de 48 V, se obtuvo una intensidad de carga de 504.17 A. Debido a que los controladores MPPT tienen corrientes nominales cercanas a 100 A, se determinó que el sistema requiere 5 controladores. Las especificaciones técnicas del controlador de carga se presentan en la Tabla 29 del Apéndice F.

Finalmente, el inversor se seleccionó considerando la potencia demandada por las cargas del sistema, de modo que la corriente alterna del inversor sea la necesaria para el funcionamiento de todos los equipos que va a alimentar. Con una demanda de 8.72 kW y aplicando un factor de seguridad de 1.2, se obtuvo una potencia requerida para el inversor de 10.46 kW. Por lo tanto, una vez consultadas diferentes referencias disponibles en el mercado (Ver Tabla 34 del apéndice G) se eligió el modelo HI-6K-DL, con una potencia nominal de 12 kW compatible con el banco de baterías de 48 V.

4.2 Diseño básico

4.2.1 Diagrama PFD

La Figura 4 presenta el diagrama de flujo de proceso (PFD), donde se muestran con mayor detalle los equipos involucrados en el sistema de potabilización propuesto. El proceso inicia en la unidad de desarenación donde ingresa un caudal de agua cruda de $62.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$ a 27°C. Esta corriente se dirige hacia un vertedero rectangular de mezcla rápida, donde la bomba P-401 inyecta el coagulante PAC, permitiendo su dispersión instantánea en el agua. El agua continua su proceso de clarificación para la eliminación de aproximadamente el 90% de los sólidos suspendidos (Lozano y Lozano, 2015), pasando primero por el floculador y luego por el sedimentador. En esta última unidad se consideran pérdidas del 1.5% asociadas a los lodos generados, los cuales son extraídos mediante la bomba P-402. El caudal resultante a la salida del sedimentador corresponde a 61.31

Figura 4

La Figura 5 presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) que corresponde a la representación gráfica y esquemática de cada uno de los equipos, tuberías, válvulas, instrumentos de control y demás componentes que intervienen en el proceso, lo que permite visualizar el funcionamiento del sistema, facilitando su diseño, planificación y operación eficiente.

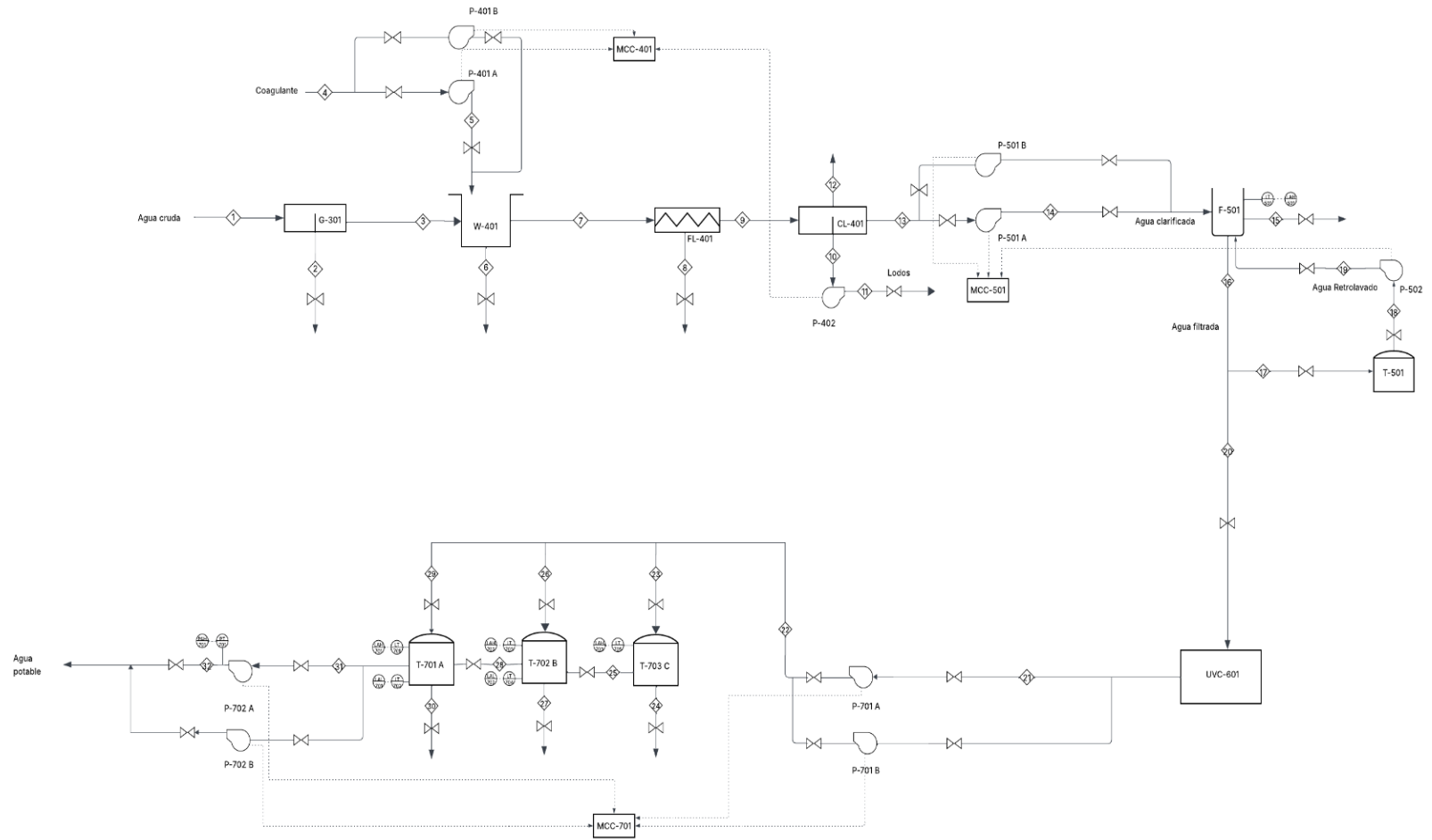
Figura 5*Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del proceso de potabilización de agua*

Tabla 9*Elementos que conforman el diagrama P&ID*

Cantidad	Etiqueta Genérica	Nombre del instrumento	Tipo de instrumento	Ubicación Zonas	Función
6	LT	Transmisor de nivel	Sensor/ Transmisor	Filtración / Almacenamiento	Mide y envía la señal del nivel del líquido para monitoreo y control.
4	LAH	Alarma de nivel alto	Alarma	Filtración / Almacenamiento	Avisa cuando el nivel supera el límite alto establecido.
2	LAL	Alarma de nivel bajo	Alarma	Almacenamiento	Avisa cuando el nivel baja del límite mínimo establecido.
1	PAH	Alarma de presión alta	Alarma	Almacenamiento y distribución	Avisa cuando la presión supera el límite alto establecido (protección de la línea/equipo).
1	PT	Transmisor de presión	Sensor/ Transmisor	Almacenamiento y distribución	Mide y envía la señal de presión para monitoreo y control.
3	MCC	Centro de control de motores	Tablero eléctrico	Clarificación / Filtración / Almacenamiento	Suministra energía, protege y permite encender o apagar los motores.

Se emplearon sensores de nivel tipo switch para simplificar la operación y reducir costos, evitando sistemas de control complejos. En las principales etapas de bombeo se consideró la instalación de dos bombas, una bomba en operación normal y otra bomba de respaldo o repuesto. Esto permite garantizar la continuidad del servicio en caso de fallas o durante labores de mantenimiento. Además, antes y después de cada bomba se instalaron válvulas de aislamiento, las cuales permiten cerrar el flujo para realizar mantenimiento sin afectar el resto del sistema.

El sedimentador cuenta con una tubería de rebose, la cual actúa como un elemento de seguridad hidráulica. Esta tubería permite evacuar el agua en caso de que el sedimentador alcance su capacidad máxima, evitando desbordamientos y afectaciones en la estructura o en las unidades cercanas.

Para el almacenamiento del agua tratada se consideraron tres tanques, con un volumen de 65 m³, sumando una capacidad total de 195 m³ para asegurar una autonomía de tres días ante posibles fallas externas, garantizando un borde libre por encima del nivel máximo de agua

cumpliendo con los requerimientos técnicos del reglamento de agua potable, aunque el volumen útil de operación por tanque es de 58.56 m³, cada tanque cuenta con su respectivo sistema de control de nivel mediante sensores tipo switch, conectados a alarmas de nivel alto y nivel bajo, que permiten alertar al operario sobre el estado del almacenamiento y tomar acciones operativas cuando sea necesario. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el control de presión en la tubería de distribución, ya que una presión excesiva puede generar daños en la infraestructura de la red de distribución. Los parámetros de operación, tabla de corrientes y el balance de masa se presentan en el Apéndice I.

4.2.3 Análisis de seguridad HAZOP

Para el análisis de seguridad del sistema, se aplicó la metodología HAZOP, tomando como base el diagrama P&ID, se identificaron como variables críticas el caudal, el nivel y la presión, debido a su influencia directa en la operación del proceso de potabilización. Los resultados del análisis correspondiente se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Análisis HAZOP de las variables críticas

Nodo	Palabra guía	Desviación	Causas	Consecuencias	Salvaguardias	Recomendación
CAUDAL						
Entrada y pretratamiento	Menos	Menor caudal	Variación en captación o válvulas mal operadas	Menor producción de agua tratada	Supervisión operativa	Ajustar Ingreso de agua
Entrada y pretratamiento	Más	Mayor caudal	Exceso de entrada	Sobrecarga de unidades	Control hidráulico y operativo	Regular caudal de entrada
Bombeo de proceso (P-401, P-501, P-702)	No	No flujo	Falla de bomba, falta de energía, válvula cerrada	Interrupción del proceso	Bomba de respaldo	Activar bomba de repuesto y revisar línea
Bombeo de proceso (P-401, P-501, P-702)	Menos	Menor flujo	Baja capacidad, obstrucción	Baja eficiencia del sistema	Supervisión operativa	Revisar bomba y tuberías

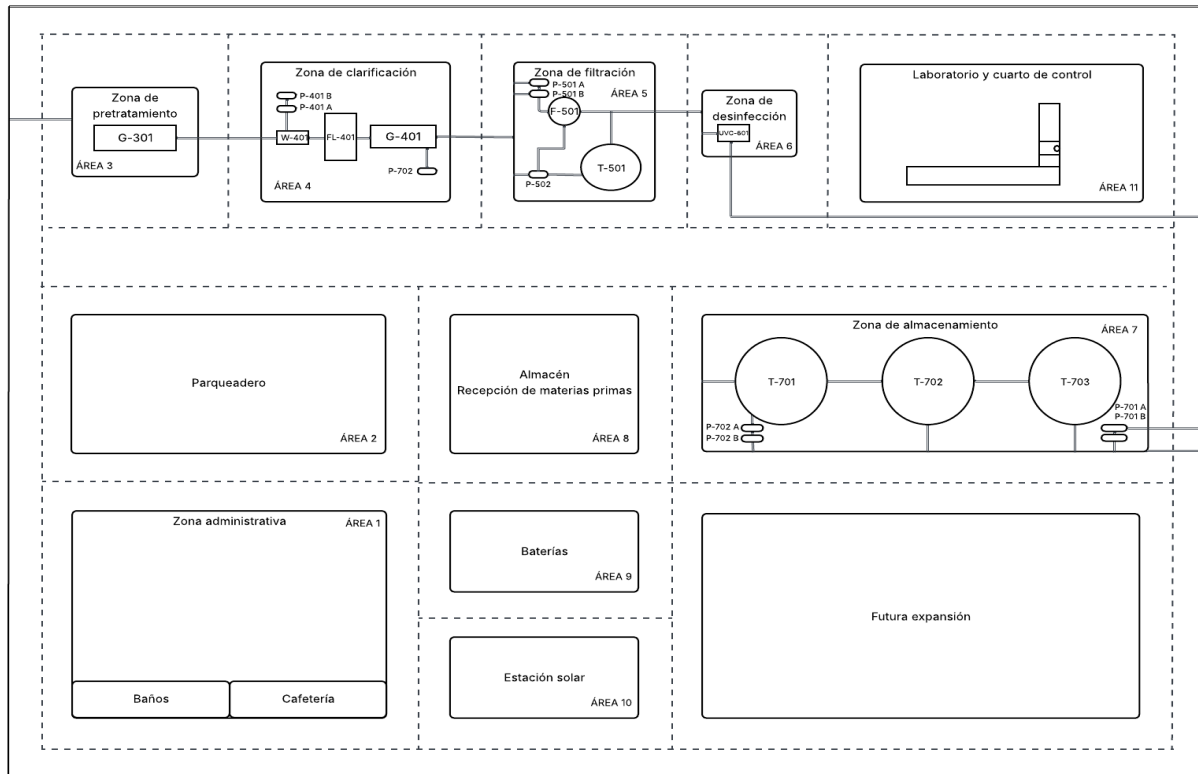
Filtración	Menos	Menor caudal filtrado	Obstrucción del filtro	Menor producción de agua	Retrolavado	Lavar y revisar el filtro
PRESIÓN						
Bombeo y conducción	Más	Presión alta	Válvula cerrada, obstrucción	Daño en tuberías y equipos	Monitoreo de presión	Revisar descarga y operación
Bombeo y conducción	Menos	Presión baja	Fugas, falla parcial de bomba	Caudal insuficiente	Bomba de respaldo	Revisar succión, fugas y bomba
Red de distribución	Más	Presión alta	Bombeo excesivo	Daño en la red	Alarma de presión alta	Ajustar operación
Red de distribución	Menos	Presión baja	Bajo nivel en tanques o fuga	Deficiencia en suministro	Monitoreo de presión	Revisar red y almacenamiento
NIVEL						
Sedimentador CL-401	Más	Nivel alto	Obstrucción en salida o exceso de entrada	Rebose	Tubería de rebose	Revisar salida
Tanques T-701 A/B/C	Más	Nivel alto	No cierre de válvula, error operativo	Rebose y pérdida de agua	Alarma de alto nivel	Cerrar entrada y pasar al otro tanque
Tanques T-701 A/B/C	Menos	Nivel bajo	Alta demanda o falla en alimentación	Riesgo de desabastecimiento	Alarma de nivel bajo e interconexión	Abrir conexión entre tanques
Tanque de retrolavado T-501	Más	Nivel alto	Acumulación de agua de lavado	Rebose	Supervisión descarga	Revisar descarga

4.2.4 Plot Plan

La Figura 6 corresponde al Plot Plan de la planta, donde se presenta la distribución en vista superior de los diferentes equipos y etapas del proceso, asimismo, se incluyen áreas administrativas y zonas complementarias para la instalación del sistema fotovoltaico, el almacén de recepción de materias primas y el laboratorio. La disposición de las unidades del proceso se realizó siguiendo la secuencia operacional del tratamiento de agua, permitiendo un flujo continuo desde la entrada de agua cruda hasta su almacenamiento en los tanques como agua potable. Para garantizar la seguridad de la planta, se consideraron 2 m para vías de acceso vehicular y peatonal, 4 m de separación entre la zona norte y la zona sur y 1 m de distancia entre equipos, de tal manera que los operarios puedan realizar labores de inspección y mantenimiento. Así mismo, se destinó un espacio dentro del terreno para futuras expansiones. Con base a esta distribución, se calculó un área de operación de 756 m².

Figura 6

Plot Plan de la planta de potabilización de agua



4.3 Evaluación financiera

4.3.1 Estimación de costos de capital (CAPEX)

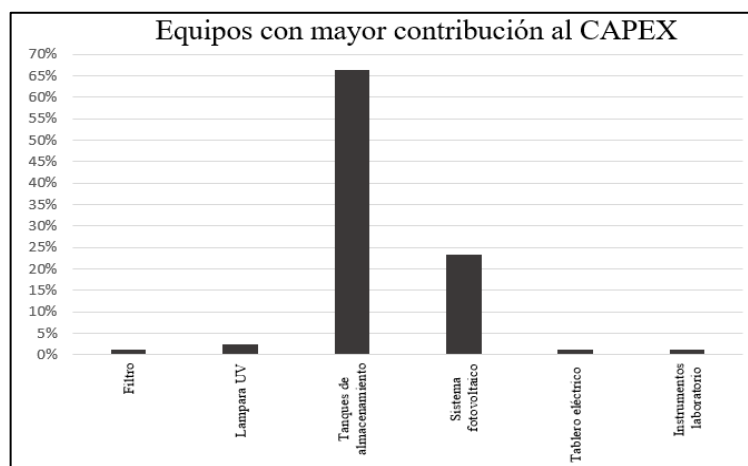
Los costos de los equipos fueron obtenidos a partir de consultas en línea en base a los requerimientos técnicos para el diseño. En la Figura 7 se presentan los equipos con mayor contribución al costo de equipos, estimado en \$359,980,608, destacándose los tanques de almacenamiento con un 66% del total, seguidos del sistema fotovoltaico con un 23% y la lámpara de desinfección UV con un 2.5%.

Adicionalmente, para el cálculo del capital fijo (FCI), se emplearon factores porcentuales típicos (ver Tabla 36 del Apéndice J), dentro de los rangos reportados en la literatura para estudios

de prefactibilidad de acuerdo con (Peters & Timmerhaus, 1991), dando como resultado, un valor de \$657,172,463. Finalmente, al incluir los costos asociados al capital de trabajo y a la puesta en marcha, el valor de la inversión de capital total (CAPEX) corresponde a \$736,033,159 (ver Tabla 39 del Apéndice J).

Figura 7

Equipos con mayor contribución al CAPEX



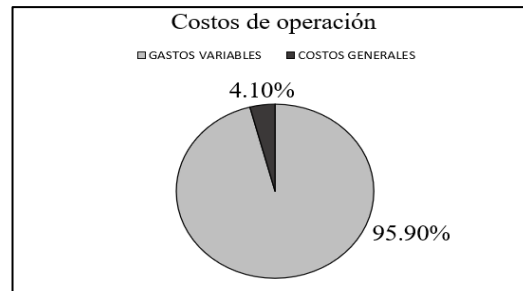
4.3.2 Estimación de costos de operación (OPEX)

En el cálculo de los costos de operación no se incluyeron los gastos asociados a la distribución del servicio debido a que el alcance del proyecto se limita al sistema de tratamiento de agua potable y estos costos suelen ser integrados en la gestión del acueducto. Asimismo, el costo de energía eléctrica no se incluye en el costo de servicios industriales, debido a que la energía requerida por la planta es suministrada por el sistema fotovoltaico. En cuanto a los costos variables, se incluyó el costo de materia prima reportado en la Tabla 37 del Apéndice J, teniendo en cuenta un requerimiento de 6.223 kg/día de PAC, lo que corresponde a un costo total anual de coagulante de \$8,276,590. Además, el costo de tratamiento de lodos se estimó en \$18,097,534 y el costo de mano de obra se calculó con base en el personal requerido, resultando en un total de 3 operarios para cubrir el funcionamiento del sistema de potabilización, lo que representa un costo anual de

\$108,032,580 según se muestra en la Tabla 38 del Apéndice J. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta costos generales de gestión, logística y operación administrativa por un valor de \$5,914,552 lo que resultó en un OPEX de \$144,264,291 (ver Tabla 40 del Apéndice J).

Figura 8

Costos de operación

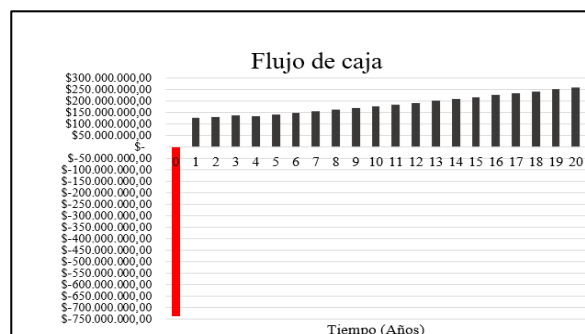


4.3.3 Flujo de caja e indicadores financieros

En la Figura 9 se presenta el flujo de caja del proyecto para un periodo de 20 años, considerando un precio del agua de \$15,000 por m³ y un total de 3 tanques para el almacenamiento. Se observa que en el año 0 el flujo negativo corresponde a la inversión inicial del proyecto y que, a partir del año 1, los flujos de caja se tornan positivos debido a los ingresos generados por la venta del agua tratada.

Figura 9

Flujo de caja



El flujo de caja presenta un crecimiento durante los tres primeros años, debido principalmente a la depreciación acelerada aplicada al sistema fotovoltaico en este periodo. Esta

depreciación reduce el EBIT y, por ende, los impuestos, lo que genera un mayor flujo de caja en los años iniciales. Sin embargo, al finalizar este beneficio en el año 4, el EBIT aumenta y, con ello, también la carga tributaria, lo que ocasiona una disminución del flujo de caja. Posteriormente, a partir del año 5, el crecimiento se modera debido al incremento progresivo de los costos operativos, como la inflación (6%) y los salarios (8.4%). Este comportamiento es favorable, ya que el proyecto mantiene flujos de caja positivos, lo que le permite cubrir sus costos, cumplir con sus obligaciones y seguir generando valor a lo largo del tiempo.

Con base al flujo de caja, los indicadores financieros obtenidos corresponden a un VPN de \$474,765,509, una TIR del 20%, un ROI del 64.5% y un periodo de recuperación (*Payback*) de 5 años. Estos resultados, indican que el proyecto es económicamente viable y es posible su implementación, asegurando liquidez y una rentabilidad atractiva en el horizonte de evaluación. El desglose completo del flujo de caja se presenta en la Tabla 41 del apéndice J.

4.3.4 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se utilizaron dos variables de entrada siendo estas el precio por metro cúbico de agua y el número de tanques de almacenamiento y como variables de respuesta el VPN, la TIR y el *Payback*. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 11 se observa que el proyecto es altamente sensible al precio del agua, evidenciando un incremento significativo del VPN y la TIR a medida que aumenta la tarifa. En particular, para un precio de \$5,000/m³ el proyecto no es viable, presentando un VPN negativo y una TIR inferior a cero, mientras que para \$15,000/m³ los indicadores financieros indican un escenario favorable.

Tabla 11

Análisis de sensibilidad frente a la variación del precio de venta del agua

Variable	Escenario	TIR	VPN	Payback
Precio de venta del agua por m³	\$5,000	-5%	\$-1,007,410,643	No se recupera
	\$10,000	6%	\$-266,322,566	12 años
	\$15,000	20%	\$474,765,509	5 años

Por otro lado, en la Tabla 12 se analizaron los impactos en la variación del número de tanques de almacenamiento, donde se observa que al aumentar su cantidad se incrementa la inversión inicial, lo cual reduce el VPN y la TIR.

Tabla 12

Análisis de sensibilidad frente a la variación en el número de tanques de almacenamiento

Variable	Escenario	TIR	VPN	Payback
Número de tanques de almacenamiento	1	29%	\$708,947,155	4 años
	2	24%	\$591,856,332	4.5 años
	3	20%	\$474,765,509	5 años

En general, las variaciones en el precio de venta del agua tienen una mayor influencia sobre la rentabilidad del proyecto, mientras que el número de tanques impacta principalmente el CAPEX. Aunque el análisis financiero muestra que la alternativa con un solo tanque presenta mayor VPN y TIR, se optó por considerar tres tanques en el diseño. Esta decisión se basa en los lineamientos de la RAS y en la necesidad de garantizar la continuidad y seguridad frente a posibles fallas o mantenimientos.

Respondiendo a la pregunta de investigación el proyecto tiene factibilidad técnica y financiera evidenciada en indicadores financieros anteriormente mencionados siendo estos favorables, lo que demuestra su sostenibilidad económica. Adicionalmente, la implementación de la radiación solar como energía renovable contribuye a la reducción de la huella de carbono y a la disminución de los costos operativos asociados al consumo de energía eléctrica convencional. Lo que respalda el cumplimiento del ODS 7 por el uso de energía asequible y no contaminante en su operación y el ODS 6 al favorecer el acceso a agua potable y limpia, mejorando la calidad de vida de la población beneficiada.

5. Conclusiones

- La selección del municipio de El Playón se fundamenta en las condiciones de riesgo sanitario, evidenciadas por altos valores de IRCA, así como en el potencial de radiación solar disponible, lo que permite plantear un sistema autónomo en una zona rural no interconectada.

A partir de este contexto, la elección de la vereda La Ceiba se realizó mediante la comparación entre 13 veredas de este municipio, considerando principalmente la población y la demanda de agua. Dado que el sistema fue diseñado para 400 habitantes por criterios de diseño y facilidad de implementación, La Ceiba, con 651 habitantes, resultó ser la opción más adecuada, ya que se ajusta mejor a esta condición y permite cubrir una parte representativa de la población. Adicionalmente, esta vereda cuenta con la quebrada La Naranjera como fuente hídrica, lo que garantiza la disponibilidad del recurso.

- El diseño del sistema de potabilización demuestra que es técnicamente viable garantizar el abastecimiento continuo de agua potable para la población objetivo en condiciones rurales, mediante la integración de tecnologías de tratamiento y un sistema fotovoltaico autónomo. La configuración seleccionada permite tratar un caudal de 58.56 m³/día, logrando la remoción de contaminantes físicos y microbiológicos hasta cumplir con la normativa vigente.

En cuanto a la selección de equipos, esta se realizó considerando el caudal de diseño y criterios de eficiencia, disponibilidad en el mercado, facilidad de instalación y reducción de espacio. Para la etapa de desinfección, se optó por una lámpara UV en lugar de colectores solares, debido a que, aunque se buscaba aprovechar al máximo la energía solar, la alternativa UV resultó ser la mejor opción con un valor de inversión de \$8,018,800 y eficiencia superior al 99% comparado con un valor de inversión de \$78,473,000 y una eficiencia del 69 % para los colectores. Asimismo, el sistema energético se diseñó como un sistema fotovoltaico autónomo

con baterías, lo que permite garantizar continuidad en la operación durante todo el día, con bajo impacto ambiental y menores costos de operación en comparación con un modelo híbrido y un sistema con solo la conexión a la red eléctrica.

- Desde el punto de vista financiero, el proyecto muestra que sí es viable, ya que se obtuvo un VPN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento. Sin embargo, al hacer el análisis de sensibilidad se evidencia un problema importante, y es que el precio necesario para que el proyecto sea rentable está alrededor de 15,000 COP/m³, lo cual es bastante alto para la comunidad rural a la que está dirigido.

Por esta razón, en un escenario real, el proyecto difícilmente podría sostenerse solo con el pago de los usuarios. Para que sea viable en la práctica, sería necesario contar con apoyo del gobierno que cubra una parte importante del costo del servicio, de manera que las personas puedan pagar un valor más accesible, aproximadamente entre 3,000 y 3,800 COP/m³, que se ajusta mejor a su capacidad de pago.

Esto también se ve influenciado por el hecho de que es un proyecto de pequeña escala, donde los costos por unidad tienden a ser más altos. En ese sentido, aunque el proyecto funciona bien en términos técnicos y financieros teóricamente, su implementación real depende en gran parte de subsidios del estado, ya que sin este respaldo sería difícil garantizar que el servicio sea accesible para la comunidad.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios relacionados a las propiedades del agua en diferentes épocas del año, para ajustar el diseño del sistema a posibles cambios en las condiciones del recurso hídrico.

Es importante validar en campo los caudales disponibles y la continuidad de la fuente, con el fin de asegurar que el sistema funcione adecuadamente en condiciones reales.

Avanzar a la fase de ingeniería de detalle para la implementación del sistema, que permita definir con mayor precisión aspectos constructivos, operativos y de mantenimiento.

Es clave considerar apoyos o subsidios que permitan que el servicio sea accesible para la comunidad y sostenible en el tiempo.

Es necesario actualizar variables como la inflación, los costos operativos y los salarios, ya que estos afectan directamente los ingresos y egresos del proyecto si se implementa en el futuro.

Referencias

- Admin. (s. f.). *Estimación horas solar pico (kWh/m²)*. Renewable Energy & Technology.
<https://renovables.tulider.net/pv/hsp>
- Aguilera, A., y Hontoria, L (2004). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*.
https://www.academia.edu/65123130/Dimensionado_de_sistemas_fotovoltaicos_aut%C3%B3nomos
- Alcaldía Municipal de El Playón Santander. (2023m). *Nuestro municipio*.
<https://elplayonsantander.micolombiadigital.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Alibaba. (s. f.). *Low pressure vacuum tube solar collector*. https://www.alibaba.com/product-detail/Low-Pressure-Vacuum-Tube-Solar-Collector_1601011359480.html
- Amézquita, J. y Carvajal, L. (2022). *Generalidades sobre métodos de desinfección mediante radiación UV*. Revista RETO, 10(1), p. 9-21. <https://doi.org/10.23850/reto.V10i1.5463>
- Amoroso, F., Muñoz, K., y Soriano, G. (2021). *Diseño de una planta potabilizadora de agua abastecida por energía solar para la comunidad de pile*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52784/1/T111132%20AMOROSO%20PARRAGA%2C%20FERNANDO%20MU%C3%91OZ%20ZAVALA%2C%20KEVIN.pdf>
- Aqualep. (s. f.). *Pretratamiento de agua potable*. <https://www.aqualep.com/pretratamiento-de-agua-potable/>
- AutoSolar. (s. f.). *Bomba de agua superficie centrífuga Pearl CEP-15F16S 1.5 HP 110/220 V*.
<https://autosolar.co/bombas-de-agua-superficie/bomba-de-agua-superficie-centrifuga-pearl-cep-15f16s-15hp-110220v>

AutoSolar. (s. f.). *Cómo calcular el inversor de un sistema fotovoltaico*. AutoSolar.

<https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/como-calcular-el-inversor-de-un-sistema-fotovoltaico>

AutoSolar. (s. f.). *Ficha técnica panel solar 550 W monocristalino*.

<https://cdn.autosolar.co/pdf/ficha-tecnica-1002071.pdf>

Autosolar Colombia. (s.f.). *Panel solar 550 W 24 V monocristalino PERC EcoGreen*.

<https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-550w-24v-monocristalino-perc-ecogreen>

Avaada Electro. (2024). *Difference between on-grid and off-grid solar systems*.

<https://avaadaelectro.com/difference-between-on-grid-and-off-grid-solar-systems/>

Baxi Calefacción, S.L.U. (2007). *AR 16: Colector de tubos de vacío. Instrucciones de instalación,*

montaje y funcionamiento para el instalador. ATC ROC.

Bosstech. (s. f.). *¿Qué son desarenadores de agua?* [https://bosstech.pe/blog/que-son-](https://bosstech.pe/blog/que-son-desarenadores-agua/)

[desarenadores-agua/](https://bosstech.pe/blog/que-son-desarenadores-agua/)

Carvajal, S., y Marín, J. (2013). *Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de*

potencia colombiano: un enfoque dinámico

Colempaques. (2019). *Ficha Técnica SKU 3085*.

https://cdn.shopify.com/s/files/1/0654/4919/7734/files/Ficha_Tecnica_SKU_3085.pdf?v=1770912648

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). (2019). *Resolución 906*

de 2019: Por la cual se definen los criterios, metodologías, indicadores, parámetros y modelos para evaluar la gestión de los prestadores de los servicios de acueducto y alcantarillado. https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_cra_0906_2019.htm

- Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Departamento Administrativo de la Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). (2024). *Histórico Calidad - Puntos río Playonero* [Base de datos no publicada].
- Cropaia. (2024). *La coagulación en el tratamiento de aguas*. <https://cropaia.com/es/blog/la-coagulacion-en-el-tratamiento-de-aguas/>
- Da Silva, G., Tiba, C., & Torres, G. (2016). *Solar pasteurizer for water microbiological decontamination*. *Renewable Energy*, 87(Part 1), 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.012>
- Díaz. (2009). *Obtención de electricidad y agua potable mediante energía solar para un centro de salud mozambiqueño*. https://oa.upm.es/1548/1/PFC_ANA_MARIA_ANTONA_DIAZ.pdf
- Ecofener. (s. f.). *Paneles solares térmicos*. <https://ecofener.com/18-paneles-solares-termicos>
- Ecoléd. (s. f.). *Calentadores solares*. <https://ecoled.com.co/collections/calentador-solar>
- EcoZaque Ingeniería S.A.S. (s. f.). *Sensor de nivel switch tipo ON/OFF*. <https://www.ecozaque.com/producto/sensor-de-nivel-switch-tipo-on-off/>
- ECO-WORTHY. (s. f.). *48V 100Ah LiFePO4 server rack battery with Bluetooth (5.12 kWh)*. Amazon. <https://www.amazon.com/ECO-WORTHY-Bluetooth-servidor-almacenamiento-respaldo/dp/B0DP4LTRMG>

Emergency WASH. (s. f.). *Pasteurización del agua: tecnología para inactivar microorganismos patógenos.* Emergency WASH.

<https://www.emergencywash.org/water/es/tecnologias/technology/pasteurisation>

ESSA - Empresa de Servicios Públicos de Santander S.A. E.S.P. (2026). *Tarifa enero 2026: Cargos y valores del servicio público de energía eléctrica.*

<https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2026/Tarifa%20Enero%202026.pdf>

Fibras y Normas de Colombia. (s. f.). *Motobomba sumergible para lodos Aqua Pak ref. ROBUSTA2/10/1230A serie Robusta descarga 2", sólidos 1", 1 HP, 1 fase, 230 volts.*

<https://tienda.fibrasynormasdecolombia.com/producto/motobomba-sumergible-para-lodos-aqua-pak-refrobusta2-10-1230a-serie-robusta-descarga-2-solidos-1-1-hp-1-fase-230-volts/>

GCT Tratamiento. (2023). *¿Qué es un desarenador?* <https://gctratamiento.mx/desarenador/>

Gonzales, V. (2021). *Importancia de la radiación solar como fuente de energía.* CiteEnergia.

https://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2021/01/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_2.pdf

Grupo Mathiesen. (s.f.). *La clarificación como parte del tratamiento de aguas.*

<https://www.grupomathiesen.com/application/la-clarificacion-como-parte-del-tratamiento-de-aguas/>

Homecenter. (s. f.). *Electrobomba periférica 1/2 HP 110V 1PGx1PG.*

<https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/489213/electrobomba-periferica-1-2hp-110v-1pgx1pg/489213/>

- Hulatt, L. (2024). *Solar thermal: Efficiency, advantages & how it works*. StudySmarter. <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/environmental-science/energy-resources/solar-thermal/>
- Ineldec. (2025). *Inversor 12 kW Inhenery: ficha técnica* [PDF]. <https://ineldec.com/wp-content/uploads/2025/12/Inversor-12kW-Inhenery.pdf>
- Ingle, R., Qureshi, M., Chaudhari, A., Machhirke, P., & Choudhari, S. (2024). *Solar Based Water Purification System*. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology* (IJRASET), 12. doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.62621>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), & Unidad de Instituto Nacional de Salud. (2024). *Boletín de vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano: julio 2024*. Dirección de Redes en Salud Pública, Grupo de Química y Toxicología
- JA Solar. (2023). *Ficha técnica del módulo fotovoltaico 550 W JAM72S30-550/MR*. <https://www.volxumcolombia.com/wp-content/uploads/2023/12/ficha-tec-550-ja-solar.pdf>
- Kumar, V., Singh, R., & Sharma, A. (2023). *UV irradiation-based potable water disinfection system using solar power*. En A. K. Rathore & A. Sharma (Eds.), *Sustainable energy and technological advancements*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1894-2_8
- Kumar, Y., Verma, M., & Ghritlahre, H. (2023). *Una revisión de los avances recientes en sistemas de colectores solares para calentar agua*. En *Tendencias recientes en ingeniería mecánica* (pp. 469–477). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7709-1_47
- Lozano, W., y Lozano, G. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño, control de procesos y laboratorio (Primera edición)*. Universidad Piloto de Colombia.

- Magne. (2008). *Abastecimiento, diseño y construcción de sistemas de agua potable modernizando el aprendizaje y enseñanza en la asignatura de ingeniería sanitaria*.
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/1522.pdf>
- Maldonado, Y., Roncancio, G., & Saavedra, J. (2019). *Evaluación del potencial de energía solar en Santander, Colombia. Prospectiva*, 17(2), 1.
- Maquitech de Colombia. (s. f.). *Caja de control standard 1.5 HP 230 V 1F Franklin Electric*.
<https://maquitechdecolombia.com/compra-de/bomba/tableros-de-control/caja-de-control-standard-1-5hp-230v-1f-franklin-electric/>
- Mateus, C. (2022). *El estado de los recursos naturales en el departamento de Santander: Inversiones en áreas estratégicas para la conservación de recursos hídricos, potabilización y tratamiento final*. Contraloría General de Santander
- Mawale, Devale, Goswami, & Borawake. (2024). *Solar Based Water Purification System*. International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME), 12. doi:ISSN: 2319-6386 (Online)
- McGuigan, K., Conroy, R., Mosler, H., du Preez, M., Ubomba, E., & Fernandez, P. (2012). *Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top*. Journal of Hazardous Materials, 235–236, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Colombia, riqueza hídrica del mundo*.
<https://www.minambiente.gov.co/colombia-riqueza-hidrica-del-mundo/>
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS): Título A – Aspectos generales*.
https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_a_.pdf

Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

(2007). *Resolución 2115 de 2007: Por medio de la cual se señalan características, instrumentos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.*

<https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017 por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).*

<https://www.minvivienda.gov.co>

Moreno, J. (2017). *Tax incentives for power generation through non-conventional sources in Colombia.* Revista de derecho Fiscal. 11 (Dec. 2017), 127–149.

<https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/fiscal/article/download/5230/9167>

Must Energy Technology Co., Ltd. (s. f.). *PH1100 US series: Split-phase hybrid solar inverter (120 V/240 V)* [Ficha técnica]. Nexo Solar. <https://nexosolar.co/wp-content/uploads/2025/11/120V-PH1100-US-2.pdf>

Must Energy. (2024). *LP1600 series lithium iron phosphate (LiFePO₄) battery: LP16-48100 51.2V 100Ah* [Ficha técnica]. <https://ineldec.com/wp-content/uploads/2024/08/LP1600-MUST-Bateria-de-litio-48V-100AH-51.2V-100AH.pdf>

NASA. (2024). *POWER Data Access Viewer: Parámetros de radiación solar* [Conjunto de datos]. NASA Langley Research Center. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Ortiz, J. (2013). *Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala.* Visión electrónica, 7(1), 103-117.

Pall Corporation. (2009). *Pall Aria FB: Save 98% water from filter backwash recovery*.

<https://www.pall.com/content/dam/pall/food-beverage/literature-library/nongated/FBABARIAFBEN.pdf>

Penn State University, Department of Energy and Mineral Engineering. (s. f.). *3.1 Overview of flat plate collectors*. EME 811: Solar Thermal Energy for Utilities and Industry.

<https://courses.ems.psu.edu/eme811/node/685>

Pérez, J. (1981). *Manual de tratamiento de agua*. Universidad Nacional de Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2056>

Pérez, J. A. (2022). *Diseño de un sistema fotovoltaico para zonas rurales*. Repositorio de Tesis

PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c5c820cc-838c-44fe-a0b2-4fc2bc404648/content>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant design and economics for chemical engineers* (5th ed.). McGraw-Hill.

<https://davuniversity.org/images/files/study-material/PLANT%20DESIGN%20AND%20ECONOMICS%20FOR%20CHEMICAL%20ENGINEERS.pdf>

Piskura, N. (2025). *¿Qué es la floculación?* ChemReady. <https://www.getchemready.com/water-facts/what-is-flocculation/>

Planeación Minero Energética (UPME). (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*.

<https://www.andi.com.co/uploads/radiacion.compressed.pdf>

Presidencia de la República de Colombia. (2007). *Decreto 1575 de 2007: Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30007>

Pure Aqua. (s. f.). *Medios filtrantes comercial serie MF-450.*

<https://es.pureaqua.com/content/pdf/medios-filtrantes-comercial-serie-mf-450.pdf>

Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. (2010). *Título B-Sistemas de Acueducto.*

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulob-030714.pdf>

Restar Solar. (2024). *Ficha técnica panel solar 550 W MonoPERC RT8I-M.*

<https://ineldec.com/wp-content/uploads/2024/01/FICHA-TECNICA-PANEL-SOLAR-550W-MONOPERC-RESTARTSOLAR-.pdf>

Rodríguez, J., y Calderón, J. (2024). *Potabilización del agua: Teoría aplicada.*

Romero, J. (2006). *Purificación del agua.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

<https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/a/127823>

Sepúlveda, S. (2014). *Radiación solar: Factor clave para el diseño de sistemas fotovoltaicos.*

Revista Mundo FESC, (8), 60–65

Solsona, F., y Méndez, J. (2002). *Desinfección del agua.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud / Oficina

SolarSquare. (2025). *Types of solar collectors.* <https://www.solarsquare.in/blog/types-of-solar-collectors/>

Stauffer, B., y Spuhler, D. (2023). *Captación de ríos, lagos y embalses (reservorios).* SSWM.

<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/captacion/captaci%C3%B3n-de-r%C3%ADos%2C-lagos-y-embalses-%28reservorios%29>

Style, O. (2012). *Energía Solar Autónoma: Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo.* Oliver Style.

https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=cNJB5tdbcJ0C&oi=fnd&pg=PP1&dq=dimensionamiento+baterias+sistema+fotovoltaico+libro&ots=MVKXwe_ayI&sig=Kwu9qeW7YNWfR_6FqR__xAfSVaM&redir_esc=y#v=onepage&q=dimensionamiento%20baterias%20sistema%20fotovoltaico%20libro&f=false

Supra Industrial. (s. f.). *Electrobomba centrífuga 3 HP 110V 1 1/2" × 1 1/4" Barnes E2567.*
<https://supraindustrial.com.co/producto/electrobomba-centrifuga-3hp-110v-1-1-2x1-1-4-barnes-e2567/>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). *Informe de inspección: Secretaría de Servicios Públicos de Acueducto, Alcantarillado y Aseo del municipio de El Playón (Santander).* <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-de-inspeccion-Secretaria-de-Servicios-Publicos-de-Acueducto-Alcantarillado-y-Aseo-El-Playon.pdf>

Tarrán, E. P. (2002). *Desinfección por luz ultravioleta.* Sao Paulo-Brasil: Tech Filter.

Tecnotanques. (s. f.). *FT vertical 65000 litros.* Tecnotanques.
<https://tecnotanques.com/catalogos/ft-vertical-65000-litros.pdf>

Tensite. (2023). *Ficha técnica batería de litio TS-L5000/LV.* <https://www.tensite-energy.com/wp-content/uploads/2023/10/Ficha-tecnica-bateria-TS-L5000-LV-Tensite.pdf>

Tienda ISSICOL. (s. f.). *Presostato vacuostato -0,5 a 6 bar 1/4" NPT macho serie M-SP.*
<https://www.tiendaissicol.com/products/presostato-vacuostato-0-5-6bar-1-4-npt-macho-serie-m-sp>

- Tobajas, M. (2017). *Energía solar térmica para instaladores*: (5 ed.). Cano Pina. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/lc/uis/titulos/45042>
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long-term 2 enhanced surface water treatment rule* (EPA 815-R-99-015). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf>
- UN-Water. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender (WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme update report 2023)*. <https://www.unwater.org/publications/who/unicef-joint-monitoring-program-update-report-2023>
- UPME. (2026). *Plan 6GW*. <https://www.upme.gov.co/simec/plan-6gw/>
- Veolia Water Technologies. (s.f.). *Filtration. En Handbook of industrial water treatment (cap. 6)*. <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-06-filtration>
- Venkatachalam, C., & Solomon, G. (2018). *Evacuated tube solar collectors: A review. International Journal of Scientific Engineering and Research*, **6**(12), 138–141. <https://www.ijser.in/archives/v6i12/IJSER18497.pdf>
- Victron Energy. (s. f.). *SmartSolar charge controller MPPT 150/70 up to 150/100 VE.Can: Datasheet*. <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0803/0719/2150/files/Victron-SmartSolar-charge-controller-MPPT-150-70-up-to-150-100-VE.Can-Datasheet-EN.pdf>
- Viqua. (2019). *VP950: Sistema de desinfección UV para agua de alto flujo 40 gpm*. <https://aquaintegral.co/wp-content/uploads/2019/09/VP950-Sistema-desinfeccion-uv-para-agua-de-alto-flujo-34-gpm-viqua.pdf>

Voltronic Power. (s. f.). *InfiniSolar 10 kW three-phase on-grid inverter with energy storage:*

Selection guide [Ficha técnica]. AutoSolar. [https://cdn.autosolar.co/pdf/InfiniSolar-10kW-](https://cdn.autosolar.co/pdf/InfiniSolar-10kW-Trif%C3%A1sico.pdf)

[Trif%C3%A1sico.pdf](https://cdn.autosolar.co/pdf/InfiniSolar-10kW-Trif%C3%A1sico.pdf)

Wright, H., & Cairns, W. (1998). *Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta*. Trojan

Technologies

Inc,

3020

[https://www.elaguapotable.com/Desinfeccion%20del%20agua%20UV%20Trojan%20Th](https://www.elaguapotable.com/Desinfeccion%20del%20agua%20UV%20Trojan%20Technologies.pdf)

[enologies.pdf](https://www.elaguapotable.com/Desinfeccion%20del%20agua%20UV%20Trojan%20Technologies.pdf)

Zhang, Y., Sivakumar, M., Yang, S., Enever, K., & Mohammad, A. (2018). *Application of solar*

energy in water treatment processes: A review. ScienceDirect, 428, 116-145.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.020>

Apéndices

Apéndice A

Índice de riesgo para la calidad del agua potable (IRCA)

Tabla 13

Clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra	IRCA mensual
80.1-100	Inviabile sanitariamente	Informar a la persona prestadora, al COVE, alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo con su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35.1-80	Alto	Informar a la persona prestadora, COVE, alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo con su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14.1-35	Medio	Informar a la persona prestadora, COVE, alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1-14	Bajo	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0-5	Sin riesgo	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano, continuar la vigilancia.

Nota. Adaptado de Resolución 2115 de 2007, Ministerio de Salud y Protección Social y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Apéndice B

Método de selección localización

Tabla 14

Criterios de evaluación para el método de promedios ponderados

Significado	Calificación
Población alta, IRCA (%) bajo, radiación solar baja	1 - 2
Población media; IRCA (%) medio, radiación solar media	2.1 - 3
Población baja, IRCA (%) alto, radiación solar alta	3.1 - 5

Para este proyecto es importante seleccionar un municipio que presente un IRCA elevado y un valor de radiación solar alta, ya que estos factores indican una mayor urgencia en la implementación de un sistema de potabilización de agua. Un IRCA elevado refleja un mayor riesgo sanitario, mientras que una alta radiación facilita el abastecimiento con la capacidad del sistema propuesto. Aunque la población del municipio también es un factor por considerar, esta puede delimitarse según el alcance del sistema, por lo que no representa una restricción determinante en la selección del lugar de estudio.

Tabla 15

Factores determinantes para la selección de la población beneficiada

	Factor relevante	Radiación solar	IRCA (%)	Población	Suma
	Ponderado	55%	35%	10%	100%
El Playón	Calificación	4.5	4.5	1.5	
	Calificación ponderada	2.475	1.575	0.15	4.2
Santa Helena del Opón	Calificación	2.5	2.8	4	
	Calificación ponderada	1.375	0.98	0.4	2.755
Sucre	Calificación	2.8	4.5	2.8	
	Calificación ponderada	1.54	1.575	0.28	3.395

Apéndice C

Veredas del municipio de El Playón

Tabla 16

Distribución poblacional y fuentes hídricas por vereda

Veredas	Población	Fuente hídrica	Cantidad de agua requerida por día [L]
Límites	4,013	Q. La Sardina, Q. Betania, Caño El Frente	489,586
Río Blanco	3,104	Caño Playoncito, Caño Santa Isabel	378,688
Arrumbazón	4,699	Q. Aguas Calientes	573,278
La Ceiba	651	Q. La naranjera	79,422

Santa Bárbara	1,890	Q. Negrera	230,580
El Filo	1,105	Q. Maveda	134,810
La Aguada	3,120	Q. Silgara	380,640
San Benito	3,123	Caño Dos Aguas	381,006
El Pino	3,632	Q. El pino	443,104
Miraflores	1,226	Q. Betania, Caño San Joaquín	149,572
Planadas de Betania	3,686	Q. Betania	449,692
Huchaderos	1,424	Caño Salteras	173,728
El Playón	6,303	Q. La Naranjera, Q. La Constancia	768,966

Nota. La población de cada vereda fue tomada del portal oficial del municipio de El Playón, Santander (sección “Nuestro municipio”). Las fuentes hídricas se identificaron a partir de información general sobre la hidrografía y microcuencas del municipio y sus quebradas principales.

Apéndice D

Normativa vigente

La legislación colombiana ha emitido instrumentos jurídicos y normativos que se refieren al uso del agua y propenden por su protección, buen uso, conservación y acceso equitativo por parte de los todos los ciudadanos.

- **Decreto 1575 de 2007:** Establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo.
- **Resolución 2115 de 2007:** Contempla las características o parámetros, los instrumentos básicos y las frecuencias en el sistema de control y vigilancia para la calidad del agua de consumo humano, se establecen los valores máximos aceptables en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua para consumo humano.
- **Resolución 811 de 2008:** Establece los lineamientos para que en forma concertada la autoridad sanitaria y las personas prestadoras que suministran y distribuyen agua para consumo

humano, definan en su área de influencia los lugares y puntos para recolectar las muestras de agua para consumo humano en la red de distribución. Dichos lineamientos, deben ser utilizados para llevar a cabo las acciones de control y vigilancia de la calidad del agua.

- **Resolución 4716 de 2010:** Establece las condiciones, recursos y obligaciones mínimas que deben cumplir las autoridades sanitarias y ambientales para la elaboración, revisión y actualización de los mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano.
- **Ley 99 de 1993:** Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, incluyendo las funciones de gestión, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire.
- **Ley 373 de 1997:** Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua con el fin de proteger el recurso hídrico en el país e incentivar su uso racional.
- **Decreto 1873 de 2012:** Establece el mecanismo departamental para la evaluación, viabilización y aprobación de proyectos relacionados con el sector de agua potable y saneamiento básico, priorizados dentro de los planes departamentales de agua, así como en los programas regionales o departamentales que sean desarrollados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- **Resolución 330 de 2017:** Señalar los requisitos técnicos que deben cumplir las obras, equipos y procedimientos que utilicen las empresas de servicios públicos del sector, cuando la comisión respectiva haya resuelto por vía general que ese señalamiento es realmente necesario para garantizar la calidad del servicio, y que no implica restricción indebida de la competencia
- **Decreto 4741 de 2005:** Establece la reglamentación en materia de la gestión de los residuos peligrosos. En el campo de la gestión de riesgo en sistemas de tratamiento y distribución de agua

es importante debido a que en las operaciones unitarias se pueden emplear sustancias que pueden convertirse en residuos peligrosos.

Apéndice E

Análisis DOFA

La Tabla 17 presenta el análisis DOFA para la planta de potabilización considerando aquellos factores internos y externos que afectan y favorecen la viabilidad del proyecto. Una de las principales debilidades identificadas es la necesidad del reemplazo periódico de la lámpara UV cuya vida útil es de aproximadamente 1 año, así como la limpieza regular de las mangas de cuarzo para eliminar incrustaciones, las cuales tienen una duración de 5 a 8 años, siendo recomendable cambiarlas cada 5 años (EPA, 1999). También es necesaria la revisión frecuente del balastro para evitar sobrecalentamiento lo cual puede reducir su vida útil u ocasionar incendios. Por lo general, los balastros tienen una utilidad que oscila entre los 10 y 15 años, siendo reemplazados cada 10 años (EPA, 1999). Como oportunidad se encuentra el incremento significativo del uso de la energía solar en Colombia para diversificar la matriz energética y mejorar la eficiencia. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética, el país ya cuenta con 3,773.97 MW de capacidad instalada en proyectos solares y eólicos, de los cuales 2,280.52 MW están en operación y 1,493.45 MW en fase de prueba (UPME, 2026).

Adicionalmente, existen beneficios fiscales e incentivos gubernamentales establecidos en la Ley 1715 de 2014 que contempla la exención del IVA para equipos solares y la deducción de un 25% del impuesto de renta para personas jurídicas con inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente (Moreno, 2017). En cuanto a fortalezas se destacan las ventajas del sistema UV caracterizado por ser un proceso amigable con el medio ambiente, ya que no genera subproductos químicos, ni altera propiedades como el sabor, olor o composición química del agua

tratada (Wright & Cairns, 1998). Finalmente, como amenazas se encuentra la variabilidad climática estacional y las fluctuaciones en los precios de las materias primas e insumos necesarios para la operación del sistema.

Tabla 17

Análisis DOFA

Debilidades	Oportunidades
Dependencia de las condiciones climáticas para la generación eléctrica.	Auge de la energía solar en la diversificación de la matriz energética.
Reemplazo periódico de los componentes internos del sistema de desinfección (lámpara, tubo de cuarzo y balastro).	Incentivos tributarios para proyectos de energías renovables no convencionales.
Alta inversión inicial por la integración de paneles fotovoltaicos y tecnologías de desinfección no convencionales.	Alta radiación solar en la ubicación geográfica seleccionada.
Fortalezas	Amenazas
Desinfección UV sin generación de subproductos químicos ni residuos tóxicos en el agua tratada.	Incremento en los precios del coagulante, materias primas y repuestos del sistema UV.
Reducción de los costos operativos a largo plazo debido a la implementación de la energía solar.	Cambios climáticos extremos como lluvias, sequías y nubosidad.
Bajo requerimiento de espacio para la instalación del sistema UV.	Variabilidad estacional del caudal y turbidez de la quebrada.

Apéndice F

Hojas de especificaciones de los equipos

Tabla 18

Características del desarenador

Desarenador G-301		
Material	Concreto	
Características del desarenador	Valor	Unidades
Diámetro de la partícula	0.5	cm
Velocidad de sedimentación	0.26	cm/s
Eficiencia	75	%
Profundidad útil	1.5	m
Tiempo de remoción de la partícula	578.54	s
Periodo de retención hidráulica	1,735.61	s
Volumen del desarenador	2.94	m ³

Área superficial	1.96	m ²
Ancho	0.81	m
Largo	2.43	m

Tabla 19

Características del vertedero rectangular hidráulico

Coagulador W-401		
Material	Concreto	
Características del vertedero	Valor	Unidades
Dosis óptima de coagulante	5-100	mg/L
Gradiente de mezcla	1,822	s ⁻¹
Tiempo de mezcla	0.40	s
Altura de caída	0.32	m
Longitud de mezcla	0.44	m
Punto de inyección	0.19	m
Ancho de cresta	0.11	m

Tabla 20

Características del floculador hidráulico de tabiques con flujo horizontal

Floculador FL-401		
Material	Concreto	
Características del floculador	Valor	Unidades
Tiempos de retención	600	s
Velocidad media del flujo	0.02	m/s
Profundidad útil del tanque	0.8	m
Ancho Útil del tanque	1.35	m
Largo del tanque	1.2	m
Volumen	1.3	m ³
Espacio entra tabiques	0.9	m
Numero de tabiques	12	und

Tabla 21*Características del sedimentador lamelar*

Sedimentador CL-401		
Material Tanque	Concreto	
Material Placas	PVC	
Características del sedimentador	Valor	Unidades
Caudal	62.23	m ³ /día
Separación entre placas	0.05	m
Número de Reynolds	138.9	-
Ángulo inclinación de placas	60	°
Profundidad	1.5	m
Volumen	1.55	m ³
Tiempo retención	720	s
Longitud	2.03	m
Ancho	0.51	m
Numero de placas	27	und

Tabla 22*Características del filtro*

Filtro rápido F-501		
Material	Acero inoxidable 304	
Modelo	31F30150MM-SS	
Características del filtro	Valor	Unidades
Número de filtros	1	und
Tasa de filtración	16.8	m/h
Presión de funcionamiento	1.73-6.9	bar
Altura	1.5	m
Diámetro	0.76	m
Área	0.45	m ²
Profundidad capa de arena	0.35	m
Profundidad capa de antracita	0.45	m
Profundidad capa de grava	0.20	m
Altura de agua sobre el lecho	0.50	m

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (Pure Aqua, s.f.).

Tabla 23*Características del tanque de retrolavado*

Tanque de retrolavado F-502		
Material	Poliétileno	
Características del tanque de retrolavado	Valor	Unidades
Volumen	4	m ³
Altura	1.04	m
Diámetro	2.20	m
Tiempo de lavado	10	min
Pérdidas por retrolavado	4.7	%

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (Colempaques, 2019)

Tabla 24*Características de los colectores de tubo vacío*

Características del colector tubo vacío	Valor	Unidades
Eficiencia	69	%
Altura	1.98	m
Ancho	1.1	m
Profundidad	0.2	m
Área superficial por colector	4.85	m ²
Número de colectores	100	und
Área total	486.23	m ²
Número de tubos por colector	60	und

El colector está compuesto por una carcasa fabricada en acero galvanizado con recubrimiento de aluminio impreso. En su interior cuenta con componentes de acero inoxidable y un marco estructural elaborado en aleación de aluminio. Asimismo, dispone de un sistema de aislamiento térmico de poliuretano que contribuye a reducir las pérdidas de calor. Los tubos del colector están fabricados en cobre y cuentan con sellos y anillos de caucho de silicona (Alibaba, s. f.). Para alcanzar la temperatura requerida en el sistema, se establecieron las características técnicas de los colectores solares de tubo al vacío, considerando parámetros como caudal, eficiencia, la tasa de transferencia de energía necesaria para cubrir la demanda térmica del proceso (Tobajas, 2017),

asimismo, se utilizó una irradiancia promedio de 649 W/m², valor obtenido de la base de datos de la NASA (2024).

Tabla 25

Características de la lámpara ultravioleta

Lámpara ultravioleta UVC-601		
Modelo	VP600	
Características de la lámpara	Valor	Unidades
Caudal	34	GPM
Intensidad UV	254	nm
Potencia	110	W
Largo	0.78	m
Ancho	0.089	m

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del sistema de desinfección UV modelo VP600 disponible en (Viqua, 2019).

Tabla 26

Características de los tanques de almacenamiento

Tanque de almacenamiento T-703 A/B/C		
Material	Polietileno de alta densidad	
Características de los tanques	Valor	Unidades
Volumen	65	m ³
Altura	7.59	m
Diámetro	3.50	m

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (Tecnotanques, s. f.)

Tabla 27

Características de los paneles solares

Panel solar		
Material	Silicio Monocristalino PERC	
Modelo	JAM72S30-550/MR	
Características	Valor	Unidades
Número de paneles	44	und
Ancho	2.27	m
Largo	1.13	m

Profundidad	0.030	m
Área	2.58	m ²
Área total requerida	136.35	m ²
Potencia	550	W
Eficiencia	21.23	%
Peso	27	kg
Voltaje en el punto de máxima potencia	41.96	V
Voltaje de circuito abierto	49.90	V
Corriente en el punto de máxima potencia	13.11	A
Ramas en serie	2	und
Ramas en paralelo	22	und
Número de celdas	144	und
Vida útil	25	años
Factor global de pérdidas	0.8	-

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (JA solar, 2023).

Tabla 28

Características de las baterías

Batería		
Modelo	Cubix 100	
Material	Litio LiFePO4	
Características	Valor	Unidades
Número de baterías	9	und
Días de autonomía	1	días
Tensión nominal	48	V
Profundidad de descarga	0.8	-
Capacidad	879.17	Ah
Capacidad nominal	100	Ah

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (ECOWORTHY, s. f.).

Tabla 29

Características del controlador

Controlador de carga		
Modelo	VictronSmart Solar MPPT	
Características	Valor	Unidades
Número de controladores	5	und
Corriente nominal	100	A
Dimensiones	0.216x0.295x0.103	m

Eficiencia máxima	98	%
Voltaje nominal	48	V

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (Victron Energy, s.f.)

Tabla 30

Características del inversor

Inversor		
Modelo	HI-6K-DL	
Características	Valor	Unidades
Número de inversores	1	und
Potencia nominal	12	kW
Tensión nominal banco de baterías	48	V
Corriente requerida	210	A
Factor de seguridad	1.2	-
Eficiencia	99.9	%

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas del fabricante (Ineldec, 2025)

Apéndice G

Sistema fotovoltaico

Figura 10

Horas Solar Pico

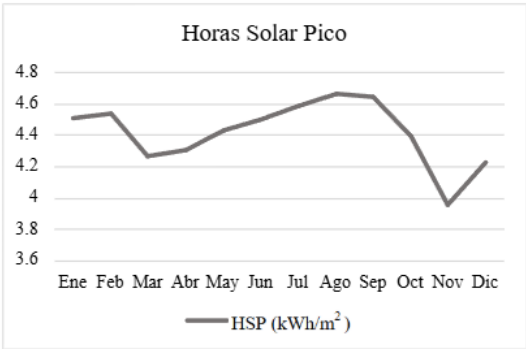


Tabla 31

Equipos con su consumo energético diario y potencia

Equipo	Cantidad	Potencia [kW]	Horas día	Horas noche	Energía día [kWh]	Energía noche [kWh]
Bomba dosificadora	1	0.015	8	0	0.12	0

Bomba purga de lodos	1	0.75	1	0	0.75	0
Bomba de filtración	1	2.24	8	0	17.92	0
Bomba de retrolavado	1	2.24	0	1	0	2.24
Bomba de distribución	1	1.11	8	16	8.88	17.76
Lampara ultravioleta	1	0.110	8	16	0.88	1.76
Inversor	1	0.2	8	16	1.6	3.2
Aire acondicionado	1	1.2	8	0	9.6	0
Equipos eléctricos menores	1	0.3	8	0	2.4	0
Iluminación	11	0.55	0	16	0	8.8
Total					42.15	33.76

Tabla 32

Características técnicas de los paneles solares cotizados

Características	JASolar	AutoSolar	RestarSolar
Material	Silicio MonoPERC	Silicio MonoPERC	Silicio MonoPERC
Potencia	550 W	550 W	550 W
Eficiencia	21.3 %	21 %	22.25 %
Precio	\$786,053	\$1,152,000	\$550,000

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas de cada fabricante (JA Solar, 2023; AutoSolar, s.f.; 2024; RestarSolar, 2024).

Tabla 33

Características técnicas de las baterías cotizadas

Características	Tensite	ECOWORTHY	Must Energy
Modelo	TS-L5000/LV	Cubix 100	LP1600
Voltaje	48 V	48 V	48 V
Capacidad	100 Ah	100 Ah	100 Ah
Precio	\$5,052,700	\$3,187,000	\$4,350,000

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas de cada fabricante (Tensite, 2023; ECOWORTHY, s.f.; Must Energy, 2024).

Tabla 34*Características técnicas de los inversores cotizados*

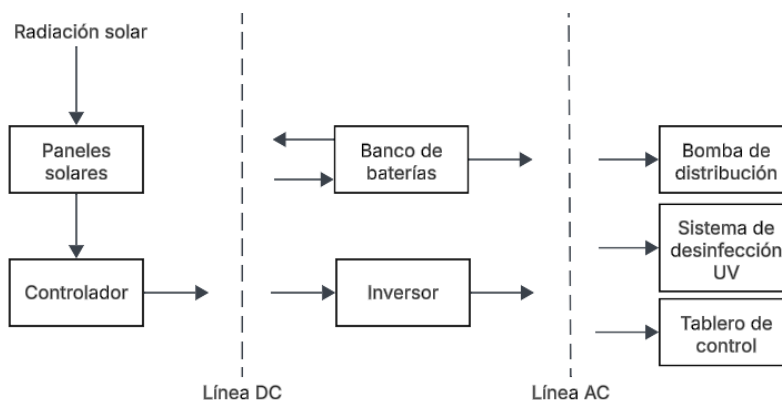
Características	Victron Energy	Inhenergy	Must Energy
Modelo	Quattro 48/10000/140-100/100 120V	HI-6K-DL	PH11-8KL3-US
Potencia	10 kW	12 kW	8 kW
Eficiencia	96%	99.9%	97.5%
Precio	\$10,903,621	\$8,400,000	\$9,188,400

Nota. Adaptado de las especificaciones técnicas de cada fabricante (Victron Energy, s.f.; Ineldec, 2025; Must Energy, s.f.).

Diagrama BFD alternativa de abastecimiento energético

En la Figura 11 se presenta el diagrama de bloques BFD del sistema fotovoltaico autónomo implementado como alternativa de abastecimiento energético para la planta potabilizadora. El sistema está conformado por un arreglo de 44 paneles solares, 5 controladores de carga, 1 inversor y un banco de almacenamiento energético conformado por 9 baterías. Los módulos fotovoltaicos son los encargados de absorber los fotones presentes en los rayos solares que producen la estimulación y liberación de electrones generando una diferencia de potencial que da paso a la corriente continua la cuál es regulada mediante los controladores y convertida en corriente alterna a través de los inversores (Autosolar Colombia, s.f.) permitiendo su distribución hacia las diferentes bombas de la planta. Durante las 8 horas de operación diurna el consumo energético será cubierto directamente por la generación fotovoltaica mientras que el banco de baterías actuará como respaldo de almacenamiento energético para las 16 horas restantes, alimentando la bomba de distribución de agua potable, así como a los sistemas auxiliares de iluminación y control.

Figura 11*Diagrama de flujo de bloques (BFD) del sistema fotovoltaico*



Nota. Adaptado de Amoroso Párraga et al. (2021).

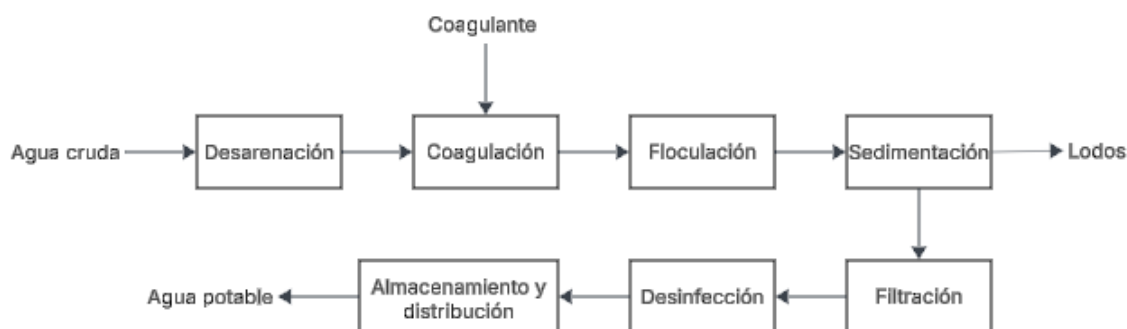
Apéndice H

Diagrama BFD del sistema de potabilización

En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo de bloques (BFD) del sistema de tratamiento de agua potable propuesto. El agua cruda ingresa inicialmente al proceso de desarenación, donde se remueven las partículas de mayor tamaño y densidad. El agua pretratada es conducida al proceso de coagulación, en el cual se realiza la dosificación del coagulante con el fin de desestabilizar las partículas coloidales presentes. Luego, el agua pasa al proceso de floculación donde el movimiento controlado del fluido a través de compartimientos sucesivos permite la formación y crecimiento de flóculos sin requerir sistemas mecánicos de agitación. La corriente de salida de esta unidad se dirige al proceso de sedimentación, donde los flóculos formados se separan por acción de la gravedad, generándose una corriente de lodos como subproducto del proceso. El agua clarificada es conducida al proceso de filtración, donde se retienen las partículas en suspensión que no fueron removidas previamente. Posteriormente, el agua filtrada ingresa al proceso de desinfección, destinado a asegurar la inactivación de microorganismos antes de su almacenamiento. Finalmente, el agua tratada es enviada a la etapa de almacenamiento y distribución para el suministro a la población como agua potable apta para consumo humano.

Figura 12

Diagrama de flujo de bloques (BFD) del proceso de potabilización de agua



Apéndice I

Balance de masa

Para el análisis del sistema de potabilización se realizó un balance de materia considerando únicamente el componente agua, debido a que no se disponía de información suficiente sobre la concentración de sólidos en las diferentes corrientes del proceso ni sobre otros parámetros necesarios para efectuar un balance de sólidos. A partir de este balance fue posible determinar el caudal de agua correspondiente a cada una de las corrientes del sistema.

El cálculo se inició a partir del caudal objetivo, correspondiente al caudal máximo diario de diseño, el cual tiene un valor de $58.56 \frac{m^3}{día}$ en la etapa de almacenamiento y distribución. A partir de este valor se realizó el balance de materia en sentido inverso al flujo del proceso.

En las etapas de almacenamiento y desinfección se asumió que no existen pérdidas de agua, por lo que el caudal se mantiene constante entre las corrientes asociadas:

$$F^{32} = F^{31} = F^{22} = F^{21} = F^{20} \quad (Ec.4)$$

En la etapa de filtración, por el contrario, se consideran pérdidas de agua asociadas al proceso de retrolavado del filtro. Estas pérdidas normalmente se encuentran en un rango entre 2%

y 5% del caudal tratado (Pall Corporation, 2009). El retrolavado se realiza aproximadamente cada 36 horas durante un tiempo de 10 minutos (Lozano y Lozano, 2015).

Para calcular el caudal utilizado en el retrolavado se consideró el área superficial del filtro, de 0.45 m^2 , y la velocidad ascensional del agua, equivalente a $36.67 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Este valor corresponde al recomendado para lechos filtrantes de arena, con el fin de garantizar una expansión adecuada del medio filtrante y evitar un lavado insuficiente (Veolia Water Technologies, s.f.).

El caudal de retrolavado se determinó de la siguiente forma:

$$F^{17} = 36.67 \frac{\text{m}^3}{\text{h} * \text{m}^2} * 0.45 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec.5})$$

$$F^{17} = 16.5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{Ec.6})$$

Considerando que el tiempo de operación del retrolavado es de 10 minutos, este valor corresponde a un volumen aproximado de:

$$F^{17} = 2.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (\text{Ec.7})$$

El caudal asociado a las corrientes del proceso de lavado es el mismo, por lo que:

$$F^{17} = F^{18} = F^{19} \quad (\text{Ec.8})$$

Para determinar el caudal de entrada al filtro, se sumó el caudal de salida hacia la etapa de desinfección y las pérdidas de agua generadas por el retrolavado:

$$F^{14} = F^{17} + F^{20} \quad (\text{Ec.9})$$

$$F^{14} = 2.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 58.56 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad (\text{Ec.10})$$

$$F^{14} = 61.31 \frac{m^3}{día} = 2.13 \frac{L}{s} \quad (Ec.11)$$

Con este valor se calculó el porcentaje de pérdidas de agua en el proceso de filtración

$$\% \text{ perdidas} = \frac{2.75}{58.56} * 100 \quad (Ec.12)$$

$$\% \text{ perdidas} = 4.7\% \quad (Ec.13)$$

Este resultado se encuentra dentro del rango recomendado de 2–5 %, por lo que el valor obtenido se considera adecuado.

Con el caudal calculado para el retrolavado también se determinó el volumen requerido para el tanque de almacenamiento de agua de lavado, considerando un factor de seguridad del 20%. De esta manera se obtuvo un volumen aproximado de 3.3 m³. Sin embargo, dado que este volumen no corresponde a un tamaño comercial estándar, se seleccionó un tanque de 4 m³.

Posteriormente se determinó el caudal correspondiente a la etapa de sedimentación. En esta unidad se consideran pérdidas de agua asociadas a la extracción de lodos, las cuales generalmente se encuentran entre 1% y 2% del caudal tratado. Para este caso se asumió un valor intermedio de 1.5 %.

El caudal de salida del sedimentador es igual al caudal de entrada al filtro, es decir:

$$F^{14} = F^{13} \quad (Ec.14)$$

Las pérdidas de agua que se van con la corriente de lodos se calcularon como:

$$F^{10} = 61.31 \frac{m^3}{día} * 0.015 \quad (Ec.15)$$

$$F^{10} = 0.92 \frac{m^3}{día} \quad (Ec.16)$$

El caudal de entrada al sedimentador, correspondiente a la corriente 9, se obtuvo sumando el caudal de salida y las pérdidas asociadas a los lodos:

$$F^9 = F^{14} + F^{10} \quad (\text{Ec.17})$$

$$F^9 = 61.31 \frac{m^3}{\text{día}} + 0.92 \frac{m^3}{\text{día}} \quad (\text{Ec.18})$$

$$F^9 = 62.23 \frac{m^3}{\text{día}} = 2.16 \frac{L}{s} \quad (\text{Ec.19})$$

Finalmente, dado que en los procesos de desarenación, coagulación y floculación no se consideran pérdidas de agua significativas, este mismo caudal se mantiene desde la entrada de pretratamiento, hasta la entrada al sedimentador.

Tabla 35

Especificaciones de las corrientes del proceso de potabilización

Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Caudal Agua [m ³ /día]	62.23	-	62.23	-	-	-	62.23	-	62.23	0.92	0.92
Presión manométrica [atm]	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0	1
Temperatura agua [°C]	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Longitud [m]	-	2	7.8	3	2	2	5.2	2	7.8	3	10
Diámetro nominal [In]	2	1 1/2	2	2	2	1 1/2	2	1 1/2	2	2	2
Corrientes	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Caudal [m ³ /día]	-	61.31	61.31	2.75	61.31	2.75	2.75	2.75	58.56	58.56	58.56
Presión manométrica [atm]	0	0	0.6	0.6	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3
Temperatura agua [°C]	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Longitud [m]	2	4	12	3	2	6	6	4	10.4	39	1
Diámetro nominal [In]	1 1/2	2	2	1 1/2	2	2	2	2	2	2	2
Corrientes	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Caudal [m ³ /día]	58.56	-	58.56	58.56	-	58.56	58.56	-	58.56	58.56	
Presión manométrica [atm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5	
Temperatura agua [°C]	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
Longitud [m]	2	5	2	2	2	5	2	2	10	32.5	

Diámetro nominal [In]	2	1 1/2	2	2	1 1/2	2	2	1 1/2	2	2
------------------------------	---	-------	---	---	-------	---	---	-------	---	---

Nota. El material seleccionado para las tuberías dentro del sistema de tratamiento es PVC, mientras que para la red de distribución se utiliza PEAD, debido a su mayor resistencia y durabilidad.

Apéndice J

Análisis Financiero

Tabla 36

Factores porcentuales de los valores de inversión de capital fijo

Componente	Rango %
Instalación	6-14
Tuberías	3-20
Terreno	1-2
Mejoras del terreno	2-5
Instalaciones eléctricas	2-10
Ingeniería y supervisión	4-21
Gastos de construcción	4-16
Honorarios de contratistas	2-6
Contingencia	5-15

Nota. Adaptado de Plant Design and Economics for Chemical Engineers (Peters y Timmerhaus, 1991, p. 167).

Tabla 37

Costo materia prima anual

Compuesto	Flujo kg/día	Precio/kg	Flujo kg/año	Precio anual
PAC	6.223	\$3,800	2,178	\$8,276,590

Nota. Esta tabla presenta el costo anual del coagulante PAC, el cuál fue calculado considerando 350 días de operación al año. Esta suposición tiene en cuenta que el sistema de potabilización requerirá paradas programadas para mantenimiento y limpieza, durante las cuales no se realizará tratamiento de agua. Sin embargo, la continuidad del servicio no se verá afectada, ya que el sistema de almacenamiento esta dimensionado para proveer tres días de autonomía.

Tabla 38*Costos mano de obra anual*

Profesión	Cantidad	Salario	Prestaciones sociales	Total
Ingeniero	1	\$2,500,000	\$1,250,000	\$3,750,000
Tecnólogo	1	\$1,750,905	\$875,452	\$2,626,357
Técnico	1	\$1,750,905	\$875,452	\$2,626,357
Total al mes				\$9,002,715
Total al año				\$108,032,580

Nota. Para el cálculo del costo de mano de obra se consideró un factor prestacional del 50% sobre el salario base, el cual contempla aportes a seguridad social (salud, pensión y riesgos laborales), prestaciones sociales y contribuciones parafiscales.

Tabla 39*Costos de inversión (CAPEX)*

Costos directos (CD)	Precio
Instalaciones eléctricas	\$14,399,224
Tubería	\$21,598,836
Terreno	\$146,000,000
Mejoras del terreno	\$7,199,612
Equipos	\$359,980,608
Costos indirectos (CI)	Precio
Ingeniería y supervisión	\$32,398,254
Construcción	\$43,197,672
Contratistas	\$7,199,612
Contingencia	\$25,198,642
CAPEX	Precio
Capital fijo (CD+CI)	\$657,172,463
Capital de trabajo	\$ 65,717,246
Puesta en marcha	\$ 13,143,449
TOTAL CAPEX	\$736,033,159

Nota. Esta tabla muestra los costos asociados a los costos directos, costos indirectos, capital de trabajo y puesta en marcha de la planta.

Tabla 40*Costos de operación (OPEX)*

Gastos variables	Precio
Materia prima	\$8,276,590
Tratamiento de lodos	\$18,097,534
Mano de obra	\$108,032,580
Mantenimiento y reparación	\$3,943,034
Costos generales	Precio
Administración	\$5,914,552
OPEX	Precio
Gastos variables	\$138,349,559
Costos generales	\$5,914,552
TOTAL OPEX	\$144,264,291

Nota. Esta tabla muestra los costos asociados a los gastos variables y costos generales anuales.

Tabla 41*Flujo de caja*

Año	Ingresos	Egresos	EBITDA	Depreciación	EBIT	Impuestos	Flujo de Caja
0							-\$736,033,159
1	\$325,440,000	\$144,264,291	\$181,175,708	\$34,168,847	\$147,006,861	\$51,452,401	\$129,723,307
2	\$344,966,400	\$158,855,115	\$186,111,284	\$34,168,847	\$151,942,437	\$53,179,853	\$132,931,431
3	\$365,664,384	\$170,111,145	\$195,553,238	\$34,867,847	\$161,383,391	\$56,484,536	\$139,068,701
4	\$387,604,247	\$182,278,626	\$205,325,620	\$6,312,211	\$199,013,408	\$69,654,693	\$135,670,927
5	\$410,860,501	\$195,432,075	\$215,428,426	\$6,312,211	\$209,116,214	\$73,190,675	\$142,237,927
6	\$435,512,131	\$209,652,148	\$225,859,983	\$6,312,211	\$219,547,771	\$76,841,719	\$149,018,263
7	\$461,642,859	\$225,026,146	\$236,616,713	\$6,312,211	\$230,304,501	\$80,606,575	\$156,010,137
8	\$489,341,431	\$241,648,564	\$247,692,866	\$6,312,211	\$241,380,655	\$84,483,229	\$163,209,637
9	\$518,701,917	\$259,621,690	\$259,080,226	\$6,312,211	\$252,768,014	\$88,468,805	\$170,611,421
10	\$549,824,032	\$279,056,249	\$270,767,782	\$6,312,211	\$264,455,570	\$92,559,449	\$178,208,332
11	\$582,813,474	\$300,072,103	\$282,741,370	\$6,312,211	\$276,429,158	\$96,750,205	\$185,991,165
12	\$617,782,282	\$322,799,008	\$294,983,274	\$6,312,211	\$288,671,062	\$101,034,871	\$193,948,402
13	\$654,849,219	\$347,377,435	\$307,471,783	\$6,312,211	\$301,159,572	\$105,405,850	\$202,065,933
14	\$694,140,172	\$373,959,461	\$320,180,711	\$6,312,211	\$313,868,499	\$109,853,974	\$210,326,736
15	\$735,788,583	\$402,709,727	\$333,078,855	\$6,312,211	\$326,766,643	\$114,368,325	\$218,710,530
16	\$779,935,898	\$433,806,488	\$346,129,410	\$6,312,211	\$339,817,198	\$118,936,019	\$227,193,390
17	\$826,732,052	\$467,442,737	\$359,289,315	\$6,312,211	\$352,977,103	\$123,541,986	\$235,747,329
18	\$876,335,975	\$503,827,432	\$372,508,542	\$6,312,211	\$366,196,331	\$128,168,715	\$244,339,827
19	\$928,916,133	\$543,186,824	\$385,729,309	\$6,312,211	\$379,417,097	\$132,795,984	\$252,933,325
20	\$984,651,101	\$585,765,889	\$398,885,212	\$6,312,211	\$392,573,000	\$137,400,550	\$261,484,662